

---

**TABLE DES MATIÈRES**

REMERCIEMENTS .....	i
Table des matières .....	iii
LISTE DES ABREVIATIONS .....	vi
NOMENCLATURES .....	vii
LISTES DES FIGURES .....	ix
LISTE DES TABLEAUX.....	xiii
AVANT PROPOS .....	xiv
INTRODUCTION .....	1
LE CHAMP MAGNÉTIQUE : ORIGINES ET APPLICATIONS. ....	5
1. L'histoire du champ magnétique .....	6
2. Le Champ magnétique artificiel.....	8
2.1 Leurs origines.....	8
2.2 Les applications et leurs conséquences.....	10
3. Le Champ magnétique naturel .....	13
3.1 Leurs origines et ses éléments.....	13
3.2 Les applications .....	16
4. Les capteurs du Champ magnétique .....	17
4.1 Historiques des mesures magnétiques.....	17
4.2 Principes des premiers capteurs.....	19
MESURES ABSOLUES DU CHAMP MAGNETIQUE TERRESTRE .....	21
1. Mesures de l'Intensité.....	22
2 Mesures des angles : déclinaison et inclinaison.....	24
2.1 Mesure de la déclinaison.....	26

---

2.2 Mesure de l'Inclinaison .....	29
3. Méthode des résidus.....	30
<b>MESURES DES COMPOSANTES DU CHAMP MAGNETIQUE : CAPTEUR</b>	
<b>TRIFLUXGATE .....</b>	<b>33</b>
1. Principes de mesures avec le capteur trifluxgate .....	34
1.1 Mesure de l'intensité totale.....	34
1.2. Mesures des composantes horizontales et verticales .....	35
1.3 Calcul des angles .....	37
2. La sonde fluxgate .....	39
2.1 Transformateur non linéaire .....	39
2.2 Principe de la sonde fluxgate.....	41
3. Structure de base d'un capteur fluxgate .....	45
3.1 Sensibilité des sondes fluxgates .....	45
3.2 Electronique des sondes .....	46
<b>RÉALISATION D'UN CAPTEUR TRIFLUXGATE .....</b>	<b>50</b>
1. Structure des sondes.....	51
1.1 Bobine d'excitation.....	52
1.2 Bobine de détection et de compensation.....	52
2. Les composants de base du capteur trifluxgate.....	53
2.1 Oscillateur à quartz .....	53
2.2 Diviseur de fréquence .....	54
2.3 Diviseur de tension .....	57
2.4 Compensateur de tension .....	59
2.5 Carte arduino.....	61
3. Electronique associée aux sondes fluxgates .....	63
3.1 Générateur d'excitation du noyau de la sonde .....	63
3.2 Générateur de signaux de référence de phase .....	66
3.3 Amplificateur d'erreur .....	67
3.4 Générateur de courant de compensation.....	73
4. Traitement des signaux et des données .....	74
4.2 Dispositif d'affichage.....	76
<b>ESSAIS DE MESURES ET D'ANALYSES DES RÉSULTATS .....</b>	<b>79</b>

1. Sensibilité et calibre des sondes : déterminations expérimentales.....	79
1.1 Etude de la sensibilité des sondes .....	79
1.2 Etalonnage des sondes .....	81
1.3 Calibration des sondes .....	84
2. Observations oscilloscopiques des sorties des sondes .....	87
2.1 Visualisation des signaux mesurés.....	87
2.2 Analyse comparative des observations.....	90
3 Traitement des signaux simulés .....	92
3.1 Chronogramme et spectre du signal d'excitation.....	92
3.2 Chronogramme et spectre du signal de détection .....	93
3.4 Chronogramme et spectre du signal de sortie de l'amplificateur d'erreur.....	95
CONCLUSION.....	97
REFERENCES .....	101
PRESENTATION DES ARTICLES ET COMMUNICATIONS .....	105
ANNEXE 1 .....	121
ANNEXE 2 .....	123
ANNEXE 3 .....	126

---

## LISTE DES ABREVIATIONS

IME : Institut pour la Maitrise de l'Energie

IOGA : Institut et Observatoire Géophysique d'Antananarivo

INRS : 'Institut National de Recherche Scientifique

RMN : Résonance Magnétique Nucléaire

IRM : Imagerie par Résonance Magnétique

ICNIRP : Commission Internationale pour la Protection contre les Rayonnements Non Ionisants

VDA : Valeurs pouvant déclencher une action

AIGA : Association Internationale de Géomagnétisme et d'Aéronomie

GPS : Global Position Système

CGS : Centimètre Gramme Seconde

URSS : Union de la République Socialiste Soviétique

ASIC: Application Specific Integrated Circuits)

AOP : Amplificateur Opérationnel

PWM : Pulls Width Modulation (Modulation de largeur d'impulsion)

PC: Personnel Computer

HCMOS: High Complementary metal–oxide–semiconductor

TTL: Transistor–transistor logic

LED: light-emitting diode

MOSFET: Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor

IJPERA: International Journal of Precious Engineering Research and Applications

RE: Resistance d'entrée

RS: Resistance Parasite

SPST: Single Pole Single Throw toggle switch

SPDT: Single Pole Double Throw toggle switch

CGS: centimètre-gramme-seconde

AJA: Andrianaivoarivelo Jaolalaina Arisoa

## NOMENCLATURES

Nom de variable	Définition	Grandeur Physique
B	Champ magnétique	Tesla
I	Inclinaison Magnétique	
I	Intensité du courant	Ampère
D	Ecart angulaire	
D	Déclinaison Magnétique	
F	Intensité totale	
F	Intensité totale du champ magnétique	<b>Tesla</b>
F	fréquence de précession	
$F_C$	Intensité Totale	
L	Lecture Azimutale	
P	moment cinétique du proton	$\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$
R	Résidu	Nanotesla
S	section efficace du noyau	Mètre
M	Moment magnétique du proton	(N·m/T)
N	Nombre des spires	
N	Nombre de spires de la bobine de détection	
H	intensité du champ résultant vu par la bobine	Tesla
H	Composante Horizontale	Nanotesla
X	Composante Magnétique	Nanotesla
Y	Composante Magnétique	Nanotesla
Z	Composante Magnétique	Nanotesla
T	Composante Magnétique	Nanotesla
CH	Affichage du courant de compensation	Nanotesla
$r_i$	Angle de la sonde	Radian
$dH_s$	Champ mesuré par le sonde	
$B_e$	Champ d'excitation	
$B_0$	Champ magnétique externe	
$H_0$	Intensité du champ superposé	

<b>Nom de variable</b>	<b>Définition</b>	<b>Grandeur Physique</b>
$W$	<i>Pulsation</i>	<i>rd/s</i>
$K$	<i>Facteur géométrique des bobines</i>	
$H_0$	<i>Champ a mesuré</i>	
$H_C$	<i>Champ de composante</i>	
$V_S$	<i>Tension pour fournir l'intensité</i>	<i>Volt</i>
$V_E$	<i>Tension de référence</i>	<i>Volt</i>
$X_S$	Champ magnétique	
$Y_S$	Champ magnétique	
$Z_S$	Champ magnétique	
$\vec{J}$	densité du courant	$A/cm^2$
$\mu$	Perméabilité	
$\mu_0$	Perméabilité à vide	$Kg.m.A^{-2}s^{-2}$
A	Erreur de site	
B	Erreur d'Azumite	
$E_s$	vecteur unitaire de l'axe de la bobine	
$D_s$	Elément de surface	$Cm^2$

---

**LISTES DES FIGURES**

Figure 1.1 :	Le champ magnétique terrestre assimilé à un champ d'un dipôle magnétique (en première approximation).	07
Figure 1.2 :	Les éléments du champ magnétique terrestre	16
Figure 2.1 :	Représentation du mouvement de précession des protons	23
Figure 2.2 :	Théodolite amagnétique muni de sa sonde fluxgate, utilisé pour les mesures des angles	25
Figure 2.3 :	Fiche de mesures absolues de l'IOGA du 06 Novembre 1998.	28
Figure 3.1 :	Transformateur non linéaire	40
Figure 3.2 :	Signal de sortie de la bobine de détection	42
Figure 3.3 :	Les différents signaux observés dans les bobines de la sonde.	45
Figure 3.4 :	Diagramme de traitement électronique de données issues des sondes	49
Figure 4.1 :	Schéma synoptique du capteur trifluxgate	51
Figure 4.2 :	Enroulements des bobines d'excitation et de mesure.	52
Figure 4.3 :	Synoptique d'un oscillateur intégré dans un ASIC	56
Figure 4.4 :	Diviseur de fréquence à base de NE555	57

---

Figure 4.5 :	Diviseur de tension	60
Figure 4.6 :	Résultats d'une expérience de laboratoire.	60
Figure 4.7 :	Amplificateur opérationnel monté en boucle ouverte	62
Figure 4.8 :	Amplificateur opérationnel fonctionnant en comparateur de tension	63
Figure 4.9 :	La carte arduino	64
Figure 4.10 :	Générateur des signaux d'excitation des sondes	67
Figure 4.11 :	Schéma complet pour la synchronisation et l'excitation	67
Figure 4.12 :	Oscillateur astable	68
Figure 4.13 :	Génération des signaux 1 kHz et 3kHz	69
Figure 4.14 :	Amplification du signal 1kHz et 3kHz	70
Figure 4.15 :	Schéma complet de la démodulation	71
Figure 4.16 :	Phase Shifter	73
Figure 4.17 :	Correction de phase et suppression du CC	73
Figure 4.18 :	Circuits de commutation analogique	74
Figure 4.19 :	Entrée et sortie du commutateur analogique. Découpage du signal	75

---

	de détection $2f$	75
Figure 4.20 :	Amplificateur différentiel et filtre passe-bas du second ordre.	76
Figure 4.21 :	Carte de la référence tension	77
Figure 4.22 :	Générateur de courant	78
Figure 4.23 :	Indicateur visuel de l'affichage	80
Figure 4.24 :	Mise en forme des signaux destinés à l'affichage	81
Figure 4.25 :	Circuit graphique à barre LED	81
Figure 5.1 :	Tension harmonique d'ordre 2 (3kHz) de la bobine de détection en fonction du champ magnétique extérieur.	84
Figure 5.2 :	Décalage magnétique BOFFSET du capteur fluxgate en fonction du courant d'excitation $I_e$ à 1,5 kHz.	85
Figure 5.3 :	Chronogramme du signal d'excitation	86
Figure 5.4 :	Signal issue du détecteur synchrone.	87
Figure 5.5 :	Chronogrammes des harmoniques 1 et 2 pour $H_{max} < H_s$	90
Figure 5.6 :	Chronogramme des signaux des harmoniques 1 et 2 pour $H_{max} > H_s$	91

---

Figure 5.7 :	Intensités des composantes X, Y et Z mesurées	92
Figure 5.8 :	Schéma synoptique de redressement	93
Figure 5.9 :	Version améliorée de listing de Dr. VANDAELE pour l'affichage des signaux sur l'oscilloscope du logiciel Proteus	94
Figure 5.10 :	Chronogramme et spectre du signal d'excitation	93
Figure 5.11 :	Chronogramme et spectre du signal de détection	99
Figure 5.12 :	Chronogramme et spectre du signal démodulé	100
Figure 5.13 :	Allures du chronogramme et du spectre du signal de sortie de l'amplificateur d'erreur	101

**LISTE DES TABLEAUX**

Tableau 1.1 :	Ordre de grandeur du champ magnétique généré par l'environnement public	12
Tableau 4.1 :	Exemples et illustration d'un signal divisé en fréquence.	58
Tableau 5.1 :	Tensions vues par les sondes après traitement	87
Tableau 5.2 :	Mesures du champ magnétique effectuées à Fihaonana le 10 Novembre 2017	95
Tableau 5.4 :	Comparaison des données du capteur trifluxgate avec celles fournies par l'Observatoire	99

## AVANT PROPOS

Cette thèse a été réalisée au sein du Laboratoire Thermodynamique Thermique et Combustion de la Mention Physique et applications et de l'Institut pour la Maitrise de l'Energie sous la co-direction du Professeur Ranaivo-Nomenjanahary Flavien et du Professeur RAKOTOMALALA Minoson. Nous nous sommes intéressé au champ magnétique du fait de son importance dans le domaine industriel et par conséquent dans le développement économique. Pour créer du champ magnétique il suffit d'injecter du courant électrique dans un courant filiforme. Mais notre travail ne concerne pas ces champs magnétiques que l'on peut créer artificiellement. Les études qui vont suivre concernent le champ magnétique naturel terrestre car beaucoup d'applications scientifiques nécessitent la connaissance des caractéristiques et informations sur ce champ magnétique. C'est la raison pour laquelle nous avons jugé opportun de concevoir et de réaliser un instrument de mesure de ce champ. Notre travail a été même en collaboration avec deux laboratoires de l'Institut et Observatoire Géophysique d'Antananarivo .Le laboratoire de Géomagnétisme et d'Electromagnétisme a manifesté son intérêt étant donné qu'il est chargé d'acquérir les informations sur les champs magnétique terrestre et que de tel instrument est de grande utilité dans la réalisation de leur mission. Le laboratoire d'Instrumentation Géophysique nous a aidé à comprendre les relations entre les phénomènes observés et les grandeurs physiques mesurables associées. Ce qui est dit dans cette thèse n'est qu'un début de l'exploration de ce phénomène physique par notre appareil TRIFLUXGATE comme la saturation des noyaux magnétiques pour la mesure de cette grandeur. D'autres études doivent être effectuées plus tard pour approfondir les résultats que l'on peut tirer de cet appareil.

## INTRODUCTION

Au même titre que l'air que nous respirons, les champs électriques et les champs magnétiques font partie intégrante de notre environnement naturel, liés à leurs importances industrielles et domestiques. Classés parmi les rayonnements non ionisants par l'INRS, les champs électriques et magnétiques statiques de basses fréquences sont dus aux appareils industriels, appareils domestiques électriques, aux ordinateurs,... Les installations de diffusions radiophoniques et télévisées, les stations de base de téléphones mobiles sont à l'origine des champs de hautes fréquences. Ces champs artificiels recouvrent ainsi quatre domaines : domestique, environnemental, médical et industriel. La Terre possède également des champs tellurique et magnétique naturels, actifs en permanence. Ces champs naturels sont dus essentiellement à la présence de roches aimantées dans la croûte terrestre, au mouvement du noyau fluide et aux phénomènes d'induction des champs magnétiques des autres astres dans les milieux conducteurs de la Terre.

Le champ électrique résulte de la présence d'une tension électrique : il existe dès qu'un appareil est branché, et sans qu'il soit nécessairement en fonctionnement. Plus la tension est élevée, plus le champ électrique est intense. Les matériaux constituant les murs ou les métaux sont susceptibles de l'arrêter. Le champ magnétique existe dès qu'un courant électrique circule pour faire fonctionner un appareil. Son intensité varie selon la consommation d'électricité : plus celle-ci est forte, plus le champ magnétique est élevé. Contrairement au champ électrique, les matériaux courants ne suffisent pas pour l'arrêter.

La combinaison des champs électrique et magnétique donne le champ électromagnétique. Ce dernier peut se propager à la fois dans le vide et dans la matière. Les nouvelles technologies créent également des champs électromagnétiques artificiels auxquels nous sommes constamment soumis. Sous forme de tensions, d'intensités de courant ou d'ondes, ces champs transportent avec eux une certaine énergie qui pourrait avoir une influence sur l'homme, sur les êtres vivants et sur les équipements. Invisibles à l'œil nu, imperceptibles par nos sens, ces champs suscitent actuellement de plus en plus d'interrogations et de méfiances. L'expansion récente des technologies sans-fil (téléphones mobiles, Wifi, antennes-relais...) contribue à soulever l'hypothèse d'un risque pour l'humanité et ses environnements. La connaissance de leurs caractéristiques est nécessaire pour accompagner les entreprises dans leurs démarches de sensibilisation, de prévention et de protection des infrastructures et des salariés.

Du point de vue théorique, ces champs vectoriels sont parfaitement connus et maîtrisés. Quoiqu'ils soient fortement couplés, nous nous sommes intéressés uniquement au champ magnétique, en particulier à celui produit par la Terre. Ainsi, les caractéristiques statiques du champ magnétique sont obtenues à partir de la loi de Biot et Savart, connaissant la géométrie des sources. Par contre, les comportements dynamiques du champ alternatif sont régis par les équations de Maxwell. Les Recherches et investigations scientifiques se font généralement en utilisant des systèmes de coordonnées cartésiennes. Dans la pratique, ces informations sont précisées à partir des mesures absolues d'intensités et d'angles et des mesures relatives des composantes de ces champs. Les systèmes de coordonnées sphériques sont bien adaptés aux mesures absolues, tandis que les enregistrements des variations des composantes sont effectués dans des systèmes de coordonnées cylindriques. A l'Institut et Observatoire Géophysique d'Antananarivo (IOGA), les mesures absolues de l'intensité se font, en général, à l'aide d'un magnétomètre à proton Geometrics ou Scintrex, celles des angles à l'aide d'un théodolite à aimant suspendu, type Chasselon ou d'un théodolite 010B muni d'une sonde fluxgate.

### **Les objectifs de la Thèse**

Pour obtenir les caractéristiques du champ, les mesures absolues nécessitent l'utilisation simultanée de deux instruments sur un même point de mesure et à un instant bien précis : mesures d'intensité et d'angles. Ce qui est difficile à réaliser sans une méthodologie appropriée ou une technique bien adaptée et des hypothèses a priori. Pour pallier à ces problèmes et mettre à profit les acquis d'une sonde fluxgate, cette thèse a pour objectif d'étudier et de réaliser un capteur triaxial à vanne de flux, dénommé « capteur trifluxgate », capable de prendre en compte toutes les informations à partir d'acquisitions simultanées en une station des trois composantes du champ. Elle constitue une généralisation de notre première tentative dont les résultats majeurs sont publiés dans la revue « International Journal of Precious Engineering Research and Applications (IJPERA, 2016, vol 20, issu 60). Dans cet article, le noyau de la sonde est torique de perméabilité magnétique constante  $\mu_0$  égale à celle du vide. La sonde ne peut détecter que la composante dans une direction donnée. La mesure est directe, aucune compensation n'est effectuée sur les composantes à mesurer. Pour déterminer complètement les caractéristiques du champ magnétique, nous sommes obligés d'effectuer au moins trois orientations de la sonde.

Dans cette thèse, nous avons pris l'exemple du champ magnétique terrestre. L'originalité de la thèse réside dans :

- l'amélioration des précisions des mesures en considérant des noyaux cylindriques de perméabilité magnétique  $\mu$  dépendant du champ appliqué,
- la résolution du problème lié à la détermination simultanée des caractéristiques du champ magnétique par l'utilisation de plusieurs sondes,
- l'adaptation des techniques utilisées pour les mesures des angles aux intensités en créant un environnement magnétique favorable au fonctionnement des sondes fluxgates.

### **Structure du manuscrit**

Ainsi, ce manuscrit est divisé en cinq chapitres. Après avoir tracé l'histoire du champ magnétique et ses origines, le premier chapitre décrit les applications et les importances industrielles et naturelles du champ magnétique. Ce chapitre s'intéresse également à la décomposition du champ magnétique terrestre en ses éléments dans des systèmes de coordonnées sphérique, cylindrique et cartésien.

Le second chapitre donne une description des principes de mesures du champ magnétique. Les mesures absolues de l'intensité exploitent le mouvement de précession des protons, tandis que celles des angles utilisent les techniques à base de sondes à saturation ou sondes fluxgates. Pour les angles, deux méthodes de mesures ont été rappelées dans ce chapitre, la « méthode dite de zéros » et, sa variante, la « méthode des résidus ». Ces méthodes découlent des principes de fonctionnement des sondes à saturation.

Le troisième chapitre introduit ensuite le capteur « trifluxgate » dont les principes de mesures sont calqués des méthodes adaptées pour la sonde fluxgate. En effet, ce chapitre tire profit de la « méthode des résidus » pour mettre en œuvre une technique permettant d'effectuer des mesures des composantes du champ. Les noyaux de la sonde sont conduits à saturation à l'aide d'un courant alternatif circulant dans la bobine d'excitation. La présence d'un champ magnétique externe à la sonde provoque une dissymétrie et induit dans la bobine de détection une tension modulée en amplitude et en phase véhiculant les informations sur l'intensité et le signe du champ magnétique superposé. Pour satisfaire les conditions de nullité du champ, il faudra compenser la partie principale du champ magnétique en générant dans la bobine de détection un courant continu proportionnelle à l'intensité de la composante à mesurer. Nous avons essayé également de remédier aux différents retournements des sondes en utilisant une géométrie simple qui consiste à placer nos sondes diamétralement opposés sur les axes d'un système orthonormé.

Le quatrième chapitre décrit les outils matériels et logiciels utilisés pour la réalisation du capteur trifluxgate. En particulier, il met en exergue les caractéristiques des sondes, les rôles des bobines d'excitation et de détection. Ce chapitre décrit également la stratégie mise en œuvre pour réaliser différents modules et dispositifs permettant d'extraire les informations véhiculées par les signaux issus des sondes, en particulier l'utilisation d'un détecteur synchrone. Ces signaux sont très complexes, malgré la simplicité de leurs supports, et leur extraction nécessite l'utilisation de composants de haute précision.

Le cinquième et dernier chapitre présente les résultats des tests effectués et les morphologies des signaux à différents niveaux pour s'assurer du bon fonctionnement des sondes, de leurs électroniques associées et des dispositifs électroniques et informatiques réalisés. Des discussions sont entreprises selon les valeurs obtenues.

## Chapitre 1

### LE CHAMP MAGNÉTIQUE : ORIGINES ET APPLICATIONS.

Une tension continue crée un champ électrique statique et un courant continu donne naissance à un champ magnétique statique. Dans ce cas, la fréquence est nulle. Les courants ou tensions alternatifs créent des champs électriques ou magnétiques périodiques : ce sont des champs alternatifs. Ces champs sont caractérisés par une amplitude et par une fréquence. L'amplitude des champs correspond à leur intensité. L'ensemble des fréquences forme le spectre électromagnétique. Celui-ci occupe une bande passante allant de 0 Hz (continu) à 10 GHz.

On distingue ainsi deux types de champs [1]:

- le champ électrique. Il résulte de la présence d'une tension électrique qui lui donne naissance dès qu'un appareil est branché, et sans qu'il soit nécessairement en fonctionnement. Son intensité s'exprime en Volt par mètre (V/m). Plus le voltage est élevé, plus le champ électrique est intense.
- le champ magnétique. Il existe dès qu'un courant électrique circule pour faire fonctionner l'appareil. Son intensité se mesure en Ampère par mètre (A/m), et l'intensité de son induction en Tesla (T). L'intensité varie selon la consommation d'électricité : plus elle est forte, plus le champ magnétique est élevé.

Quoique le champ électrique et le champ magnétique sont fortement couplés et ne peuvent pas être dissociés, nos études, analyses et synthèses sont focalisées uniquement sur les champs magnétiques artificiels et naturels. Le champ magnétique est parfaitement connu et maîtrisé, en particulier celui de la Terre. Sa découverte remonte à une époque relativement ancienne, sept siècles avant Jésus Christ.

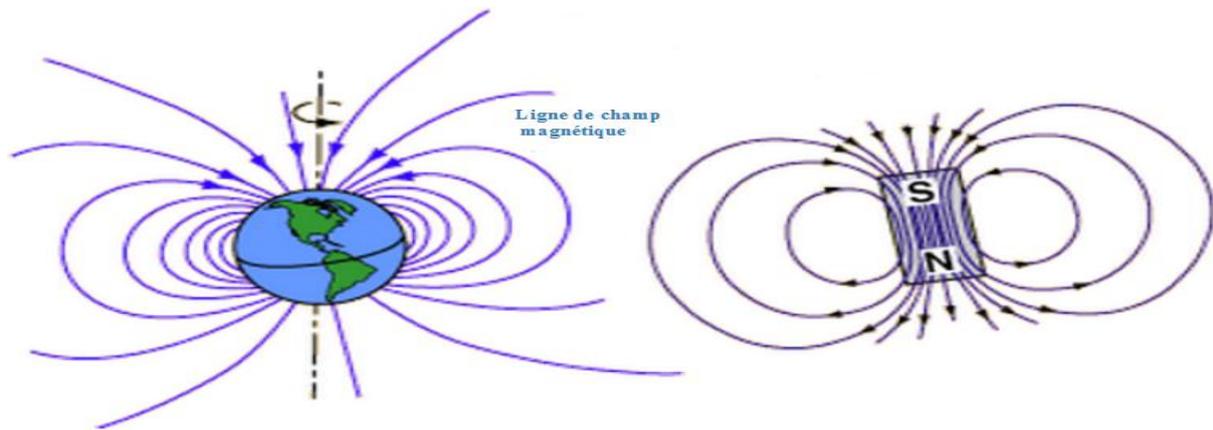
## 1. L'histoire du champ magnétique

La première découverte du magnétisme dans le monde ancien était observée dans les magnétites. Quand les gens ont remarqué que ces espèces minérales, morceaux naturellement aimantés, pourraient attirer du fer. Le mot « magnet » (aimant en français) vient du terme Grec « magnítis líthos » qui veut dire une pierre de la région de Magnésie. En Grèce ancienne, Aristote a conduit la première discussion scientifique sur le magnétisme avec le philosophe THALES de Miletus vers 625 avant Jésus-Christ [2].

Autour de la même ère, en Inde ancienne, le chirurgien indien SUSHRUTA était le premier utilisateur de l'aimant à des fins chirurgicaux [3]. En Chine ancienne, la référence littéraire ayant trait au magnétisme se trouve dans un livre du IV<sup>ème</sup> siècle avant Jésus-Christ nommé « Le Maître de la Vallée du Démon » [4]. Lüshi Chunqiu, dans l'annale du second siècle avant Jésus-Christ, a noté aussi que "Le magnétite fait venir le fer ou il l'attire" [5]. L'observation de l'attraction d'une aiguille est constatée dans le travail de Lunheng au cours du premier siècle : "Un magnétite attire une aiguille" [6]. Le scientifique Chinois Shen Kuo du XI<sup>ème</sup> siècle était la première personne qui, dans son livre intitulé les « Essais de la Piscine du Rêve », évoquait la boussole de l'aiguille aimanté. Il a amélioré l'exactitude de navigation en employant le concept astronomique du vrai nord. A partir du XII<sup>ème</sup> siècle, les Chinois étaient connus pour utiliser la boussole magnétite de la navigation. Ils ont sculpté une cuillère directionnelle de magnétite suspendue à l'aide d'un fil de coton, placée à l'avant de leur coque. Pendant la croisière, la manche de la cuillère a toujours pointé vers le sud.

En Europe, Alexander Neckam, en 1187, était la première personne à décrire la boussole et utilisation dans la navigation maritime. En 1269, Peter Peregrinus de Maricourt a écrit l'« Epistola de magnete », le premier livre existant qui décrit les propriétés de l'aimant. En 1282, les propriétés de l'aimant et de la boussole ont été discutées par Al-Ashraf, un physicien, astronome et géographe Yemenite [7]. En 1600, William Gilbert a publié son « De Magnete, Magneticisque Corporibus », et de « Magno Magnete Tellure » (Sur l'aimant et les Corps Magnétiques, et sur le Grand Aimant de la Terre). Dans son travail, il décrit plusieurs de ses expériences avec son modèle de Terre admettant que le champ magnétique terrestre est comparable au champ qu'engendrait un dipôle magnétique situé au centre de la Terre, d'intensité environ  $8 \cdot 10^{11}$  A/m<sup>2</sup> et dont

l'axe fait un angle de  $11^\circ$  par rapport à l'axe de rotation de la terre. De ses expériences, il a conclu que les boussoles indiquent la direction des lignes des champs magnétiques, c'est à dire pointé vers le nord (**Figure 1.1**).



**Figure 1.1** : Le champ magnétique terrestre assimilé à un champ d'un dipôle magnétique (en première approximation).

Une compréhension du rapport entre l'électricité et le magnétisme a commencé en 1819 par le travail de Hans Christian, professeur à l'Université de Copenhague, qui a découvert accidentellement un champ magnétique en plaçant l'aiguille d'une boussole à côté d'un fil parcouru par un courant électrique. Plusieurs autres expériences ont suivi. En 1820, André Marie Ampère a découvert que le champ magnétique circulant le long d'un contour fermé a un rapport avec le courant qui circule à travers la surface limitée par ce contour.

Carl Friedrich Gauss, Jean-Baptiste Biot et Félix Savart en 1820 ont établi la loi régissant la valeur du champ magnétique produit en un point de l'espace par un courant électrique en fonction de la distance de ce point au conducteur, c'est la loi de Biot et Savart. En 1831, Michael Faraday a montré que la variation temporelle du flux du champ magnétique à travers une boucle de fil induit un voltage. James Clerk Maxwell a expliqué dans ses équations, dites équations de Maxwell, les liens entre l'électricité, le magnétisme et l'optique à travers le champ électromagnétique.

En 1905, Einstein a utilisé les lois de l'électromagnétisme pour motiver ses théories de relativité spéciale [8]. Selon la datation d'une roche de quatre milliard d'années trouvée

en Greenland et Australie, le champ magnétique a été déjà existé dans l'histoire de la formation de la terre [9]. Il est également toujours présent dans nos quotidiens.

## 2. Le Champ magnétique artificiel

Les champs magnétiques artificiels produits par l'homme recouvrent quatre domaines :

- domestique : lignes électriques des habitations, téléphones, télévisions, micro-ondes, réseaux Wifi, plaques de cuisson à induction, alarmes, appareils électroménagers...
- environnemental : radars, lignes à haute tension, relais de téléphonie mobile, relais de radio-télédiffusion,...
- médical : appareils à Résonance Magnétique Nucléaire (RMN) ou Imagerie par Résonance Magnétique (IRM), radiologie ...
- industriel : bacs d'électrolyse, fours à induction et chauffage, fours électriques, installations de soudure électrique, ...

### 2.1 Leurs origines

L'aimant est une matière ou objet qui produit un champ magnétique. Ce champ magnétique, invisible, est responsable de la sensibilité de la plupart des propriétés de l'aimant. Un aimant attire tous les éléments ferromagnétiques. Le fer, le nickel, le cobalt et les alliages métalliques de terre rare sont naturellement aimantés.

Les magnétites appartiennent également au groupe des éléments ferromagnétiques. Les aimants permanents sont fabriqués à partir d'alliage de fer, de nickel (10 à 25%), d'aluminium (8 à 12%), en général additionné de cobalt, de titane, et de cuivre. Les ferrites sont soumis à des traitements spéciaux dans un fort champ magnétique pendant sa fabrication pour aligner leur structure microcristalline interne en les faisant un fort aimant. Un aimant est considéré comme un dipôle magnétique dont le moment est confondu à l'axe du barreau aimanté. L'aimant produit son propre champ magnétique, d'intensité proportionnelle à l'intensité du moment magnétique. Quand un aimant est placé dans un champ magnétique externe d'origines diverses, il est soumis à un mouvement de rotation pour paralléliser son moment vers une direction d'équilibre.

Un fil rectiligne traversé par un courant électrique produit des champs magnétiques circulaires. Ce fil est le centre de symétrie des champs apparus. Ce phénomène physique est déjà formalisé à l'aide d'une équation mathématique. En effet, si  $\vec{j}$

représente la densité du courant à l'intérieur du fil, le champ magnétique  $\vec{B}$  se déduit de l'équation de MAXWELL par l'équation (1.1),

$$\text{rot}\vec{B} = \mu \vec{j} \quad (1.1)$$

Cette équation conduit à exprimer le champ magnétique  $\vec{B}$  en tout point de l'espace extérieur au fil connaissant la géométrie du courant. En effet, un fil rectiligne d'épaisseur négligeable parcouru par un courant constant d'intensité  $I$ , l'intensité  $B$  du champ magnétique en un point  $P$  situé à une distance  $r$  du fil est donnée par :

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad (1.2)$$

Dans le cas d'une spire, la forme du fil est circulaire. Le champ magnétique engendré par une telle source est perpendiculaire au plan contenant sa circonférence. D'après la loi de BIOT et SAVART, l'intensité du champ créé par une spire est donnée par

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 I dS}{4\pi r^2} \vec{n} \times \vec{e}_r \quad (1.3)$$

Où  $\mu_0$  est la perméabilité de vide et  $d\vec{S}$  est l'élément de surface porté par la normale.  $\times$  désigne le produit vectoriel. Dans un solénoïde, les spires sont accolées les unes aux autres. Traversée par un courant électrique d'intensité  $I$ , chaque spire engendre un champ magnétique et la résultante de ces champs constitue le champ du solénoïde. Une bobine est un solénoïde à noyau de fer doux. Elle sert pour produire un champ magnétique véhiculant une puissance transférable. La bobine est souvent utilisée dans le régime du courant alternatif. L'application courante est le transformateur.

Un transformateur est utilisé pour convertir un courant alternatif en autre niveau de tension alternative. Il existe deux catégories de transformateur :

- les transformateurs électroniques servent à diminuer la tension 220V du secteur en une autre tension de fonctionnement nécessaire à un appareil électronique.
- les transformateurs de puissance sont utilisés dans les lignes de transport et de distribution pour élever ou diminuer la tension électrique d'un réseau.

Ces deux catégories de transformateur ont même mode de fonctionnement. La variation du flux magnétique coupé par une spire induit un courant électrique circulant le long du fil de la spire. A titre d'illustration, la rotation d'un aimant permanent près d'une bobine entraîne une variation de flux magnétique et engendre un courant alternatif à ses deux bornes. La fréquence du courant est identique à celle de la rotation de l'aimant. Un transformateur peut être considéré comme un émetteur-capteur du champ magnétique. Il ne fonctionne pas sous une tension continue. Ce phénomène de transfert du courant à l'aide du champ magnétique dans un transformateur est appliqué pour réaliser un capteur du champ magnétique.

## **2.2 Les applications et leurs conséquences**

Dans l'industrie, les applications du champ magnétique sont nombreuses. Elles ont été classées en six familles par l'Institut National de Recherche Scientifique Français (INRS):

- le champ statique : il concerne les équipements fonctionnant avec un courant électrique continu (0 Hz). Ce champ statique est présent dans des cuves d'électrolyse utilisées pour le revêtement. Il apparaît également dans des appareils à RMN ou IRM dans les laboratoires de recherche ou les hôpitaux.

- le champ de fréquence extrêmement basse (ELF – 50Hz) est observé dans les installations et appareils alimentés par les courants de la JIRAMA, SM3E, Henry Fraise (50Hz). Il facilite la production, le transport et la distribution d'électricité (lignes à haute tension, transformateurs, sous-stations électriques).

- le champ de moyennes fréquences (50Hz – 3 MHz) regroupe toutes les machines utilisant des procédés d'électrothermie par induction. On les rencontre dans la sidérurgie et la métallurgie (fusion dans des fours à creuset, traitement thermique et chauffage pour estampage...), dans l'industrie électronique (fours à induction...),

- le champ de Hautes Fréquences ou radiofréquences regroupe les machines utilisant l'électrothermie par effet diélectrique, avec des fréquences allant de 3 MHz à 3 GHz. Un exemple d'illustration est celui des lecteurs optiques...

- dans la gamme du champ d'hyper-fréquence ou micro-onde, le chauffage par micro-ondes s'obtient par l'émission d'un champ électromagnétique d'une fréquence de 2,45 GHz. Les fours industriels à micro-ondes sont utilisés dans la plupart des industries. Les secteurs concernés sont : agroalimentaire et industrie du caoutchouc (vulcanisation), dépose de films organiques sur les métaux, spectrométrie...

- Champs de Télécommunications. Tous les moyens de télécommunication sont concernés par cette famille : émissions de radiodiffusion, de télédiffusion, téléphonie mobile, radiobalises, télémétrie, transmissions satellitaires, radars civils ou militaires...

En 1998, la Commission Internationale pour la Protection contre les Rayonnements Non Ionisants (ICNIRP) a publié des recommandations, applicables à toute la population, pour limiter l'exposition aux champs électromagnétiques de 0 à 300 GHz. Dans une recommandation éditée en 1999, le Conseil européen a retenu l'ensemble des valeurs préconisées par l'ICNIRP, également pour toute la population. Elle donne des niveaux de référence mesurables dans les zones où l'exposition est significative. Par exemple à 50 Hz : 5 000 V/m pour le champ électrique, 100 m T pour le champ magnétique et 2mA/m<sup>2</sup> pour la densité de courant induit. Dans la vie courante, les champs rencontrés sont très inférieurs à ces valeurs (tableau 1.1)

**Tableau 1.1** : Ordre de grandeur du champ magnétique généré par l'environnement public

Appareils	réfrigérateur	Chaîne Stéréo	Lignes HT 90kV	Lignes HT 400kV	PC Ordinateur	Téléviseur	Rasoir Electrique
B en (mT)	0,30	1,00	1,00	1,20	1,40	2,00	500,00

Il s'agit de valeurs maximales mesurées à 30 cm, sauf pour les appareils qui impliquent une situation rapprochée. Il n'existe pas encore de réglementation malgache spécifique concernant l'exposition des travailleurs aux champs magnétiques : la référence ci-dessus est calquée de la directive européenne 2004/40/CE. Selon cette directive, pour un

appareillage fonctionnant à 50 Hz (soit 0,05 kHz), l'intensité du champ magnétique ne devra pas dépasser 400 A/m ou 500 mT.

Pour un appareillage fonctionnant à 400 MHz, l'intensité du champ magnétique ne devra pas dépasser 0,16 mT. Nous constatons que la fréquence a une très grande importance sur les valeurs pouvant déclencher une action (VDA) : plus elle est élevée, plus elle a d'impact sur la VDA. Dans l'état des connaissances actuelles, le respect des limites d'exposition en vigueur garantit la protection des salariés contre les effets à court terme des champs magnétiques.

Dans la vie courante, l'intensité des champs magnétiques de basses fréquences ou radiofréquences est très inférieure aux niveaux de référence relatifs à la protection de la population et ne présente pas de risque avéré pour la santé. Dans les lieux où les sources d'exposition sont élevées, l'accès est sécurisé et généralement interdit à la population.

Dans le milieu industriel, certains secteurs sont plus susceptibles d'exposer aux champs magnétiques, comme les installations industrielles mettant en œuvre de forts courants ou tensions électriques : la production d'énergie électrique, son transport et sa distribution, la sidérurgie et la métallurgie, l'industrie électronique, ou encore, tout secteur utilisant des installations électriques puissantes. Si aujourd'hui, la plupart des machines respectent la réglementation en vigueur, l'arrivée sur le marché de nouvelles technologies et l'évolution de la réglementation imposent aux entreprises de rester vigilantes.

Nous venons de voir que le champ magnétique ait un caractère industriel car on peut l'utiliser et le fabriquer dans une industrie. Plus précisément, on peut créer un champ magnétique en injectant un courant électrique dans un circuit filiforme, dans un moteur ou dans une machine électrique. Mais dans ce travail, nous ne parlerons pas de ce champ magnétique créé industriellement mais du champ magnétique terrestre observé près de la Terre.

### **3. Le Champ magnétique naturel**

Le champ magnétique terrestre est un phénomène naturel discret. Les preuves tangibles de sa présence sont du reste fort peu nombreuses. Hormis son effet bien connu sur les aiguilles aimantées, seule l'apparition spectaculaire des aurores boréales nous rappelle sa présence. Mais il est essentiel pour la vie sur terre, notons l'indéniable rôle protecteur qu'il joue, en déviant la pluie de particules chargées apportées par le vent solaire. Sans le champ magnétique terrestre, nous serions quotidiennement irradiés. Néanmoins, une partie de ces radiations peuvent pénétrer à travers la barrière de champ magnétique terrestre et entraînent des perturbations magnétiques dans le voisinage immédiat de la terre. Dans le temps moderne, le besoin de comprendre les caractéristiques du champ magnétique terrestre, son origine et sa variation, devient très important.

#### **3.1 Leurs origines et ses éléments**

Le champ magnétique terrestre, encore appelé champ géomagnétique, résulte de la superposition de trois effets d'origines distinctes et d'amplitudes très différentes [10] :

- le champ principal créé dans la partie fluide conductrice du noyau de la Terre par effet dynamo auto-entretenu et qui représente 98 % du champ magnétique total. Cet effet résulte de l'interaction des courants électriques avec le champ de mouvements dans ce noyau fluide. A la surface de la Terre, son intensité varie entre 30 000 nT au voisinage de l'équateur à 60 000 nT près des pôles. Sa variation au cours du temps peut atteindre 1 % par an.

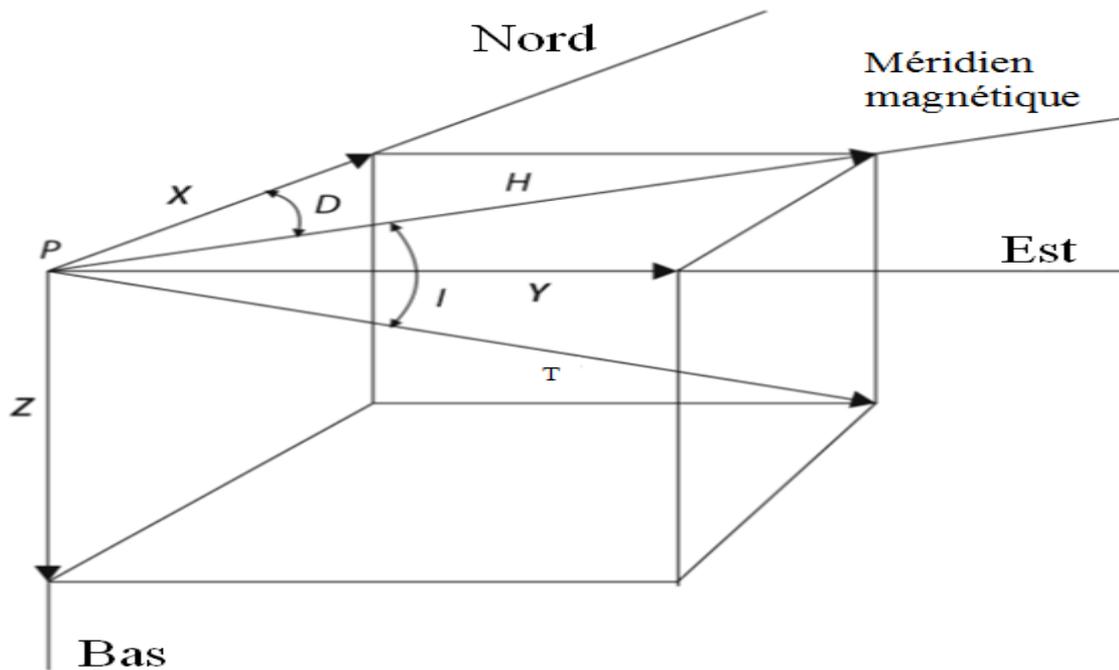
A celui-ci s'ajoute un champ d'origine superficielle, créé par les roches aimantées de la lithosphère terrestre. Son intensité ne dépasse pas 1000 nT.

- un champ d'origines externes créé par les différents courants circulant dans la magnétosphère et l'ionosphère. Lié principalement à l'activité solaire et à la marée lunaire, ce champ présente des variations dont les temps caractéristiques vont de quelques microsecondes à onze ans.

Le champ géomagnétique  $\vec{B}(S, t)$  est un champ vectoriel, et comme tout vecteur, il est défini à chaque instant et en tout point du globe par sa direction et son module. Il peut être représenté par un ensemble d'éléments dit « éléments magnétiques » obtenus en projetant le vecteur champ sur trois axes de coordonnées rectangulaires liés au système de coordonnées géographiques. A l'Observatoire Magnétique d'Antananarivo, comme dans toute autre observatoire, par habitude et surtout pour des raisons de commodité, on retient de préférence le système de coordonnées sphériques d'origine O pour les mesures absolues de l'intensité  $F = \|\vec{B}(S, t)\|$  et des angles de déclinaison D et d'inclinaison I et le système de coordonnées cylindriques pour les mesures relatives des composantes horizontale H et verticale Z.

La **Figure 1.2** donne les éléments du champ magnétique projetés dans les différents systèmes de coordonnées. Dans le système de coordonnées cartésiennes, l'axe Ox est dirigé vers le nord géographique, l'axe Oy vers l'Est et l'axe Oz vertical descendant. Les composantes horizontales Nord et Est sont notées respectivement X et Y. L'inclinaison est l'angle formé par le vecteur par rapport à l'horizontal et la déclinaison entre l'axe Ox et la composante horizontale H du vecteur  $\vec{B}(O, t)$ .

Le regain d'intérêt qui s'était manifesté au cours de ces vingt dernières années en faveur de l'étude de la distribution de ces éléments du champ magnétique terrestre conduisait l'Association Internationale de Géomagnétisme et d'Aéronomie (AIGA) à recommander à toutes les nations de consentir à un effort particulier pour déterminer avec précision ces éléments, leurs variations temporelles et leurs distributions spatiales. En effet, les équations (1.4) et (1.5) suivantes prévoient qu'il suffit d'en connaître trois éléments indépendants pour en disposer de tous les autres.



**Figure 1.2** : Les éléments du champ magnétique terrestre [10]

Ces équations décrivent les relations de correspondances internes entre les éléments du champ, permettant le passage du système de coordonnées sphériques vers les autres systèmes de coordonnées (1.4) ou inversement (1.5)

**\* relations de correspondances entre les éléments magnétiques**

**- relations directes (1.4)**

$$Z = F \cdot \sin(I) \quad (1.4a)$$

$$H = F \cdot \cos(I) \quad (1.4b)$$

$$X = H \cos(D) \quad (1.4c)$$

$$Y = H \sin(D) \quad (1.4d)$$

**- Relations inverses (1.5)**

$$F^2 = H^2 + Z^2 \quad (1.5a)$$

$$I = \text{atan}\left(\frac{Z}{H}\right) \quad (1.5b)$$

$$H^2 = X^2 + Y^2 \quad (1.5c)$$

$$D = \text{atan}\left(\frac{Y}{X}\right) \quad (1.5d)$$

Les composantes, X, Y, Z et T sont exprimées en nano teslas (nT). Les angles I et D sont présentées en degré, minute et seconde ou en radian.

**3.2 Les applications**

Il nous paraît utile de signaler en quelques mots sur l'usage pratique que l'on peut faire de notre connaissance du champ magnétique terrestre. Nous avons déjà évoqué la boussole dont l'importance était évidemment considérable à l'époque où aucun autre instrument de navigation précis et pratique n'était disponible. Aujourd'hui, de tels instruments existent (GPS, Balise radio, ...) et sont bien précis qu'une boussole... lorsqu'ils ne tombent pas en panne. Du fait de sa remarquable fiabilité, la boussole est toujours présente à bord des navires et des avions.

D'autres applications concernent le domaine militaire, les satellites ou l'orientation des antennes. Moins technologiques, notons l'application à l'archéologie et à l'étude de l'orientation des animaux migrateurs. Il importe de rappeler également l'intérêt des cartes magnétiques pour la détermination de la nature du sous-sol. La méthode magnétique habituelle tient suffisamment compte des caractéristiques du champ magnétique terrestre dans la zone prospectée pour pouvoir déceler dans le sous-sol la source, cause de l'anomalie magnétique. Cette méthode, pratiquant la mesure des susceptibilités, tient compte des propriétés intrinsèques des matériaux du point de vue magnétique. Elle prend d'avantage en considération l'aimantation induite par le champ magnétique terrestre.

Le champ magnétique terrestre est également utilisé dans les industries minières et pétrolières. Pour avoir des mines ou du pétrole, il faut d'abord prospector. La prospection magnétique consiste à chercher et localiser les roches, formations et gisements en se basant sur les anomalies magnétiques. Ces anomalies sont obtenues en soustrayant de l'intensité du champ magnétique, mesurée en un point à l'aide d'un magnétomètre à protons par celle du champ de référence en ce point. La connaissance de la distribution spatiale de ce champ dans une région nous donne donc des idées sur les endroits où ces minerais se cachent. Chaque minerais ou gisement correspond à une réponse magnétique.

## **4. Les capteurs du Champ magnétique**

La technologie de capteurs du champ magnétique nécessite à l'heure actuelle une grande précision et une large gamme de fonctionnement dans différentes conditions. Tous les appareils de mesures utilisent des technologies de pointe au niveau du capteur afin de réduire les erreurs systématiques liées à la détection. Le capteur de champ magnétique est déjà utilisé depuis 1187 dont l'application la plus connue est la boussole. La mesure de l'intensité du champ magnétique est devenue une action très importante. Les magnétomètres ne nécessitent pas de direction privilégiée.

### **4.1 Historiques des mesures magnétiques**

Depuis la fin des années 1600, l'Observatoire de Paris a étudié les propriétés du champ magnétique à l'aide des boussoles de déclinaison et d'inclinaison. Carl Friedrich Gauss, directeur de l'observatoire géomagnétique de Göttingen, s'intéresse à ces propriétés pendant les années 1830. En 1833, il invente le premier magnétomètre et publie un article dans lequel il décrit un nouvel instrument composé d'une barre métallique aimanté attaché à des fils d'or. Cette barre peut osciller et capable de mesurer le champ magnétique terrestre. En son honneur, l'unité de mesure de champ magnétique a été nommée « gauss » dans le système CGS [18].

Vers la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle, beaucoup de scientifiques et ingénieurs s'intéressent à la conception d'un détecteur de métaux et/ou minerais. Les premières machines étaient rudimentaires, consommaient beaucoup d'énergie et fonctionnaient uniquement à de degré très limité. En 1874, un inventeur parisien Gustave Trouvé a développé un appareil portatif pour localiser des objets métalliques [19]. Dans les années 1900, Nikola Tesla a amélioré le magnétomètre de Gauss. Avec ses innovations introduites aux Etats Unis, Tesla a collaboré, vendu et partagé ses idées avec l'industriel George Westinghouse.

Après la conception améliorée de Tesla sur le magnétomètre, de nombreux chercheurs se sont investis pour réaliser des magnétomètres pouvant servir pour des levés aéromagnétiques. En 1915, l'URSS a commencé à fonder le concept et elle a conçu un prototype en 1936. Ce type de magnétomètre n'était pas très sensible. En 1920, Gerhard Fischer a constaté que ce manque de précision est dû aux anomalies de terrains contenant des roches composées de minerais. En 1925, il a eu le premier brevet en livrant son détecteur de métal couplé par l'écho d'une onde radio.

En Italie, Août 1929, Herr a aidé le dirigeant Italien Benito Mussolini à retrouver des articles qui restent dans les galères de l'Empereur Caligula au fond du Lac Nemi. L'invention de Herr a été utilisée durant la deuxième Expédition Antarctique de l'Amiral Richard Byrd en 1933, pour localiser des objets métalliques laissés par les premiers explorateurs. Son efficacité fut surprenante jusqu'à huit pieds de profondeur [20].

En 1943, les soldats de la Marine américaine ont créé un magnétomètre pour détecter les sous-marins à partir d'un avion, et en 1946, suite à cette conception, Hans Lundberg a mis au point un magnétomètre capable de mesurer le champ magnétique terrestre à partir d'un hélicoptère. Au cours des années 1950, deux types de magnétomètres existent :

- le magnétomètre à résonance nucléaire. Il peut mesurer le champ magnétique à partir du déplacement des molécules d'un liquide induit par une variation du champ magnétique,
- le magnétomètre fluxgate. Il utilise trois supports tournant autour d'un point fixe. L'un suit le champ magnétique terrestre tandis que les deux autres mesurent le champ magnétique créé par d'autres objets.

En 1969, Cohen améliore son invention, et ses recherches ont contribué, à partir de 1990, au développement d'un magnétomètre très sensible utilisé dans les hôpitaux et dans les laboratoires de tests de diagnostics. Le grand changement technique des détecteurs a été le développement du système d'équilibre d'induction. Ce système nécessite deux bobines qui sont électriquement équilibrés. Quand un métal est introduit à leurs proximités, cet équilibre est rompu. Ce déséquilibre permet le détecteur à discriminer les métaux. Chaque métal a son propre effet quand il est exposé aux alentours du détecteur. Ce dernier donne un courant alternatif d'amplitude varié selon le type du métal. Cette recherche a donné par la suite naissance au capteur fluxgate.

#### **4.2 Principes des premiers capteurs**

La boussole ancienne ou aimant suspendu est un appareil comportant une aiguille aimantée horizontale. Cette aiguille peut tourner librement autour d'un axe passant par son centre de gravité. En présence de champ magnétique l'aiguille aimantée s'oriente dans la direction du champ externe. Le pôle nord de l'aiguille va s'orienter vers celui du sud du champ magnétique. Plongé dans le champ magnétique terrestre, l'aiguille de la boussole est orientée automatiquement suivant la direction nord-sud magnétique.

Sous l'action d'un champ magnétique variable, un solénoïde est parcouru par un courant électrique alternatif. Si le champ magnétique est constant, le solénoïde est insensible. L'intensité du champ magnétique est proportionnelle à celui du courant induit selon la loi de Biot-Savart. La présence de tension aux bornes du solénoïde montre qu'il peut donner une forme électrique du champ magnétique capté.

Dr. Edwin Hall a trouvé qu'il y a une différence de potentielle entre les deux faces d'une plaque d'or mince traversé par un courant quand elle est exposée dans un champ magnétique perpendiculaire à sa face. Il a trouvé que cette tension est proportionnelle à la densité du flux de l'induction magnétique perpendiculaire au conducteur. L'élément de Hall est à la base d'un capteur de champ magnétique. Il nécessite de conditionnement de signal pour rendre la sortie utilisable dans plusieurs applications.

## Chapitre 2

### MESURES ABSOLUES DU CHAMP MAGNETIQUE TERRESTRE

Depuis plus d'un siècle, les hommes ont cherché à décrire le champ magnétique terrestre dans sa représentation spatiale et dans ses variations temporelles. L'utilisation de satellites pour l'étude de l'ionosphère et de la magnétosphère a accru la nécessité de mesures terrestres et a permis une remarquable amélioration des connaissances. Cette recherche a toujours été réalisée dans le cadre d'une importante coopération internationale et se poursuit actuellement sous l'égide de plusieurs groupements scientifiques internationaux, en particulier l'Association Internationale de Géomagnétisme et d'Aéronomie (AIGA), de l'Union Géodésique et Géophysique Internationale (UGGI) qui formulent les recommandations et collectent, par l'intermédiaire des Centres Mondiaux des Données, les informations. Actuellement, 200 observatoires dont Antananarivo en fait partie, collaborent à cette collecte de données.

A l'Institut et Observatoire Géophysique d'Antananarivo (IOGA), les principales utilisations des appareils de mesures absolues des éléments du champ magnétiques sont :

- la mesure en observatoire magnétique (récemment déporté à Fihaonana Ankazobe) en vue de déterminer les références qui permet d'établir en ce lieu et à chaque instant la valeur des éléments : mesures de l'intensité totale et des angles, calculs des composantes horizontales et verticales.

- la mesure dans les stations de répétition, environ 21 stations à Madagascar (principaux aéroports), où l'on effectue périodiquement des mesures (tous les cinq ans). Elles ont pour but d'étudier les variations spatiales au cours du temps et mettre à jour la cartographie magnétique de l'ensemble de l'île,

- la mesure de prospection destinée à la connaissance précise des régions potentiellement riches en mines ayant des réponses magnétiques non négligeables,

Les mesures d'observatoire sont les plus exigeantes. Elles nécessitent la connaissance des éléments du champ magnétique avec une précision meilleure que 1 nT pour

l'intensité totale et 3" d'arcs pour les angles. Le magnétomètre à proton constitue l'appareil de base et effectue la mesure de l'intensité. Il est complété par une sonde à vanne de flux fixée parallèlement à l'axe optique de la lunette d'un théodolite amagnétique. Ce théodolite avec sa sonde à saturation sert à mesurer les angles. La connaissance de ces trois éléments permet de déterminer d'après les équations (1.4) les autres éléments. Les conseils généraux donnés dans les paragraphes qui suivent reprennent une partie des indications figurant dans les documents de référence de l'Observatoire Magnétique de Tananarive. Les modes opératoires adaptés à ces appareils de mesures sont rappelés ci-dessous.

## 1. Mesures de l'Intensité.

Le Magnétomètre à proton est utilisé pour mesurer l'intensité totale  $F$  du champ magnétique. Le principe de cet appareil s'appuie sur les découvertes de l'électronique quantique et sur les propriétés de la résonance magnétique nucléaire. Plusieurs types d'appareils utilisant de diverses manières les propriétés physiques de l'atome ont été réalisés depuis 1955. On peut signaler les magnétomètres à pompage optique et le magnétomètre à proton à polarisation dynamique. Ces appareils présentent l'intérêt d'une mesure continue de l'intensité du champ magnétique terrestre mais sont complexes et peu utilisés.

Nous nous intéresserons au magnétomètre à proton à précession libre de l'IOGA qui est le plus largement et universellement utilisés. Son principe est assez complexe. En effet, le proton présente un moment magnétique. Il est animé d'un mouvement de rotation sur lui-même (spin) autour de la direction de son moment magnétique (**Figure 2.1**). En présence d'un champ magnétique extérieur, le proton précessionne autour de la direction de ce champ à la fréquence de Larmor

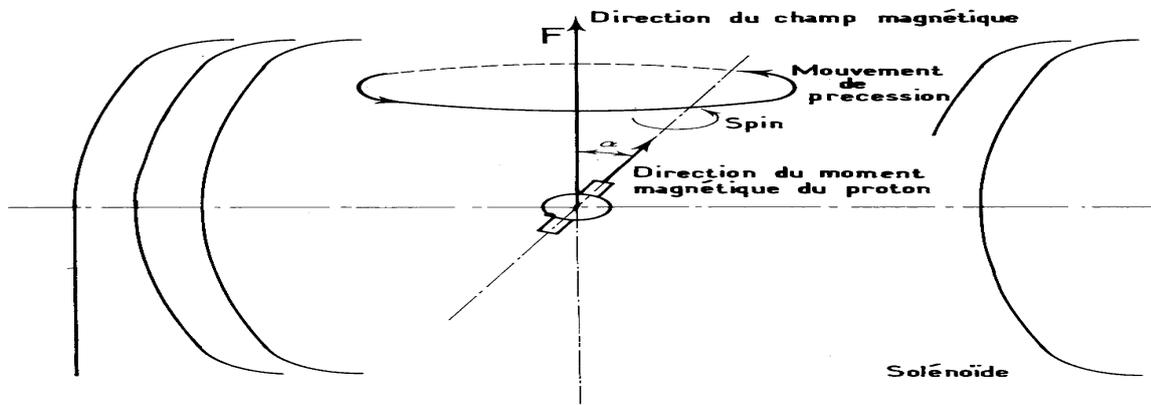
$$f = \frac{MF}{2\pi P} \quad (2.1)$$

$M$  = moment magnétique du proton,

$F$  = Intensité totale du champ magnétique

$P$  = moment cinétique du proton

$f$  = fréquence de précession



**Figure 2.1** : Représentation du mouvement de précession des protons [40]

La fréquence  $f$  est indépendante de l'angle  $\alpha$ . Le rapport  $M/P$  est le rapport gyromagnétique du proton, c'est une constante physique de la matière. Le processus de précession est excité en appliquant un fort champ magnétique de l'ordre de 20 mT, perpendiculaire à la direction du champ à mesurer et pendant une durée de quelques secondes. Les moments magnétiques des protons (axe de mouvement de spin) vont s'orienter dans la direction du champ de polarisation. Après interruption du champ de polarisation qui doit être brutale, les moments magnétiques des protons vont acquérir un mouvement de précession en phase à la fréquence de Larmor et tendre à s'aligner dans la direction du champ magnétique.

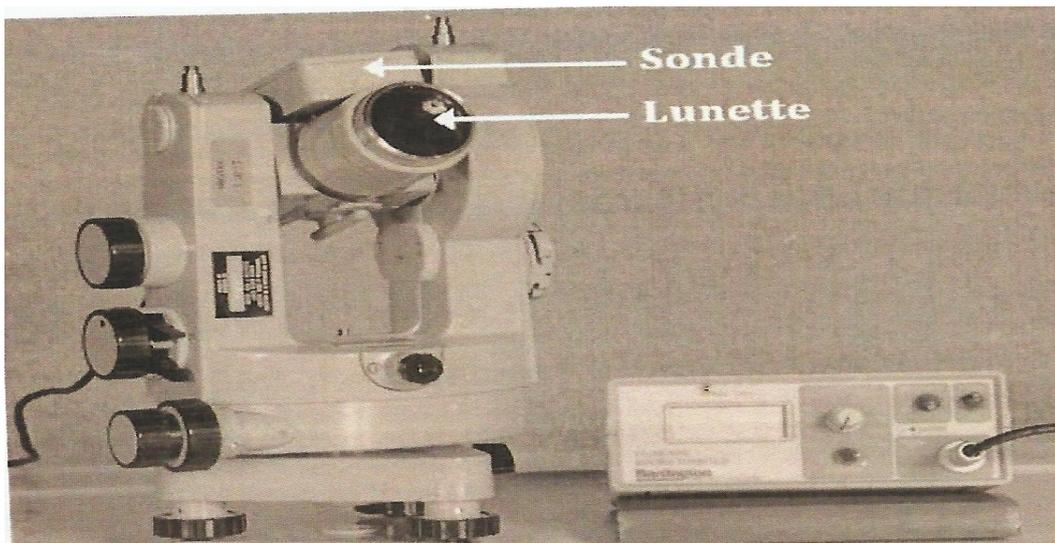
Le mouvement de précession est amorti par les collisions entre les particules dues à l'agitation thermique et l'interaction des protons entre eux provoque la perte de la cohérence de phase des mouvements de précession. Le signal recueilli aux bornes du bobinage commun de polarisation et de détection est une sinusoïde amortie de constante de temps d'amortissement de l'ordre de 1s. Les protons peuvent prendre 2 directions de spin qui correspondent à des états énergétiques du proton différents. En l'absence d'excitation, l'énergie reçue ou émise par le milieu est nulle et par conséquent

le nombre des protons ayant un spin dans un sens est égal au nombre de protons ayant un spin de sens opposé. La polarisation engendre une excitation du milieu qui modifie suivant la loi de BOLTZMAN le rapport entre le nombre de protons de spin + et de spin – d'environ un proton pour  $10^7$ . Les protons ont des sens de rotation du mouvement de précession inverse suivant le signal du spin et seule la différence entre la population de chaque catégorie induit une force électromotrice dans le bobinage. Le milieu excité est constitué d'environ un demi-litre d'un liquide riche en atome d'hydrogène tel que le kérosène.

La fréquence du signal recueilli est voisine de 2kHz pour un champ de 50 000 nT, elle est rigoureusement proportionnelle au rapport gyromagnétique du proton d'hydrogène et à l'intensité totale du champ magnétique. L'amplitude de ce signal est de l'ordre de 1 mV. Afin d'obtenir un niveau de signal protonique suffisant, il importe d'orienter le capteur de manière à ce que le champ de polarisation soit à peu près perpendiculaire au champ à mesurer. L'intensité totale du champ magnétique terrestre observé à Madagascar varie entre 31 000 nT et 35 000 nT avec une précision de mesures meilleure que 1 nT. C'est un appareil absolu et précis tout à fait essentiel pour la mesure de l'intensité.

## **2 Mesures des angles : déclinaison et inclinaison.**

L'appareil est réalisé en fixant une sonde à saturation (fluxgate) rigidement et parallèlement à l'axe optique d'un théodolite amagnétique (**Figure 2.2**). La sonde à saturation est un capteur de champ directionnel. Il est utilisé en détecteur de champ nul pour les mesures d'inclinaison et de déclinaison. Le théodolite comporte un cercle vertical et un cercle horizontal ainsi qu'une lunette astronomique. Le cercle vertical indique la direction de l'axe optique de la lunette par rapport à la verticale. Le cercle horizontal indique la direction de l'axe optique de la lunette, dans le plan horizontal, par rapport à une balise que l'on aura visée au préalable et dont la direction géographique est connue.



**Figure 2.2** : Théodolite amagnétique muni de sa sonde fluxgate, utilisé pour les mesures des angles [39]

Un tel matériel présente par construction un certain nombre de défauts. La correction de ces défauts conduit à mettre en œuvre une méthodologie de mesures appropriées aboutissant à la détermination des angles. Cet appareil peut ainsi être considéré comme un appareil de mesures absolues ne nécessitant pas intrinsèquement une calibration. Mais, malgré un alignement mécanique aussi précis que possible en azimut et en site du support de sonde par rapport à l'axe optique de la lunette deux défauts subsistent :

- le défaut d'azimut : il existe un angle  $\beta$  entre la projection sur le plan horizontal de l'axe optique de la lunette et la projection sur le plan horizontal de l'axe magnétique de la sonde fluxgate,
- le défaut de site : l'axe magnétique de la sonde fluxgate est incliné d'un angle  $\alpha$  par rapport à l'axe optique de la lunette. Lorsque le théodolite est parfaitement nivelé et que la lunette est horizontale,  $\alpha$  représente l'angle entre la projection de l'axe magnétique de la sonde sur le plan vertical et la trace du plan horizontal.

Si  $\mathbf{e}_s$  représente le vecteur unitaire suivant l'axe magnétique de la sonde, les mesures des angles reposent sur l'équation de base suivante :

$$(B + Es).es = 0 \quad (2.2)$$

Où **B** est le champ magnétique terrestre mesuré, **Es** est le champ équivalent à l'erreur de sonde, c'est la valeur du champ mesuré lorsque la sonde fluxgate est placée dans un champ nul. Elle est due à la sonde à saturation, à son électronique associée et aux matériaux magnétiques avoisinants. Une hypothèse contraignante est de supposer le champ constant pendant toute la durée de la mesure.

Afin de simplifier le calcul, on peut, de manière justifiée, assimiler l'arc et le sinus. Le cosinus de ces angles sera pris égal à 1. Enfin, tant que l'erreur de sonde est de faibles valeurs par rapport aux intensités des composantes horizontale et verticale. Ces simplifications demeurent acceptables. Le principe de la mesure consiste à rechercher les quatre positions de champ nul dans le plan horizontal ou plan vertical. Ces quatre positions sont, aux erreurs instrumentales près, normales à la direction du méridien magnétique, pour la déclinaison et perpendiculaire au champ magnétique pour l'inclinaison. La **Figure 2.3** représente le relevé effectué de l'intensité et des angles.

### 2.1 Mesure de la déclinaison

Pour la déclinaison, les positions des sondes correspondent aux deux positions obtenues en visant successivement l'Est et l'Ouest magnétiques, la sonde étant au-dessus de la lunette ainsi qu'aux mêmes visées la sonde étant au-dessous de la lunette. En établissant et en résolvant les quatre équations déduites de l'équation (2.1), il est possible de calculer la déclinaison ainsi que la valeur des différents défauts. En effet, dans un repère lié à une balise terrestre, les composantes du champ magnétique sont (H cos(d), Hsin(d), Z), d étant l'angle entre la direction de la balise et celle du méridien magnétique.

Les cosinus directeurs de **es** sont (cos (li - εβ)cos (α), sin (li - εβ)cos(α), sin (εα)), li (i=1,4) sont les angles lus sur le cercle horizontal.

$$B.es = H\cos(d)\cos(li - \varepsilon\beta)\cos(\alpha) + H\sin(d)\sin(li - \varepsilon\beta)\cos(\alpha) + Z \sin(\varepsilon\alpha)$$

$$B.es = H\cos(li - \varepsilon\beta - d)\cos(\alpha) + Z \sin(\varepsilon\alpha) \quad (2.3)$$

avec  $\varepsilon = 1$  quand  $i = 1,4$  et  $\varepsilon = -1$  quand  $i = 2,3$ . Tous les angles sont comptés positivement dans le sens horaire. L'équation (2.3) peut encore s'écrire

$$B.es = H \cos(d) \cos(li - \varepsilon\beta - d + \pi/2 - \pi/2) \cos(\alpha) + Z \sin(\varepsilon\alpha)$$

$$B.es = -H (li - \varepsilon\beta - d + \pi/2) + Z \varepsilon\alpha \quad (2.4)$$

en faisant l'approximation usuelle  $\sin\alpha = \alpha$  et  $\cos\alpha = 1$  quand  $\alpha \ll 1$ . Sachant que l'erreur de sonde **Es** et **es** sont colinéaire par définition.

Date: 06/11/98

UNIVERSITE D'ANTANARIVANO  
INSTITUT DE RECHERCHES GEOPHYSIQUES

MESURES ABSOLUES  
et LIGNES DE BASE

Températures: OPERATEUR : Roland  
21.8  
20.1 AIDE OPERATEUR : Jérémie

Signal : 500 Batterie : 12.4

**CHAMP TOTAL**

VALEUR APPROCHÉE : 33000 +					VALEUR APPROCHÉE : 33000 +				
	HH.MM	F1	F2	F3		HH.MM	F1	F2	F3
1	03:41	727.0	727.0	727.0	1	04:28	723.3	723.2	723.1
2	03:42	726.9	726.9	726.9	2	04:29	723.1	722.3	723.0
3	03:43	726.7	726.7	726.9	3	04:30	722.9	722.9	723.0
4	03:44	726.9	726.6	726.7	4	04:31	723.3	722.8	722.8
5	03:45	726.7	726.6	726.6	5	04:32	722.9	723.0	723.1
6	03:46	726.7	726.7	726.7	6	04:33	723.1	723.2	723.0
7	03:47	726.8	726.6	726.7	7	04:34	722.9	723.1	723.0
8	03:48	726.7	726.4	726.3	8	04:35	722.8	722.9	723.0
9	03:49	726.5	726.3	726.4	9	04:36	722.6	722.9	722.6
10	03:50	726.2	726.2	726.2	10	04:37	722.5	722.7	722.4

**DECLINAISON MAGNETIQUE**

REPÈRE : Clocher Areliv  
AZIMUT : 294.1080

	AZIMUT	SITE
V1 (Sonde Haut)	327.1901	98.4449
V2 (Sonde Bas)	127.1874	301.5486
V3 (Sonde Haut)	327.1908	98.4446
V4 (Sonde Bas)	127.1860	301.5494

	HH.MM	Lecture
L1	04:03	116.8455
L2	04:04	116.8061
L3	04:05	316.8129
L4	04:06	316.7940

	HH.MM	Lecture
L1	04:07	116.8427
L2	04:08	116.8047
L3	04:10	316.8135
L4	04:11	316.7931

**INCLINAISON MAGNETIQUE**

Est magnétique : 116.81  
Nord magnétique : 16.81  
Sud magnétique : 216.81

	HH.MM	Lecture
L1	04:17	141.4459
L2	04:18	341.4283
L3	04:20	258.5689
L4	04:21	58.5814

	HH.MM	Lecture
L1	04:23	141.4431
L2	04:24	341.4290
L3	04:25	258.5682
L4	04:27	58.5804

**Figure 2.3** : Fiche de mesures absolues de l'IOGA du 06 Novembre 1998.

$$Es \cdot es = Es \quad (2.5)$$

Compte tenu des équations (2.4) et (2.5), l'équation (2.2) peut s'écrire

$$-H (li - \varepsilon\beta - d + \pi/2) + Z \varepsilon\alpha + Es = 0, i = 1,2,3,4 \quad (2.6)$$

où compte tenu des valeurs de  $\varepsilon$ , en fonction des positions de la sonde, nous pouvons écrire les quatre équations suivantes :

$$l1 = d + \beta + \pi/2 + (Z/H) \alpha + Es/H \quad (2.7a)$$

$$l2 = d - \beta - \frac{\pi}{2} - (Z/H) \alpha - Es/H \quad (2.7b)$$

$$l3 = d - \beta + \pi/2 - (Z/H) \alpha + Es/H \quad (2.7c)$$

$$l4 = d + \beta - \frac{\pi}{2} + (Z/H) \alpha - Es/H \quad (2.7d)$$

d'où

$$d = (1/4) (l1 + l2 + l3 + l4) \quad (2.8)$$

La direction du champ nul est obtenue, sonde horizontale en recherchant le zéro électrique par rotation du cercle horizontal du théodolite pour chaque orientation. Cette procédure de mesure permet de déterminer la déclinaison magnétique D par :

$$D = d - VB + AzB \quad (2.9)$$

AzB est l'azimut de la balise, c'est à dire l'angle que fait la direction de la balise par rapport à celui du Nord géographique, VB est valeur lu sur le cercle horizontal du théodolite son axe optique étant confondu avec la direction balise station d'observation. La valeur de D calculée est indépendante des défauts d'appareillage sous réserve que le nivellement de la lunette soit réalisée de façon rigoureuse à chaque orientation.

## 2.2 Mesure de l'Inclinaison

Pour déterminer l'inclinaison, considérons le repère Oxyz défini de la manière suivante : Oxz est le plan vertical contenant l'axe de la lunette, proche du méridien magnétique. Les angles dans ce plan sont orientés par rapport à Oy. Le principe de mesure est similaire à celui de la déclinaison, il consiste à positionner l'axe de la sonde à saturation dans le méridien magnétique, puis par rotation du cercle vertical, à rechercher le zéro électrique (positionnement en champ nul) obtenu lorsque l'axe de la sonde est perpendiculaire à la direction du champ **B**. La mesure de l'inclinaison suppose donc un orientation préalable de la sonde dans le méridien magnétique. L'angle que fait **Es** par rapport au plan horizontal est  $li + \epsilon\alpha$ . D'où les cosinus directeurs de **es** dans un repère Oxyz.

$$es = ( \cos(li + \epsilon\alpha)\cos(\beta) - \cos(li + \epsilon\alpha)\sin(\beta) \sin(li + \epsilon\alpha))$$

$$es = ( \cos(li + \epsilon\alpha), -b \cos(li + \epsilon\alpha) \sin(li + \epsilon\alpha)) \quad (2.10)$$

Sachant que les composantes de **B** dans ce repère sont  $B(F\cos(I)\cos(\alpha), F\cos(I)\sin(\alpha), F\sin(I))$  On cherche la position de **es** telle que l'équation (2.3) soit satisfaite. Compte tenu des approximations faites et en négligeant les termes du second ordre, avec  $\epsilon = 1$  quand  $i=1,2$  et  $\epsilon=-1$  quand  $i=2,3$ .

$$B.es = F [ \cos(I)\cos(li + \epsilon\alpha) - \beta\alpha \cos(I)\cos(li + \epsilon\alpha) + \sin(I)\sin(li + \epsilon\alpha)]$$

$$B.es = F \cos(I - li - \epsilon\alpha) = \epsilon F \sin(I - li - \epsilon\alpha + \epsilon\pi/2)$$

$$B.es = \epsilon F ( I - li - \epsilon\alpha + \epsilon\pi/2) \quad (2.11)$$

Il est commode d'introduire l'angle auxiliaire  $\delta$  matérialisant l'erreur de sonde et défini par la relation

$$\tan \delta = \frac{Es}{F}$$

$$\text{Ou } Es = F \tan \delta = F \delta \quad (2.12)$$

Dans le plan vertical,  $\delta$  représente l'écart angulaire, dû à l'erreur de sonde, entre la direction théorique de l'axe magnétique de la sonde et sa direction effective. Des équations (2.2), (2.11) et (2.12), nous obtenons :

$$l_i = I - \alpha + \varepsilon\pi/2 - \varepsilon\delta \text{ pour } i = 1,2,3,4 \quad (2.13)$$

Soit 3 inconnues pour 4 équations qui ne sont pas indépendantes. D'où

$$I = (1/2) \{ l_1 + l_4 \} = (1/2) \{ l_2 + l_3 \} \quad (2.14)$$

On obtient donc à partir des positionnements 1 et 4 d'une part et 2 et 3 d'autre part une détermination distincte et indépendante de l'inclinaison  $I$ . La détermination obtenue à partir des mesures 1 et 4 correspond à une mesure avec la sonde située au-dessus de la lunette. La seconde détermination à une mesure effectuée à la position inverse.

Lors de la recherche du méridien magnétique, on se trouve dans le cas du premier orientation de la mesure de la déclinaison. La direction de la sonde présente par rapport à la normale à ce méridien magnétique un défaut d'azimut. On peut calculer l'erreur angulaire de détermination de l'inclinaison qui résulte de cet orientation. Une fois l'intensité et les angles connus, il est facile d'accéder aux composantes sans effectuer leurs mesures. Il suffit d'appliquer les relations de correspondance (1.4) entre les éléments du champ magnétique à déterminer.

### 3. Méthode des résidus

La méthode permettant de déterminer les angles est appelée « Méthode de zéros ». Elle est basée sur la détection de la direction du champ nul. Cette approche a été utilisée afin d'éviter la saturation de la sonde. Une variante de cette méthode de zéros est la méthode des résidus. La formule (2.2) est simplement remplacée par :

$$(\mathbf{B} + \mathbf{E}s).es = R \quad (2.15)$$

Où R est le résidu, en nT, affiché sur le boîtier électronique de la sonde.

Pour la déclinaison, la relation (2.6) donne :

$$-H (li - \varepsilon\beta - d + \pi/2) + Z\varepsilon\alpha + Es = Ri, i = 1,2,3,4 \quad (2.16)$$

Posons,

$$ri = \arcsin(Ri/H) = Ri/H$$

Le calcul de ri suppose la connaissance de H. Une incertitude sur H implique une incertitude sur ri, donc sur d puis D. On a ;

$$\Delta ri = (Ri / H^2) \Delta H \quad (2.17)$$

avec

$$\Delta ri = 1, \text{ on a}$$

$$\Delta H = \frac{\pi}{180 \times 3600} \cdot \frac{H^2}{Ri} = 4,85 \cdot 10^{-6} \frac{H}{Ri}$$

Où,  $\Delta H$  est l'incertitude tolérée pour que  $D_{ri}$  soit inférieur à 1". Pour  $Ri = 10\text{nT}$  et  $H = 18\,350\text{ nT}$ , on obtient  $\Delta H = 163\text{ nT}$ . Cette valeur reste dans la gamme tolérée par la sonde.

Pour l'inclinaison, la relation (2.13) devient :

$$F (I - li - \alpha + \varepsilon\pi/2 - \varepsilon\delta) = Ri, \text{ pour } i = 1,2,3,4 \quad (2.18)$$

Posons

$$ri = \arcsin\left(\frac{Ri}{F}\right)$$

ri est l'angle dont il faudrait tourner la sonde, dans le plan vertical pour afficher la valeur 0 comme dans la méthode de zéros. Le calcul de ri suppose donc la connaissance de F. Une incertitude sur F implique une incertitude sur ri donc sur I.

Dans la détermination des angles, les relations (2.15) et (2.16) montrent clairement que, par rapport aux formules de la « méthode de zéros », il suffit de remplacer  $l_i$  par  $l_i + \epsilon_i$  en tenant compte des conventions de signes. Les techniques développées dans ce chapitre ne tiennent pas compte des variations du champ au cours des mesures. Nous avons supposé que le champ à mesurer reste constant pendant la durée de la séquence des mesures, il en est de même concernant ses directions. Ces hypothèses n'ont pas d'incidence sur les grandeurs mesurées. De plus, les erreurs systématiques de la sonde sont certes, considérées comme étant faibles et elles sont corrigées par le processus de mesures en faisant plusieurs lectures pour plusieurs positions relatives de la sonde par rapport à la lunette telle qu'elles sont décrites plus haut.

Pour les mesures des angles, celles de la déclinaison nécessitent une balise repère dont l'azimut AZB par rapport au nord géographique est connu. On fait quatre visées de cette balise, dont deux visées avant les mesures de la déclinaison et deux visées de contrôles après les mesures. La valeur adoptée de la visée de la balise s'obtient en faisant la moyenne de ces visées à 100 grades près. Avant de commencer les mesures de la déclinaison, il faut s'assurer du bon nivellement du théodolite pour que la lunette et la sonde soient horizontale. Puis on fait tourner le théodolite horizontalement jusqu'à ce que l'affichage sur l'électronique associée de la sonde soit nul. Ceci indique que la direction du champ magnétique est perpendiculaire à l'axe magnétique de la sonde. Pour cela, il y a quatre positions possibles  $L_i$  ( $i=1,4$ ). Pour les mesures de l'inclinaison, il faut placer la sonde dans le plan du méridien magnétique en suivant l'indication du Nord magnétique obtenue lors de la mesure de la déclinaison. Puis, on fait tourner le théodolite verticalement jusqu'à ce que l'affichage soit nul. Les mesures sont dites de bonne qualité si les erreurs systématiques sont inférieures à 40" d'arcs pour les angles et 5nT pour l'erreur de sonde.

Enfin, le principe de base de la conception du « capteur trifluxgate » repose sur celui de la « méthode dite des résidus ».

## Chapitre 3

### MESURES DES COMPOSANTES DU CHAMP MAGNETIQUE: CAPTEUR TRIFLUXGATE

Pour déterminer complètement les éléments du champ magnétique terrestre, on doit mettre en œuvre deux appareils de mesures : un magnétomètre à proton pour la mesure de l'intensité et un théodolite muni d'une sonde fluxgate pour la détermination des angles. Les autres éléments du champ seront déduits par la suite à partir des relations de correspondance (1.4) et (1.5) entre les différents éléments. Seulement, avec deux appareils, il est pratiquement impossible d'obtenir simultanément les valeurs absolues des éléments du champ magnétique en un point donné sans hypothèses a priori et une méthodologie appropriée. L'hypothèse consiste à supposer le champ constant pendant la durée des mesures, il en est de même pour tout point sur une surface entourant le point considéré. Dans la pratique, les mesures se font en deux points voisins après avoir déterminé la différence d'intensité entre ces points tout en supposant qu'elle ne varie pas au cours du temps. Ce problème peut être évité en réalisant un dispositif capable de prendre en compte au moins trois éléments du champ magnétique.

Aussi avons-nous mis à profit les différentes possibilités de la sonde à saturation fluxgate pour concevoir et réaliser un appareil permettant de mesurer simultanément les éléments du champ en un point. Notre appareil comporte un capteur composé de six sondes fluxgates triaxiaux, deux sondes verticales et quatre sondes horizontales, libres de se mouvoir dans le plan horizontal. Le capteur est ainsi dénommé capteur « Trifluxgate » à cause de ses trois axes orthogonaux munis de deux sondes parallèles. La conception de tel appareil dépend des techniques de mesures, des principes de base sur lesquels reposent ces mesures et les manières dont les sondes pourraient traduire les informations véhiculées.

## 1. Principes de mesures avec le capteur trifluxgate

Mesurer des intensités à partir d'une sonde conçue pour mesurer des angles n'est pas évident quoiqu'il soit possible d'exprimer les intensités en fonction de ces angles en utilisant le sinus ou le cosinus. La difficulté réside dans la création de l'environnement favorable au fonctionnement des sondes, sachant que ces dernières ne peuvent fonctionner que dans des gammes de faible champ, limitées entre -500nT et 500nT, alors que la composante à mesurer dépasse souvent les 20000 nT. La solution est de fournir à la sonde un champ magnétique continu au moment de la mesure. Ce champ de compensation est de l'ordre de grandeur du champ à mesurer, il faut donc injecter dans les enroulements de détection un courant continu d'intensité adéquate permettant de générer ce champ.

### 1.1 Mesure de l'intensité totale

La mesure de l'intensité totale  $F_c$  ne pose aucune difficulté, car sa mesure ne dépend ni de l'orientation des sondes horizontales ni du système de référence utilisé pour l'exprimer. On doit avoir rigoureusement :

$$F_c^2 = X_s^2 + Y_s^2 + Z_s^2 \quad (3.1)$$

$X_s$ ,  $Y_s$  et  $Z_s$  représentent respectivement les valeurs calculées à partir des données exactes du champ de compensation ( $X_c$ ,  $Y_c$ ,  $Z_c$ ) et des résidus ( $dX_s$ ,  $dY_s$ ,  $dZ_s$ ) en nT mesurés par chacune des sondes du capteur trifluxgate. Les mesures sont effectuées dans un système de coordonnées cartésiennes lié au point d'observation.

$$T_s = T_c + dT_s, \quad (T = X \text{ ou } Y \text{ ou } Z) \quad (3.2)$$

Normalement, la mesure de l'intensité totale, ne tient pas compte des positionnements des sondes horizontales. Dans la pratique, on doit avoir un ordre de grandeur du champ à mesurer pour définir le champ de compensation et déterminer, à un facteur correctif près, le courant de compensation.

Le capteur trifluxgate n'était pas conçu pour mesurer uniquement l'intensité du champ magnétique. En effet, dans certaines circonstances, il est très intéressant d'effectuer directement la mesure des composantes Z et H ou X, Y et Z du champ magnétique. Pour que cette mesure soit possible, les sondes doivent travailler à faible champ. Il est donc nécessaire d'appliquer à chaque sonde à saturation un courant de compensation qui annule la partie principale du champ à mesurer. La connaissance de la valeur exacte du champ compensé et la mesure du champ résiduel vu par la sonde permettent de calculer la valeur des composantes du champ magnétique à condition de suivre une procédure permettant d'éliminer les défauts d'appareillage.

## 1.2. Mesures des composantes horizontales et verticales

La procédure de mesure de la composante horizontale H est similaire à celle utilisée pour la mesure de la déclinaison, utilisant la méthode des résidus. On supposera que l'on dispose d'un générateur de courant de linéarité parfaite, c'est à dire que le courant est rigoureusement proportionnel à la valeur affichée sur le boîtier de l'électronique. La calibration de ce courant de compensation est effectuée en comparant au même instant la valeur  $F_c$  du champ total mesuré à l'aide des trois sondes du capteur trifluxgate avec la valeur  $F_a$  du champ total mesuré avec un magnétomètre à proton. L'erreur d'orientation des sondes par rapport à la direction du champ magnétique n'entraîne pas d'erreur appréciable de calibration si elle est inférieure à 10' d'arc.

La mesure de H peut être effectuée directement après la calibration des générateurs de courant correspondants aux sondes horizontales. La procédure de la mesure commence par la recherche dans le plan horizontal de la direction du méridien magnétique. Cette direction est perpendiculaire à l'une des sondes se trouvant dans les conditions de détection de champ nul, l'autre sonde située dans la direction parallèle ou antiparallèle au vecteur **H**. On définit les quantités suivantes :

- CH indique l'affichage du courant de compensation pour annuler la partie principale du champ **H** à mesuré,
- $H_c$  est la valeur exacte en nT du champ compensé par l'affichage CH,

-  $dH_s$  est le champ mesuré par l'une des sondes horizontales du capteur « trifluxgate »,

$$H = H_c + dH_s = X_c + dX_s \quad (3.3a)$$

$$Y_c = 0 \text{ nT et } dY_s = 0 \quad (3.3b)$$

Dans les conditions de détection de champ nul, la sonde perpendiculaire à  $\mathbf{H}$  ne nécessite pas de compensation, elle se comporte exactement comme la sonde utilisée pour mesurer la déclinaison.

Pour les composantes horizontales Nord  $X_s$  et Est  $Y_s$  du champ magnétique, les mesures se font en plaçant la sonde horizontale  $X_s$  dans la direction du Nord géographique du point d'observation. Aux valeurs lues  $dX_s$  et  $dY_s$  affichées sur l'électronique des sondes, s'ajoutent les valeurs exactes  $X_c$  et  $Y_c$  du champ de compensation introduites via le PC :

$$X_s = X_c + dX_s \quad (3.4a)$$

$$Y_s = Y_c + dY_s \quad (3.4b)$$

Pour la mesure de la composante verticale, elle fait également intervenir le résidu  $dZ_s$  mesuré par la sonde verticale et les données de compensation  $Z_c$ . La lecture du signal de sonde correspond au positionnement de la sonde selon la verticale du lieu, la valeur de  $Z$  est donnée au signe près par la relation

$$Z = Z_c + dZ_s \quad (3.5)$$

La compensation de la partie principale du champ permet aux sondes à saturation de fonctionner correctement dans leur environnement. Elle ne doit pas influencer la sensibilité des sondes

### 1.3 Calcul des angles

Les angles sont calculés à partir des valeurs mesurées des composantes horizontales et verticale, connaissant les relations de correspondances entre les différents éléments. Ainsi la déclinaison magnétique est calculée à partir des relations (3.4) par :

$$D = \arctan(Y_s/X_s) \quad (3.6)$$

et l'inclinaison magnétique peut être déduite des relations (3.1), (3.3a), (3.5) par :

$$I = \arcsin(Z/F) = \arccos(H/F) = \arctan(Z/H) \quad (3.7)$$

Les relations (3.3), (3.4) et (3.5) mettent clairement en évidence que les sondes sont conçues de la même manière et qu'elles peuvent jouer les mêmes rôles. Lors de la mesure des composantes du champ magnétique, on peut éliminer l'erreur de sonde  $E_s$  et les défauts de positionnement des sondes en effectuant les mesures des résidus successivement en orientation parallèle et antiparallèle à la direction de la composante à mesurer. La procédure suivie pour les mesures et les relations simplifiées donnent pour la composante horizontale  $H$  :

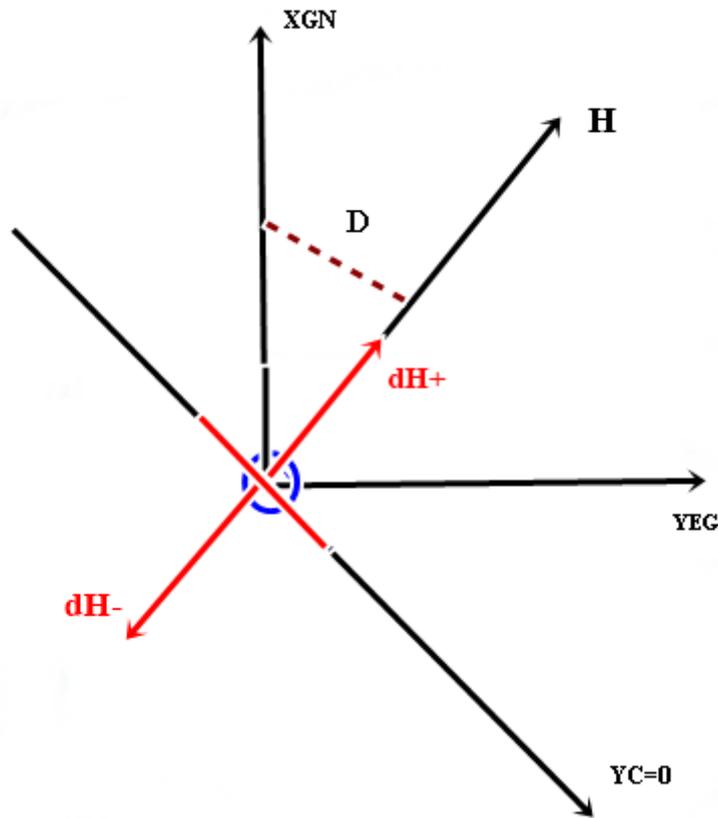
$$dH_{s+} = H \cos(\nu - \beta) + Z \sin(\alpha) - E_s - H_c \quad (3.7a)$$

$$dH_{s-} = H \cos(\nu - \beta) - Z \sin(\alpha) + E_s - H_c \quad (3.7b)$$

avec

$$\tan(\nu) = (E_s/H) + (Z \alpha / H) \quad (3.7c)$$

$dH_{s+}$  et  $dH_{s-}$  sont les valeurs résiduelles lues sur le boîtier des sondes horizontales suivant les orientations de la sonde diamétralement opposés. (**Figure 2.4**)



**Figure 2.4 :** Mesure de la composante horizontale par le capteur fluxgate

. Les angles étant faibles, on peut assimiler le cosinus à l'unité et le sinus à l'arc. On en déduit :

$$dH_s = (1/2) (dH_{s-} + dH_{s+}) = H - H_c \quad (3.8)$$

La relation (3.8) est la généralisation de la relation (3.3a). Lors de la recherche de la direction du méridien magnétique, on se trouve dans le cas d'orientation de la mesure de la déclinaison. On peut calculer l'erreur de sonde  $E_s$  résultant de cet orientation.

$$E_s = (1/2) (dH_{s+} - dH_{s-}) = Z \alpha \quad (3.9)$$

Au lieu de procéder au retournement de la sonde, nous avons envisagé d'utiliser deux sondes parallèles et diamétralement opposées. Les principes de mesures des éléments du champ magnétique reposent sur ceux de la sonde à saturation. Ils dictent les

structures de base du capteur trifluxgate. Ce dernier utilise six sondes fluxgate conçue de la même façon et placées deux à deux suivant les axes d'un repère orthonormé.

Pour mieux comprendre ces principes de mesures il est nécessaire de connaître la grandeur mesurée par la sonde et sa traduction par l'électronique associée en champ magnétique.

## 2. La sonde fluxgate

### 2.1 Transformateur non linéaire

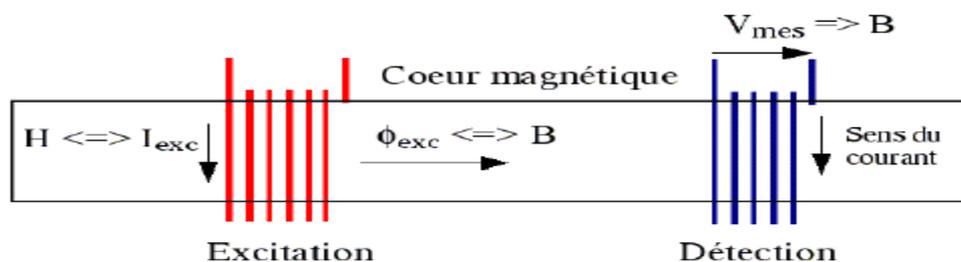
La sonde fluxgate est basée sur l'effet d'un transformateur constitué de deux enroulements placés autour d'un noyau de matière aimantée de perméabilité non linéaire  $m(H)$  dépendant du champ appliqué  $H$  [24]. Nous allons analyser la configuration d'une bobine comportant un noyau anisotrope. Cette bobine est donnée par la **Figure 3.1**. La tension  $u(t)$  induite dans l'enroulement secondaire de la bobine est proportionnelle à la variation temporelle du flux  $F$  qui traverse les spires dans leur axe longitudinal.

$$u(t) = -NS\vec{e}_s \cdot \frac{d\vec{B}}{dt} \quad (3.10)$$

avec

$$\mathbf{B} = \mu(H) \mathbf{H} \quad (3.11)$$

- N nombre de spires de la bobine de détection,
- S section efficace du noyau,  $\mathbf{e}_s$  vecteur unitaire de l'axe de la bobine
- H intensité du champ résultant vu par la bobine



**Figure 3.1** : Transformateur non linéaire

Le champ magnétique **B** vu par la sonde résulte de la superposition du champ **Be** créé par les enroulements de la bobine d'excitation et des champs **Bo** des perturbations externes.

$$\mathbf{B} = \mathbf{Be}(i(t)) + \mathbf{Bo} \quad (3.12)$$

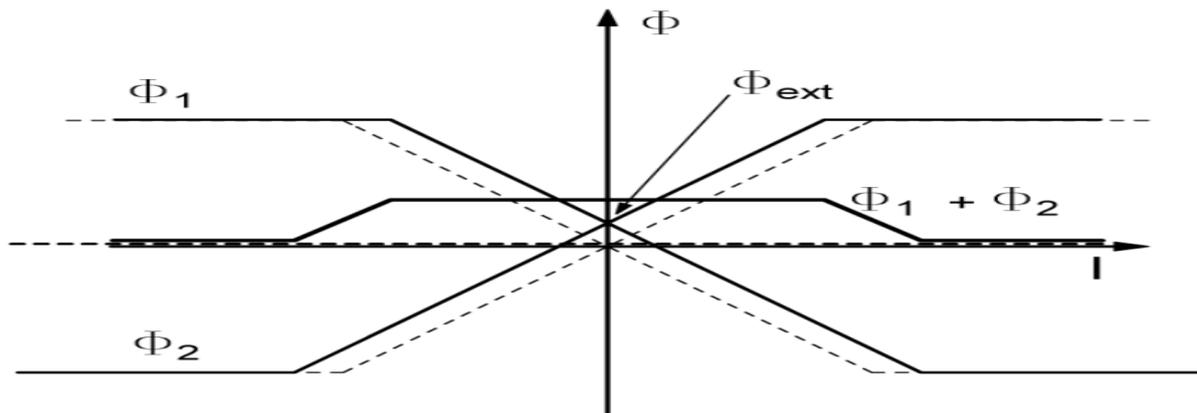
- **Be**(i(t)) est le champ d'excitation, créé par l'enroulement de la bobine d'excitation dû à la présence d'un courant alternatif i(t),
- **Bo** le champ magnétique externe supposé constant pendant la durée d'observation.

La présence d'un champ externe **Bo** suivant une direction longitudinale perturbe la symétrie des champs alternatifs **Be**(i(t)), et ce déséquilibre provoque l'apparition de tensions harmoniques u(t) dans la bobine de détection. D'après l'équation (3.10), la tension à la sortie de cette bobine est proportionnelle à l'intensité du champ résultant projeté sur l'axe de la sonde et s'exprime par la relation (3.13).

$$u(t) = -NS \frac{d}{dt} (\mu(H)N_e i(t) + H_0) \quad (3.13)$$

$N_e$  est le nombre de spires de la bobine d'excitation et i(t) le courant circulant dans ses spires. La relation (3.13) nous montre clairement que nous pouvons récupérer l'intensité du champ superposé **Ho** à partir de la tension u(t) induite dans la bobine de détection.

La conception de VAQUIER permet d'effectuer une mesure différentielle. Elle consiste à mettre deux enroulements symétriques antiparallèles pour la bobine d'excitation avec un enroulement commun pour la bobine de détection. En absence de champ externe, les deux enroulements d'excitation créent deux champs magnétiques de même intensité mais de sens contraires. Ces champs n'induisent aucun signal électrique dans l'enroulement de la bobine de détection. Un champ magnétique extérieur provoque la saturation d'un des enroulements d'excitation, l'équilibre est rompu et on voit apparaître dans l'enroulement de détection une tension représentée sur la **figure 3.2**.



**Figure 3.2** : Signal de sortie de la bobine de détection

## 2.2 Principe de la sonde fluxgate

Le fonctionnement de la sonde à saturation est identique à celui du transformateur de VAQUIER. Elle utilise la propriété des matériaux à forte perméabilité d'atteindre leur induction de saturation pour des faibles valeurs de champ. La sonde à saturation est constituée de deux noyaux identiques et parallèles à haute perméabilité entourés chacun de deux enroulements, l'un dit primaire ou excitation l'autre dit secondaire ou détection. La sonde fluxgate a une grande plage de mesure avec une résolution de 10 pT pour un champ magnétique terrestre jusqu'à l'ordre de millitesla. Pour les applications nécessitant la mesure de champ faible, la sonde fluxgate est très intéressante avec une précision absolue de 10 nT.

Les bobinages d'excitation sont connectés en série et de manière à ce que le courant alternatif d'excitation crée dans les noyaux des champs d'induction de sens opposés. Le courant d'excitation, de pulsation  $\omega$ , porte les noyaux à saturation deux fois par cycle ; la variation de l'induction magnétique dans les noyaux suit la courbe du cycle d'hystérésis.

A un instant donné, le champ magnétique d'excitation s'ajoute au champ magnétique terrestre pour l'un des noyaux tandis qu'il est de sens opposés pour l'autre noyau.

$$\mathbf{B1} = \mathbf{Be} (i(t)) + \mathbf{Bo} \quad (3.14a)$$

$$\mathbf{B2} = -\mathbf{Be} (i(t)) + \mathbf{Bo} \quad (3.14b)$$

Le cycle d'hystérésis du matériau magnétique est parcouru pour les quatre noyaux avec des sens de rotation opposés entraînant de ce fait la saturation des noyaux 1 et 4 au cours de la première demi-période du courant d'excitation et des noyaux 2 et 3 au cours de la deuxième demi-période. La tension  $u(t)$  recueillie aux bornes du bobinage de détection est proportionnelle à la différence des variations de flux apparaissant dans les noyaux et vérifie, d'après les relations (3.13) et (3.14), la relation (3.15) suivante :

$$u(t) = -NS\vec{e}s \frac{d}{dt} \sum_1^4 (\mu_n(H_n) \vec{H}_n) \quad (3.15)$$

où  $n = 1, 2, 3, 4$  pour les sondes d'un axe donné. En développant (3.15) nous obtenons :

$$u(t) = -NS\vec{e}s \sum \frac{d}{dt} (\mu_n(H_n) \vec{H}_n) \quad (3.16)$$

avec

$$\frac{d}{dt} (\mu_n(H_n) \vec{H}_n) = \left( \mu_n(H_n) + \frac{d}{dH} \mu_n(H_n) \right) \frac{d}{dt} \vec{H}_n \quad (3.17)$$

En première approximation, nous avons adopté les hypothèses simplificatrices (3.18) suivantes en supposant la bobine isotrope :

$$\| \mathbf{H}_o \| \ll \| \mathbf{H}_e \| \quad (3.18a)$$

$$\mu_n(-H) = \mu_n(H) \quad (3.18b)$$

Le développement limité de  $\mu_n(H)$  d'ordre 1 dans le voisinage immédiat de  $H_e$  s'écrit

$$\mu_n(H_n) = \mu_e + s_n \left( \frac{d\mu_e}{dH} \right)_{H=H_e} H_e \quad (3.19)$$

Avec  $s_n = 1$  pour  $n=1,4$  et  $s_n = -1$  pour  $n=2,3$

En tenant compte de (3.19), le calcul de  $\frac{d\mu_n(H_n)}{dH_n}$  donne

$$\frac{d\mu_n(H_n)}{dH_n} = (1 + s_n) \frac{d\mu_e}{dH_e} + s_n \frac{d^2\mu_e(H_e)}{dH_e^2} H_e \quad (3.20)$$

En remplaçant  $\mu_n(H)$  et  $d\mu_n(H)/dH$  par leurs valeurs obtenues dans les relations (3.19) et (3.20), l'équation (3.17) devient :

$$\frac{d}{dt}(\mu_n(H_n)\vec{H}_n) = \left(\mu_e + (s_n H_e + (1 + s_n)H_n) \frac{d\mu_e(H_e)}{dH_e} + s_n H_e H_n \frac{d^2\mu_e(H_e)}{d^2H_e}\right) \left(\frac{d\vec{H}_n}{dt}\right) \quad (3.21)$$

En remarquant que

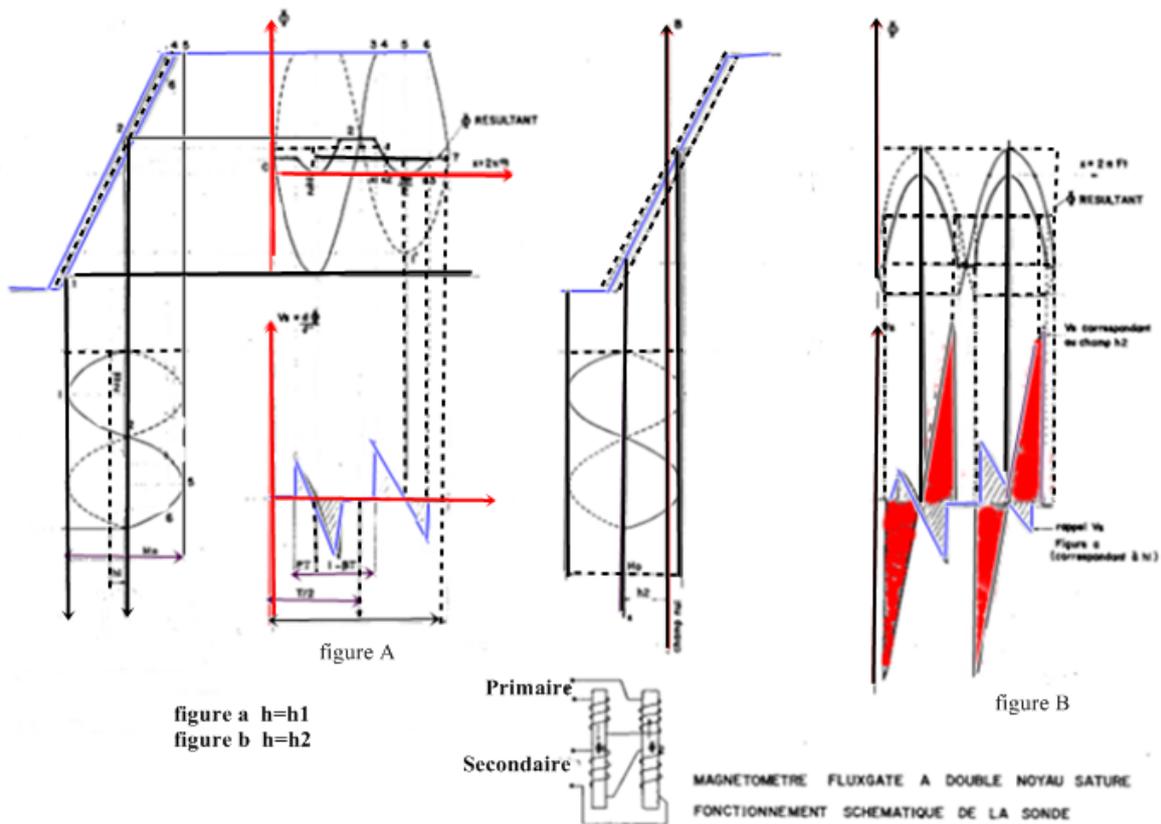
$$\vec{H}_n = s_n N_e i(t) \vec{e}_s + \vec{H}_0 \quad (3.22)$$

où  $N_e$  représente le nombre de spires de la bobine d'excitation et  $i(t)$  le courant alternatif circulant dans ces spires, les relations (3.16), (3.21) et (3.22) donnent

$$u(t) = -NSN_e \frac{di(t)}{dt} \left[ 4N_e i(t) + 2H_0 \left( \left( \frac{d\mu_e}{dH} \right)_{H=H_e} + 2H_e \left( \frac{d^2\mu_e}{dH^2} \right)_{H=H_e} \right) \right] \quad (3.23)$$

Compte tenu du fait que  $\sum s_n = 0$  et que  $s_n^2 = 1$  pour tout  $n = 1, 2, 3, 4$ .

La relation (3.23) montre clairement que la tension aux bornes de la bobine de détection est proportionnelle à l'intensité du champ superposé et que sa phase reflète le signe de ce champ. Les graphes de la **Figure 3.3** illustrent les différents signaux véhiculés par les bobines. Pour améliorer la sensibilité de la sonde fluxgate, on augmente le nombre de tours des deux bobines d'excitation ou son diamètre. Le signal de sortie est présent lorsque la perméabilité change et il est proportionnel à l'asymétrie induite par le champ magnétique externe. Le signe est déterminé par la direction du courant, l'orientation du champ externe et la transition de saturation de la bobine. Pour augmenter la gamme et la linéarité, on peut générer un courant de compensation dans la bobine de détection. Cette compensation élimine la partie principale du champ superposé et permet à la sonde de fonctionner dans les conditions normales.



**Figure 3.3** : Les différents signaux observés dans les bobines de la sonde.

La **Figure 3.2** montre clairement l'apparition d'une onde de période double de la fréquence d'excitation dont la phase relative par rapport au signal d'excitation s'inverse lorsque le champ auquel est soumise cette sonde change de sens et dont l'amplitude est fonction de l'intensité de ce champ. L'analyse harmonique appliquée à cette forme d'onde montre que l'amplitude des harmoniques paires décroît avec leur rang. On peut exprimer cette onde de manière simplifiée par la relation (3.24):

$$u(t) = -K \omega \sqrt{2} I \cos(\omega t) [H_0 + 2\sqrt{2} \cdot N_e \cdot I \sin(\omega t)] \quad (3.24)$$

K facteur géométrique des bobines,

$H_0$  champ à mesurer,

Cette expression simplifiée de  $u(t)$  nous a permis de procéder à une simulation numérique pour comprendre les comportements et les morphologies des signaux de sortie des différents étages de notre dispositif électronique.

En résumé, le signal harmonique apparaissant aux bornes du bobinage détecteur ressemble à un signal modulé en amplitude et en phase. L'amplitude est proportionnelle à l'intensité du champ magnétique auquel est soumise la sonde. Sa phase s'inverse lorsque le sens du champ change.

### **3. Structure de base d'un capteur fluxgate**

Une sonde fluxgate est en général composée de deux bobines : une bobine d'excitation et une bobine de détection. La sonde est orientée perpendiculairement au champ à mesurer. La bobine d'excitation sert à équilibrer le champ magnétique traversant la bobine de détection afin d'éviter le phénomène d'induction. Dans ce cas, les deux enroulements sont placés sur les mêmes noyaux ferromagnétiques. La bobine d'excitation est alimentée par un courant alternatif. La bobine de détection détecte le champ magnétique via l'autre bobine pour induire un courant.

#### **3.1 Sensibilité des sondes fluxgates**

La fréquence d'excitation et les dimensions de la bobine sont les paramètres influents sur les sondes fluxgates

##### **\* Fréquence d'excitation**

La tension de sortie de la bobine de détection dépend de l'intensité du champ magnétique détecté et de la fréquence d'excitation. Elle est sensible à la variation du champ magnétique délivré par la bobine d'excitation. La bobine d'excitation est alimentée par un courant alternatif sinusoïdal ou rectangulaire. Ce type de signal assure la stabilité du champ vu par la bobine de détection. Pour les très faibles fréquences, inférieure à 20Hz, le champ de compensation reste stable, mais la sensibilité de la sonde fluxgate

diminue. L'excitation à haute fréquence entraîne une meilleure variation du champ d'excitation et une bonne précision pour le champ résiduel.

#### **\* Dimension de la bobine de détection**

La dimension de la bobine de détection rend compte de la sensibilité des sondes fluxgates. En effet, selon la loi de BIOT et SAVART, le champ magnétique produit par une spire traversée par un courant d'intensité  $I$  dépend de la surface de la spire, donc de son rayon. Si le rayon de la bobine de détection est élevé, alors la variation d'une faible quantité du champ magnétique externe n'a aucune influence devant sa grande surface. Plus la surface de la bobine de détection est petite, plus sa sensibilité augmente.

#### **\* Environnement magnétique de la sonde**

La sonde fluxgate est orientée dans la direction perpendiculaire à celle de du champ magnétique à mesurer afin d'éviter la saturation de la sonde. Les autres champs sont pris en compte dans l'erreur de sonde  $E_s$ .

### **3.2 Electronique des sondes**

Un capteur fluxgate comprend la sonde à saturation et son électronique associée. On affecte à la sonde une carte spécifique regroupant la fonction mesure et la fonction compensation dont la valeur est modifiable via arduino ou un programme élaboré sur un PC. Le circuit de compensation est nécessaire lorsque les champs à mesurer sont de valeurs supérieures à 500 nT. Chaque carte est composée de :

- un générateur d'excitation du noyau de la sonde. Il utilise le signal d'un oscillateur à quartz après division de fréquence et mise en forme pseudo-sinusoïdale. Un étage pilote permet de doser le niveau du signal à l'entrée de l'étage de puissance qui délivre le courant d'excitation de la sonde par l'intermédiaire d'un transformateur.

- un générateur de signaux de référence de phase. Il délivre au détecteur synchrone du signal d'erreur quatre signaux logiques de commande respectivement en phase, en opposition de phase, en quadrature à + et – 90° avec ce signal d'erreur à la fréquence  $2f$  provenant de la sonde. Pour assurer leur correspondance d'ensemble avec la phase du signal d'erreur, ce générateur est synchronisé soit par l'oscillateur lui-même après division, soit par le comparateur branché aux bornes du secondaire du transformateur d'excitation.

- un amplificateur d'erreur. Cet amplificateur comporte un filtrage actif Passe-Bande à la fréquence  $2f$  (3 kHz), un détecteur synchrone et un étage continu bouclé sur l'enroulement de contre-réaction de la sonde par l'intermédiaire d'une résistance et d'un potentiomètre servant à ajuster le facteur d'échelle du magnétomètre.

- un générateur de courant de compensation. Il délivre à l'enroulement de compensation de la sonde un courant continu régulé proportionnel

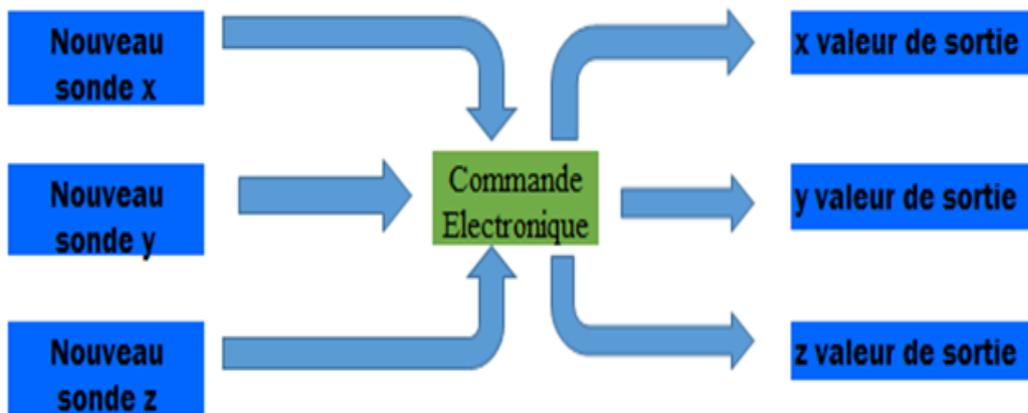
\* d'une part à la source de tension de référence mise à niveau par un étage inverseur,

\* et d'autre part à la valeur du code de commande d'un convertisseur D/A. La compensation peut être inhibée moyennant l'application d'un signal de commande. L'étage qui suit le convertisseur assure la régulation du courant de compensation. La valeur du champ compensé, fournie par un PC ou l'arduino, est possible pour les valeurs comprises entre – 40000 nT à +50000 nT.

La conception et la réalisation du matériel reposent sur les considérations théoriques précédentes. En effet, non seulement, on doit maîtriser les techniques et les méthodes d'acquisition des informations, mais on doit être en mesure de traduire ces informations sous formes électriques ou optiques que nous sommes capables d'exploiter. Ce matériel unique utilise six sondes courtes à saturation montées suivant trois axes orthonormés. Ce bloc est libre de se mouvoir dans le plan horizontal. On peut fixer les sondes horizontales sur support tournant, mobile dans un secteur de 0 à 360 degrés d'arc. La mise en service du capteur trifluxgate peut être différentes selon que chaque carte est

autonome ou non. C'est ainsi que dans l'ensemble, on pourra souhaiter avoir une horloge commune et une référence de tension commune.

La partie électronique est munie d'un oscillateur à quartz à haute fréquence de l'ordre de 200 kHz. Un capteur trifluxgate mesure simultanément les trois composantes du champ selon les orientations des sondes. Le boîtier délivre trois valeurs électriques correspondant au champ mesuré et compensé. La **Figure 3.4** montre le diagramme de traitement des données électriques issues des sondes du capteur trifluxgate. La commande électronique joue le rôle de convertisseur analogique numérique. Elle envoie les résultats des calculs pour leurs visualisations.



**Figure 3.4** : Diagramme de traitement électronique de données issues des sondes

Pour plus d'efficacité, nous utilisons six sondes fluxgate placées deux à deux diamétralement opposés sur chacun des axes d'un système orthonormé. Un circuit électronique sert à contrôler et à traiter les valeurs électriques via ces six sondes fluxgates. Il calcule le module du champ magnétique détecté, donne le sens ainsi que sa direction. Pour un capteur trifluxgate à six bobines de détection, ce circuit électrique compare les valeurs données deux détecteurs parallèles disposés un même axe. Il rejette la valeur inférieure tandis qu'il prend la valeur supérieure comme une composante cartésienne de coordonnée vectorielle du champ détecté.

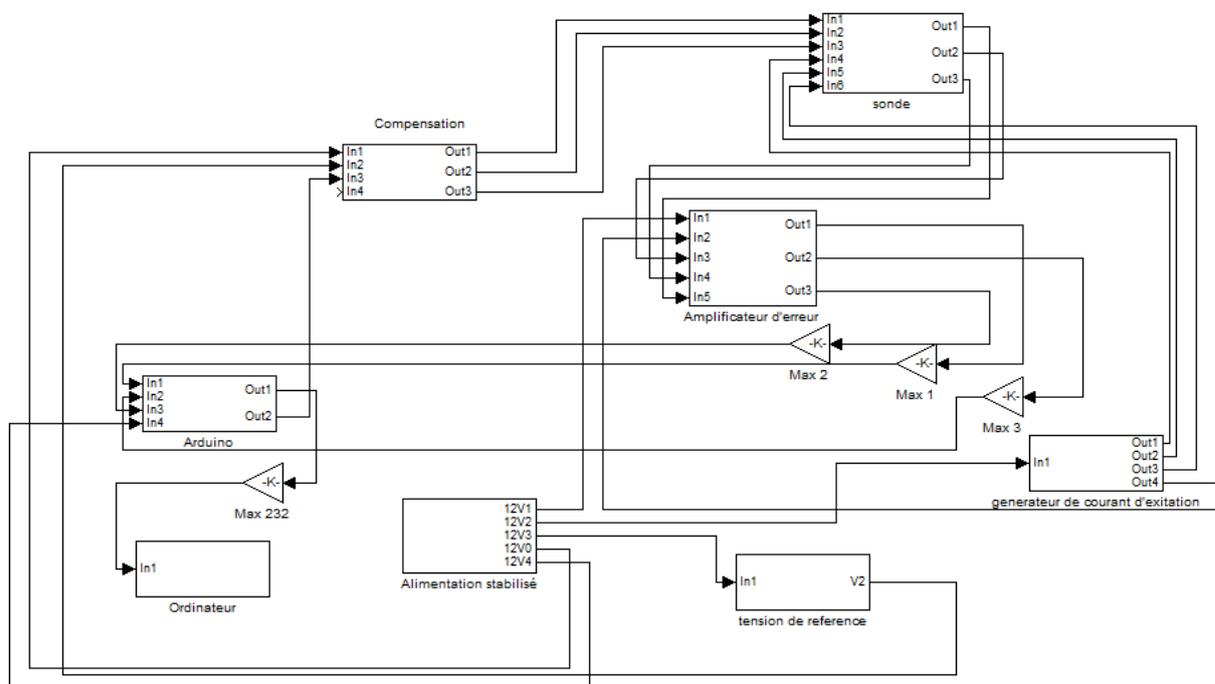
Le signal d'excitation dépend de l'enroulement de la bobine d'excitation. On utilise le courant alternatif lorsque l'enroulement de la bobine comporte des enroulements

continus qui se termine jusqu'au bout du premier enroulement. Ce type d'alimentation peut équilibrer le champ magnétique au sein de la bobine d'excitation. La forme du signal de sortie est identique à celle du signal d'excitation. Un signal carré à haute fréquence est compatible à une bobine d'excitation à double enroulement de façon à avoir un signal carré à la sortie. Ce type de bobine d'excitation comprend deux bobines identiques disposées diamétralement opposé. Le sens d'enroulement de ces deux bobines est réglé pour avoir deux champs magnétiques opposés Ces deux bobines sont excitées par un seul circuit électronique. La figure 3.4 représente le diagramme de la bobine d'excitation à double enroulement commandée par un seul circuit électronique. Le circuit électronique d'excitation donne deux signaux d'état complémentaire.

## Chapitre 4

### RÉALISATION D'UN CAPTEUR TRIFLUXGATE

Le capteur trifluxgate fonctionne suivant le principe des noyaux saturés fluxgates. Les noyaux de ses sondes sont portés à saturation au moyen de bobinages d'excitation alimentés à partir d'un générateur de courant alternatif de fréquence  $f = 1,5 \text{ kHz}$  de telle sorte que l'induction dans chacun des noyaux cylindriques en parallèles soit en opposition de phase. Un champ extérieur superposé provoque pour chacun des noyaux une dissymétrie d'alternance dont les effets s'ajoutent. Cette dissymétrie est caractérisée par la présence de courant induit d'harmoniques pairs dans le bobinage de détection. L'harmonique de rang deux est en fait le seul utilisé. La **Figure 4.1** schématise les différents traitements subis par le signal issu de la sonde de détection.



**Figure 4.1** : Schéma synoptique du capteur trifluxgate

Le signal de détection, issu de la sonde, préalablement filtré dans la bande  $2f$  (3 kHz), est amplifié par un amplificateur sélectif, puis traité dans un démodulateur lequel est polarisé par un signal issu du générateur de fréquence  $f$  (1,5 kHz). Le signal de sortie du démodulateur dont l'amplitude et la phase sont fonctions de l'intensité et le signe du champ superposé au niveau de la sonde, est appliqué à l'entrée d'un amplificateur continu qui ferme la boucle de contre-réaction sur des bobinages disposés autour des noyaux des sondes lesquels sont en faits commun à l'excitation et à la contre-réaction. La valeur de la résistance du circuit de contre-réaction détermine le rapport « tension de sortie sur le champ appliqué » (5V pour 1000 nT ou 2000nT).

Les ampères-tours du solénoïde de compensation permanente parcouru par un courant continu à très haute stabilité compensent la valeur moyenne de la composante considérée du champ magnétique mesuré jusqu'au plus proche multiple entier de 100 nT.

## 1. Structure des sondes

Chaque sonde est formée d'enroulements autour de deux noyaux ferromagnétiques cylindriques. La **Figure 4.2** montre un exemple de géométries possibles. Le matériau constituant le noyau doit avoir une courbe d'hystérésis permettant de traduire une forte saturation de l'induction lorsque le champ magnétique dépasse un certain seuil, fixé à 500 nT.



**Figure 4.2** : Enroulements des bobines d'excitation et de mesure.

## 1.1 Bobine d'excitation

La bobine d'excitation forme l'élément sensible de la sonde. Ses deux enroulements, mécaniquement colinéaires, sont connectés en série pour le courant et en opposition pour l'induction résultante. La tension alternative de fréquence 1,5 kHz appliquée aux bornes de cet ensemble fournit un courant d'excitation qui à son tour produit un champ magnétique. Les impulsions de courant dues à la brusque rupture d'impédance prennent naissance dès que les noyaux passent à saturation. Ces impulsions de courant s'annulent en absence de champ superposé dans l'axe de la sonde. L'induction correspondante subit une saturation, symétrique par rapport à zéro.

Lorsqu'un champ magnétique extérieur s'ajoute aux champs d'excitation, la saturation des noyaux n'est plus symétrique et la tension est déformée. Cette déformation est en général visible sur l'amplitude des harmoniques paires de la tension. L'harmonique deux sera le seul utilisé, car sa phase et son amplitude varient selon le signe et l'intensité du champ superposé suivant l'axe de la sonde. Le noyau de la bobine canalise les lignes de champ magnétique le long de l'axe de la sonde

## 1.2 Bobine de détection et de compensation

Un champ magnétique externe superposé induit dans la bobine de détection un courant dont l'intensité est proportionnelle au champ observé. La bobine de détection utilise le noyau de la bobine d'excitation. La bobine d'excitation assure la stabilisation du champ magnétique. Un courant induit circule dans l'enroulement de la bobine de détection quand il y a variation de champ magnétique selon le même principe qu'un transformateur fonctionnant en courant alternatif.

Pour les mesures des angles, la sonde se trouve dans la direction de faible champ, et ces mesures ne nécessitent pas d'autres conditions particulières. Pour les composantes, les sondes doivent être placées dans la direction de la composante à mesurer et elles sont vites, portées à saturation. Pour permettre à la sonde de fonctionner correctement, il

faut compenser les parties principales du champ en injectant dans la bobine de détection un courant continu régulé très stable. Toute variation de ce courant, même faible provoque un déséquilibre de la bobine d'excitation, donc la mesure proprement dite.

## 2. Les composants de base du capteur trifluxgate

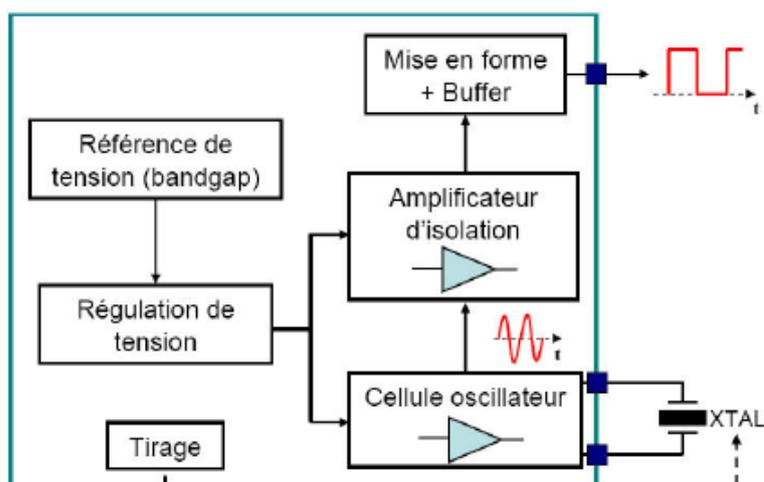
### 2.1 Oscillateur à quartz

L'oscillateur à quartz reste le principal dispositif permettant de réaliser des bases de temps de très haute stabilité dans des diverses applications et joue aussi un rôle non négligeable dans le domaine des capteurs (température, pression...). Cependant, les tendances du marché imposent constamment de nouveaux challenges techniques en groupant plusieurs fonctionnalités dans un seul dispositif. Le développement de ce type de circuit est appelé ASIC (Application Specific Integrated Circuits) du fait de son appartenance à une application spécifique. En fonction du type d'applications, il est parfois utile de recalibrer la fréquence d'oscillation afin de compenser les dispersions dues à la fabrication. Cette opération est le plus souvent réalisée par ajout d'une capacité supplémentaire en série avec le résonateur pour "tirer vers le haut, la fréquence. Cette capacité, que l'on nomme communément capacité de tirage, peut-être de valeur fixe ou commandée par l'intermédiaire d'une tension statique ou dynamique (cas des boucles à verrouillage de phase, besoins d'une modulation de fréquence...).

Les fonctions, illustrées sur la **Figure 4.2** sous forme de synoptique, ont été intégrées pour compléter celle de l'oscillateur à quartz. Elles sont très utiles pour la génération des signaux d'excitation de nos sondes. Ces fonctions consistent à :

- fournir au système une tension de polarisation stable avec une cellule oscillateur de type Colpitts (ou équivalent),
- limiter le niveau du signal par le biais d'un amplificateur d'isolation précédant un étage buffer,
- mettre en forme le signal et garantir l'adaptation de l'oscillateur à une charge et à des niveaux de tension spécifiques (HCMOS, 50 W, TTL...),

– permettre un tirage électronique de la fréquence à l'aide d'une structure adaptée.



**Figure 4.3** : Synoptique d'un oscillateur intégré dans un ASIC

Un oscillateur sinusoïdal de tension est obtenu en insérant une boucle de réaction avec une entrée nulle (**Figure 4.3**) dans le dispositif. A la fréquence de résonance de l'oscillateur, une cellule de réaction assure la stabilité de l'ensemble si le gain de l'amplificateur est élevé. Ce dispositif fournit un signal carré de fréquence fondamentale 3kHz.

## 2.2 Diviseur de fréquence

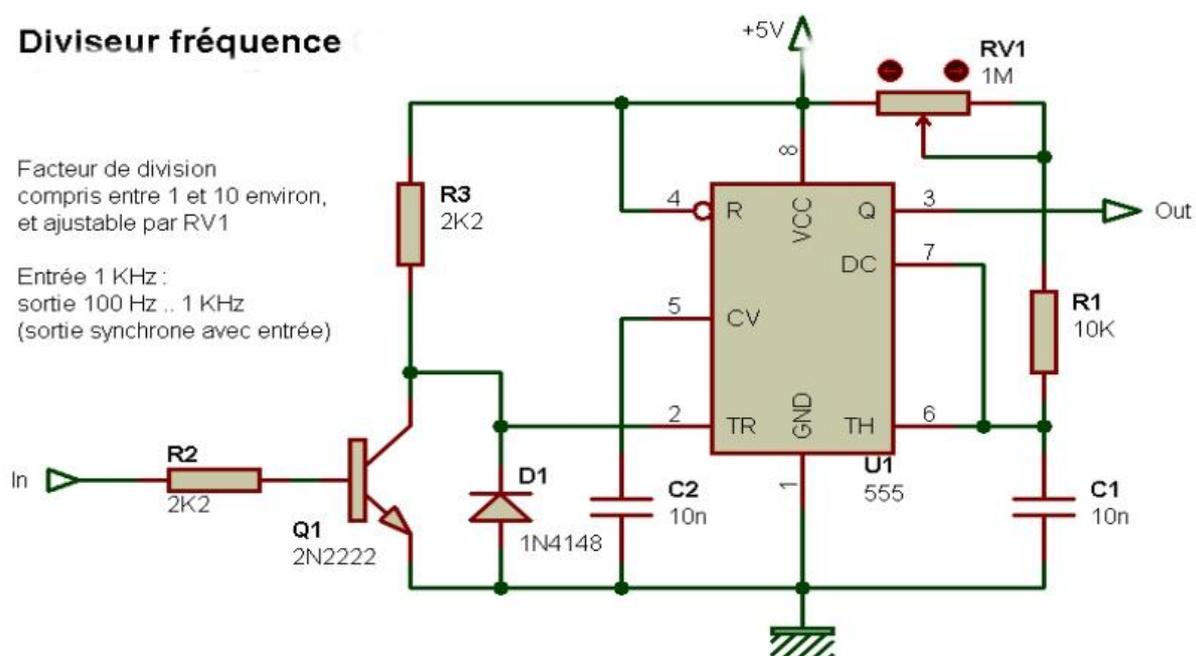
### Principe de base

Le diviseur de fréquence repose sur l'emploi d'un monostable non-redéclanchable, basé sur un NE554. Le NE554 est câblé de telle sorte qu'il délivre une impulsion de sortie positive quand il reçoit une impulsion de commande "négative" sur son entrée 2 Trigger. Le transistor Q1 permet un déclenchement sur un front montant, puisqu'il est simplement monté en commutateur / inverseur. La durée de l'impulsion délivrée par le NE554 dépend de la valeur des composants C1 et R1 + RV1. Si le curseur de RV1 est positionné côté +5V (résistance RV1 minimale), la durée de l'impulsion de sortie est de

l'ordre de 0,5 ms. Si le curseur de RV1 est positionné côté R1 (résistance RV1 maximale), la durée de l'impulsion est de l'ordre de 11 ms.

### Analyse avec un signal fixe d'entrée de 3 KHz

On retrouve sur la sortie Out d'un diviseur de fréquence, un signal dont la fréquence est exactement la moitié de celle du signal appliqué sur l'entrée In. Si le signal d'entrée est à 3 kHz, le signal de sortie est à 1,5 kHz. Sur la **Figure 4.4**, on observe un diviseur par deux réalisé avec un NE554.

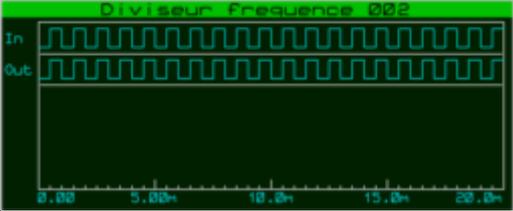
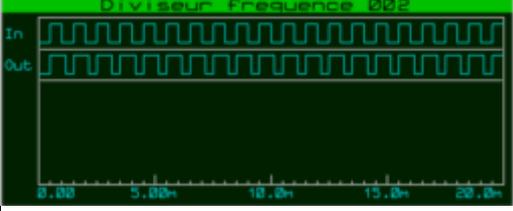
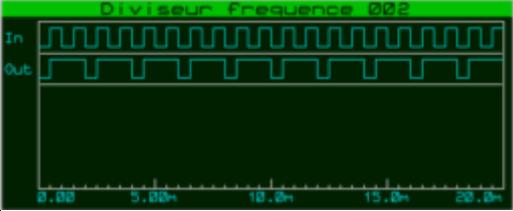
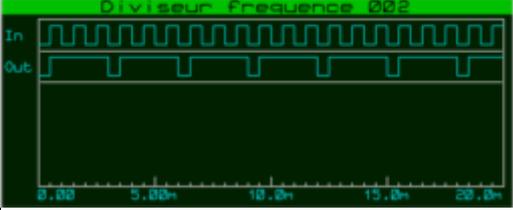


**Figure 4.4** : Diviseur de fréquence à base de NE555

En mettant plusieurs diviseurs de ce type en cascade, on peut obtenir un facteur de division de 2 puissances  $n$ ,  $n$  étant le nombre de NE554. On obtient un facteur de division par 16 (2 puissance 4).

A titre d'exemples et d'illustrations, le tableau 4.1 suivant donne les résultats simulés effectués avec le circuit présenté sur la **Figure 4.4**. Il met surtout en évidence le temps de déclenchement de la division en fréquence. Pour chaque cas, nous donnons une interprétation sommaire de la comparaison du signal observé en entrée et à la sortie du circuit diviseur de fréquence.

Tableau 4.1 : Exemples et illustration d'un signal divisé en fréquence.

Signaux obtenus	Explications
	<p>RV1 au minimum de valeur ( curseur vers +5 V)</p> <p>Les impulsions de sortie durent 0,5 ms, et sont déclenchées toutes les 0,5 ms puisque le signal d'entrée est de 1 KHz. Résultat : la fréquence du signal de sortie est rigoureusement identique à celle du signal d'entrée.</p>
	<p>RV1 à 5 % de sa valeur totale ( curseur proche du +5 V)</p> <p>Les impulsions de sortie durent 0,65 ms, et sont toujours déclenchées toutes les ms puisque le signal d'entrée est toujours de 1 KHz. Résultat : fréquence de sortie identique à la fréquence d'entrée, mais cette fois avec un rapport cyclique différent pour le signal de sortie.</p>
	<p>RV1 à 10 % de sa valeur totale ( curseur proche du +5 V)</p> <p>Les impulsions de sortie durent désormais 1,5 ms. Comme elles durent plus longtemps que ne dure l'état haut de chaque impulsion d'entrée, certaines transitions vers l'état haut du signal d'entrée passent inaperçues. L'impulsion de sortie est déclenchée non pas pour chaque front montant du signal d'entrée, mais tous les deux fronts montants. Conséquence : la fréquence du signal de sortie est deux fois moindre que celle du signal d'entrée (500 Hz).</p>
	<p>RV1 à 20 % de sa valeur totale ( curseur proche du +5 V)</p> <p>Les impulsions de sortie durent maintenant 2,5 ms. Elles durent là aussi plus longtemps que ne dure l'état haut de chaque impulsion d'entrée, certaines transitions vers l'état haut du signal d'entrée passent inaperçues. L'impulsion de sortie est déclenchée non pas pour chaque front montant du signal d'entrée, mais tous les quatre fronts montants. Conséquence : la fréquence du signal de sortie est quatre fois moindre que celle du signal d'entrée (250 Hz).</p>

Ce tableau met en évidence que nous sommes bien en présence d'un diviseur de fréquence ajustable par potentiomètre.

### Relation de phase entre entrée et sortie

Avec ce montage, il existe une relation de phase entre le signal de sortie et le signal d'entrée. Quel que soit le facteur de division, le passage à l'état haut de la sortie correspond toujours au passage à l'état haut de l'entrée, dès l'instant où l'impulsion de sortie est au préalable retombée à zéro bien sûr.

### Niveaux d'entrée et de sortie

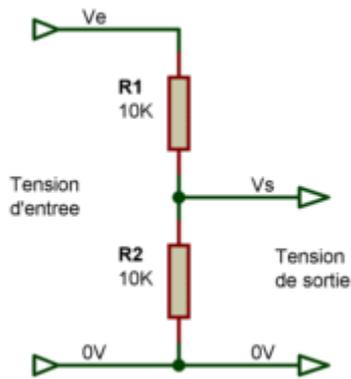
L'entrée accepte des signaux dont l'amplitude est comprise entre 1 V (en fait un peu moins) et plusieurs volts. Pour ce qui est de la sortie, l'amplitude des signaux dépend de la tension d'alimentation, puisque qu'on exploite directement la sortie du NE555.

## 2.3 Diviseur de tension

Un diviseur de tension permet de fournir une tension de sortie réduite (par exemple 5V) par rapport à sa tension d'entrée (par exemple 7V). On parle de diviseur de tension parce que la tension de sortie est une fraction de la tension d'entrée, il existe un rapport simple entre les deux valeurs. Le capteur trifluxgate utilise un diviseur de tension de type résistif. Ce type de diviseur de tension est utilisé pour générer des courants de compensation d'intensités différentes. Dans la pratique, deux résistances suffisent pour constituer un diviseur de tension. Le principe de base d'une division de tension repose sur le schéma simple suivant, qui montre sa mise en œuvre pour deux résistances R1 et R2, et où la tension de sortie Vs est obtenue à l'aide de la formule suivante :

$$V_s = V_e * \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \quad (4.1)$$

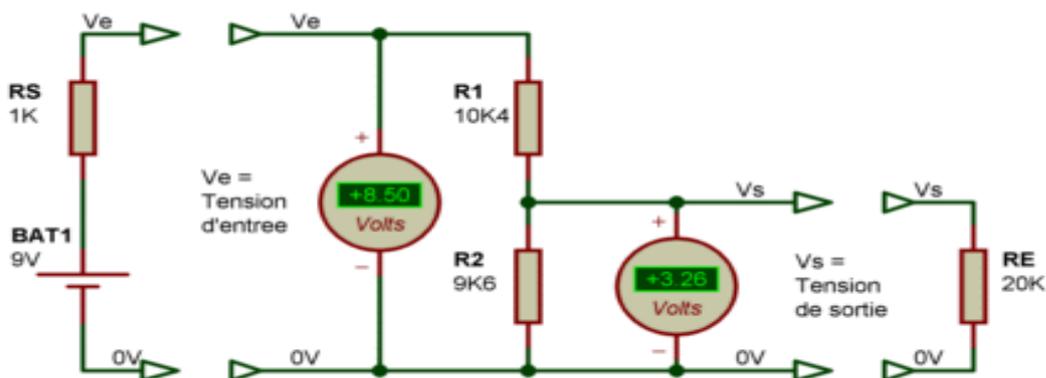
Les deux résistances R1 et R2 sont reliées en série, et on applique sur celles-ci, une tension de référence Ve. Vs la tension pour fournir l'intensité nécessaire pour compenser le champ. Si les résistances ont la même valeur ohmique, ce qui est le cas sur la **figure 4.4**, elles vont s'approprier chacune la même quantité. La tension disponible sur la résistance R2 sert à alimenter le générateur de courant.



.On obtient sur cette résistance R2 une tension de sortie  $V_s$ , qui est la tension que l'on désire obtenir à partir de la tension d'entrée  $V_e$ . Comme les deux résistances ont ici la même valeur, on récupère en sortie, une tension  $V_s$  égale à la moitié de la tension d'entrée  $V_e$ .

**Figure 4.5** : Diviseur de tension

Dans la pratique, on veut obtenir une tension de 4.50V à partir d'une tension de 9.00V. La source de tension  $V_e$  possède une forte résistance interne  $R_S$  de 1 Kohms, les résistances  $R_1$  et  $R_2$  ne font pas parfaitement 10 Kohms (ce sont des modèles ayant une tolérance de 5%), et un circuit "utilisateur" qui présente une résistance d'entrée  $R_E$  de 20 Kohms. La **Figure 4.6** présente les résultats simulés d'une expérience de laboratoire.



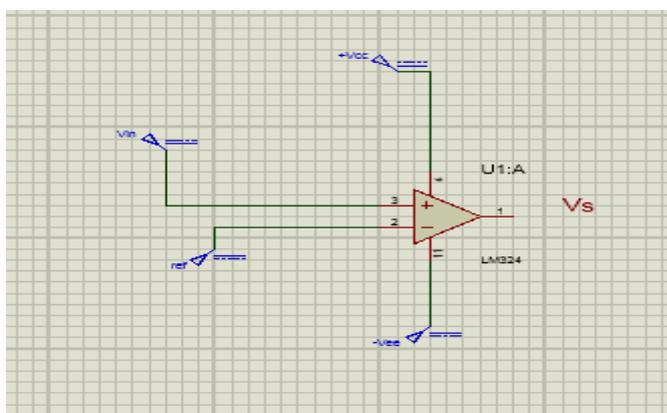
**Figure 4.6** : Résultats d'une expérience de laboratoire.

On constate que les 4.50V attendus ne font en fait que 3.26V. A quoi cela est-il dû ? Au simple fait que la résistance "parasite"  $R_S$  est mise en série avec  $R_1$ , et que la résistance "parasite"  $R_E$  est mise en parallèle avec  $R_2$ . C'est comme si on disposait d'un pont diviseur avec une résistance  $R_1$  de 11.4 Kohms et une résistance  $R_2$  de 6.5 Kohms.

D'après ces constatations, nous sommes obligés de tenir compte des circuits en amont et en aval du diviseur de tension.

## 2.4 Compateur de tension

L'étage de comparaison consiste à comparer le signal d'entrée à une tension de référence. Nous avons utilisé un compateur de tension intégrée qui ; pour une différence de tension donnée entre les deux entrées, va fournir une tension logique égale a « 1 » ou « 0 ».



**Figure 4.7** : Amplificateur opérationnel monté en boucle ouverte

### Principe

Théoriquement, pour un amplificateur monté en boucle ouverte à un gain infini (**Figure 16**), la tension de sortie est donnée par la relation :

$$V_S = A_0 (V_+ - V_-) \quad (4.2)$$

Avec  $V_+ = V_{in}$  et  $V_- = V_{ref}$ . Une petite différence entre  $V_{in}$  et  $V_{ref}$  suffit à saturer l'amplificateur opérationnel.

Si :  $V_+ > V_-$ , donc  $V_+ - V_- = |>0$  d'où ( $V_S = A_0 \cdot |$ ) tend vers  $+\infty$  avec l'appartient à  $R^+$

Or :  $V_S = +V_{CC}$ , donc  $V_S$  tend vers  $+V_{CC}$

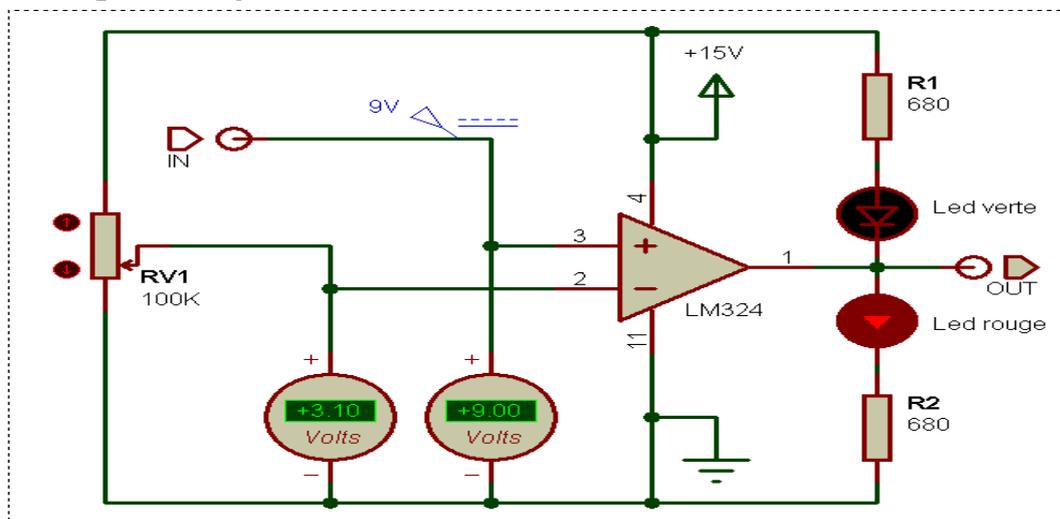
Si :  $V_+ < V_-$ , donc  $V_+ - V_- = -|<0$  d'où ( $V_S = -A_0 \cdot |$ ) tend vers  $-\infty$  avec l'appartient à  $R^+$

Or :  $V_S \geq -V_{ee}$ , donc  $V_S$  tend vers  $-V_{ee}$ .

Pour ces valeurs de sortie, l'amplificateur fonctionne en mode comparateur. Nous pouvons calculer sa fonction de transfert théorique idéal, modifiée par la lenteur de basculement et la présence d'une tension d'offset statique. Dans ce type d'application, on met à profit le gain élevé de l'AOP, et on ne laisse la sortie avoir que deux valeurs de tension possibles : les tensions max et min qu'il peut fournir. Toutes les tensions intermédiaires ne peuvent exister de façon "stable", car le gain est ici tellement important, que la moindre petite différence de tension entre les deux entrées inverseuse et non inverseuse est amplifiée à un tel point qu'elle ne peut que "buter" contre les bornes imposées par la tension d'alimentation.

Pour une différence de tension de 1 mV, alors que le gain est de 5000, la sortie va désespérément essayer d'atteindre 500 V... mais n'y arrivera évidemment pas, car l'alimentation n'est que de 12 V. Il existe plusieurs façon de câbler un AOP en comparateur de tension, mais la **figure 4.7** devrait normalement suffire pour comprendre les grandes lignes, et nous permettre ensuite d'adapter à nos besoins.

**Montage en comparateur :**



**Figure 4.8** : Amplificateur opérationnel fonctionnant en comparateur de tension

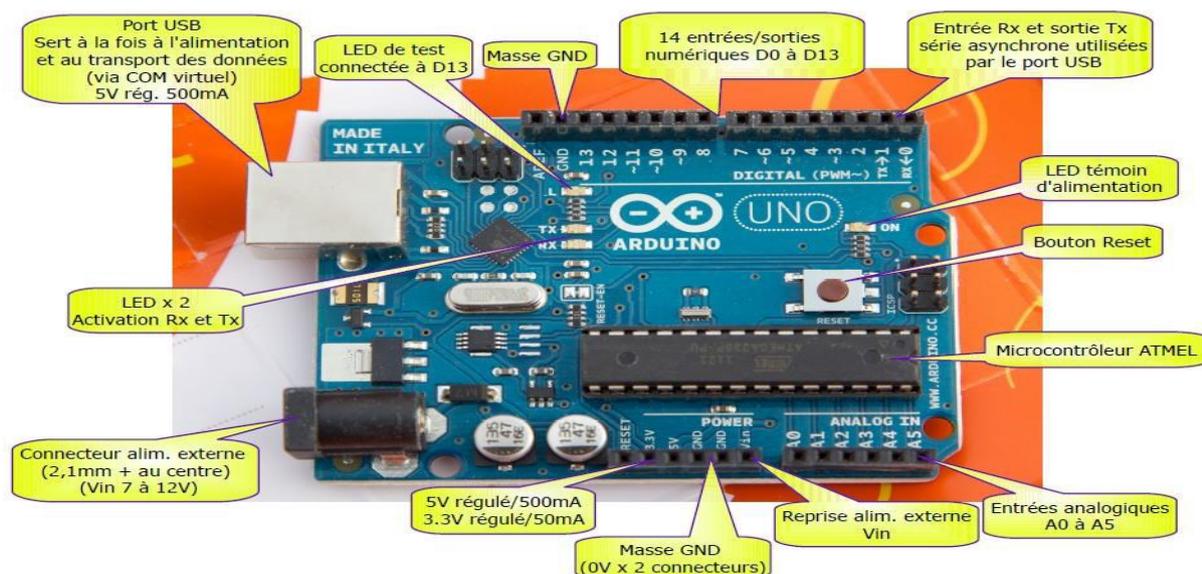
Si on peut utiliser un AOP en tant que comparateur en le faisant fonctionner en boucle ouverte (pas de réaction de la sortie vers une entrée), il n'est pas nécessaire de l'utiliser en tant qu'AOP en lui ajoutant une résistance de contre-réaction. En boucle ouverte, son

gain s'écroule et on ne peut pas le faire fonctionner à grande vitesse. Un comparateur de tension est prévu pour travailler en régime bloqué/saturé. Alors évidemment la structure de sortie de ces deux composants ne peut pas être la même. Quand on veut faire travailler un comparateur de tension à grande vitesse, mieux vaut ne pas utiliser un AOP, mais plutôt un comparateur de tension rapide (MAX961, AD790 ou LT1016 par exemple).

## 2.5 Carte arduino

Matériel libre doté d'un plan de constructions en Open Source, la carte Arduino va nous servir de relais entre les dispositifs électroniques des sondes et l'ordinateur portable. Elle est divisée en plusieurs modules distincts et dépendants. La **figure 4.8** présente l'organisation du circuit programmable avec ses modules. On peut également lui transmettre une suite logique d'instructions traduite sous la forme de script. L'exécution de ce script permet d'obtenir (virtuellement) un circuit électronique possédant quasiment le même mode de fonctionnement que le circuit électronique dédié. L'arduino assure donc :

- l'acheminement des signaux de commande de l'ordinateur vers les dispositifs électroniques des sondes,
- ou la récupération des signaux d'état et des données des dispositifs électroniques vers l'ordinateur.



**Figure 4.9** : La carte arduino

La carte Arduino s'organise de la manière suivante :

- le microcontrôleur joue le rôle de « cerveau » de la carte. Sa partie préprogrammée commande le fonctionnement général interne de la carte. La partie programmable par l'utilisateur peut transmettre un programme exécutable directement via l'ordinateur par l'intermédiaire de son port USB. Les instructions émises par l'ordinateur au microcontrôleur vont déterminer l'interaction entre la carte Arduino, ses périphériques d'entrées (broches, boutons) et de sorties (broches, leds ...). Ces instructions sont sauvegardées dans une mémoire Flash de capacité 32 KB.
- le convertisseur analogique-numérique a pour fonction de numériser les tensions analogiques issues de l'amplificateur d'erreur pour être exploitables par l'ordinateur. Le résultat de la conversion est codé sur dix bits. L'arduino utilise un convertisseur à approximation successive basée un procédé de dichotomie, ainsi, la tension d'entrée est comparée avec la sortie du convertisseur par pesées successives.
- les 14 broches numériques délivrent uniquement deux hauteurs de tensions : la tension nulle LOW (0V) et la tension HIGH (5V). Parmi elles, 6 peuvent fonctionner en mode PWM. Ces ports sont reconnaissables par leur petite « vague » inscrite à côté de la broche. Les ports 3, 5, 6, 9, 10, 11 sont compatibles en mode PWM, leur fréquence de

fonctionnement est d'environ 490Hz. La carte dispose aussi de 6 broches d'entrée analogique et deux broches faisant office de masses.

- les deux ports délivrant une tension fixe, l'un de 5V avec une très faible intensité électrique, l'autre une tension de 3.3 V.

La programmation de la carte Arduino se fait depuis l'ordinateur, à l'aide d'applications gratuites comme Java fournies avec la carte. Nous pouvons donc saisir notre script, le compiler et l'acheminer vers ses destinataires. La technique de modulation de largeur d'impulsion (PWM) facilite la transmission de ces signaux de commande ou d'état de l'ordinateur vers les dispositifs électroniques des sondes ou inversement par le biais de l'arduino.

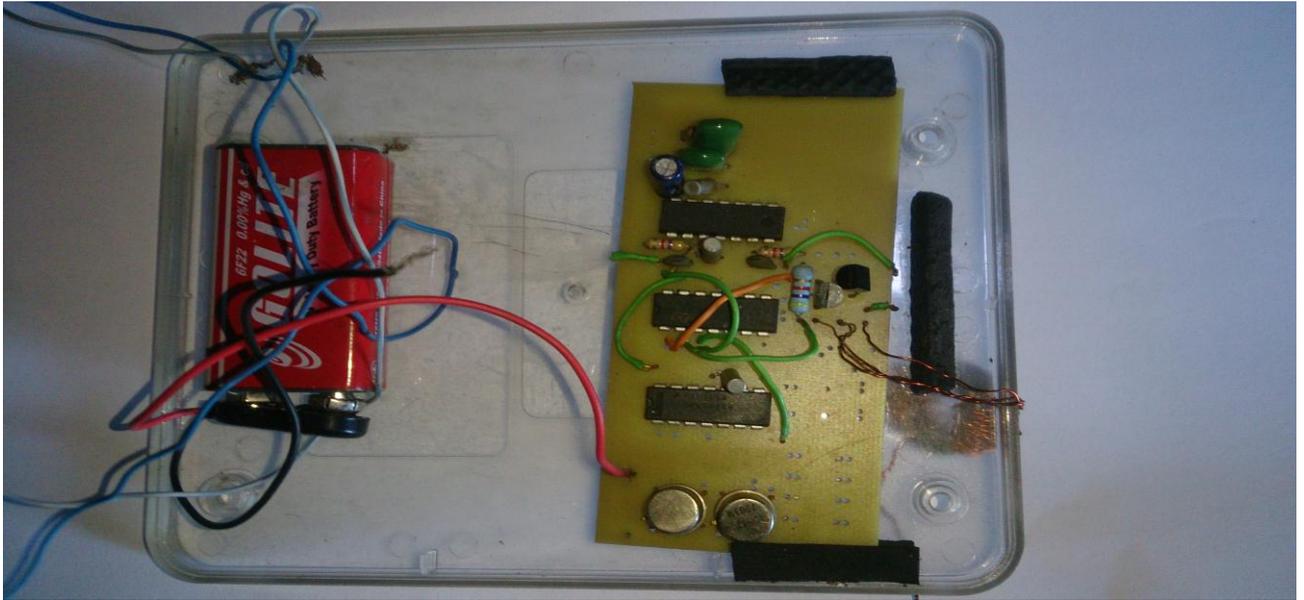
### **3. Electronique associée aux sondes fluxgates**

Ce paragraphe décrit :

- le générateur d'excitation du noyau de la sonde,
- le générateur de signaux de référence de phase,
- l'amplificateur d'erreur
- le générateur de courant de compensation
- l'ensemble des alimentations stabilisées

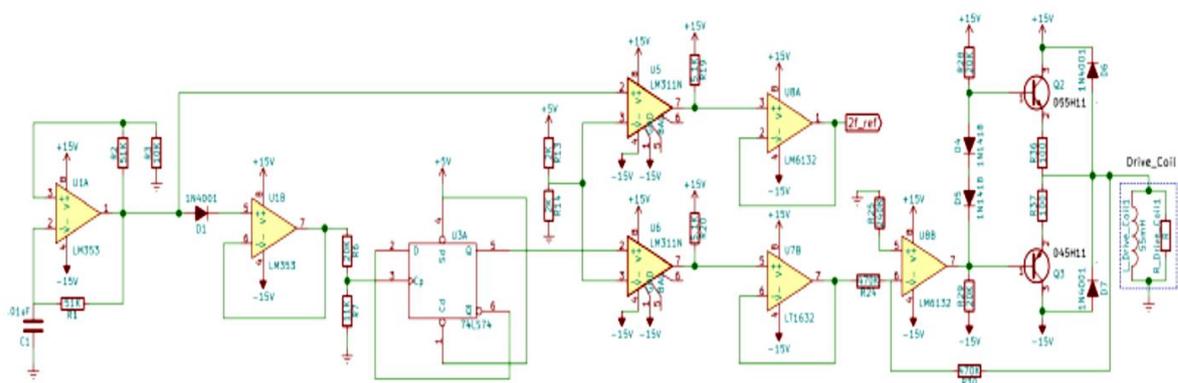
#### **3.1 Générateur d'excitation du noyau de la sonde**

Afin de réaliser la fonctionnalité correcte du capteur fluxgate, la bobine d'excitation devrait être amenée à saturation.



**Figure 4.10** : Générateur des signaux d'excitation des sondes

La **Figure 4.10** représente la photo du générateur d'excitation tout en jouant le rôle de préamplificateur des signaux alternatifs des sondes d'excitation. Les temps d'excitation sont définis à partir d'onde carrée à la fréquence  $f$  (1,5 kHz) et  $2f$  (3 kHz) ainsi que l'amplification du signal de fréquence 1,5 kHz afin de conduire les noyaux à saturation positive et négative.



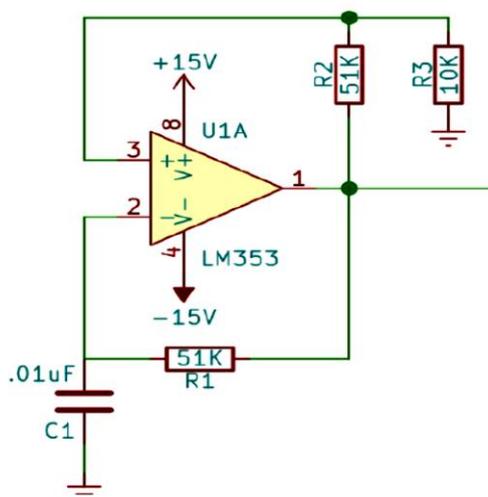
**Figure 4.11** : Schéma complet pour la synchronisation et l'excitation

La **Figure 4.11** représente l'ensemble du schéma pour le circuit de synchronisation et d'excitation. Le signal de fréquence 3 kHz a été généré en premier en utilisant un LM353 sous la configuration d'oscillateur astable. La **Figure 4.12** illustre l'oscillateur généré par un courant de forte intensité ayant une capacité de piloter des commutateurs analogiques, un comparateur et un tampon. Ensuite, la fréquence 3kHz est réduite de moitié à l'aide d'un bascule. En effet, il est plus facile de diviser la fréquence de moitié et de maintenir un cycle de service de 50% que de doubler la fréquence tout en maintenant le cycle. Cette fréquence a été calculée comme suit :

$$b = R3 / (R2 + R3) \quad (4.1a)$$

$$f = \frac{1 - \beta}{2 * R1 * C1 * \ln(1 + \beta)} \quad (4.1b)$$

Les valeurs des résistances et des condensateurs ont été choisies pour obtenir une onde carrée de sortie avec une fréquence 3 kHz.



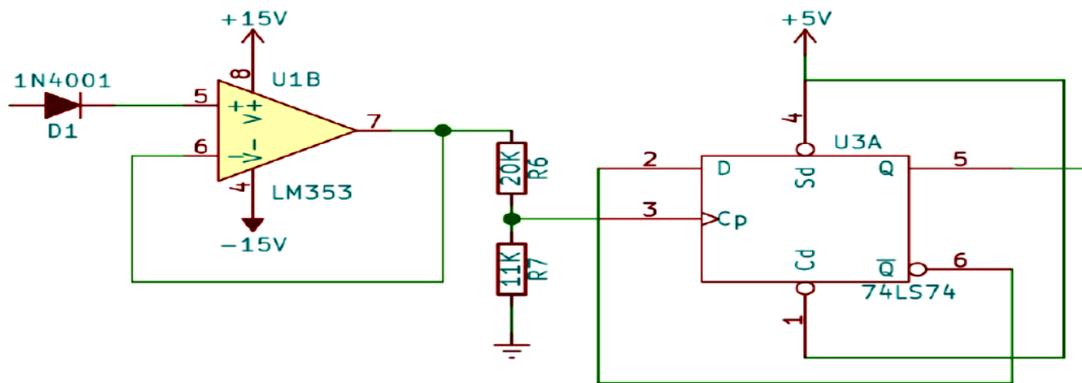
**Figure 4.12** : Oscillateur astable

La sortie de l'oscillateur astable est également utilisée pour alimenter le circuit de division et le circuit de génération du signal de référence.

### 3.2 Générateur de signaux de référence de phase

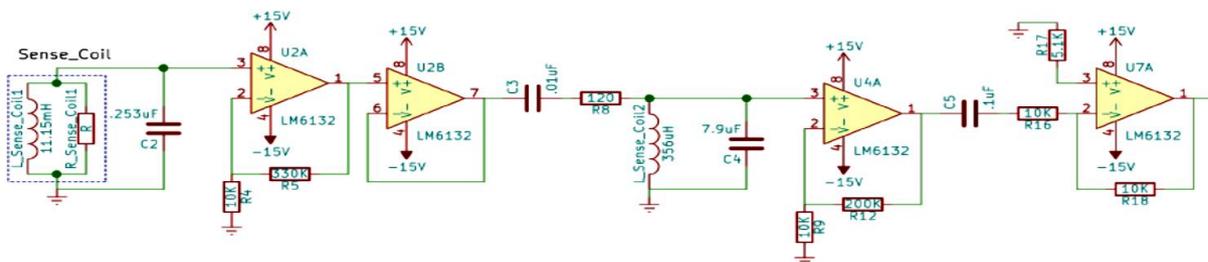
Un signal de référence à la fréquence 3 kHz, est nécessaire pour la démodulation de phase et la détermination correcte de la phase du signal de la bobine de détection. La sortie de l'oscillateur astable fournit un carré onde qui fonctionne de +15V à -15V. Pour permettre à la bascule de fonctionner dans la gamme de tension 0V et 5V, quelques étages intermédiaires ont été ajoutés pour atteindre la conversion du niveau de tension. Une diode et un tampon permettent de restreindre la gamme de fonctionnement de +15V à 0V. Un diviseur de tension réduit la gamme entre +5V à 0V. Dans cette gamme, l'onde carrée de fréquence 3 kHz est ensuite introduite dans un flip-D configuré de telle sorte que l'entrée D est liée à la sortie Q-bar. Enfin, l'onde carrée de fréquence 1,5 kHz, pouvant générer environ 50 mA, a été produite pour entraîner le noyau toroïdal à saturation.

Les niveaux de l'onde carrée sortant de la bascule a été ensuite reconvertie en +15V et -15V puisque le noyau est censé être conduit dans un état de saturation avec des champs positif et négatif. Les ondes carrées positives et négatives sont ensuite introduites dans un tampon, puis amplifiées. La **Figure 4.13** représente l'étage d'amplification, un amplificateur de classe AB, ou amplificateur de push-pull, avec rétroaction permettant d'éliminer toute distorsion introduite. Le signal de sortie finale est acheminé directement dans les enroulements d'excitation toroïdale. Les enroulements d'excitation sont placés sur une embase de verre métallique dont la perméabilité relative était très élevée, de l'ordre de 20 000. Aussi, était-il beaucoup plus facile de conduire à saturation le noyau de ferrite. La bobine d'excitation avait besoin d'un courant de l'ordre de 50 mA.



**Figure 4.13** : Génération des signaux 1 kHz et 3kHz

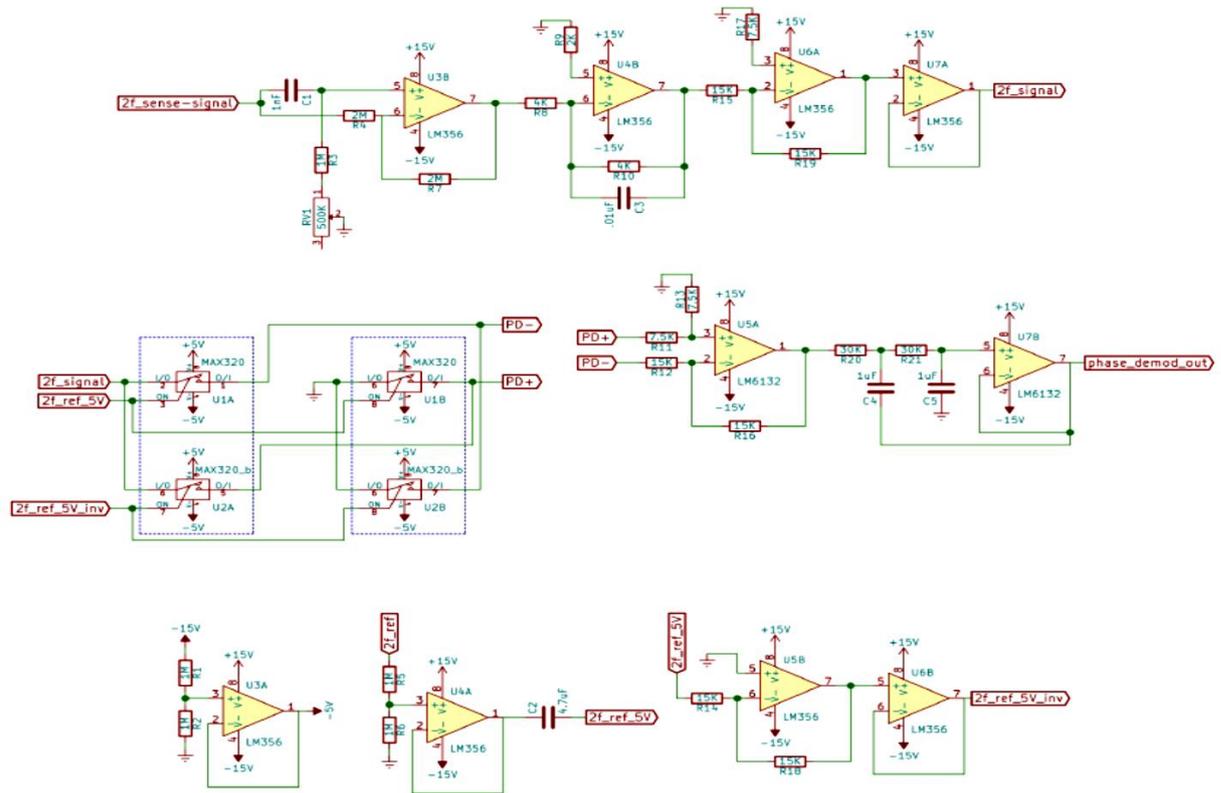
La forme d'onde de sortie à travers la bobine d'excitation est obtenue à partir du circuit représenté sur la **Figure 4.14**. Lorsque la vague carrée s'effondre pendant un certain temps, le noyau est porté à saturation. Cet évanouissement se produit lorsque la perméabilité du noyau toroïdal s'annule, tout comme l'inductance. Dans ces conditions, le noyau se comporte comme une résistance de fuite. Cette résistance est faible comparée à celle de la résistance de sortie du signal de commande de l'amplificateur push-pull, la chute de tension qu'elle provoque est supposée négligeable.



**Figure 4.14** : Amplification du signal 1kHz et 3kHz

### 3.3 Amplificateur d'erreur

L'amplificateur d'erreur, représenté sur la **Figure 4.15**, assure la démodulation du signal issus des bobines de détection. Les différentes étapes comportent l'extraction du signal d'excitation, la conversion et l'inversion de la tension de référence et la synchronisation de la détection



**Figure 4.15** : Schéma complet de la démodulation

### 3.31 Extraction du signal d'excitation

Afin de trouver la grandeur et la polarité du champ magnétique mesurée, la composante de fréquence 3 kHz doit être extraite de la réponse de la bobine de détection. Afin d'isoler le signal 3kHz, deux réservoirs de résonance LC ont été utilisés. La fréquence de résonance et le facteur de qualité Q de ce réservoir LC disposé en parallèle peuvent être déduits à partir de l'équation suivante:

$$f = \frac{1/2\pi}{\sqrt{LC}} \tag{4.2a}$$

$$Q = 2\pi fRC \tag{4.2b}$$

Le premier réservoir LC est utilisé par la bobine de détection comme inducteur résonnant et une capacitance accordée pour produire une fréquence de résonance d'environ 2f. L'inductance de la bobine de détection est très sensible, aussi le premier réservoir a été construit avec un facteur de qualité Q assez élevé pour couper la plupart des fréquences indésirables, mais assez faible pour s'assurer que nous ne risquons pas perdre accidentellement les données véhiculées par le signal 2f.

Un étage de gain suivi d'un étage tampon et un autre réservoir LC deviennent ainsi une nécessité et ont été construits. Le réservoir est réglé précisément sur la fréquence  $2f$ , et la valeur de la résistance a été choisie pour une petite bande passante telle que l'intensité du courant a considérablement diminué aux premiers et troisièmes harmoniques. Après l'amplification, un filtre passe-haut a été ajouté pour éliminer tout décalage DC qui est introduit dans le signal dû aux réservoirs. A la sortie du filtre passe-haut, l'amplitude de l'onde sinusoïdale  $2f$  est proportionnelle à l'intensité du champ magnétique mesuré et la phase de l'onde donne des informations sur la direction de ce champ.

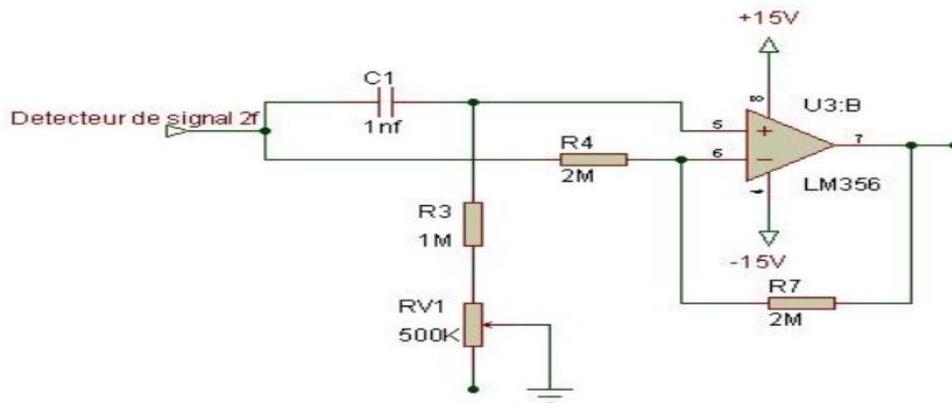
### 3.32 Démodulation d'amplitude et de phase

Les caractéristiques du champ mesuré sont extraites à l'aide d'un démodulateur d'amplitude et de phase. En raison des retards inhérents aux circuits ainsi que des délais de réponse, le signal est déphasé par rapport au signal d'excitation. Ce déphasage est corrigé en introduisant un déphaseur. Ce dernier a été étalonné par :

- (1) un champ connu produit par un aimant placé à une distance fixe et tourné de telle sorte que la direction du champ soit parallèle à l'axe de la bobine de détection,

- et (2) le passage à zéro de l'onde induite par ce champ coïncide à celui de l'onde carrée de référence  $2f$ .

A l'issue de l'étalonnage, il a été déterminé que le signal  $2f$  dans la direction positive était déphasé de l'onde carrée de référence  $2f$ , et donc la fréquence de commande, d'environ 43 degrés. Le déphaseur, assimilé à un filtre laissant passer toute la phase, a décalé son entrée dans la gamme de 40 degrés à 50 degrés en fonction de la valeur d'un potentiomètre. Ces étapes sont illustrées sur la **Figure 4.16**.

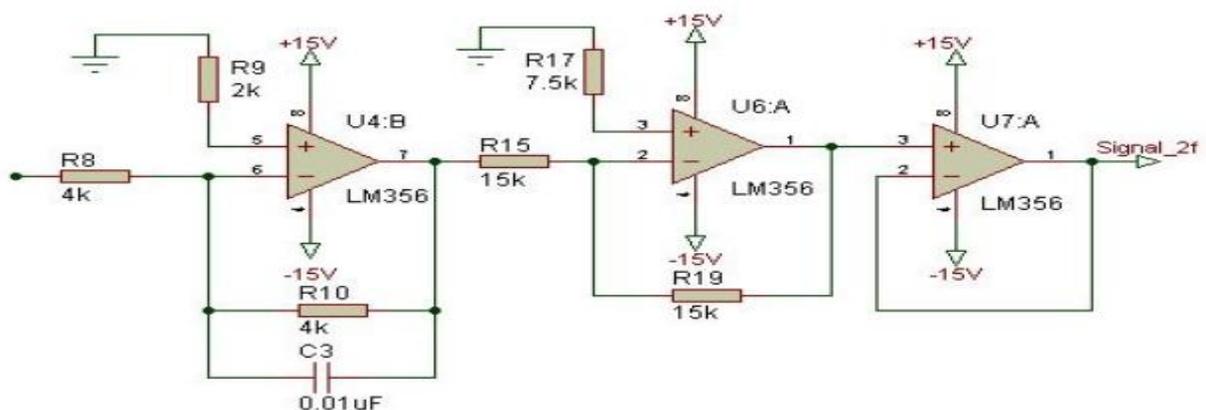


**Figure 4.16** : Phase shifter

La relation permettant de déterminer le déphasage qui peut être réalisé à partir de cette phase shifter est la suivante :

$$\tan(2\phi) = \frac{RC}{2\pi f} \quad (4.3)$$

La démodulation correcte de la phase nécessite un signal sinusoïdal de mêmes caractéristiques que l'onde carrée de référence 2f, mais inversé. Ces étapes sont illustrées à la **Figure 4.17**



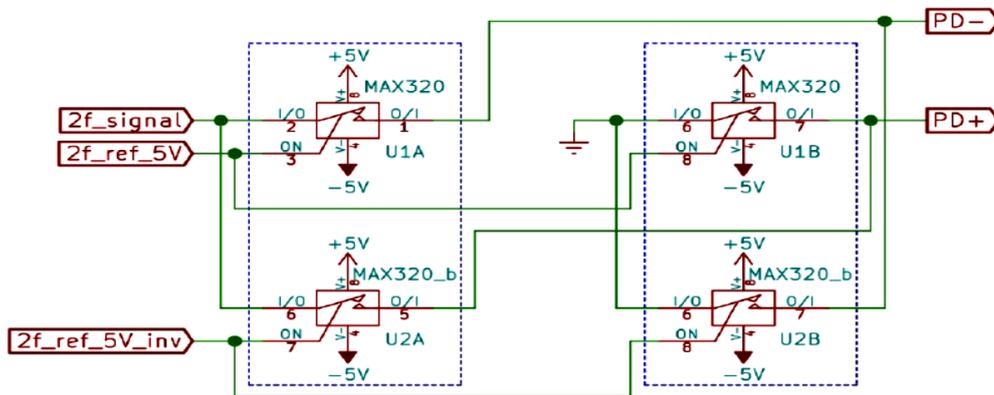
**Figure 4.17** : Correction de phase et suppression du CC

Pour générer ce signal, l'onde carrée 2f référence est alimentée à travers un diviseur de tension et un tampon pour atteindre la tension conversion. Elle est ensuite introduite dans un amplificateur inverseur et un tampon pour obtenir la sinusoïde inversée. Ces

deux signaux sont ensuite converties en niveaux de tension de +5V et -5V afin de piloter les commutateurs analogiques. Ces derniers sont responsables de la séparation des alternances du signal 2f induit dans la bobine de détection.

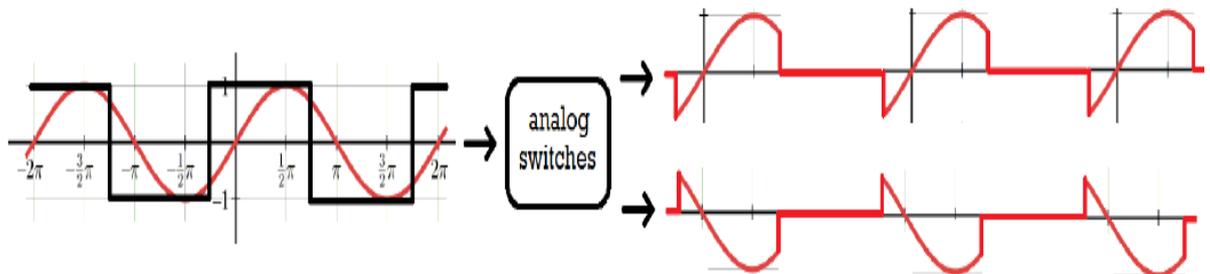
### 3.33 Commutation analogique.

Le signal sinusoïdal et l'onde carrée de référence sont introduits dans un détecteur synchrone. La première partie du détecteur est constituée d'une série de 4 commutateurs analogiques SPST configurés pour agir comme deux commutateurs analogiques SPDT, illustrés sur la **Figure 4.18**.



**Figure 4.18** : Circuits de commutation analogique

Le but de ces commutateurs est de diviser le signal sinusoïdal en deux signaux différents : celui qui est en phase avec les demi-cycles positifs de l'onde carrée de référence normale et celui qui est en phase avec les demi-cycles inversée. Les signaux



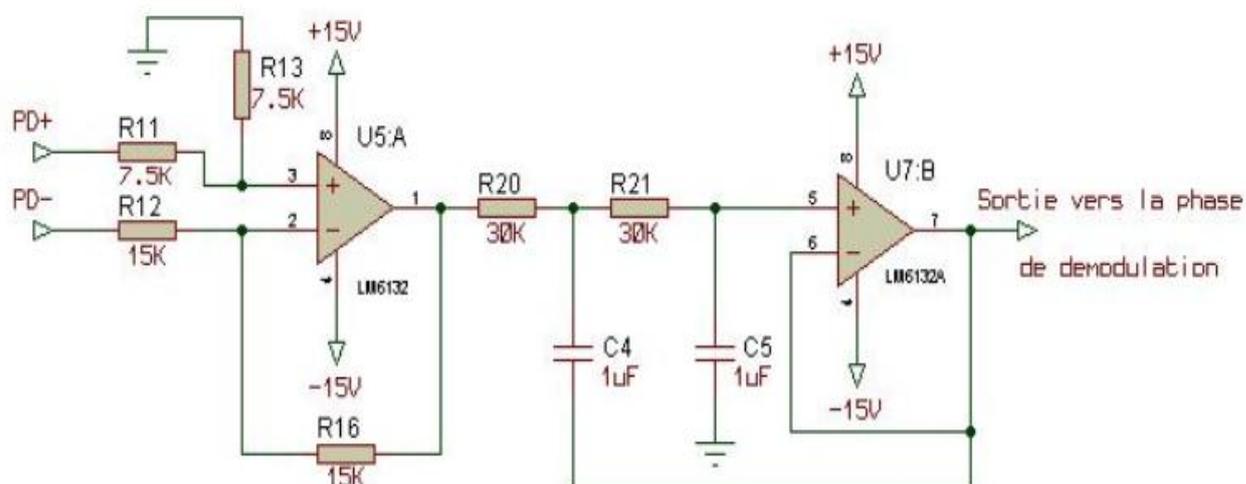
d'entrée et de sortie du commutateur analogique sont présentés sur la **Figure 4.19**.

**Figure 4.19** : Entrée et sortie du commutateur analogique. Découpage du signal de détection 2f

Les commutateurs analogiques MAX320 ont été choisis en raison de leur très faible charge d'injection (2-5 pC), de faible résistance à l'état passant (16Ω) et de vitesse de commutation rapide (35-65ns) qui sont importants pour préserver l'intégrité du signal de détection 2f au moment du découpage.

### 3.34 Amplification et filtrage

Les deux parties du signal de détection hachées sont ensuite introduites dans un amplificateur différentiel et un filtre passe-bas actif de second ordre afin d'en extraire la tension continue finale qui véhicule l'intensité et le signe du champ magnétique mesuré. La **Figure 4.20** illustre les différentes étapes d'amplification et de filtrage passe-bas. L'amplificateur différentiel agit essentiellement comme un soustracteur.



**Figure 4.20** : Amplificateur différentiel et filtre passe-bas du second ordre.

Le filtre passe-bas de second ordre a été choisi pour extraire uniquement la composante DC de la tension de sortie différentielle. Sa fréquence de coupure est fixée à 1,5kHz. Le signal démodulé et amplifié devrait avoir un niveau de tension continue suffisant dont le signe s'inverse lorsque le champ est dans la direction opposée. Cette tension est très vite distordue lorsqu'on s'éloigne des conditions de fonctionnement de la sonde,

limitées dans la plage -500 nT à +500 nT. Un dispositif d'affichage approprié permet de prendre en compte la tension observée ou la saturation de la sonde.

L'amplificateur d'erreur est conçu pour travailler dans des zones de faible champ. Placée dans la direction perpendiculaire à celle du champ à mesurer, la sonde est donc très efficace pour mesurer des angles. Nous avons adapté cette technique pour accéder aux mesures des différentes intensités du champ en associant à l'électronique de la sonde un dispositif permettant de compenser la partie principale du champ magnétique.

### 3.4 Générateur de courant de compensation.

#### Référence tension

La référence tension (**Figure 4.21**) fournit au générateur de courant, l'intensité nécessaire à la compensation moyenne des composantes du champ. Le courant traversant le solénoïde de compensation doit avoir une valeur très précise en fonction des valeurs introduites dans le PC. C'est pourquoi, à partir de la tension d'alimentation ou batterie, il est nécessaire d'avoir une tension de référence très stable de 10V. On compare ensuite la tension de sortie de cette référence tension à la tension fournie par une diode de référence à très grande stabilité.

La tension de référence notée dans le levé des caractéristiques particulière, correspond à un point de fonctionnement de la diode en place et déterminée par une résistance de haute précision et de très grande stabilité. La résistance interne de la référence tension doit être inférieure à 1m.ohm.



**Figure 4.21** : Carte de la référence tension

### Générateur de courant

Il existe un générateur par sonde. Le générateur de courant est constitué d'un amplificateur à impédance d'entrée élevée qui attaque un étage fournissant le courant de sortie. Le courant circulant dans le solénoïde de compensation est déterminé à partir de la référence de 10V. Le générateur fournit l'intensité nécessaire pour amener la chute de tension aux bornes des résistances de compensation à la valeur de la tension de référence. Ce dispositif (**Figure 4.22**) permet d'avoir un courant constant dans le solénoïde indépendant des variations de résistances pouvant intervenir dans le circuit alimenté.



**Figure 4.22** : Générateur de courant

## 4. Traitement des signaux et des données

Les différents signaux issus des sondes fluxgates véhiculent les informations concernant les valeurs compensées des composantes mesurées du champ magnétique. Ces tensions électriques sont analogiques par nature. L'arduino assure la commande de compensation, la fonction de conversion analogique/numérique, de sérialisation des octets en bits et l'acheminement des codes binaires vers le PC. Ces circuits sont programmés à l'aide de leurs instructions propres. Le calcul est effectué à l'aide de ces

mêmes circuits électroniques. Pour pouvoir étalonner les signaux issus des sondes, il faut disposer de quelques valeurs d'entrée analogique connues. Ces valeurs d'entrées correspondent à l'intensité du champ magnétique superposé. Le calcul fait correspondre la quantité de champ magnétique détecté à la valeur affichée à l'écran d'affichage numérique.

### **4.1 Signaux de commande**

Les douze bobines d'excitation des six sondes fluxgates sont commandées par un seul dispositif électronique. Elles se trouvent dans le même état d'excitation grâce à un générateur délivrant deux signaux rectangulaires de fréquences 1,5 kHz et 3 kHz. Les bobines d'excitation sont disposées de telle sorte que le champ magnétique résultant vu par les bobines de détection est nul. Les six sondes fluxgates indiquent des valeurs significatives du champ magnétique détecté. Le calcul est effectué après la conversion analogique numérique des six signaux détectés. En choisissant les orientations des trois axes orthogonaux suivant la disposition des six bobines de détection, on peut déterminer le sens du champ détecté.

Pour le calcul à l'intérieur du circuit intégré programmable, on considère six variables et on suppose que les deux variables successives représentent les intensités de deux détecteurs disposés parallèlement. La comparaison est effectuée entre deux variables deux à deux. Les composantes cartésiennes du champ magnétique mesuré sont données par le maximum des deux variables comparées.

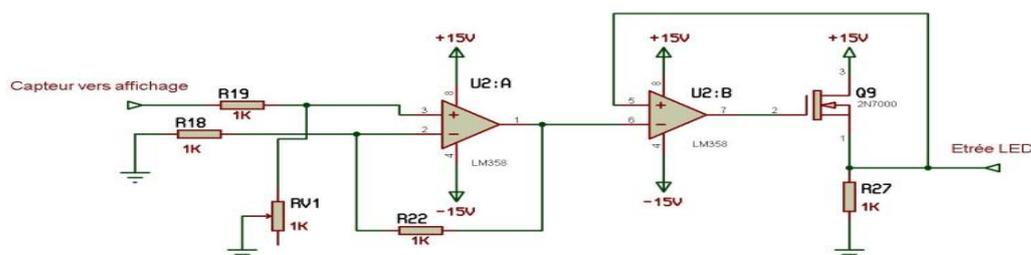
## 4.2 Dispositif d'affichage

Les capteurs fluxgates doivent appliquer les normes de l'industrie afin d'isoler les circuits de mesures et d'affichage. Le but de l'affichage par le biais d'un ampèremètre était de créer un retour visuel (Figure 4.23) indiquant le courant circulant dans la bobine de détection. Pour afficher cette information, un graphique à barres LED a été construit pour incrémenter une étape, ou allumer une autre LED, chaque fois que le courant d'entrée augmente de 0.1 A, avec une plage de 0A à 1A. Cela a nécessité au total de 10 LED.



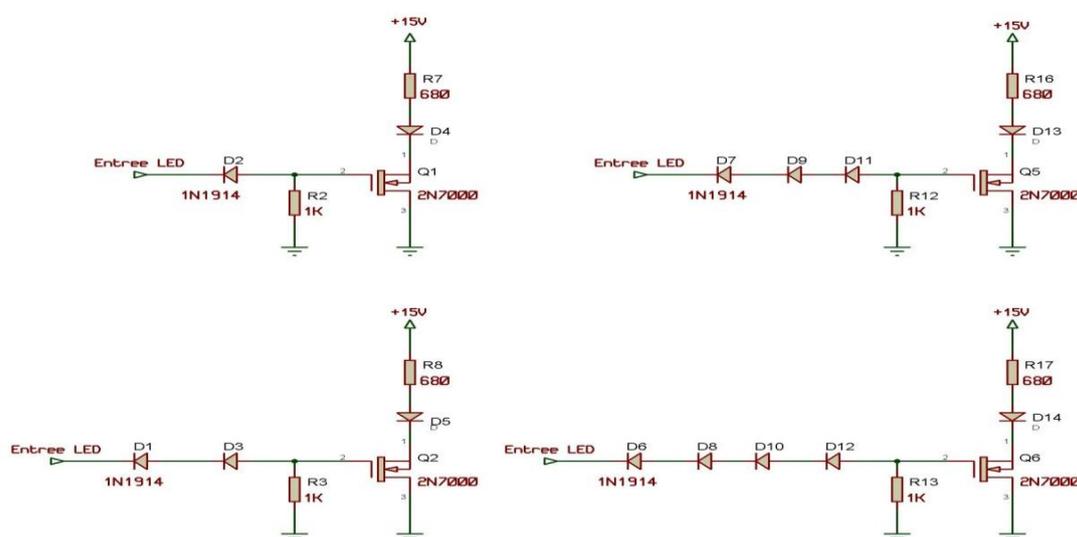
**Figure 4.23** : Indicateur visuel de l'affichage

Lorsque l'amplitude du signal de détection 2f a été extraite, elle a été envoyée dans le dispositif d'affichage. La mise en forme du signal nécessite une amplification non inverseuse avec un gain réglable via un potentiomètre. Le signal amplifié a été ajusté et calibré pour assurer qu'un qu'une intensité de 1A produit un signal de 10V, tandis que 0A correspond à un signal de 0V.



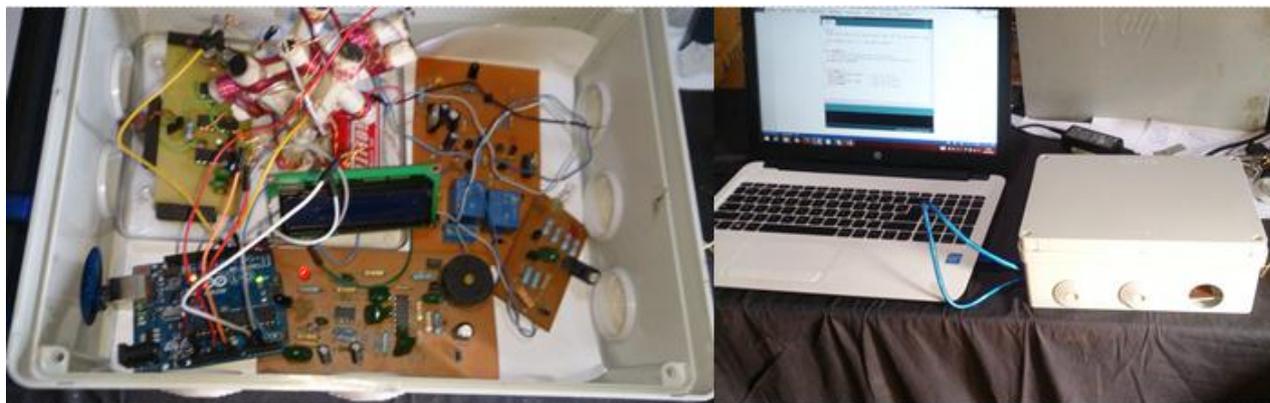
**Figure 4.24** : Mise en forme des signaux destinés à l'affichage

Le signal ainsi traité provoque un décalage constant par rapport au signal provenant d'une tension de référence. La sortie du circuit de sommation a ensuite été envoyée à un amplificateur opérationnel disposant de N canaux MOSFET dans sa boucle de retour en tant que tampon de signal. La sortie de cet ampli-op conduisait 10 diviseurs de diode-résistance en parallèle séparés (**Figure 4.24**). Les diodes étaient chacune ajusté pour produire 10 tensions différentes incrémentées l'une de l'autre d'un volt. L'objet du circuit de sommation était de produire une tension de décalage égale à celle des MOSFETS 2N7000 utilisés pour conduire les LED.



**Figure 4.25** : Circuit graphique à barre LED

L'affichage est réalisé grâce à un écran à cristaux liquide aussi appelé écran LCD. Celui qui nous a été fourni pour notre étude dispose de quatre lignes et vingt colonnes pour afficher les données. L'écran est alimenté en 5 Volts par l'arduino.



**Figure 4.26 :** Le capteur trifluxgate AJA

**La figure 4-26** illustre le capteur trifluxgate réalisé. Il est divisé en deux grandes parties : le coffret de mesures et l'unité de traitement. Le coffret de mesures rassemble les générateurs de courants d'excitation et de compensation des sondes. Ces générateurs puisent l'énergie nécessaire du générateur de tension de référence. Ce dernier est également utilisé pour alimenter les autres cartes. Ce coffret contient également l'amplificateur d'erreur. Ce dispositif récupère les tensions issues des sondes de détection pour en extraire les informations utiles, puis achemine les données vers l'arduino. L'arduino, d'une part, prend en charge les signaux de commande des générateur de compensation et, d'autre part, traduit les données pour être compatible avec l'ordinateur. L'ordinateur s'occupe du traitement numérique des grandeurs physiques mesurées, de l'affichage des valeurs lues et d'envoi des données servant pour la compensation.

## Chapitre 5

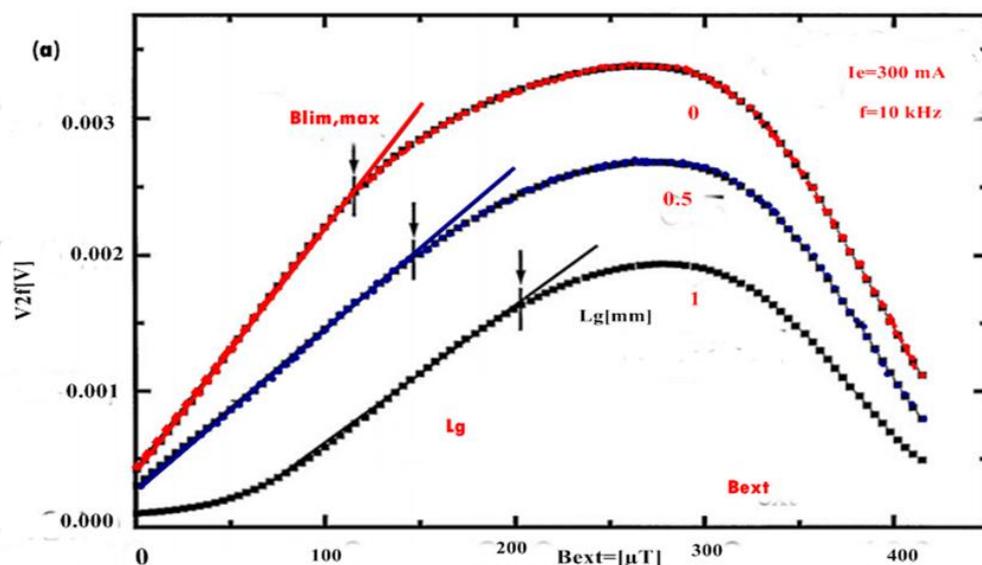
### ESSAIS DE MESURES ET D'ANALYSES DES RÉSULTATS

#### 1. Sensibilité et calibre des sondes : déterminations expérimentales

La sonde fluxgate fonctionne suivant la saturation périodique de ses noyaux ferromagnétiques. Leur perméabilité relative dépend du champ magnétique appliqué. Dans le chapitre 3, nous avons mis en exergue que l'action combinée du champ magnétique extérieur et celles des champs d'excitation entraînent le déséquilibre de ces noyaux et conduisent à la génération de tension d'harmoniques d'ordre supérieur de la fréquence fondamentale d'excitation dans la bobine de détection. L'amplitude du deuxième harmonique est proportionnelle au champ externe pour un certain plage de champ. Le signal est extrait en utilisant une technique de verrouillage.

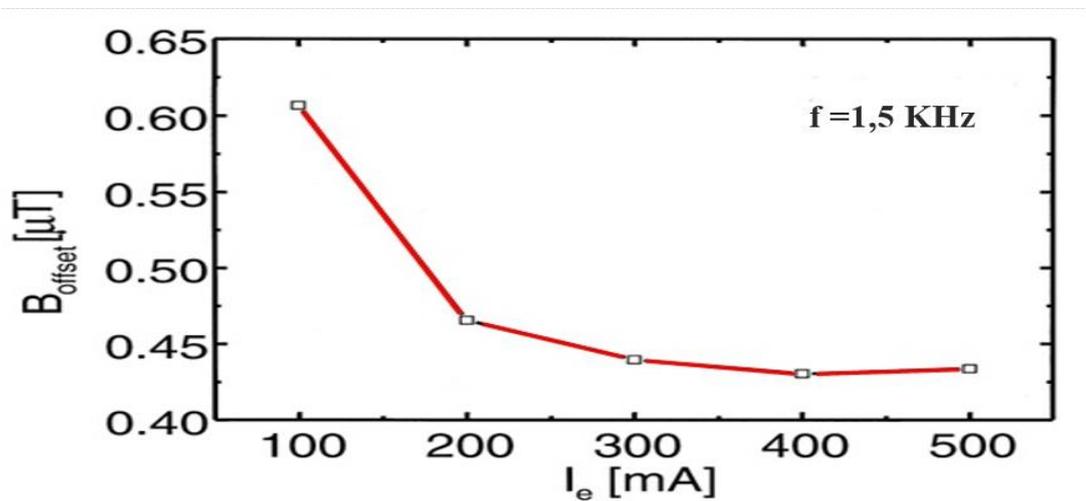
##### 1.1 Etude de la sensibilité des sondes

La **Figure 5.1** montre la sensibilité et le maximum de la plage linéaire  $B_{lim}$ . Cette sensibilité diminue quand le maximum de la plage linéaire  $B_{lim}$  augmente. Il est donc possible de faire un compromis entre la sensibilité et la plage de détection du champ magnétique.



**Figure 5.1** : Tension harmonique d'ordre 2 (3kHz) de la bobine de détection en fonction du champ magnétique extérieur.

Pour évaluer la limite de détection minimale de nos sondes, nous avons effectué des mesures du décalage magnétique en fonction de celui des sondes. Nous avons défini la tension d'offset mesurée pour la fréquence  $2f=3\text{kHz}$ , en faisant varier  $B$  extérieur de zéro à la saturation et de retour à zéro. A partir de ces valeurs, on peut calculer le décalage  $2f$  en utilisant les courbes de sensibilité mesurées. Les résultats d'une telle procédure sont représentés sur la **Figure 5.2** en fonction du courant d'excitation à 1,5 kHz. Le décalage est d'autant plus élevé que l'intensité du courant d'excitation est faible. La raison de ce comportement doit être recherchée dans l'état de saturation des noyaux magnétiques.



**Figure 5.2** : Décalage magnétique BOFFSET du capteur fluxgate en fonction du courant d'excitation  $I_e$  à 1,5 kHz.

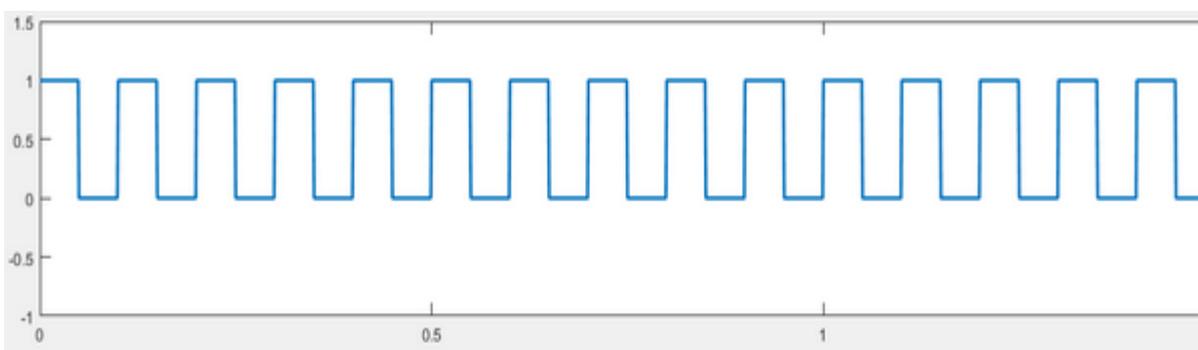
Ce constat confirme le fonctionnement des sondes à faible champ. Pour respecter l'environnement magnétique des sondes, les sources de champ magnétique doivent être dans une direction perpendiculaire aux axes des sondes. Le principe de mesures des angles s'en déduit facilement. Par contre, pour les mesures d'intensités, les bobines de détection devraient fournir un courant continu d'intensités variables suivant les sondes pour compenser les parties principales des composantes à mesurer et pour satisfaire les conditions de nullité des champs. Étant donné que les valeurs observées du décalage  $B$  sont nettement inférieures à la valeur du champ magnétique terrestre, les compensations sont obligatoires.

## 1.2 Etalonnage des sondes

Pour tester la sensibilité de nos sondes, nous avons mesuré le champ magnétique produit par une bobine de test constitué par un noyau ferromagnétique cylindrique de 1cm de diamètre, de 8cm de longueur sur lequel sont enroulés 20 spires. Ces spires sont parcourues par un courant d'intensité 0,5 A. Ce bobine génère un champ magnétique de direction parallèle à son axe et d'intensité 1,26mT.

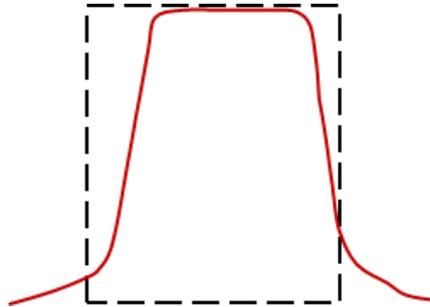
Nous avons constaté que l'intensité du champ magnétique détecté varie en fonction de la position et de l'orientation des sondes. Elle est maximale lorsque l'axe de la bobine est parallèle à ceux des sondes. Nous en avons conclu que nos sondes fluxgates sont des détecteurs de proximité, ce qui est tout à fait normal, sachant que les intensités du champ magnétiques sont inversement proportionnelles à la distance. C'est la raison pour laquelle on recommande souvent les sondes fluxgates pour déterminer la direction du champ magnétique.

Pour étalonner nos sondes, un signal rectangulaire d'amplitude 1 V et de fréquence 1,5 kHz est injecté dans les bobines d'excitation. Le chronogramme de tel signal est représenté sur la **Figure 5.3**. Ce signal fournit aux enroulements d'excitation un courant alternatif qui génère des champs magnétiques alternatifs dont la résultante vue par les sondes de détection est nulle.



**Figure 5.3** : Chronogramme du signal d'excitation

La bobine de test étant placée parallèlement à l'axe des sondes, l'observation oscilloscopique des signaux de détection sont illustrées sur la **Figure 5.3**. Cette figure présente le signal de sortie de l'amplificateur d'erreur d'amplitude 1,2 V sur une période de 0,67ms.



**Figure 5.4** : Signal issue du détecteur synchrone.

Théoriquement, l'allure du chronogramme du signal de détection doit ressembler à celle du signal d'excitation (**Figure 5.4**), mais cette alteration est probablement due à la présence de la charge inductive de la bobine. Etant donné que l'on s'intéresse à l'amplitude du signal, la distorsion n'affecte pas la détermination de l'intensité du champ magnétique. Sur les autres voies, nous constatons les mêmes observations, mais leurs amplitudes sont à peine perceptibles, liées aux faits que les sondes correspondantes sont placées perpendiculairement à l'axe de la bobine de test et que les conditions de nullité du champ sont bien respectées. Pour les sondes parallèles à l'axe de la bobine de test, l'une des deux détermine la valeur positive de l'intensité tandis que l'autre donne la valeur négative. Dans la pratique et pour faciliter nos calculs, nous éliminons les valeurs minimales. Si la bobine de test se trouve à l'extrémité de l'une des sondes de détection, d'un axe donné, alors seule cette sonde fournit une tension électrique significative.

Nous avons procédé à d'autres mesures en plaçant la bobine de test dans une direction quelconque non parallèle à celles des sondes. Les données rapatriées au niveau de l'ordinateur portable sont résumées sur le tableau 5.1 suivant. Les tensions vues par les sondes verticales Z sont nettement supérieures par rapport à celles déterminées par les sondes horizontales. Ces observations traduisent la réalité du terrain.

**Tableau 5.1** Tensions vues par les sondes après traitement

Direction des axes	X	Y	Z
Tension vue par la sonde 1	0,600 V	0,064 V	0,960 V
Tension vue par la sonde 2	0,096 V	0,400 V	0,150 V

Les valeurs X1, Y2 et Z1 indiquent les composantes cartésiennes du champ magnétique détecté. Les valeurs X2, Y1 et Z2 ne sont pas tenues en compte, étant données qu'elles sont inférieures par rapport aux précédentes. L'intensité est obtenues à partir de ces valeurs d'après le calcul suivant (5.1)

$$U = \sqrt{X1^2 + Y2^2 + Z1^2} = \sqrt{0,60^2 + 0,40^2 + 0,96^2} = 1,2V \quad (5.1)$$

Cette tension est corrélée avec nos premières mesures. De ces tests et vérifications expérimentales, nous avons déduit la sensibilité de nos sondes. Elle est déterminée par :

$$s = \frac{1,2610^{-6}T}{1,2V} = 1,0510^{-6} T/V = 10,5 nT/mV \quad (5.2)$$

D'après la littérature la norme internationale pour la sensibilité des instruments de mesures de l'intensité totale est de l'ordre de 5 nT/mV. Le résultat fourni par (5.2) montre que la sensibilité de nos sondes est deux fois plus grande que celle préconisée par les normes internationales. Ceci est probablement dû, d'une part aux autres valeurs mesurées mais négligées pour le calcul des intensités et d'autre part au non-respect de l'environnement magnétique des sondes. En effet, nos sondes se trouvent à l'intérieur du coffret contenant les dispositifs électroniques, et ces derniers vont influencer nos mesures. Par contre, les résultats confirment que notre capteur trifluxgate fonctionne correctement.

Sachant qu'aucune compensation n'a été effectuée, ces observations nous ont permis également de définir la direction de la bobine de test par rapport au repère lié à nos

sondes. Les angles d'inclinaison et de déclinaison du champ créé par cette bobine sont définis comme suit :

$$I = \operatorname{asin}\left(\frac{Z}{\sqrt{X^2+Y^2+Z^2}}\right) = \operatorname{asin}\left(\frac{0,96}{1,2}\right) = 53,13^\circ \quad (5.3a)$$

et

$$D = \operatorname{atan}\left(\frac{Y}{X}\right) = \operatorname{atan}\left(\frac{-0,40}{0,72}\right) = -29,01^\circ \quad (5.3b)$$

Ces résultats sont en bon accord avec nos observations. Notre dispositif peut être donc utilisé comme un inclinomètre ou une boussole magnétique.

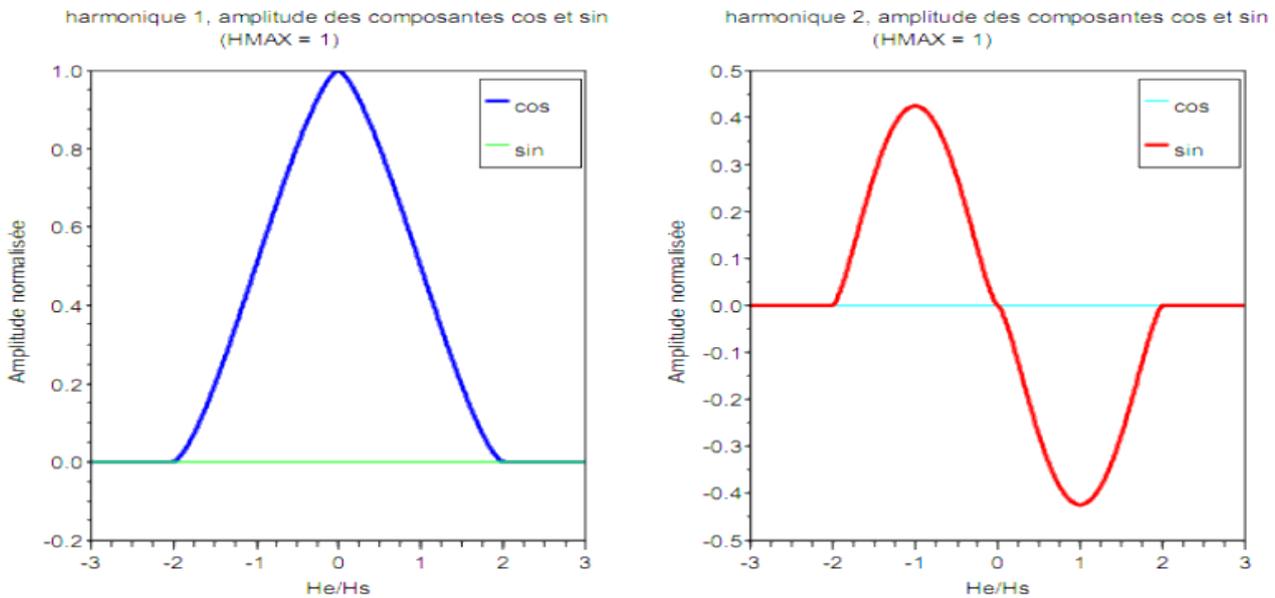
### 1.3 Calibration des sondes

Pour bien comprendre certaines situations observées durant les mesures, les analyses suivantes ont été menées en comparant l'intensité du champ magnétique externe  $H_0$  par rapport à celle du champ d'offset  $H_{\max}$  ou du champ de saturation  $H_s$  des noyaux. Cette étude nous a permis de calibrer nos sondes et définir les intervalles de fonctionnement.

Si le champ  $H_0 > 0$ , alors le noyau plongé dans le champ d'excitation négatif sera moins saturé par rapport au noyau soumis au champ positif. On peut décomposer la tension détectée en série de Fourier puisqu'elle est périodique de période 0,67ms. Ainsi, suivant la valeur de  $H_{\max}$  par rapport à  $H_0$ , le deuxième harmonique du signal est supposé véhiculer l'information sur le champ extérieur  $H_0$ . Compte tenu du fait que ce signal est modulé en amplitude et phase, nous avons procédé à une détection synchrone. Le logiciel Matlab est utilisé pour tracer les valeurs des harmoniques en fonction de  $H_0$ , pour plusieurs valeurs de  $H_{\max}$ .

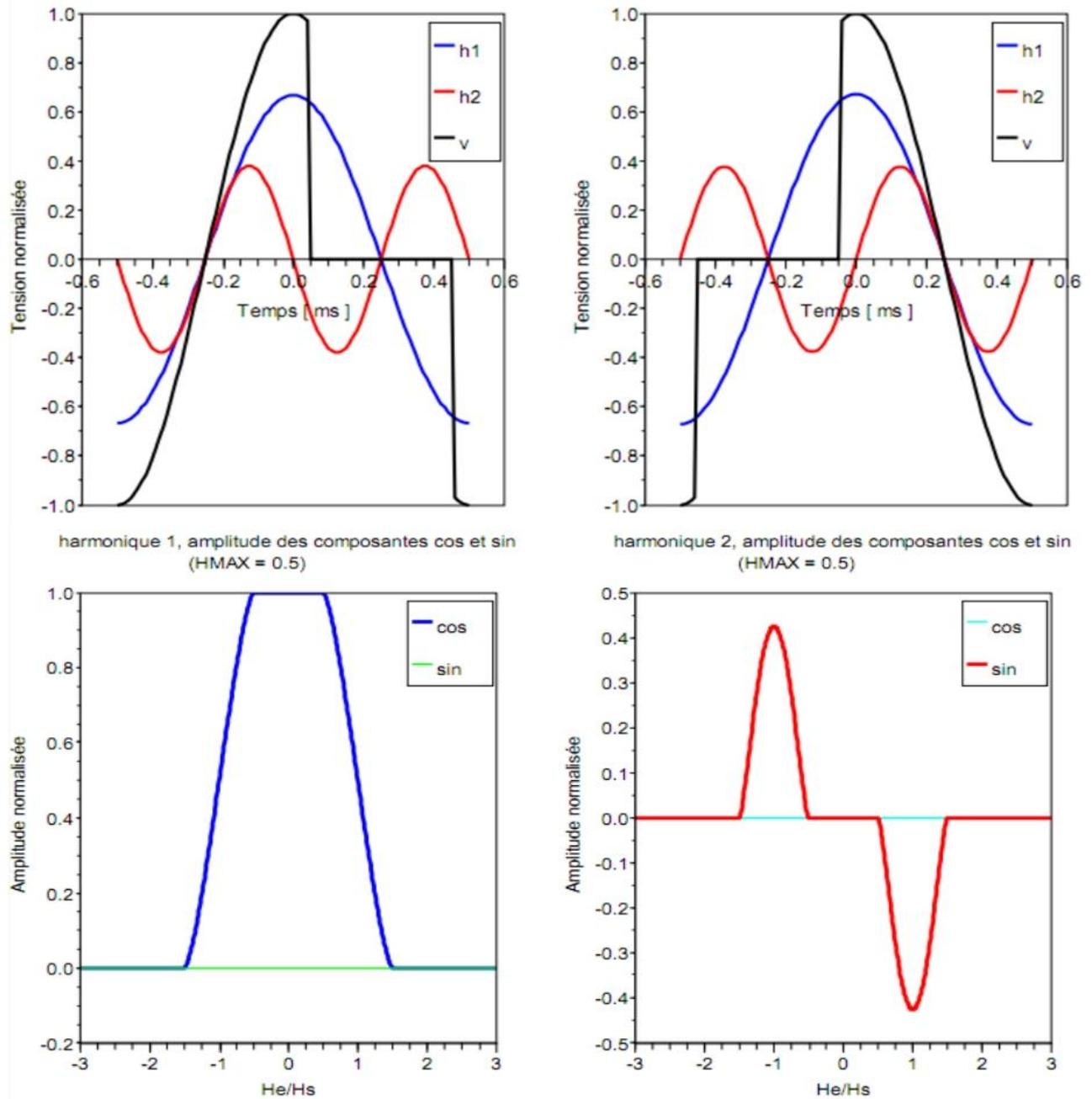
Pour  $H_{\max} < H_s$ ,  $H_s$  champ de saturation, on peut noter qu'il existe une zone dans laquelle les amplitudes des harmoniques 1 et 2, notés  $h_1$  et  $h_2$  sont constantes. En effet, tant que le noyau magnétique n'est pas saturé, la tension relevée a l'allure d'une

cosinusoïde (**Figure 5.5**). Cette situation ne permet donc pas de mesurer des champs inférieurs à  $H_s - H_{max}$ . Pour des champs plus importants, on remarque que l'amplitude de l'harmonique 2 varie linéairement avec  $H_0$  sur une certaine plage de valeurs



**Figure 5.5 :** Chronogrammes des harmoniques 1 et 2 pour  $H_{max} < H_s$

Dans le cas limite où  $H_{max} = H_s$ , l'harmonique 2 permet de détecter un champ magnétique et de mesurer son amplitude, mais pas de façon linéaire pour des champs très faibles.



**Figure 5.6** : Chronogramme des signaux des harmoniques 1 et 2 pour  $H_{max} > H_s$

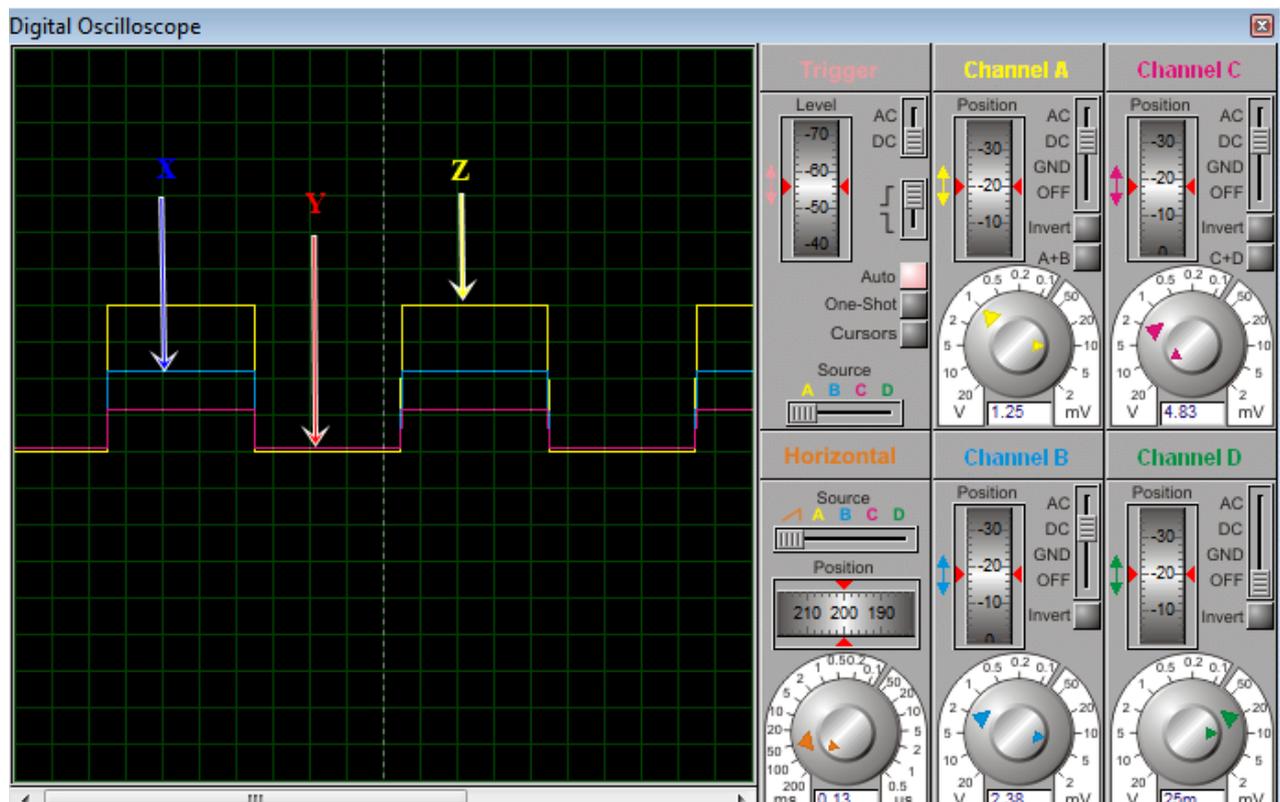
Si  $H_{max} > H_s$  on constate que l'harmonique 2 nous permet de mesurer la valeur de  $H_0$  sur une certaine plage de linéarité. L'harmonique 1 ne permet ni de déterminer l'orientation du champ magnétique ni de mesurer son amplitude d'une façon simple. La **Figure 5.6** résume la réponse observée des tensions induites dans le bobinage de mesure pour deux valeurs.

Pour ces harmoniques 1 et 2, on remarque immédiatement que l'information d'orientation du champ extérieur est contenue dans la phase de l'harmonique 2.

## 2. Observations oscilloscopiques des sorties des sondes

### 2.1 Visualisation des signaux mesurés

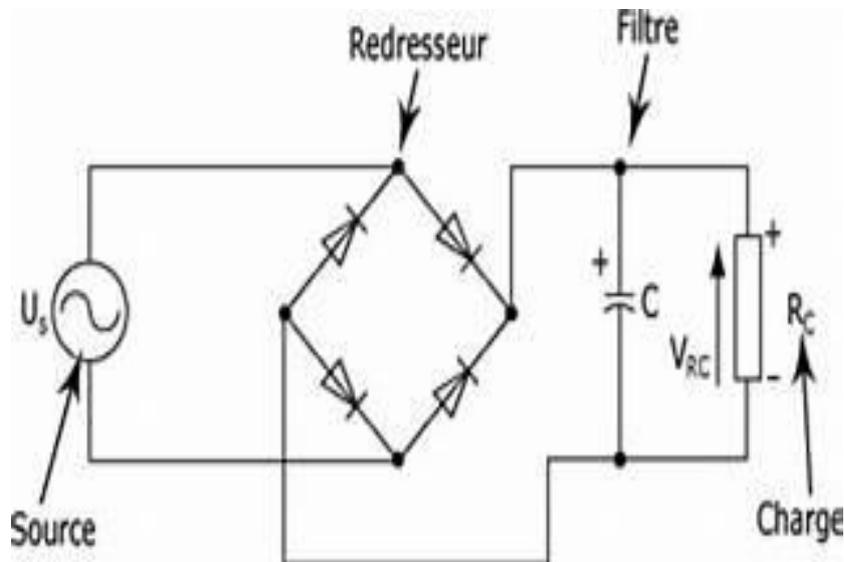
Il nous est facile de visualiser les signaux à l'aide de l'oscilloscope fourni par le logiciel proteus, une fois les données rapatriées. La **Figure 5.7** donne une représentation des signaux vus par nos sondes après un traitement appropriés en particulier en prenant soin d'assurer la compatibilité des signaux de sortie de l'amplificateur d'erreur avec l'entrée de l'arduino.



**Figure 5.7** : Intensités des composantes X, Y et Z mesurées

En effet, les signaux de sortie de l'amplificateur d'erreur se présentent sous forme d'impulsion. Pour pouvoir les acheminer vers l'arduino, nous avons fait recours à des redresseurs. Leurs rôles sont de stabiliser les tensions électriques issues des

enroulements de détection. La **Figure 5.8** donne un schéma synoptique du circuit de redressement. La charge  $R_c$  représente l'entrée analogique de l'Arduino.



**Figure 5.8** : Schéma synoptique de redressement

Les chronogrammes des signaux apparaissent sur l'oscilloscope du proteus. Leur affichage nécessite l'élaboration d'un programme adéquat. Dr. VANDAELE nous a remis un listing de tel programme lors de son dernier passage à Antananarivo. Nous l'avons adapté pour la **figure 5.9** suivante présentée la version améliorée du listing de Dr. VANDAELE.

```

#include "LiquidCrystal.h"
LiquidCrystal lcd(8, 9, 4, 5, 6,
7);
float
c0,c1,c2,c3,c4,c5,cm1,cm2,cm3
= 0.0;
float temp=0.0;
void setup()
{ Serial.begin(9600);
lcd.begin(16, 2);
lcd.print("Champ magnétique");
}
void loop()
{
//Formule de la conversion de
tension
int c0 = analogRead(A0);
int c1 = analogRead(A1);
int c2 = analogRead(A2);
int c3 = analogRead(A3);
int c4 = analogRead(A4);
int c5 = analogRead(A5);
//comparaison des valeurs
If (c0<c1) ;
{ cm1=c1 ;}
Else
Liberation Serif {cm1=c0 ;}
If (c2<c3) ;
{cm2=c3 ;}
else
{cm2=c2 ;}
If (c4<c5) ;
{cm3=c5 ;}
else
{cm3=c4 ;}
modul_champ =
(sqrt(cm1*cm1+cm2*cm2+cm3*cm3)
* 5.0) / 1024.0;
if (modul_champ < 0.1)
{modul_champ =0.0; }
Serial.print("v= ");
Serial.println(Champ magnétique);
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("modul_champ ");
lcd.print(modul_champ);
delay(300); }

```

**Figure 5.9 :** Version améliorée de listing de Dr. VANDAELE pour l’affichage des signaux sur l’oscilloscope du logiciel Proteus

Les principales fonctions de l'arduino utilisées dans ce programme sont :

- *Lcd\_com*
- *Lcd\_init*

- *Lcd\_clear*
- *Gotoxy*
- *Lcd\_putc et lcd\_putchar*

La fonction *lcd\_com* permet d'écrire dans le registre de configuration de l'afficheur et donc d'assurer la communication entre le microcontrôleur et l'écran LCD. La fonction d'initialisation de l'écran *lcd\_init()* a été réalisée conformément aux instructions données dans la data sheet de l'afficheur LCD. La fonction *lcd\_clear* permet simplement d'effacer l'écran. Afin de pouvoir écrire sur l'écran à l'endroit souhaité, la fonction *goto\_xy(int row,int col)* a été créée pour positionner le curseur sur la ligne sur et la colonne voulues. Les variables *row* et *col* indiquent respectivement les lignes et les colonnes sur lesquelles le curseur est positionné. Enfin les fonctions *lcd\_putchar(char c)* et *lcd\_putc(int16 c)* permettent d'écrire respectivement sur l'écran une chaîne de caractère (exemple : « composante Z») ou alors le résultat de la conversion effectuée sur 10 bits (exemple : 1024). La fréquence de balayage est choisie à 100Hz afin d'avoir un rafraîchissement assez rapide sans pour autant avoir un phénomène de scintillement à l'écran.

## 2.2 Analyse comparative des observations

Les analyses suivantes découlent des observations effectuées sur un site de l'Observatoire Magnétique d'Antananarivo le 16 Mars 2018 à Fihaonana. Le tableau 5.2 traduit les résultats des mesures par les instruments de l'IOGA et ceux de notre capteur trifluxgate.

**Tableau 5.2** Mesures du champ magnétique effectué à Fihaonana le 16 Mars 2018

a) Instruments de l'observatoire (Magnétomètre SMR90 et théodolite 010B)

Éléments mesurés	F	D	I
	33785 nT	-13°45'48"	53°13'48"

b) Capteurs Trifluxgate

Éléments mesurés	X	Y	Z
Valeurs lues sur l'afficheur	250 mV	- 460 mV	960 mV

Les valeurs lues sur l'afficheur de notre dispositif sont les valeurs résiduelles des éléments vues par nos sondes fluxgates. Elles sont traduites sous forme de tensions électriques. Pour les convertir en nanotesla, il faut ajouter les tensions continues de compensation pour X et Z, tensions fournies au niveau des bobines de détection. Ces tensions correspondent à  $X_c = 1,62 \text{ V}$  et  $Z_c = 1,62 \text{ V}$ . Normalement les données de compensation doivent être différentes d'une sonde à l'autre, mais cela nécessite de réaliser un module permettant de commander un ou plusieurs potentiomètres électroniques via l'arduino et/ou l'ordinateur. Nous avons choisi de remplacer ces potentiomètres par un simple diviseur de tension et d'appliquer la même tension fournie aux bornes des enroulements de détection. Compte tenu de la sensibilité de nos sondes qui est de l'ordre de  $10,5 \text{ nT/mV}$ , le tableau 5.3 donne les valeurs des composantes X, Y et Z converties en nT.

**Tableau 5.3** Données du champ magnétique mesurées à Fihaonana par le capteur trifluxgate

Éléments mesurés	X	Y	Z
	19635 nT	- 4830 nT	27090 nT

De ces mesures nous avons calculé l'intensité totale, la déclinaison et l'inclinaison du champ magnétique à l'aide des relations de correspondance (1.5) et le tableau 5.4 suivant nous donne la comparaison de nos données avec celles de l'Observatoire Magnétique d'Antananarivo, les marges d'erreurs pour chaque élément comparée.

**Tableau 5.4** Comparaison des données du capteur trifluxgate avec celles fournies par l'Observatoire

Éléments mesurés	F	D	I
Données d'Observatoire	33 785 nT	-13°45'48"	53°13'48"
Données Capteur Trifluxgate	33 804 nT	-13°49'11"	53°15'42"

Le tableau 5.4 montre que les mesures des angles sont à 3' des données de l'Observatoire et que celle de l'intensité à 20nT. Cette analyse montre clairement que les sondes à saturation sont faites pour mesurer des angles. On peut l'adapter aux mesures des intensités à conditions de créer un environnement magnétique leur permettant de fonctionner correctement.

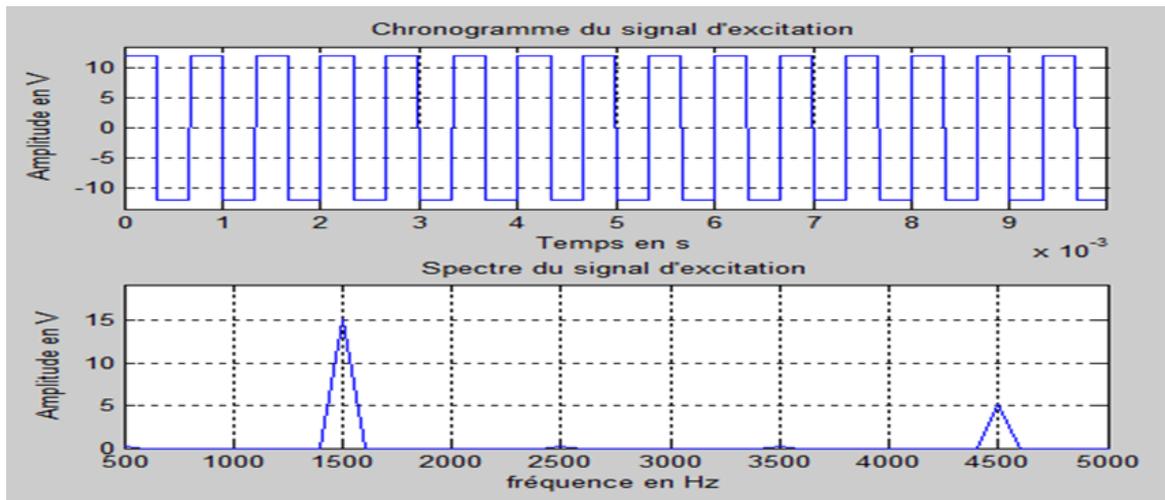
### 3 Traitement des signaux simulés

Nous avons vu au chapitre 3 que le signal de détection est la superposition de deux signaux : le signal d'excitation et le signal généré par l'existence d'un champ magnétique externe. Ce champ externe a tendance à modifier l'allure de la tension mesurée à cause du déplacement du cycle de saturation du noyau magnétique. Les analyses suivantes ont été effectuées pour bien comprendre les comportements des champs magnétiques en présence et les morphologies des signaux générés.

Matlab dispose des outils numériques nous permettant de visualiser les chronogramme et spectres des signaux intervenant dans le fonctionnement du capteur trifluxgate. Néanmoins, quelques hypothèses ont été émises pour pouvoir étudier et analyse le comportement et la nature des signaux aussi bien dans les domaines temporel que fréquentiel. Ces hypothèses concernent surtout l'influence du champ appliqué sur les sondes. Nous avons supposé que le champ à mesurer reste constant pendant toute la durée de mesure et que la perméabilité magnétique des noyaux ferromagnétiques des sondes s'exprime sous forme de développement limité à l'ordre 2 du champ appliqué. Nous déduisons de ces hypothèses l'expression des variations temporelles du champ d'induction magnétique appliquée, et par conséquent, les tensions induites au niveau des enroulements de détections. .

#### 3.1 Chronogramme et spectre du signal d'excitation

Le signal d'excitation des sondes des capteurs trifluxgates est un signal rectangulaire. Il est échantillonné à la fréquence  $f_e = 10$  kHz, pour respecter les conditions de Shannon. La **Figure 5.10** donne les allures de son chronogramme sur une durée de 10ms et son spectre dans la gamme de fréquences limitée à la fréquence 5 kHz de Nyquist.

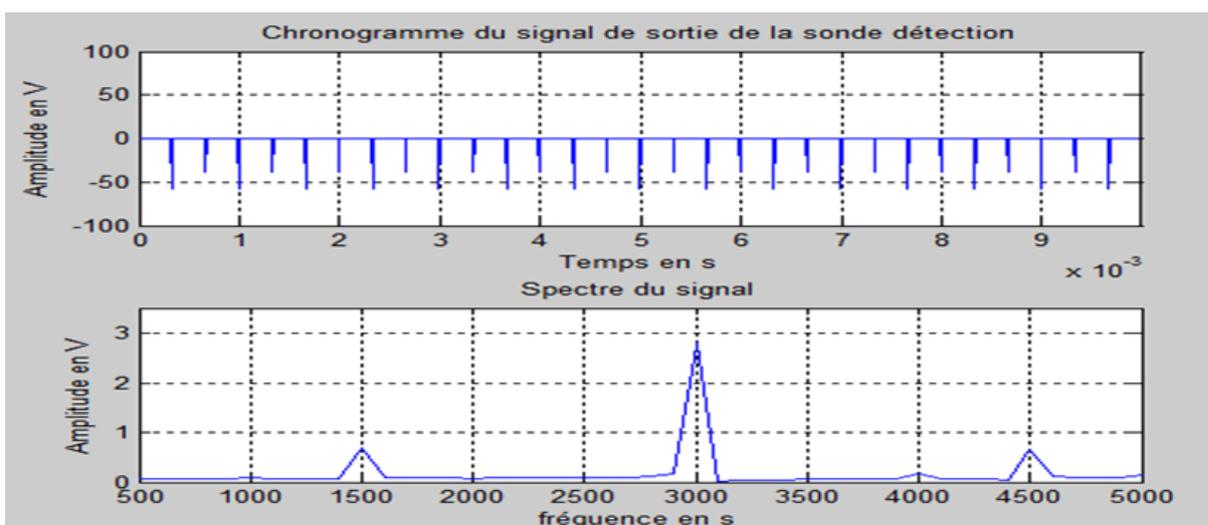


**Figure 5.10** : Chronogramme et spectre du signal d'excitation

La fréquence 4,5 kHz est visible sur le spectre du signal d'excitation. Ceci résulte de la décomposition en série de Fourier montrant que le signal d'excitation n'est pas une sinusoïde pur.

### 3.2 Chronogramme et spectre du signal de détection

Aux bornes des sondes de détection, les allures du chronogramme et du spectre sont représentées sur la **Figure 5.11**.

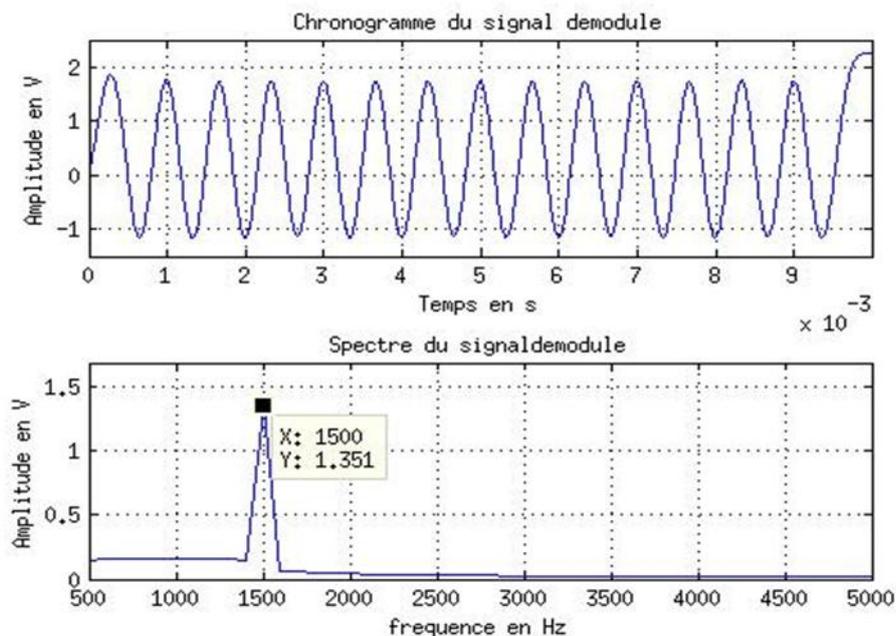


**Figure 5.11** : Chronogramme et spectre du signal de détection

L'allure du chronogramme du signal de détection est complexe et difficile à interpréter, mais on peut considérer qu'elle est due à la présence dans ses composants d'un signal issu de la dérivation temporelle du signal d'excitation. Concernant le spectre, la figure confirme la présence d'harmonique 2 de la fréquence fondamentale 1,5 kHz. Son allure ressemble à celle d'un signal modulé en amplitude avec onde porteuse. La fréquence de l'onde porteuse est de 3 kHz et son amplitude de l'ordre de 3V. La fréquence du signal modulant peut être déterminée à partir des raies latérales. Cette fréquence vaut 1,5 kHz avec un taux de modulation d'environ 0,33.

### 3.3 Chronogramme et spectre du signal démodulé

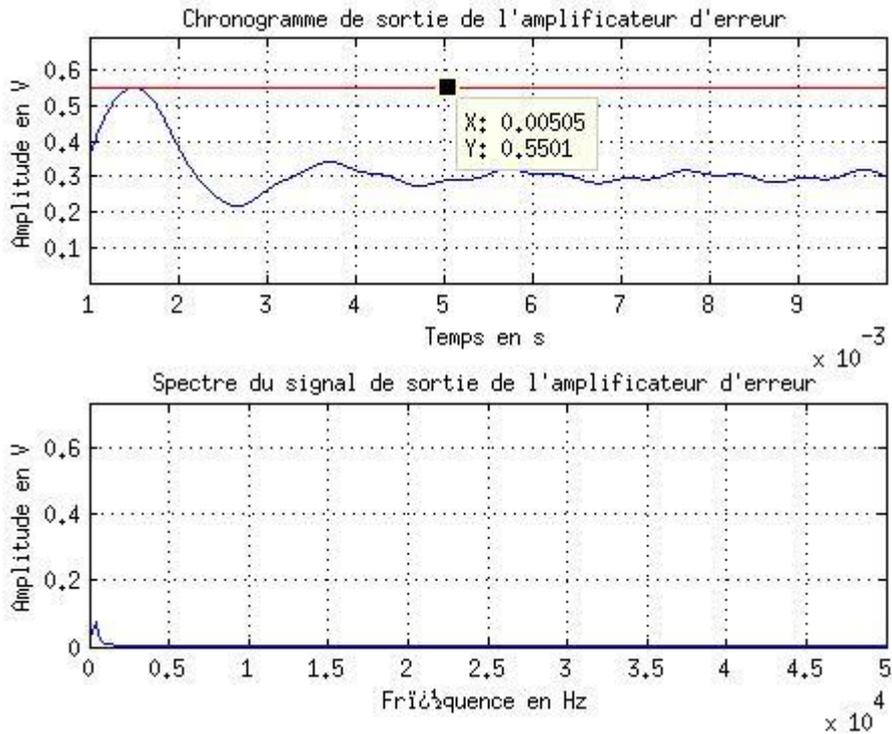
Pour chaque composante, le signal issu de la sonde de détection (**Figure 5.11**) est acheminé vers l'amplificateur d'erreur. Le premier étage rencontré est celui du démodulateur. La démodulation consiste à multiplier le signal modulé par le signal porteur. La **Figure 5.12** donne les allures du chronogramme et du spectre du signal démodulé. On y observe un signal sinusoïdal de fréquence 1,5 kHz et d'amplitudes variables avec un décalage d'offset de 374mV. Cette composante continue représente l'équivalent en tension du champ résiduel mesuré. Et la variation d'amplitudes peut correspondre à des composantes résiduelles hautes fréquences existant dans le signal démodulé.



**Figure 5.12** : Chronogramme et spectre du signal démodulé

### 3.4 Chronogramme et spectre du signal de sortie de l'amplificateur d'erreur

Pour éliminer les composantes résiduelles hautes fréquences du signal, nous avons filtré le signal démodulé à l'aide du filtre passe bas de Butterworth d'ordre 5 pour une fréquence de coupure  $f_c=500$  Hz. La **Figure 5.13** donne l'allure du chronogramme et du spectre du signal de sortie de l'amplificateur d'erreur. Le signal de sortie de l'amplificateur d'erreur est acheminé vers l'arduino. Ce dernier s'occupe de sa transmission vers l'ordinateur.



**Figure 5.13** : Allures du chronogramme et du spectre du signal de sortie de l'amplificateur d'erreur

Le filtre suivi d'un comparateur à seuil de hauteur égale à l'amplitude du signal alternatif donne un signal continu d'amplitude 550mV correspondant au résidu vu par la sonde. Il suffit d'y ajouter la valeur du champ de compensation pour obtenir le champ mesuré.

La simulation nous a permis de comprendre le fonctionnement de nos sondes et de réaliser les dispositifs nécessaires pour extraire l'information véhiculée par ces sondes. La complexité du signal de sonde nous a obligés d'utiliser des systèmes intelligents comme l'arduino et le pc portable. Notre capteur trifluxgate est un prototype dont il faudra améliorer pour mesurer les éléments du champ magnétique terrestre avec les précisions exigées des communautés scientifiques.

#### **4. Perspectives**

Trois inconvénients majeurs ont été relevés au cours de nos différents essais de mesures et de tests et méritent d'être améliorés dans les prochaines versions de notre capteur trifluxgate :

- la proximité des sondes par rapport au dispositif électronique. Il faut trouver un compromis pour placer nos sondes par rapport aux électroniques associés. Les éloigner risque d'affaiblir les signaux, les rapprocher, elles perturbent les valeurs lues.
- au moins quatre retournements de sondes sont nécessaires pour effectuer les mesures d'un élément du champ magnétique. Nous avons pu éviter ces différents retournements des sondes, mais nous n'avons tenu compte que des trois valeurs maximales vues par les sondes, ces données négligées peuvent, pourtant, augmenter la sensibilité de nos sondes. Un effort devrait être fait pour la prise en compte de ces données dans les différentes équations établies.
- les mesures des composantes horizontales Nord et Est géographiques supposent également la connaissance de la direction du nord géographique, direction obtenue par visées d'astre, opérations indépendantes des mesures des éléments du champ mais doivent être effectuées au préalable. Nous envisageons d'équiper notre dispositif d'un système pouvant matérialiser la direction du nord géographique. Ce système permet de relever les positions du Soleil à des instants précis par rapport aux axes du repère orthonormé des sondes et de déduire de ces informations les orientations azimutaux de ces axes et leurs déviations du nord géographique

## CONCLUSION

Dans l'industrie, les applications des champs électriques et magnétiques ont été classées en six familles. Cette catégorisation respecte les gammes de fréquences mises en œuvre par les machines, sauf pour la sixième famille qui regroupe toutes les télécommunications quelle que soit la fréquence. Aussi, sommes-nous exposés en permanence aux champs électrique et magnétique, dans notre environnement domestique ou sur le lieu de travail. Notre confort en est largement tributaire.

Dans les milieux industriels, ces champs générés par les diverses technologies recouvrent une très large gamme de fréquences, mais la majorité sont de faible puissance, leurs intensités sont très inférieures aux niveaux de référence mesurables dans les zones où l'exposition est significative : 5kV/m pour le champ électrique et 100mT pour le champ magnétique. Ces champs comportent donc peu de risques pour l'homme. Les amplitudes des champs tellurique et magnétique naturels sont très faibles comparées à celles des champs industriels, de l'ordre du mV/m pour le champ tellurique et de quelques milliers de nT pour le champ magnétique.

Néanmoins, il est important de connaître les différentes caractéristiques du champ magnétique. Dans notre thèse, nous avons réalisé un « capteur trifluxgate », composé de six sondes fluxgates, l'électronique associée et un dispositif numérique d'affichage, d'acheminement et de sauvegarde des données acquises. La conception d'un tel instrument s'appuie sur les acquis d'une sonde fluxgate pour mesurer les angles, et les transposer pour effectuer les différents éléments du champ magnétique terrestre tout en évitant l'utilisation de deux ou plusieurs appareils. En effet, une sonde fluxgate, placée parallèlement à l'axe optique d'un théodolite, permet de déterminer les angles. Elle est libre de se mouvoir aussi bien dans le plan horizontal que dans le plan vertical. Les mesures reposent sur le principe de détection de champ nul ou « méthode de zéros ». Les directions azimutales ou de site ainsi définies sont celles perpendiculaires au champ observé. L'électronique associé à la sonde est conçue de telle façon que la sonde se sature facilement dès qu'on s'écarte significativement de ces directions. Couplée à la

---

mesure d'intensité par un magnétomètre, une simple transformation de systèmes de coordonnées permet d'accéder aux autres composantes, et le champ est parfaitement déterminé.

Une variante améliorée de cette « méthode de zéros », est la « méthode de résidus ». Elle consiste à orienter la sonde dans une direction voisine à ces directions azimutale et de site. Les valeurs résiduelles mesurées par la sonde représentent ainsi les valeurs du champ observé. Ces valeurs résiduelles sont tirées des tensions induites dans les bobines de détection. Elles risquent d'être trop élevées pour les sondes et doivent être compensées par l'électronique de la sonde. Les valeurs attribuées au champ de compensation étant connues, cette technique a permis d'accéder aux éléments horizontaux du champ observé compte tenu des relations de passage d'un système de coordonnées à l'autre.

La « méthode de résidus » a été transposée au capteur trifluxgate pour accéder aux différents éléments du champ magnétique. Le capteur comprend six sondes fluxgates triaxiales, deux sondes pour chacun des axes d'un système orthonormé. Ce capteur mesure les intensités du champ dans n'importe quelles directions. Les lectures faites sur les afficheurs nous donnent directement les valeurs des composantes projetées sur les axes des sondes, corrigées des valeurs de compensation préétablies sur chacune d'elles.

Indépendamment des orientations des sondes, l'intensité totale du champ magnétique est obtenue en prenant la racine carrée de la somme quadratique des valeurs mesurées par le capteur « trifluxgate » en tenant compte des valeurs compensées. La valeur de la composante verticale Z est fournie par la lecture directe de l'afficheur associé à la sonde verticale corrigée des données de compensation et des erreurs de mesures. De la même manière, la valeur de la composante horizontale H est obtenue à partir de l'une des sondes horizontales, sachant que l'autre satisfait aux conditions de détection de champ nul. Ces deux grandeurs permettent ensuite de déterminer l'angle d'inclinaison du champ par rapport au plan horizontal.

La déclinaison du champ ne peut pas être mesurée sans aucune information sur la direction du Nord géographique. En effet, pour la déterminer avec une bonne précision, les directions des sondes horizontales doivent coïncider aux axes horizontaux d'un système cartésien dont l'axe Ox est confondu à celui du Nord géographique et l'axe Oy à l'Est géographique, difficilement à obtenir sur le terrain ou dans un laboratoire. Les résultats fournis par les sondes horizontales sont donc entachées de défauts systématiques dus au positionnement des sondes. La détermination des composantes Nord et Est ainsi que la déclinaison du champ magnétique soulève un problème qui ne peut être résolu sans munir le capteur « trifluxgate » d'un système lui permettant d'orienter l'une des sondes horizontales dans la direction du Nord géographique.

Le capteur trifluxgate est un dispositif utilisé pour détecter des champs magnétiques sur des directions quelconques. L'électronique associée aux sondes a été conçu pour isoler l'information contenue dans la tension induite dans les bobines de détection. Elle permet de commander les courants dans les différents enroulements des bobines d'excitation afin de déterminer les valeurs de compensation du champ. Ce circuit comprend entre autres un oscillateur à quartz, capable de générer un signal carré ultra-haute fréquence de l'ordre de 1 MHz et un amplificateur avant de solliciter ces bobines d'excitation à double noyaux cylindriques. Les enroulements de chaque bobine d'excitation sont conçue de telle sorte que la résultante du champ qu'ils créent vue par les enroulements de détection soit nulle. Les circuits de compensation sont gérés par des procédures gravées dans l'arduino, les valeurs du champ compensées sont modulables à travers des programmes élaborés sur un PC-portable. La valeur compensée, identique pour les composantes X et Z, est de l'ordre de grandeur de la partie principale du champ magnétique à mesurer. La morphologie de la tension induite dans la bobine de détection ressemble à celle d'une onde modulée en amplitude et en phase. L'amplitude est proportionnelle à l'intensité du champ superposé et la phase à son signe.

La sensibilité et le calibre de nos sondes sont déterminés expérimentalement. La sensibilité est déduite de l'étalonnage effectué à partir d'une source de caractéristiques

connues. Cette sensibilité est deux fois plus grande que celle préconisée par la norme internationale dictée par l'Association Internationale de Géomagnétisme et d'Aéronomie. Le calibre dépend par contre des valeurs de saturation des sondes.

Une analyse comparative des données de nos capteurs et celles des Observatoires a été également menée. Ces mesures ont eu lieu dans la station de Fihaonana. De cette analyse, nous avons conclu que le capteur trifluxgate peut concurrencer les dispositifs de mesures d'angles. Concernant les intensités, l'environnement magnétique des sondes doit être reproduit correctement au niveau des sondes, car les mesures des composantes se font dans la situation où les sondes sont parallèles aux composantes à mesurer. Les précisions de nos sondes sont du même ordre de grandeur que celles des instruments de mesures de l'Institut et Observatoire Géophysique d'Antananarivo.

Pour mieux comprendre le fonctionnement des différents modules de notre dispositif électronique, nous avons simulé les morphologies des signaux à chaque étape du traitement. Le signal d'excitation est supposé être un signal rectangulaire. Il fournit des champs magnétiques alternatifs dont la résultante vu des enroulements de détection est nulle. La présence d'un champ magnétique externe rompt l'équilibre et induit au niveau des enroulements de détection un signal modulé en amplitude et phase. La détection synchrone est utilisée pour récupérer l'information véhiculée par ce signal. Les chronogrammes des signaux sont assez complexes, par contre l'analyse spectrale permet de bien comprendre leurs natures.

---

**REFERENCES**

- [1] **Du Trémolet de Lacheisserie, Étienne; Damien Gignoux; Michel Schlenker, 2005.** « Magnetism: Fundamentals ». Springer. pp. 3–6. ISBN 0-387-22967-1.
- [2] **Fowler, Michael, 1997.** « Historical Beginnings of Theories of Electricity and Magnetism ». Rapporté le 02/04/2008.
- [3] **Vowles, Hugh, P., 1932.** « Early Evolution of Power Engineering ». Isis. University of Chicago Press. 17 (2): 412–420 [419–20]. doi:10.1086/346662.
- [4] **Guiguizi.** « The testimony also took the burnt bone from the tongue if it was taken from the magnet. » The section "Fanying 2" (The Second Reaction).
- [5] **Li, Shu-hua, 1954.** "Origine de la Boussole II. Aimant et Boussole". Isis (in French). 45 (2): 175–196. JSTOR 227361.
- [6] **Lunheng.** "Amber takes up straws, and a load-stone attracts needles". In the section "A Last Word on Dragons" (Luanlong)
- [7] **Schmidl, Petra G, 1996–1997.** "Two Early Arabic Sources On The Magnetic Compass". Journal of Arabic and Islamic Studies. 1: 81–132.
- [8] **Einstein A,** "On the Electrodynamics of Moving Bodies", June 30, 1905.
- [9] **Lanza, R. and Meloni, A., 2006.** « The Earth's Magnetism - An Introduction for Geologists ». Würzburg: Springer, 2006.
- [10] **Coulomb, J., Jobert, G., 1976.** « Traité de géophysique interne ». Tome II, Magnétisme et Géodynamique. Masson Paris – New-York – Barcelone – Milan.
- [10] **Jankowski, J. and Sucksdorff, C., 1996.** « Guide for Magnetic Measurements and Observatory » Practice. Warszawa: International Association of Geomagnetism and Aeronomy, 1996.
- [11] **Matzka, J., Chulliat, A., Manda, M., Finlay, C.C. and Qamili, E.** Geomagnetic Observations for Main Field Studies: From Ground to Space. Published online : Springer, 2010

- 
- [12] **Magnetic North, Geomagnetic and Magnetic Poles.** 5 Jun. 2012.  
<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/poles/polesexp.html>
- [13] **Griffiths, David J.** (1999). Introduction to Electrodynamics (3rd ed.). Prentice Hall. pp.255–8. ISBN 0-13-805326-X. OCLC 40251748
- [14] **Knight, Jones, & Field,** "College Physics" (2007) p. 815.
- [15] **Cullity, B. D. & Graham, C. D.** (2008). Introduction to Magnetic Materials (2 ed.). Wiley-IEEE Press. p. 103. ISBN 0-471-47741-9.
- [16] **"Units for Magnetic Properties"** (PDF). Lake Shore Cryotronics, Inc. Archived from the original (PDF) on 2011-07-14. Retrieved 2012-11-05.
- [17] **John Denker,** Electromagnetism using Geometric Algebra versus Components"  
[www.av8n.com/physics/maxwell-ga.htm](http://www.av8n.com/physics/maxwell-ga.htm)
- [18] **C.F Gauss,** 1832 « The Intensity of the Earth's Magnetic Force Reduced to Absolute Measurement »,
- [19] **Grosvenor and Wesson** 1997, p. 107.
- [20] **Poulter, Thomas C.** 1935 « Outline of the Scientific Accomplishments of the Byrd Antarctic »Expedition II, 1933-1935.
- [21] **Modelski,** Tadeusz, 1986. The Polish Contribution to The Ultimate Allied Victory in The Second World War. Worthing, England. p. 221.
- [22] **F. Kaluza,** A. Gröger et H. Gröger, New and future applications of fluxgate sensors, Sensors and Actuators A, vol. 106, pp. 38-51, 2003
- [23] **P. Ripka,** Noise and stability of magnetic sensors, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol. 157-158, pp. 424-427, 1996
- [24] **RIPKA, Pavel,** Magnetic Sensors and Magnetometers. Artech House Publishers. ISBN-10:1580530575. 494 p.
- [25] **DANMARKS METEOROLOGISKE INSTITUT.** Ørsted mission web page online]. Last revision 4th of July 2004. URL: <<http://dmiweb.dmi.dk/fsweb/projects/oersted/>> [cit.2011-6-3]

- 
- [26] **NIELSEN et al.** Development, construction and analysis of the 'Ørsted' fluxgate magnetometer. *Meas. Sci. Technol.* 1995
- [27] **AUSTER et al.** The THEMIS Fluxgate Magnetometer. *Space Sci. Rev.* 2008.
- [28] **CARR et al.** The Double Star magnetic field investigation: instrument design, performance and highlights of the first years observations. *Annales Geophysicae.*2005.
- [29] **GLASSMEIER et al.** The Fluxgate magnetometer of the BepiColombo Mercury Planetary Orbiter. *Planet. Space Sci.* 2008.
- [30] **D.I. Gordon, R.H. Lundsten, R. Chiarodo,** Factors affecting the sensitivity of gamma-level ring-core magnetometers. *IEEE Trans. Magn.* 1(4), 330–337 (1965).
- [31] **F Primdahl,** The fluxgate mechanism, part I: the gating curves of parallel and orthogonal fluxgates. *IEEE Trans. Magn.* 6(2), 376–383 (1970).
- [32] **H. Aschenbrenner, G. Goubau, Eine Anordnung** zur Registrierung rascher magnetischer Störungen. *Hochfrequenztechnik und Elektroakustik* 47(6), 177–181 (1936)
- [33] **J.R. Burger,** The theoretical output of a ring core fluxgate sensor. *IEEE Trans. Magn.* 8(4), 791–796 (1972)
- [34] **A.L. Geiler et al.,** A quantitative model for the nonlinear response of fluxgate magnetometers. *J. Appl. Phys.* 99(8), 08B316 (2006)
- [35] **F. Primdahl, P. Ripka, J.R. Petersen et O.V. Nielsen,** The sensitivity parameters of the short-circuited fluxgate, *Measurement Science Technology*, Vol. 2, pp. 1039-1045, 1991
- [36] **O.V. Nielsen et al,** Development, construction and analysis of the Orsted fluxgate magnetometer, *Measurement Science Technology*, Vol. 6, pp. 1099-1015, 1995
- [37] **J.R. Petersen, F. Primdahl, B.Hernando, A. Fernandez et O.V. Nielsen,** The ring-core fluxgate sensor null feed-through signal, *Measurement Science Technology*, Vol. 3, pp. 1149-1154, 1992
- [38] **J. T. SANTOS et R. G. MEYER,** “A One Pin Crystal Oscillator for VLSI Circuits”. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 19(2), 228–236, April 1984 .

---

[39] **Jacques bitterly et jean Michel Cantain**, “Portable Magnetometer Theodolite with Fluxgate Sensor for Earth’s Magnetic Field Component Measurements”. at IPG Paris ,1982

[40] **Jacques bitterly et jean Michel Cantain**, L’instrument utilisé est un magnétomètre proton champ total de type GSM-19 GW à effet « overhauser »,1982

## PRESENTATION DES ARTICLES ET COMMUNICATIONS

**A.I. Article publié au Journal International**, Journal of Precious Engineering Research and Applications (IJPERA) ISSN: 2456-2734, Vol. 2, Issue 2, November 2017, pp. 01-08)

### **Design and realization of a sensor fluxgate magnetometer**

Jaolalaina A. ANDRIANAIVOARIVELO<sup>1</sup>, Falinirina ANDRIANJATOVO<sup>1</sup>, Minoson S. RAKOTOMALALA<sup>1</sup>, Flavien N. RANAIVO-NOMENJANAHARY<sup>2</sup>

*1 Institute for the Management of Energy (IME), University of Antananarivo, Madagascar*

*2 Physics and Applications MENTION, University of Antananarivo, Madagascar*

### **Design and realization of a sensor fluxgate magnetometer**

---

**Abstract:** *An improved digital fluxgate magnetometer using digital logic and a high resolution digital-analog converter is used to digitize a magnetic signal. They are intended for signal processing algorithms. The magnetometer includes an oscillator signal output and a magnetic fluxgate sensor having a drive coil coupled to the oscillator a feedback coil, and a sense coil. An analog multiplier is coupled to the sense coil and the oscillator and generate signal passing through analog low pass filter. Comparator is coupled to the analog multiplier, and register is coupled to the comparator and deliver logical 0 or 1 in accordance with the output of the comparator. Digital filter receives these logical values to produce the fluxgate magnetometer final output. High resolution digital-analog converter is placed between register and feedback coil of the magnetic fluxgate sensor in a feedback loop of the sensor. This kind of converter produces a very high resolution (typically more than 22 bits) that is necessary to adequately represent the dynamic range of the sensor.*

**Keywords:** *coils, fluxgate, magnetic field, magnetometer, sensor*

---

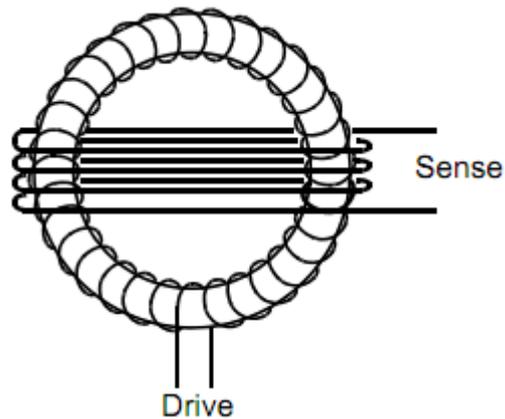
## **Introduction**

The development of magnetic sensors is justified by these multiplicities application. Generally, it purpose to increase resolution while reducing size and power consumption. Of such sensors are present in many applications: from electronic compasses [1], information reading in storage systems [2] and much larger applications such as nondestructive testing of metals [3] or medicine field like detection of markers [4]. Among all these sensors, fluxgate sensor has a huge advantage: The ability to measure vector field over a wide bandwidth with a very high resolution. All these magnetometers have naturally the vocation to detect and/or measure a simple magnetic field. These fields may be produced by a source or by a test body for measuring a further quantity (an electric current, a position, an angle, a bit ...). In this work, we are particularly interested in the study and measurement of low frequency and low amplitude magnetic fields. So we focus on high sensitivity magnetometer. A san instrument of its kind, a magnetometer consists mainly of a sensor, the physical element that transforms the variation in magnetic magnitude into an electrical magnitude, a conditioner responsible for recovering the electrical quantities and sometimes a signal processing unit to format the output of the conditioner. At the end, a simulation was performed to determine the most suitable type of signal. Unlike most of existing magnetometers, we design a three-dimensional

fluxgate which detects weak magnetic fields from all directions. The improvement is the use of three coils.

## Theory of operation

Fluxgate magnetometers are used to measure the vector components of magnetic field. Their typical measurement range extends approximately from 0.1nT to 1mT DC to a few kHz. Its toric core is formed of a thin easily saturable ferromagnetic strip (permalloy).



**Figure 1:** Fluxgate sensor [4]

An excitation winding, supplied with alternating current, is wound around this core, which creates a magnetic field circulating around the core given by Biot-Savart.

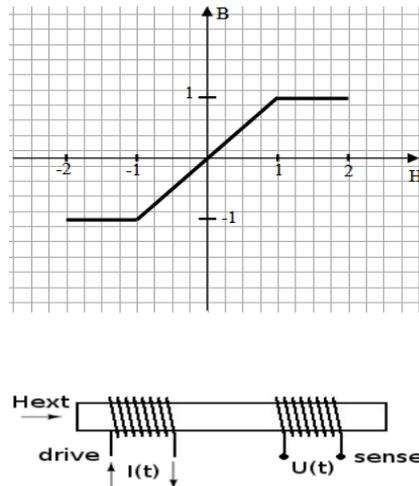
$$B(r) = \frac{\mu_0}{4\pi} I \int_L \frac{dl \vec{R}}{R^3} \vec{r} \quad (1)$$

$B(r)$  : Magnetic induction in the distance  $r$ .  
 $\mu_0$  : Magnetic permeability  
 $R$  : Divergence and the curvature of the formula

This last equation (1) show the magnetic field value inside the circle core of the drive coil. The drive coil, while the current  $I$  is flow through it, it give a magnetic field at the toric core. The sum of two magnetics fields vector in the opposite diametrically at the core is zero. If the toric ray is long, the magnitude of the magnetic field at this toric is low. This sum is always zero all the value of the current  $I$  because the two vector have the opposite sense.

This magnetic field causes a periodic saturation of core, alternately clockwise and counterclockwise way, and keeps an average permeability greater than that of air. When the core is saturated, its permeability becomes identical to that of air. If there is no

magnetic component in the axis of the measuring coil, there is no flux variation. On the other hand, if a magnetic field component is present in this axis, every time the ferrous material passes from a saturation condition to another, the flow through the core will change from a low level to a high [8]. The electrical signal (potential) obtained is proportional to the intensity of the external magnetic field acting along its axis (figure 2). Using filtering techniques associated with an electronic system, it is then possible to deduce the value of the external magnetic field.



**Figure 2:** Transformer analogy

Same the transformer, the existence of external magnetic field break the magnetic balance at the toric. The magnetic flux variation is given by the following formula.

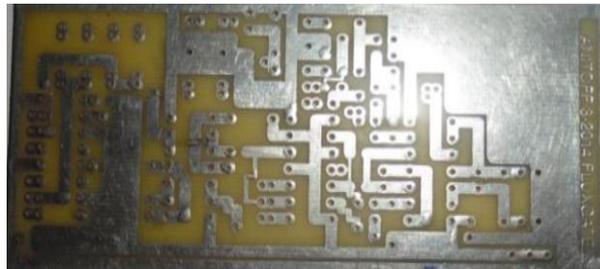
$$\Phi = L \cdot I = n \cdot \Delta B \quad (2)$$

- L : Inductance of reel
- I : Current
- N : Number of spiral
- $\Delta B$  : Magnetic field module

A transformer is a device can convert the alternative current to another level alternative current. Its application is very used for the high power voltage electric of the current transport. It also used to have a nominal voltage at the electronic circuit. However the two application of the transformer, the basic principle of operation is the same. If a permanent magnet is moved front of the coil, there is an alternative current in the wire who formed the coil. The rotation of the magnet and the current frequency is the same. The voltage between the terminals of coil depend the speed of magnet rotation. There is not current at the coil while the magnet permanent is unmoved. The rotation give the variation of the magnetic flux front of the coil and create the electric current. When the terminal of the coil is connected to an alternative current. There are magnetic field

variation inside the coil core. At the transformer, supplied for an alternative current, there are magnetic flux variation who can create a current. There are two coil at the transformer, the primary coil and secondary coil. If the first coil is supplied for an alternative current, it can give a sinusoidal magnetic field inside its core. The second coil catch the magnetic flux variation and give another level sinusoidal voltage according to the number of spire between the two coils. The drive and sense coil are similar to a transformer. The drive coil create a magnetic field that is balanced for a toric shape of the core. The sense coil is like the secondary coil in the transformer. It can give a current if there are magnetic flux variation from the drive coil. The equilibrium of the toric core magnetic field is break when an external magnetic field appear front of the sense coil. This unbalance of the magnetic field cause the magnetic flux variation through the sense coil and create an induced voltage in its terminal. This terminal voltage of the sense coil is the analogical shape of the detected magnetic field. The sense coil output voltage and the detected magnetic field are proportional. For design, we used the printed circuit boards (PCB). The figure 3 show this PCB picture [6].

It variation



**Figure 3** : Printed circuit

The most commonly reading technique is based on the detection of the second harmonic. The second harmonic component of the induced voltage in the detection coil that is proportional to the external field. It is extracted by the operation of a synchronous demodulator. Other reading strategies have been developed recently: The detection coil is short-circuited and an output current flow barrier is obtained. In this case, the quantity which is proportional to the external magnetic field is the current in the sensing coil. A capacitor is often related to the detection coil. This capacitor is in conjunction with the inductance of the detection coil, there is formed a highly selective filter, resulting in an output stream.

Sensor sensitivity can be improved by optimizing the induced voltage, and this can be done using the following solutions:

- Increasing the excitation frequency;
- Increasing the number of turns of the detection coil;
- Increasing the cross section of the ferromagnetic material, since a larger section requires a larger current to saturate the ferromagnetic material thus increases energy consumption.

Through these solutions, we get the best performance of the detection of magnetic field. So magnetometer is able to measure static or slowly varying magnetic fields with an

amplitude of between 1 100 nT and mT and reach a resolution of about 0.1 nT. The absolute accuracy of known fluxgate sensor is approximately 100 nT and can reach 1 nT for the best devices. In these sensors, the temperature coefficient is less than 0.1 nT per degree Celsius, it is usually between 30 and 50. In terms of dynamic range and resolution, fluxgate magnetometers do better than Hall sensors and are preferable with respect to SQUID because of their lower cost and size. Fluxgate magnetometers operate can use on soft magnetic material having the following characteristics [7]:

- Low losses at the excitation frequency, which is typically several tens of kilohertz range;
- A value of low saturation induction, which involves low energy consumption;
- Minimal magnetostriction effect;
- A low magnetic noise, due to the easy reversal of magnetization, and a minimum number of structural imperfections;
- Uniformity of cross section.

To calculate the magnetic field value, we use the following formula.

$$E = -\frac{\Delta\Phi}{\tau} \quad (3)$$

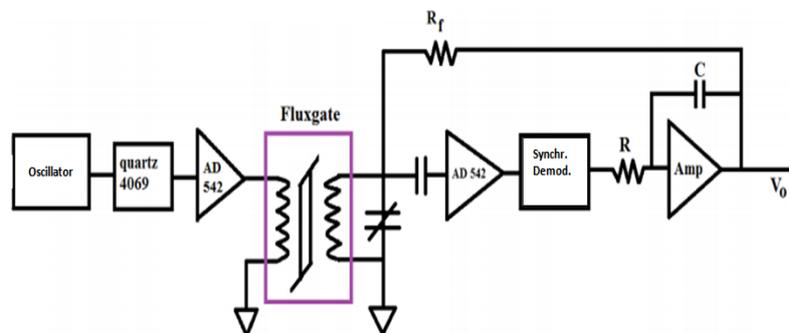
$$\Rightarrow E = \frac{2.n.S.\Delta B}{\tau} \quad (4)$$

$$\Rightarrow \Delta B = \frac{\tau.E}{2.n.S} \quad (5)$$

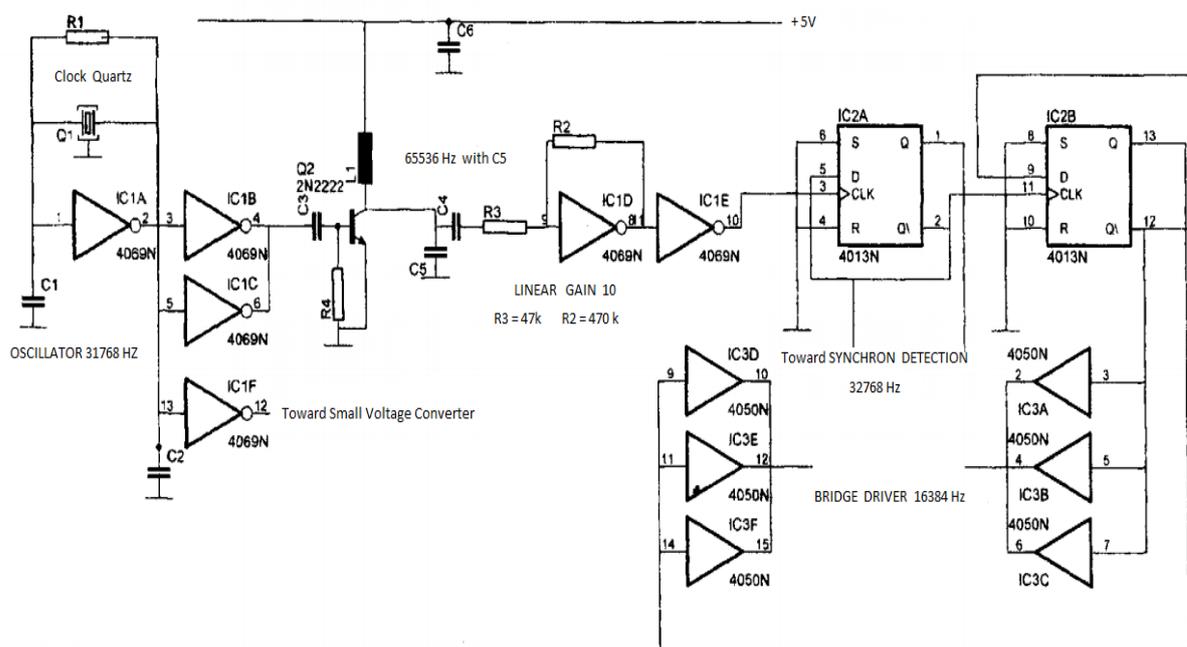
S : Toric section

$\tau$  : Half period

The fluxgate is the heart of the magnetic field sensor. This device supplied by an electronic oscillator bloc. To the fluxgate output, there is a signal amplifier and a synchronous demodulator. The following figure 4 show this magnetic field sensor diagram.

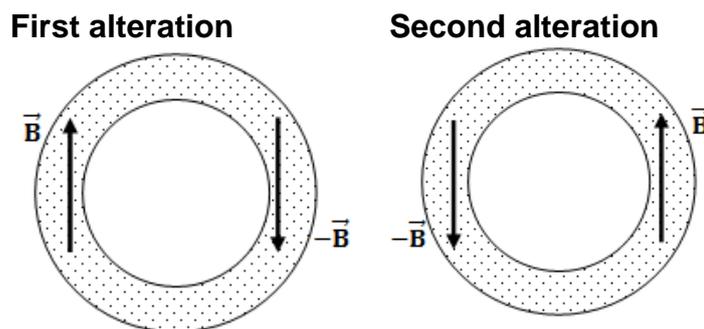


**Figure 4:** Tabular diagram of the magnetic field sensor



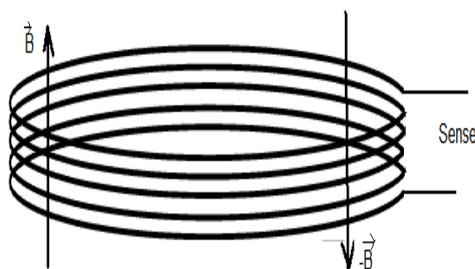
**Figure 5:** Electronic command of the driver and sense coil

To excite the driver coil, we used a quartz oscillator. This oscillator type can give very high frequency (65536Hz). The 4069N are the frequency divider. The oscillator electronic command of the driver coil is divide for four parts. The first is the quartz oscillator who give high frequency and low voltage with his nominal frequency. The quartz oscillator is commanded by a capacitor C1 and the resistor R1. The second part of this circuit is the signal amplifactory. This amplifier is based for a transistor 2N2222. The current voltage from the first part of the oscillator is very low voltage. So we use another circuit bloc to rise this low voltage. The third part of this command is the divider of frequency. It include two digitals invertor 4013N. These IC is clocked by the 4069N output (IC1D and IC1E). This clock have a high frequency oscillator 65536 Hz. After the first IC 4013N (IC2A), this frequency have a value 32768 Hz. This last frequency used to command the synchronal detection. The second 4013N (IC2B) is clocked by the first frequency divider. It give 16384 Hz of frequency. This last frequency is used to command the drive coil. The last part of this command circuit is the operational amplifier. This amplifier include an integrated circuit 4050N that content six operational amplifier. This amplifier used to amplify the low voltage from the second 4013N (IC2B) output. This amplified signal is used to command the drive coil at the fluxgate device. The oscillator supplies the toric reel to balance the magnetic field through its core. The magnetic field at the toric core are diametrically opposite. This opposition mean the existence of balanced magnetic field inside the drive coil. Therefore, there is not induced voltage to the drive coil terminal. The following figure 6 gives a more explanation for it.



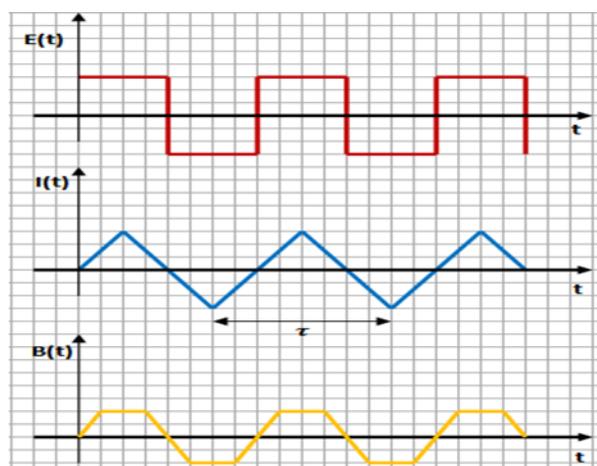
**Figure 6:** The position of magnetic field into the toric core.

Through the sense reel, the magnetic field is positioned like the figure 7



**Figure 7:** Magnetic field positioning through the sense reel.

The sum of the magnetic field goes through the sense reel is zero. With an external magnetic field, this balance is broken and results in a magnetic field variation through the sense reels. This variation induces the potential between the reel poles. The intensity of the external magnetic field adds to one of the two opposite magnetic vectors  $\vec{B}$ . The current  $I(t)$ , the magnetic field  $B(t)$  vary according to the sense output voltage signal. The Figure 3.2 shows this variation.



**Figure 3.2:** Variation of  $I(t)$  and  $B(t)$  according to  $E(t)$  variation.

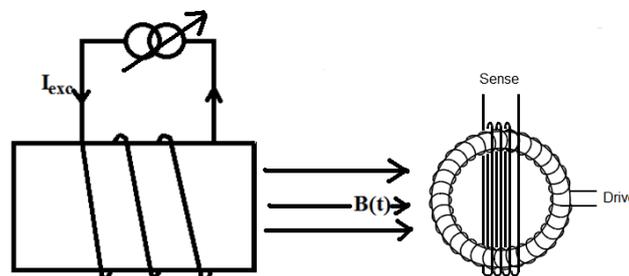
## SIMULATION with ISIS 7 Pro

Before realization we simulated this circuit with Proteus software (Proteus ISUS Professional) to check for any anomalies but also to see if the voltage waveform and intensity is lower than the limit of datasheet component.

Proteus is able to simulate practical and accessible electronic circuits with well animated components. It is intended also to the design of PCB. Two modules are included in Proteus software: Intelligent Input System Schematic (ISIS) and Advanced Software Routing Editing (ARSE). ISIS is mainly used for editing electronic circuits. Through these simulations, errors can be detected from the design stage. Because of its Virtual System Modeling module (VSM), it can control the majority of the graphic aspect of electronic circuits. The ARSE software is a tool for editing and routing circuits and complements ISIS. ARSE allows the automatic routing components.

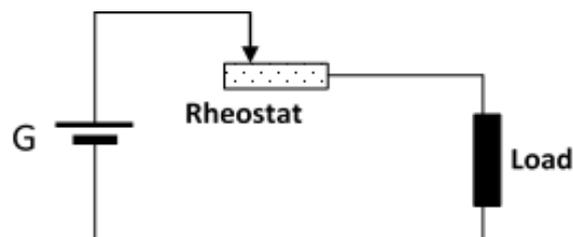
There is no magnetic field to detect in the simulation. Therefore, we use another source instead the detect signal. This signal can be eliminated while adjusting the excitation voltage. It means, if there are another external magnetic field, the sensor gives a new value at the scope.

Our fluxgate magnetometer test uses an electromagnet to vary easily the magnetic field intensity. It is supplied by a variable current source. If the current has a strong intensity, the magnetic field also becomes strong. This method shows the following figure 6.



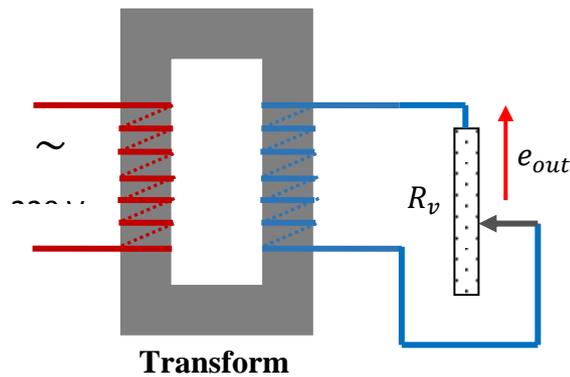
**Figure 9:** Variable electromagnet positioning near the fluxgate.

The first part is the iron core reel. If it is excited by a continuous current, the magnetic field flux appears at its core extremity. To vary the magnetic field magnitude, we used the current variable generator. This generator is the same as all continuous generators but it uses a rheostat to keep its current variation. This diagram circuit is like the following figure 10.



**Figure 10 :** Diagram circuit of variable generator

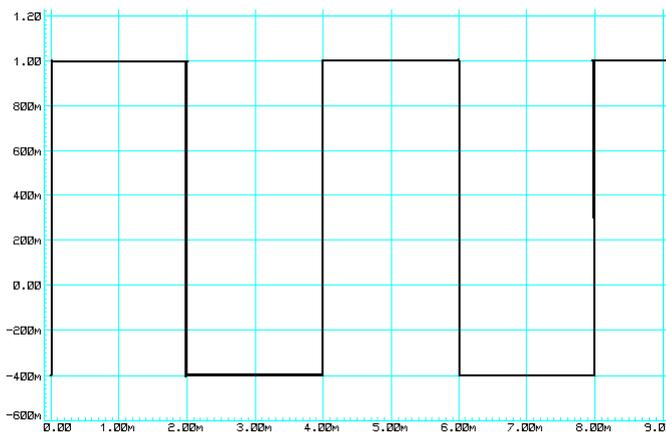
This circuit diagram is the simple show of the current variable generator. G can replace for a useful continuous generator like battery. But the autotransformer is well instead the battery because it have a fix current value and a variable voltage  $R_v$ . This autotransformer is made up of one reel and one variable resistor. This variable resistor used to make a voltage divider to have a voltage between 0 V to 200V. The figure 11 show the main diagram of the autotransformer.



**Figure 11** : Main diagram of a autotransformer

## Results and discussions

Whithout external magnetic field, no sgnal modification is show into the scop who measure the amplifcator output voltage. But in reality, he show a low voltage signal come from the earth magnetic field existence. This first simulation by ISIS are giving the folowing figure 2.



**Figure 12:** Output voltage without external magnetic field.

This figure shows the existence of the earth magnetic field. To calculate the magnetic fields value, we use the formula (5).

$$E = 2 \text{ V}$$

$n = 20$  turns

$\tau = 47 \times 10^{-6} s$

$S = 34 \times 10^{-6} m^2$

With those values, we calculated the earth magnetic field in this area.

$\Delta B = 0,069117647 T$

With the formula (5) and the following value, we had table 1.

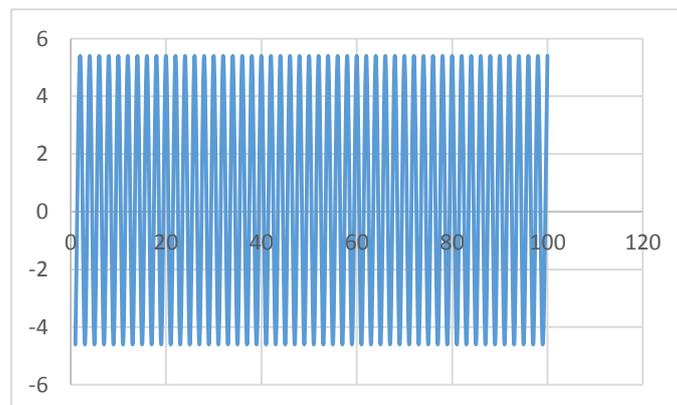
$n = 20$  turns

$\tau = 47 \times 10^{-6} s$

$S = 34 \times 10^{-6} m^2$

We orient our device to the east and west to annul the existed earth magnetic field. Because earth magnetic field is oriented to the south toward north. If we orient our fluxgate in this last direction, we detect the earth magnetic field magnitude.

We tested our fluxgate device to measure the magnetic field from the electromagnet. To have a magnitude variation of the magnetic field, we change the current with the rheostat. We choose 12 V to our autotransformer. After Diode Bridge and 4200  $\mu F$  capacitor, we have a continuous generator 12.1V/3,2A. Therefore, we can vary this current amount between 0 A to 3A with a fix voltage 12V. The variation of the detect magnetic field is depend of the electromagnet current supply. In the amplifier terminal, the current value is 0,5 A and 10V with 32768 Hz. We connected the drive toric reel between its terminals. After calculation, we find out the magnetic field magnitude inside the toric reel. We set the electromagnet magnetic field to 0,4 T that to say the E voltage is 12V. We put this electromagnet front of the sense reel to appear an external magnetic field. The sense reel detect this last magnetic field. We connected a scope between the sense reel terminal and we have a curve like the Figure 4.4.



**Figure 4.4** : Detect magnetic field sine on the scope

This figure is non symmetric compared with the horizontal axis. Therefore, we can calculate the magnetic field intensity. This magnitude is absolute value of the difference

between the maximal and minimal amplitude. We find out after calculation that the magnetic field detected is exactly 0,4 T.

## **Conclusion**

The detection of magnetic field use a lot of technic and precision. The fluxgate sensor is a device who can detect the magnetic field magnitude. In our work, we realized an apparatus who can measure the intensity of a magnetic field. We used two reel for our sensor. This sensor is commanded by the digital electronic circuit. It serve a high frequency square sine. This high frequency square sine commands the drive reel to balance the magnetic field inside the reel toric core. When there are another external magnetic field, this balance is disrupt and break. This unbalance give a variation of the magnetic field through the sense reel and create an induced voltage between its terminals. This induced voltage is the electric shape of the detect magnetic field. In the scope, we have a periodic sine non symmetric compared with horizontal axis. The detect magnetic field value is calculated from difference between the maximal and minimal amplitude. This paper will use to the researcher who want to design a magnetic field sensor independent of the external temperature and pressure. This device can detect a determined direction magnetic field. It can't give a true value of a magnetic field magnitude while it is oriented on bad direction.

## **REFERENCES**

- [1] *J.E. Lenz, A review of magnetic sensors, 1990*
- [2] *C. Smith et R. Schneider, proceeding and sensor, 1999*
- [3] *Rene Jensen, Michael Nielsen, PI & LC. Osc Metal Detector, 2003*
- [4] *Chengliu Li, Yicheng Bai, Wenyan Jia and Mingui Sun, Eating Event Detection by Magnetic Proximity Sensing, PMC 2014 Oct 21*
- [5] *J. Heremans, Solid-state magnetic field sensors and applications, Journal of Physics, D. Applied Physics, Vol. 26, 1993*
- [6] *D. Robbes et al, Highly sensitive uncooled magnetometers: State of the Art. Superconductive magnetic hybrid magnetometers, an alternative to SQUIDS, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 11, N°1, 2001*
- [7] *Ripka, Advances in Magnetic field Sensors, IEEE SENSORS JOURNALS, VOL 10, NO. 6, JUNE 2010.*

A.I .Communication affichée à la conférence internationale HEPMAD 17 (21 – 26 Septembre 2017)



CONTRIBUTION TO THE IMPLEMENTATION OF THE RULES FOR THE CONSTRUCTION OF A POSITIVE ENERGY BIOCLIMATIC HABITAT IN MADAGASCAR FOR THE FOLLOWING CLIMATE AREAS: TEMPERATE, FRESH AND COLD, THEN THE INTERMEDIATE AREA.

RANDRIANARINOSY *Lead*; Thierry, ANDRIANAIVOARIVELO, *Jaolalaina*, RAKOTO JOSEPH *Contributors*, RANDRIAMANANTANY *Co-lead*.

ABSTRACT

The study of the contribution to the implementation of the rules of construction of a positive energy bioclimatic habitat in Madagascar for climatic zones: temperate, soft and cold, then the intermediate zone was undertaken. The objective is not only to produce rules for building a habitat on the premise that the exploitation and transformation of local natural resources can reduce the energy demand of buildings. But to develop prediction models of these hydric, hydrothermal behavior of local materials. The heating, ventilation and air conditioning. Thus, for our future, we save energy by renovating the building, combating unfavorable conditions for the design of the building with a view to isolating it or limiting heat losses by using renewable energies in any part of the country.

OBJECTIFS

- Global objectives**
- The building is decomposed into homogeneous zones determined according to the exposures and the occupancies by corresponding loads.
  - Locate in the energetic environment of the building, which includes the following elements: the enumeration of the energetic resources of the site using grid energies: local, fatal and renewable. But for our study, we do the analysis by solar energy. Then, the phases of studies make it possible to compare, in total cost (investment, operation, maintenance, depreciation ...) different coherent to consumption and a judicious combination of energies on the entire building.
  - Ensure all the comforts: visual, thermal, acoustic, ... and the sanitary qualities of the air and water spaces.
  - Provide bioclimatic techniques for the construction of a habitat
  - Produce building rules based on the principle of exploitation and transformation of local, natural resources-, in order to reduce the energy demand of buildings the study of the bioclimatic construction of a positive energy building:
- Specific objectives**
- To develop models for predicting the hydric, hydrothermal behavior of local materials.
  - Concept of energy saving constructions of tomorrow: dynamic thermal simulation (Metlab, Energie Plus ...).

EXPECTED RESULTS

- A good, better "future bioclimatic building"
- Sobriety and energy saving in a building, in all climatic zones
- Heating, air conditioning, ventilation of the habitat that guides any action in the area of health and well-being of the inhabitants.
- High technology capable of fighting against conditions unfavorable to the design of a building, limited heat losses or isolated a building using renewable energies in any area.

TECHNOLOGY FOR THE CONSTRUCTION OF A BIOCLIMATED BUILDING

- The zones have been actively involved in supporting the development of solar energy and the energy efficiency of buildings. During the course of the work, the capacities of the local actors are closely monitored by implementing the techniques, technology and rules required for construction. In order to build a bioclimatic building that meets the needs of energy competences, energy is mastered throughout the area studied on the trades, and assesses the employment needs in the buildings and professions concerned.
- Analyze the target for energy efficiency of new or existing buildings: consumption and local energy production.
- Propose effective technical and regulatory actions for construction and renovation.
- Application of standards (Low Energy Building (BBC), Energy Positive Building (BEPOS), High Energy Quality (HQE) to all new buildings: energy consumption less than or equal to 50kwh / m<sup>2</sup> / year renovation will respect these standards in advance to improve rental costs.
- Calculate the cost of these actions for the assessment of markets for energy potentials.



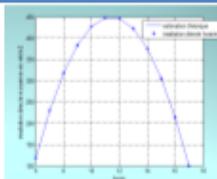
THEORETICAL RESULTS

THEORETICAL RESULTS

- Astronomical formulas
- Available data
- Hypothesis

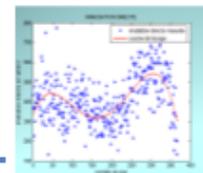
$$I(i, \gamma) = I_n * [\cos(h) * \sin(i) * \cos(a - \gamma) + \sin(h) * \cos(i)]$$

M = 366 days  
N = 12 months  
a: azimuth of the sun

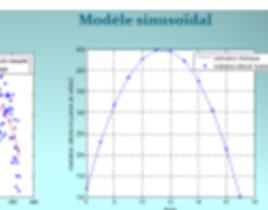
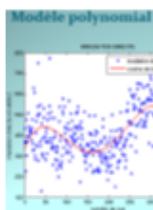


$$I(i) = I_n * [(\cos(h) * \sin(i) * \cos(a) + \sin(h) * \cos(i))]$$

M = 366 days  
N = 12 months  
a: azimuth of the sun  
h: solar height  
i: angle



$$y = a_0x^4 + a_1x^3 + a_2x^2 + a_3x^2 + a_4$$



Variation des paramètres a, pour I = 0°

h	a	i	I
0	0	0	0
15	0	15	0
30	0	30	0
45	0	45	0
60	0	60	0
75	0	75	0
90	0	90	0
105	0	105	0
120	0	120	0
135	0	135	0
150	0	150	0
165	0	165	0
180	0	180	0
195	0	195	0
210	0	210	0
225	0	225	0
240	0	240	0
255	0	255	0
270	0	270	0
285	0	285	0
300	0	300	0
315	0	315	0
330	0	330	0
345	0	345	0
360	0	360	0

Variation des paramètres a, pour I = 60°

h	a	i	I
0	0	0	0
15	0	15	0
30	0	30	0
45	0	45	0
60	0	60	0
75	0	75	0
90	0	90	0
105	0	105	0
120	0	120	0
135	0	135	0
150	0	150	0
165	0	165	0
180	0	180	0
195	0	195	0
210	0	210	0
225	0	225	0
240	0	240	0
255	0	255	0
270	0	270	0
285	0	285	0
300	0	300	0
315	0	315	0
330	0	330	0
345	0	345	0
360	0	360	0

CONCLUSION

By way of conclusion we can say that we have achieved the object of contributing to the implementation of the rules for the construction of a positive energy bioclimatic habitat in Madagascar for climatic zones.

The objective of this work was to ensure all the summer and winter comforts and the sanitary qualities of the spaces of the air, the water in a building. Its realization necessitated a study of the zones by developing models of prediction of the thermic, hydrothermal and hydric behaviors of local materials. It enables buildings to be made on a large energy consumer: with less energy to design an energy-efficient construction of tomorrow with the treatment and dynamic thermal simulation of the available data.

The bioclimatic analysis of the zones, of the construction allowed us to deduce the high techniques, able to fight against the conditions unfavorable to the design of a building. It also allowed us to propose a better future bioclimatic building. Indeed, its shape, its orientation and the choice of the materials used and the solar collector with positive energy can accommodate the maximum energy.

From the perspective, we hope by this study to have given an overview about the dynamics of the design of a building of a bioclimatic building and to have a plus to this path. As a result of research, weather conditions and atmospheric conditions, the results may be altered, improved locally and energetically.

REFERENCES

- Ministère de l'énergie et des mines, les énergies renouvelables, Antananarivo, 2004
- Les conditions cadres au niveau national: Présentation de Madagascar, « zonage bioclimatique », Rauh 1992, cité par Gottfert, 1998.
- RAKOTOSALAMA D. (1993) Contribution à l'étude du gisement solaire d'Antananarivo. Thèse de Doctorat, Université de Madagascar, Antananarivo, 180p
- MURRAY, R.(1975) Probabilité et statistique pour et problème. NEW YORK, 4e Mc Graw Hill, 382p
- CHASSERIAUX, J.M. (1994) Conversion thermique du rayonnement solaire. Paris, 4e Dunod, 273p
- Yves Jeannot (page consultée le 03 juillet 2005). Thermique solaire. (En ligne) Adresse
- [http://www.thermique55.com/principale/thermique\\_solaire.pdf](http://www.thermique55.com/principale/thermique_solaire.pdf)
- SFEIR, A. et GUANARRACINO, (1980) Ingénierie des systèmes solaires. Paris, 4e. Tec et Doc, 266p
- BERNARD, R. - MENGUY, G. et SCHWARTZ, M. (1980) Le rayonnement solaire : conversion thermique et applications, Paris, 4e, Tec et Doc, 275p

A.II .Communication affichée à la conférence internationale HEPMAD 16 (13 – 18 Octobre 2016)



## Study of triaxial fluxgate sensor

Jaolalaina Arisoa Andrianarivo, Misono RAKOTOMALALA,  
Flavien Noël RANAIVO-NOMENJANABARY, Falimirina ANDRIANJATOVO

Institut pour la Maîtrise de l'Energie (IME)  
Université d'Antananarivo, Madagascar

---

**CONTEXT**

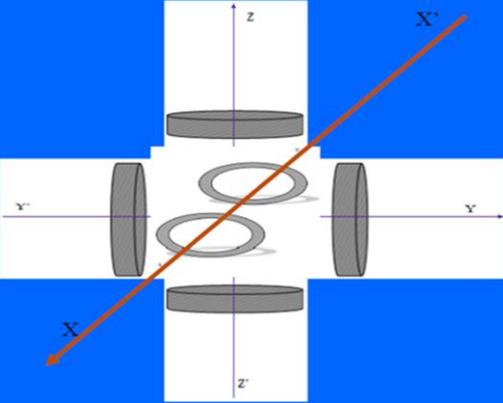
Trifluxgate sensor is a device can determine the magnetic field characteristic in many direction. For the three dimension of magnetic field, it contains six magnetic field sensors[1]. To work in the area who exist a lot of magnetic field, this device can show the direction, sense and the amount of the detect magnetic field. It have a lot of utilization in the scientist development [2]. The electronic compasses, the metal detector and the terrestrial magnetic field are the first utilization of the triaxial fluxgate sensor.

**PURPOSE**

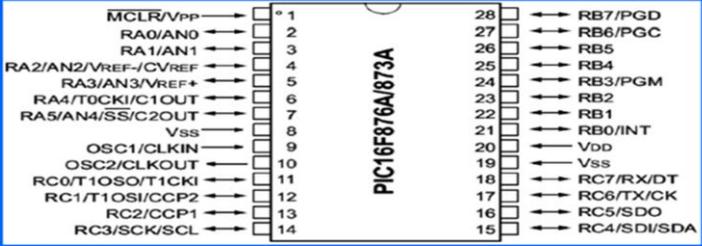
It comes to realize a device capable to treat the six signal from the six fluxgate sensor.

---

**THE SIX FLUXGATES SENSORS DISPOSITION**

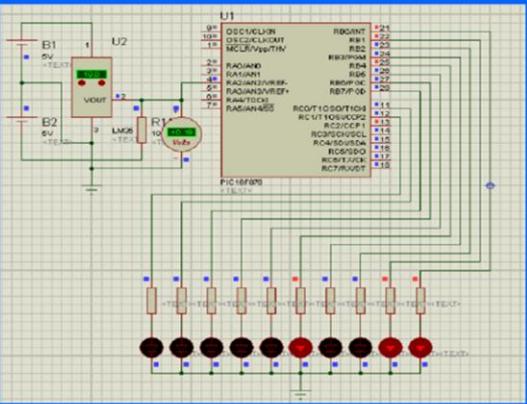


The three axes give the coordinates of the magnetic fields detected by the six sensors. To treat the electric data from the six sensors numerically. It is necessary to use an electronic circuit contained the analogical/digital converters. This circuit returns the continuous values of the captured signals to a discreet shape signal. The PIC16F876A is a integrated circuit programmable [8] to digitize the continuous sensor output voltage. It contains four analogic inputs.

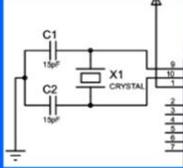


---

**ELECTRONIC SCHEMATIC DIAGRAM OF THE PIC16F876A**



This electronic schematic diagram show the connection between the sensor and the integrated circuit programmable. The sensor output connect to the pin 2, 3, 4, 5. The pin 11, 12, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28 give the digital values. It is necessary to program this integrated circuit before using. This program is make by the *mkroC for PIC* software. The output digital value is in binary number. To keep this value in decimal number, the LCD screen [8] can read this binary number and change it to the decimal number. This circuit show the PIC16F876A electronic simulation it is no power supply.



To keep work this IC, it is necessary to use two capacitor 15pF and one quartz oscillation. This IC is supplied by the 5V continuous generator.

---

**CONCLUSION**

Numerical treatment of the magnetic field sensor output voltage is very interesting. The magnetic field sensor give an analogical voltage. The PIC 16F876A can change this analog voltage to digital voltage. PIC 16F876A must be programmed before of its using. The detected magnetic field can treat to the informatics support after it binary conversion.

**BIBLIOGRAPHY**

[1] G. Esau, B. Noble, and I. N. Staddon, "On certain integrals of Lipschitz-Hankel type involving products of Bessel functions," Phil. Trans. Roy. Soc. London, vol. A247, pp. 528-551, April 1955.  
 [2] J. Clerk Maxwell, A Treatise on Electricity and Magnetism, 3rd ed., vol. 3. Oxford: Clarendon, 1892, pp.66-73.  
 [3] J. Doe, "Title of paper if known," unpublished.  
 [4] D. Robbins et al, Highly sensitive uncoiled magnetometers: State of the Art. Superconductive magnetic hybrid magnetometers, an alternative to SQUIDS, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 11, N°1, 2001  
 [5] F. Farka, Noise and stability of magnetic sensors, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol. 157-158, pp. 424-427, 1996  
 [6] Oleg Ingénieur de recherche, Commande: GRUSON - Eric. Document: Commande: LABORATOIRE D'ELEC.TROTECHNIQUE ET D'ELECTRONIQUE DE PUISSANCE DE LILLE  
 [7] F. Kéroux, A. Grégoire et H. Grégoire, New and future applications of fluxgate sensors, Sensors and Actuators A, vol. 106, pp. 38-51, 2003  
 [8] Olivier FRANÇAIS (2000) Coars-electroniques-CAN-CNA-Capteurs-Echantillonnage

**BIBLIOGRAPHY**

Address : Institut for the Management of Energy (IME), University of Antananarivo, Post Box 566, Antananarivo 101, Madagascar  
 Email : jaolalaina@gmail.com  
 Phone : +261 33 12 624 01

ANDRIANAIVOARIVELO Jaolalaina Arisoa

117

**A.III .Communication affichée à la conférence internationale HEPMAD 15 (17 – 22 sept 2015**



**TRIFLUGATE SENSOR MAGNETOMETER**  
**\*\*J. A. Andrianaivoarivelo\*\*, H.Z. Randrianandraina, M. Rakotomalala**  
 Département de Physique  
 Institut pour la Maitrise de l'Energie  
 Université d'Antananarivo, Madagascar

**CONTEXT**

An improved digital trifluxgate magnetometer using digital logic and a high resolution digital-analog converter is used to digitize [1] a magnetic signal. They are intended for signal processing algorithms [2]. The magnetometer includes an oscillator signal output and a magnetic fluxgate sensor having a drive coil coupled to the oscillator a feedback coil [3], and a sense coil. An analog multiplier is coupled to the sense coil and the oscillator and generate signal passing through analog low pass filter. Comparator is coupled to the analog multiplier, and register is coupled to the comparator and deliver logical 0 or 1 in accordance with the output of the comparator. Digital filter receives these logical values to produce the fluxgate magnetometer final output [4]. High resolution digital-analog converter is placed between register and feedback coil of the magnetic fluxgate sensor in a feedback loop of the sensor [5]. This kind of converter produces a very high resolution (typically more than 22 bits) that is necessary to adequately represent the dynamic range of the sensor.

**PURPOSE**

It comes to realize a device capable to measuring magnetic fields in any direction at low frequencies and very low amplitude. This is a high-sensitivity magnetometer.

**CONFIGURATION STUDIED**

The trifluxgate sensor is a device capable to measuring static magnetic fields or low frequency (<10 kHz) [5]. The trifluxgate sensor allows absolute measurement of the magnetic field (unlike inductive sensors), and measures the direction of the field. It is able to measure the earth's field with a resolution of up to 10pt, as well as to measure fields of the order of millitesla [6].

**METHOD OF TRIAXIAL FLUXGATE MAGNETOMETER**

It's a device :  
 •Capable to measuring low power magnetic field in any direction.  
 •Allow to indicate the magnetic field direction detected.  
 • Capable to give the magnetic field intensity [7].



This schematic simulation used to command the oscillator of the trifluxgate. It's create the alternative current trough the sensor's coil. The latter create alternative magnetic field [8]. This magnetic field causes a periodic saturation of core, alternately clockwise and counterclockwise way, and keeps an average permeability greater than that of air. When the core is saturated, its permeability becomes identical to that of air [10]. If there is no magnetic component in the axis of the measuring coil, there is no flux variation.

**TRIFLUXGATE SENSOR STRUCTURE**

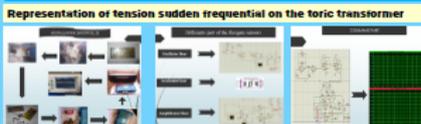


**ELECTRONIC SCHEMATIC DIAGRAM**

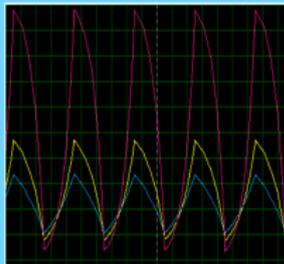


This schematic show the three fluxgates sensors magnetometers arrangement. From these three sensors, one can win the external magnetic field power value [12]. These three values is the cartesian components (x, y, z) of the magnetic field. The black core indicate the x components, the green to the y value and the orange to the z value. These three coils are disposed two to two perpendicular. They are commanded for one electronic comand. The exit is divided for three as an electric voltage form. With the three value, one can determine the magnetic field characteristics like direction, sense and power [11].

**EXPERIENCE NUMERIC VALUE**



**EXIT CURVE**



Vertical axis 2V/div  
 Horizontal axis 1 ms/div

**CONCLUSION**

The presented work opens an important breach in the manner to treat fluxgate electronics realization.

The magnetic field sensor to floodgate of flux miniaturized "fluxgate" permits the measure of the magnetic field with a very high resolution. Considering his size, one can say that it is a micro-magnetometers of precision.

Our survey focused on the conception of an interface integrated analogic/numeric permitting to valorize to best the strong potential

**BIBLIOGRAPHIE**

- [1] G. Eason, B. Noble, and I. N. Sneddon, "On certain integrals of Lipschitz-Hankel type involving products of Bessel functions," Phil. Trans. Roy. Soc. London, vol. A247, pp. 529–551, April 1955.
- [2] J. Clerk Maxwell, A Treatise on Electricity and Magnetism, 3rd ed., vol. 2. Oxford: Clarendon, 1882, pp.68–73.
- [3] J. Doe, "Title of paper if known," unpublished.
- [4] D. Robbes et al, Highly sensitive uncooled magnetometers: State of the Art. Superconductive magnetic hybrid magnetometers, an alternative to SQUIDS, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 11, N°1, 2001
- [5] P. Ripka, Noise and stability of magnetic sensors, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol. 157-158, pp. 424-427, 1996
- [6] Oleg. Ingénieur de recherche. Commande. grusson : Eric. Doctorant. Commande: LABORATOIRE D'ELECTROTECHNIQUE ET D'ELECTRONIQUE DE PUISSANCE DE LILLE
- [7] F. Kaluza, A. Grüger et H. Grüger, New and future applications of fluxgate sensors, Sensors and Actuators A, vol. 106, pp. 38-51, 2003
- [8] Carl W. Morland, "Fluxgate Magnetometer", 1999-2002.
- [9] J.E. Lenz, A review of magnetic sensors
- [10] C. Smith et R. Schneider, proceeding and sensor, 1999
- [11] Reference: Primdhal 1979
- [12] René Jensen, Michael Nielsen, PI&LC. Osc Metal Detector, 2003



A.IV. Communication affichée au Congrès International Plasma-Energie CIPE 2016 (12 – 16 Décembre 2016)



# ETUDE DE CAPTEUR A VANNE DE FLUX TRIAXIAL

Jaolalaina Arisoa ANDRIANAIVOARIVELO<sup>1</sup>, Misonon RAKOTOMALALA<sup>2</sup>,  
Flavien RANAIVO-NOMENJANAHAKY, Hery Zo RANDRIANANDRAINA  
Ecole Doctorale Physique et Application  
Institut pour la Maîtrise de l'Energie (IME)  
Université d'Antananarivo

CONTACT : Tel : +261 33 12 624 01 e-mail : jaolalaina@gmail.com

## INTRODUCTION

Un magnétomètre trifluxgate à vanne de flux numérique amélioré utilise un convertisseur analogique numérique à haute résolution pour numériser un signal magnétique. Il comporte un oscillateur qui produit un signal carré et six bobine de détecteurs de flux magnétique couplé à l'oscillateur, un bobinage de rétroaction, et un bobinage de détection. Un multiplicateur analogique est couplé au bobinage de détection et à l'oscillateur et produit un signal envoyé à un filtre passe-bas analogique. Un comparateur est couplé au multiplicateur analogique et un enregistreur est couplé au comparateur et produit un 1 logique ou un 0 logique conformément à la sortie du comparateur. Un filtre numérique reçoit le signal de sortie de l'enregistreur et produit un signal de sortie numérique du magnétomètre à vanne de flux numérique. Un convertisseur numérique-analogique à haute résolution est couplé entre l'enregistreur et le bobinage de rétroaction du détecteur à vanne de flux magnétique dans une boucle de rétroaction du détecteur. Le convertisseur numérique-analogique produit une sortie numérisée à très haute résolution (typiquement plus de 22 bits) qui est nécessaire pour représenter adéquatement la plage dynamique du détecteur.

## METHODES ET MATERIELS

**Simulation et réalisation des trois commandes électroniques d'un capteur trifluxgate**

Cette figure représente la simulation d'un commande de l'oscillateur du trifluxgate. C'est créer la dépression du courant alternative de la bobine vers le monde. Le dernier crée le champ aimanté alternatif. Le champ aimanté présente une saturation périodique de cour et comme chemin dans le sens inverse des signaux d'une montre. Quand le cour est saturé, sa perméabilité devient identique à cela d'air. S'il n'y a aucun composant aimanté dans l'axe de la bobine de la mesure, il n'y a pas de variation de flux.

Le travail est divisé en trois(03) sections:  
 Section I : Importance du Quartz pour une oscillation à haute fréquence  
 Section II : Etude de la partie de l'étage oscillateur  
 Section III : Etude du circuit contenant un transformateur torique

**Figure 1: réalisation des trois commandes électroniques d'un capteur trifluxgate**

## RESULTATS ET DISCUSSION

**Tableau 2: exemple des données de tension en fonction de champ magnétique**

E (T)	U (V)
10	0.33223529
9.94	0.33227547
9.9	0.33279412
10.02	0.33394176
10.01	0.33548028
10.41	0.35210264
10.79	0.36202547
11.01	0.37236706
11.09	0.37122594
10.72	0.36258824
10.29	0.34801471
9.92	0.31182264
9.46	0.31983236
11.05	0.37259682
9.9	0.33147059
10.4	0.35175471
11.09	0.37273529
11	0.37205882
10.82	0.36187263
10.87	0.35741471
10	0.33236264
10	0.33232363
20	0.67647059

**Figure 5: Variation de I (t) et B (t) en fonction de E (t) de variation.**

**Figure 6: Tension de sortie sans champ magnétique externe**

## EMPLACEMENT DU CAPTEUR

Les caractéristiques du champ magnétique capté

Direction:  $\vec{B} = \vec{B}_x + \vec{B}_y + \vec{B}_z$

Intensité:  $\mu = \|\vec{B}\| = \sqrt{[B_x]^2 + [B_y]^2 + [B_z]^2}$

**Figure 2: Emplacement des six capteurs fluxgate**

Face	B.X	B.Y	B.Z	I(t) * I
ABCD	-B	0	0	B
BCFD	0	-B	0	B
AFBA	0	0	-B	B
EFDE	B	0	0	B
AECA	0	B	0	B
CDHC	0	0	B	B

**Tableau 1: Etat du champ magnétique détecté par chaque face du cube**

**Figure 3: Les trois axes d'un champ magnétique sans s'importe quelle direction.**

**Figure 7: Résultats de la simulation du signal avec le logiciel ISIS**

C'est un appareil:  
 • Capable à mesurer le champ aimanté faible dans toute direction.  
 • Indiquer la direction de champ aimanté détecté.  
 • Capable de donner l'intensité magnétique présent.

**Figure 4: Addition de signal de sortie suivant les trois axes d'un repère cartésienne.**

## CONCLUSION

Ce présent travaille a un rôle important pour réalisation trifluxgate électronique. Ainsi les processus sont les suivants: Les trois signaux de sortie, qui sont entré dans un circuit intégré programmable (PIC 16F 876), possédant un Convertisseur Analogique Numérique (CAN). Les Programme de calcul et les calculs module du champ magnétique sont effectués dans le CAN. Ensuite le signal numérique obtenu doit transférer dans un écran LCD.

**REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

- [1] G. Eason, B. Noble, and I. N. Steadon, "On certain integrals of Lipschitz-Hankel type involving products of Bessel functions," *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, vol. A247, pp. 529-551, April 1955.
- [2] J. Clerk Maxwell, *A Treatise on Electricity and Magnetism*, 3rd ed., vol. 2. Oxford: Clarendon, 1892, pp.68-73.
- [3] J. Doe, "Title of paper if known," unpublished.
- [4] D. Robbins et al, Highly sensitive uncooled magnetometer: State of the Art. Superconductive magnetic hybrid magnetometer, an alternative to SQUIDS, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 11, N°1, 2001
- [5] F. Ripka, Noise and stability of magnetic sensor, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 157-158, pp. 424-427, 1996
- [6] Oug: Ingénieur de recherche: Commande: GRUBON : Etic: Doctorant: Commande: LABORATOIRE D'ELECTROTECHNIQUE ET D'ELECTRONIQUE DE PUISSANCE DE LILLE

**A.V. Communication affichée au Congrès International Plasma-Energie CIPE 2016 (12 – 16 Décembre 2016)**



Institut pour la Maîtrise de l'Énergie

**CONCEPTION ET REALISATION D'UN CAPTEUR FLUXGATE  
MAGNETOMETRE**

Jaolalaina Arisoa ANDRIANAIVOARIVELO\*, Misonon RAKOTOMALALA\*  
Institut pour la Maîtrise de l'Énergie, Université d'Antananarivo



Université  
d'Antananarivo

**CONTEXTE :**

Un magnétomètre à vanne de flux est un capteur de champ magnétique pour le vecteur champ magnétique. Sa gamme normale est adaptée pour mesurer le champ terrestre. Sa sensibilité peut aller au-delà 1 / 10 000 . Il a traditionnellement été utilisé pour la navigation en faisant le travail d'une boussole ainsi que la détection de métal et prospection. Il n'est pas très difficile à construire mais il est souvent oublié dans le monde d'aujourd'hui. Pourtant, la forte demande du marché d'aujourd'hui stimule le développement des capteurs magnétiques de haute résolution, de petite et faible puissance. De nouvelles applications, telles que la boussole électronique, les lecteurs d'encre magnétique, la détection de véhicules, le contrôle non destructif des métaux et la détection de marqueurs dans la médecine, apparaissent tous les jours. La mesure de champ magnétique est par conséquent un élément essentiel de nombreux systèmes industriels ou des appareils utilisés par le grand public .Parmi tous les capteurs capables de mesurer le champ magnétique de faible densité, le capteur fluxgate possède de multiples avantages, notamment celui de pouvoir mesurer le vecteur champ, sur une large bande passante, et avec une très haute résolution. Ce travail rentre dans le cadre du renforcement de l'instrumentation au sein de l'Institut.

**OBJECTIF :**

Il s'agit de concevoir et réaliser un appareil capable de mesurer le champ magnétique à basse fréquence et de très faible amplitude, c'est-à-dire un magnétomètre à haute sensibilité.

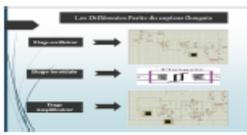
**CONFIGURATION ÉTUDIÉE**

Le Capteur fluxgate (ou capteur à vanne de flux) est un capteur vectoriel permettant la mesure de champs magnétiques statiques ou basses fréquences (0-10kHz). Le capteur fluxgate permet la mesure absolue du champ magnétique (contrairement aux capteurs à induction), et mesure la direction du champ. Il est capable de mesurer le champ terrestre avec une résolution pouvant atteindre 10pT, aussi bien que de mesurer des champs de l'ordre du millitesla.




**METHODE DU FLUXGATE MAGNETOMETER**

C'est un appareil :  
 + Connaître la mesure de champs magnétiques statiques ou basses fréquences.  
 + La mesure absolue du champ magnétique  
 + La direction du champ  
**MAGNETOMETRE.**  
 C'est un matériel :



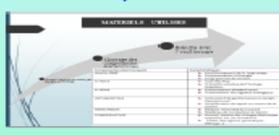
**SCHEMA ELECTRONIQUE**



**VALIDATION NUMÉRIQUE**

Résultat obtenue à partir du LOGICIEL PROTEUS

1. MATERIEL D'ENTREE



2. EVALUATION DU LOGICIEL

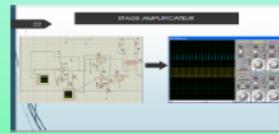


3. FORME DE LA BOITE SONORE

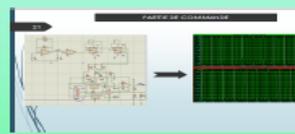


Représentation de la tension fréquente subit sur la sortie de transformateur torique

4. ETAT ALIMENTAIRE



5. FAUCON DE CONSTRUCTION



6. COURANT CONTINUE



**CONCLUSION ET PERSPECTIVE**

Le travail présenté ouvre une brèche importante dans la manière de traiter l'électronique pour la réalisation d'un fluxgate.

Le capteur de champ magnétique à vanne de flux miniaturisé («fluxgate») permet la mesure le champ magnétique avec une très haute résolution. Compte tenu de sa taille, on peut dire que c'est un micro-magnétomètres de précision.

Notre étude s'est focalisée sur la conception d'une interface intégrée analogique/numérique permettant de valoriser au mieux le fort potentiel du capteur fluxgate. Dans cette optique, nous avons exploré la voie d'une nouvelle méthode de fonctionnement du capteur qui permet de tirer parti des caractéristiques propres du capteur miniaturisé. Cette nouvelle méthode permet en outre d'augmenter les performances du capteur tout en allégeant les contraintes sur l'interface électronique de détection, et en diminuant la consommation du système.






---

## ANNEXE 1

Quelques Programmation utilisé pour la réalisation du capteur trifluxgate

```

%% ANALYSE DU FILTRE DE BUTTERWORTH
% Fréquence d'échantillonnage
fe = 1e3;
% Filtre Passe-Bas
% fréquence de coupure
fch = 100; fcb = 200;
% Ordre du filtre
No = 5;
% bande passante du filtre
Wn = 2*[fch fcb]/fe;
% Calcul des coefficients du filtre
[b,a] = butter(No,Wn,'bandpass');
%% Visualisation des réponses du filtres
% Réponse impulsionnelle
figure(1);
[h,t]=impz(b,a);
plot(t,h);grid;
% Réponse fréquentielle
% diagramme de BODE
[H,w] = freqz(b,a);
figure(2);freqzplot(H,fe*w/2);
close all, clc
% SIGNAL DE D'EXCITATION
fe = 10e4;Ne = 1000;
t = 1/fe*(0:Ne-1);
fo = 1.5e3;
le = 12*sin(2.*pi*fo*t);
figure(1);subplot(211);plot(t,le);grid;
axis([0 max(t) -13.5 13.5]);
title('Chronogramme du signal d"excitation')
xlabel('Temps en s'); ylabel(' Amplitude en V');
sle = 2*abs(fft(le))/Ne;
f = fe*(0:Ne-1)/Ne;
subplot(212);plot(f,sle);grid;
axis(0 1.25*.max(sle));
title('Spectre du signal d"excitation');
xlabel('frequence en Hz'); ylabel(' Amplitude en V');
% Signal de detection
Ho = 0.01;G = 100;
ld = diff(le); ld = ld*/.max(ld);
ld=ld.*(4*le(1:length(ld)) + Ho);
Nd = length(ld);
sld = 2*abs(fft(ld))/Nd;
figure(2)
subplot(211);plot(t(1:length(ld)),ld);grid;

```

---

```

axis([0 max(t) -20 1]);
title('Signal de detection');
title('Chronogramme du signal');
xlabel('Temps en s');ylabel('Amplitude en V');
subplot(212);plot(f(1:length(ld)), sld);grid;
title('Spectre du signal');
xlabel('frequence en Hz');ylabel('Amplitude en V');
axis([500 5000 0 1.25*max(sld)])
% Filtrage du signal d'Ã©modulÃ©
%Wn = 2*[ ]/fe;
Wn = 2*500/fe;
[b,a]=butter(5,Wn,'low');
lfilt = filter(b,a,ldem);
lmoy = max(lfilt(N:Nd));
lmean = lmoy*.ones(1,length(lfilt));
figure(4);subplot(211);plot(t(N:length(lfilt)),lfilt(N:length(lfilt)),'b',t(1:length(lfilt)),lmean,'r');grid;
axis([N/ 1.25*min) 1.25*max]);
title('Chronogramme de sortie de l"amplificateur d"erreur');
xlabel('Temps en s'); ylabel('Amplitude en V');
sld = 2*abs/Ne;
subplot(212);plot(f(1:length(sld)),sld);grid;
axis([0 fe/2 0 1.25*max(sld)]);
title('Spectre du signal de sortie de l"amplificateur d"erreur');
xlabel('Frequence en Hz'); ylabel('Amplitude en V');

```

## ANNEXE 2

### Les différentes Lois en Electromagnétisme

#### LOIS GÉNÉRALES DE L'ÉLECTROMAGNÉTISME

##### 1 Conservation de la charge

Équation de conservation de la charge :

$$\operatorname{div} \vec{j} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad \text{avec} \quad \vec{j} = \sum \rho_{m_i} \vec{v}_i, \quad \vec{v}_i = \text{vitesse de conduction}$$

$$\rho = \frac{dq}{d\tau} \text{ densité volumique de charge}$$

##### 2 Équations de Maxwell

###### 2.1 Courant de déplacement

C'est le vecteur  $\vec{j}_D$  donné par :

$$\vec{j}_D = \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

###### 2.2 Forme locale des équations de Maxwell

$$\begin{array}{ll} \text{Maxwell-Gauss : } \operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0} & \text{Maxwell-Thomson : } \operatorname{div} \vec{B} = 0 \\ \text{Maxwell-Farraday : } \operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} & \text{Maxwell-Ampère : } \operatorname{rot} \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \text{ avec } \varepsilon_0 \mu_0 c^2 = 1 \end{array}$$

###### 2.3 Conséquences

$\vec{E}$  et  $\vec{B}$  sont créés par des charges et des courants.

$\vec{E}$  et  $\vec{B}$  sont couplés :  $\vec{B}$  variable dans le temps crée  $\vec{E}$  (induction),  $\vec{E}$  variable dans le temps crée  $\vec{B}$  (propagation d'ondes électromagnétique).

###### 2.4 Forme intégrale des équations de Maxwell

###### 2.4.1 Équation de Maxwell-Thomson (Conservation du flux)

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0$$

Le flux  $\iint_S \vec{B} \cdot \vec{dS}$  est conservé le long d'un tube de champ.

###### 2.4.2 Théorème de Gauss

$S$  une surface fermée orientée vers l'extérieur :

$$\oiint_S \vec{E} \cdot \vec{dS} = \frac{Q_{\text{int}}}{\varepsilon_0}$$

###### 2.4.3 Loi de Farraday

$C$  un circuit fermé fixe (induction de Neuman) :

$$\oint_C \vec{E} \cdot \vec{dl} = e = -\frac{d\phi}{dt}$$

On retrouve le cas de la statique :  $\vec{B}$  est constant donc  $\oint_C \vec{E} \cdot \vec{dS} = 0$ ,  $\vec{E}$  est à circulation conservative.

#### 2.4.4 Théorème d'Ampère (forme générale)

$C$  un circuit fermé

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 i_{enl} + \mu_0 \iint_S \vec{j}_D \cdot d\vec{S}$$

#### 2.5 ARQS

On se situe dans l'Approximation des Régimes Quasi-Stationnaires si :

$$\|\vec{j}_D\| \ll \|\vec{j}\| \quad \text{ou} \quad \left\| \frac{1}{c^2} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right\| \ll \mu_0 \|\vec{j}\|$$

Si on appelle  $T$  l'échelle temporelle de variation de  $\vec{E}$ , et  $E$  l'ordre de grandeur de  $\vec{E}$ , la condition d'ARQS est :  $T \gg \frac{\varepsilon_0 E}{j}$

#### 2.6 Équations de Maxwell dans l'ARQS

$$\begin{aligned} \operatorname{div} \vec{E} &= \frac{\rho}{\varepsilon_0} & \operatorname{div} \vec{B} &= 0 \\ \operatorname{rot} \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} & \operatorname{rot} \vec{B} &= \mu_0 \vec{j} \end{aligned}$$

#### 2.7 Équations de Maxwell en statique

$$\begin{aligned} \operatorname{div} \vec{E} &= \frac{\rho}{\varepsilon_0} & \operatorname{div} \vec{B} &= 0 \\ \operatorname{rot} \vec{E} &= \vec{0} & \operatorname{rot} \vec{B} &= \mu_0 \vec{j} \end{aligned}$$

On remarque que  $\vec{E}$  et  $\vec{B}$  sont découplés.

#### 2.8 Relations de passage à une interface

On considère une interface entre deux milieux constituant une distribution de charge ( $\sigma$ ) et de courant ( $\vec{j}_S$ ). Soient  $M_1$  et  $M_2$  deux points infiniment proches de la surface se faisant face, chacun placés d'un côté de l'interface.  $\vec{n}_{12}$  un vecteur unitaire dirigé de 1 vers 2. On a :

$$\vec{E}_2 - \vec{E}_1 = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} \vec{n}_{12} \quad \vec{B}_2 - \vec{B}_1 = \mu_0 \vec{j}_S \wedge \vec{n}_{12} \quad \text{avec} \quad \sigma = \int_{M_1}^{M_2} \rho(z) dz$$

- Le champ électrique normal et le champ magnétique tangentiel sont discontinus.
- Le champ électrique tangentiel et le champ magnétique normal sont continus.

### 3 Potentiels

#### 3.1 Potentiel vecteur

On a toujours  $\operatorname{div} \vec{B} = 0$ , il existe donc  $\vec{A}$  tel que  $\vec{B} = \operatorname{rot} \vec{A}$ .  $\vec{A}$  s'appelle le potentiel vecteur.

#### 3.2 Potentiel scalaire

$\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}$  dérive d'un potentiel scalaire  $V$  tel que :

$$\vec{E} = -\operatorname{grad} V - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}$$

Remarque : les deux expressions définissent  $\vec{A}$  et  $V$ , et sont complètement équivalentes aux équations de Maxwell-Farraday et de Maxwell-Thomson.

### 3.3 Non-unicité

$\vec{A}$  n'est pas unique. Pour tout champ scalaire  $\varphi$ ,  $\vec{A}' = \vec{A} + \overrightarrow{\text{grad}}\varphi$ ,  $\vec{A}'$  est aussi un potentiel vecteur qui convient. De plus,  $V' = V - \frac{\partial\varphi}{\partial t}$  est un potentiel scalaire qui convient aussi. On aura ainsi :

$$\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}}V' - \frac{\partial\vec{A}'}{\partial t}$$

On peut définir une jauge : c'est une relation entre  $\vec{A}$  et  $V$  restreignant le choix possible.

### 3.4 Equations de Poisson

En électrostatique :  $\Delta V = -\frac{\rho}{\varepsilon_0}$

En magnétostatique (vrai aussi en ARQS) :  $\Delta\vec{A} = -\mu_0\vec{j}$

## 4 Énergie électromagnétique

### 4.1 Densité d'énergie

$$u = \frac{d\mathcal{E}}{d\tau} = \varepsilon_0 \frac{E^2}{2} + \frac{B^2}{2\mu_0}$$

### 4.2 Puissance cédée aux porteurs de charges

$\mathcal{V}$  un volume de l'espace contenant des charges éventuellement mobiles, et dans lequel règne un champ électromagnétique  $(\vec{E}, \vec{B})$ . La puissance volumique cédée aux porteurs de charges par le champ électromagnétique est :

$$\frac{d\mathcal{P}}{d\tau} = \vec{j} \cdot \vec{E}$$

Cas d'un conducteur ohmique :  $\frac{d\mathcal{P}}{d\tau} = \vec{j} \cdot \vec{E}$ , avec  $\vec{j} = \gamma\vec{E} \Rightarrow \frac{d\mathcal{P}}{d\tau} = \gamma E^2$  et  $\mathcal{P} = Ri^2$  avec  $R = \frac{\rho l}{S}$ ,  $i = jS$ .

Puissance joule volumique :  $\frac{d\mathcal{P}_I}{d\tau} = \gamma E^2 = \frac{j^2}{\gamma}$

### 4.3 Vecteur de Poynting

C'est un vecteur  $\vec{\pi} = \vec{\pi}(M, t)$  tel que  $\vec{\pi} \cdot \vec{dS} =$  puissance électromagnétique traversant la surface  $\vec{dS}$ ,  $\forall \vec{dS}$  centré en  $M$ .

### 4.4 Bilan d'énergie

$u$  l'énergie du système à  $t$  :

$$\underbrace{\text{div}\vec{\pi}}_{\text{terme de flux}} + \frac{\partial u}{\partial t} = \underbrace{-\vec{j} \cdot \vec{E}}_{\text{terme de création}}$$

### 4.5 Expression de $\vec{\pi}$

Une expression possible pour  $\vec{\pi}$  est :

$$\vec{\pi} = \frac{\vec{E} \wedge \vec{B}}{\mu_0}$$

## ANNEXE 3

### Les syntaxes du langage utilisé en Arduino

#### La syntaxe du langage

La syntaxe d'un langage de programmation est l'ensemble des *règles d'écriture* liées à ce langage. On va donc voir dans ce sous-chapitre les règles qui régissent l'écriture du langage Arduino.

#### Le code minimal

Avec Arduino, nous devons utiliser un *code minimal* lorsque l'on crée un programme. Ce code permet de diviser le programme que nous allons créer en deux grosses parties.

```
1 // fonction d'initialisation de la carte
2 void setup()
3 {
4   // contenu de l'initialisation
5 }
6
7 // fonction principale, elle se répète (s'exécute) à l'infini
8 void loop()
9 {
10  // contenu de votre programme
11 }
```

Le code minimal d'un programme Arduino

Vous avez donc devant vous le code minimal qu'il faut insérer dans votre programme. Mais que peut-il bien signifier pour quelqu'un qui n'a jamais programmé ?

#### La fonction setup

Dans ce code se trouvent deux fonctions. Les fonctions sont en fait *des portions de code*.

```
1 // fonction d'initialisation de la carte
2 void setup()
3 {
4   // contenu de l'initialisation
5   // on écrit le code à l'intérieur
6 }
```

Zoom sur la fonction setup

Cette fonction **setup ()** est appelée *une seule fois* lorsque le programme commence. C'est pourquoi c'est dans cette fonction que l'on va écrire le code qui n'a besoin d'être exécuté une seule fois. On appelle cette fonction : **fonction d'initialisation**. On y retrouvera la mise en

place des différentes sorties et quelques autres réglages. C'est un peu le check-up de démarrage. Imaginez un pilote d'avion dans sa cabine qui fait l'inventaire : - *patte 2 en sortie, état haut ?* - *OK - timer 3 à 15 millisecondes ?* - *OK ...*

Une fois que l'on a initialisé le programme il faut ensuite créer son "cœur", autrement dit le programme en lui-même.

```
1 // fonction principale, elle se répète (s'exécute) à l'infini
2 voir loop ()
3 {
4   // contenu de votre programme
5 }
```

Pour pouvoir programmer notre carte, il nous faut trois choses :

\_ Un ordinateur

- Une carte Arduino
- Et connaître le langage Arduino

C'est ce dernier point qu'il nous faut acquérir. Le but même de ce chapitre est de vous apprendre à programmer avec le langage Arduino.

**Le langage Arduino est très proche du C et du C++.**

## I - La syntaxe du langage

La syntaxe d'un langage de programmation est l'ensemble des règles d'écritures liées à ce

langage. On va donc voir dans ce sous chapitre les règles qui régissent l'écriture du langage Arduino.

### Le code minimal

Avec Arduino, nous devons utiliser un code minimal lorsque l'on crée un programme. Ce code permet de diviser le programme que nous allons créer en deux grosses parties. :

#### Code : C

```
void setup() //fonction d'initialisation de la carte
{
  //contenu de l'initialisation
}
void loop() //fonction principale, elle se répète (s'exécute) à l'infini
{
  //contenu de votre programme
}
```

#### La fonction

Dans ce code se trouvent deux fonctions. Les fonctions sont en fait des portions de code. Cette fonction `setup()` est appelée une seule fois lorsque le programme commence. C'est pourquoi c'est dans cette fonction que l'on va écrire le code qui n'a besoin d'être exécuté une seule fois. On appelle cette fonction : "fonction d'initialisation ". On y retrouvera la mise en place des différentes sorties et quelques autres réglages. C'est un peu le check-up de démarrage.

Une fois que l'on a initialisé le programme il faut ensuite créer son "cœur", autrement dit le programme en lui-même.

C'est donc dans cette fonction `loop ()` où l'on va écrire le contenu du programme. Il faut savoir que cette fonction est appelée en permanence, c'est-à-dire qu'elle est exécutée une

fois, puis lorsque son exécution est terminée, on la ré-exécute et encore et encore. On parle de boucle infinie.

***A titre informatif, on n'est pas obligé d'écrire quelque chose dans ces deux fonctions. En revanche, il est obligatoire de les écrire, même si elles ne contiennent aucun code !***

## II - Les instructions

Les instructions sont des lignes de code qui disent au programme : "fait ceci, fait cela, ..."  
C'est tout bête mais très puissant car c'est ce qui va orchestrer notre programme.

### Les points virgules

Les points virgules terminent les instructions. Si par exemple je dis dans mon programme :

"appelle la fonction `fairedemitour`" je dois mettre un point virgule après l'appel de cette fonction.

### Les accolades

Les accolades sont les "conteneurs" du code du programme. Elles sont propres aux fonctions, aux conditions et aux boucles.

Les instructions du programme sont écrites à l'intérieur de ces accolades.

### Les commentaires

Pour finir, on va voir ce qu'est un commentaire. J'en ai déjà mis dans les exemples de codes. Ce sont des lignes de codes qui seront ignorées par le programme. Elles ne servent

en rien lors de l'exécution du programme.

`//cette ligne est un commentaire sur UNE SEULE ligne`

`/*cette ligne est un commentaire, sur PLUSIEURS lignes`

`qui sera ignoré par le programme, mais pas par celui qui li le code ;) */`

### Les accents

**Il est formellement interdit de mettre des accents en programmation. Sauf dans les commentaires.**

## III - Les variables

Imaginons que vous avez connecté un bouton poussoir sur une broche de votre carte Arduino.

Comment allez-vous stocker l'état du bouton (appuyé ou éteint) ?

Une variable est un nombre . Ce nombre est stocké dans un espace de la mémoire vive (RAM) du microcontrôleur. La manière qui permet de les stocker est semblable à celle utilisée pour ranger des chaussures : dans un casier numéroté.

Ce nombre a la particularité de changer de valeur.

Le symbole "`=>`" signifiant : "est contenu dans..."

Le nom de variable accepte quasiment tous les caractères sauf :

- . (le point)
- , (la virgule)
- é,à,ç,è (les accents)

### Définir une variable

Si on donne un nombre à notre programme, il ne sait pas si c'est une variable ou pas. Il faut le lui indiquer. Pour cela, on donne un type aux variables. Oui, car il existe plusieurs types de variables ! Par exemple la variable "x" vaut 4 :

`x = 4 ;`

Et bien ce code ne fonctionnerait pas car il ne suffit pas ! En effet, il existe une multitude de nombres : les nombres entiers, les nombres décimaux, ... C'est pour cela qu'il faut assigner une variable à un type.

Voilà les types de variables les plus répandus :

Type	Quel nombre il stocke ?	Valeurs max du nombre stocké	Nombre sur x bits	Nombre d'octets
Int	entier	-32 768 à +32 767	16	2
Long	entier	-2 147 483 648 à +2 147 483 647	32	4
Char	entier	-128 à +127	8	1
Flat	décimale	$-3,4 \times 10^{38}$ à $+3,4 \times 10^{38}$	32	4
double	décimale	$-3,4 \times 10^{38}$ à $+3,4 \times 10^{38}$	32	4

## VII- Les boucles

En programmation, une boucle est une instruction qui permet de répéter un bout de code.

Cela va nous permettre de faire se répéter un bout de programme ou un programme entier.

Il existe deux types principaux de boucles :

La boucle conditionnelle, qui teste une condition et qui exécute les instructions qu'elle contient tant que la condition testée est vraie.

La boucle de répétition, qui exécute les instructions qu'elle contient, un nombre de fois prédéterminé.

### La boucle while

En anglais, le mot while signifie "tant que". Donc si on lit la ligne :

```
while(position_volet = "ouvert")
```

```
{
/* instructions */
}
```

Il faut la lire : "TANT QUE la position du volet est ouvert ", on exécute les instructions entre

les accolades.

Prenons un exemple simple, réalisons un compteur !

```
int compteur = 0 ; //variable compteur
```

```
while (compteur != 5 ) //tant que compteur est différent de 5, on boucle
```

```
{
compteur++; //on incrémente la variable compteur à chaque tour de boucle
}
```

### La boucle do...while

Cette boucle est similaire à la précédente. Mais il y a une différence qui a son importance !

En effet, si on prête attention à la place la condition dans la boucle while , on s'aperçoit qu'elle est testée avant de rentrer dans la boucle.

```
do
```

```
{
//les instructions entre ces accolades sont répétées tant que la condition est fausse
```

```
}while( /* condition à tester */ )
```

Dans une while , si la condition est vraie dès le départ, on entrera jamais dans cette boucle.

A l'inverse, avec une boucle do...while , on entre dans la boucle puis on test la condition.

### **La boucle for**

Voilà une boucle bien particulière. Ce qu'elle va nous permettre de faire est assez simple.

Cette boucle est exécutée X fois.

Contrairement aux deux boucles précédentes, on doit lui donner trois paramètres.

```
for( /*initialisation de la variable*/ ; /*condition à laquelle la boucle s'arrête*/ ; /*instruction à exécuter*/ )
for(int compteur = 0; compteur < 5; compteur++)
{
//code à exécuter
}
```

D'abord, on crée la boucle avec le terme for (signifie "pour que"). Ensuite, entre les parenthèses, on doit donner trois paramètres qui sont :

- la création et l'assignation de la variable à une valeur de départ
- suivit de la définition de la condition à tester
- suivit de l'instruction à exécuter

Le langage Arduino n'accepte pas l'absence de la ligne suivante :

int compteur. On est obligé de déclarer la variable que l'on va utiliser (avec son type) dans la boucle for !

### **La boucle infinie**

La boucle infinie est très simple à réaliser, d'autant plus qu'elle est parfois très utile. Il suffit

simplement d'utiliser une while et de lui assigner comme condition une valeur qui ne change jamais. En l'occurrence, on met souvent le chiffre 1 ou TRUE.

```
while(1)
{
//instructions à répéter jusqu'à l'infinie
}
while(TRUE)
{
//instructions à répéter jusqu'à l'infinie
}
```

## **X– Programmer Arduino**

### **La structure d'un programme**

1. la partie déclaration des variables (optionnelle)
2. la partie initialisation et configuration des entrées/sorties : la fonction setup ()
3. la partie principale qui s'exécute en boucle : la fonction loop ()

### **Entrées/Sorties Numériques**

pinMode(broche, mode)

Configure la broche spécifiée pour qu'elle se comporte soit en entrée, soit en sortie.  
**broche:** le numéro de la broche de la carte Arduino dont le mode de fonctionnement (entrée ou sortie) doit être défini.

**mode:** soit INPUT (entrée en anglais) ou OUTPUT (sortie en anglais)

```
int ledPin = 13; // LED connectée à la broche numérique 13
void setup()
{
pinMode(ledPin, OUTPUT); // met la broche numérique en sortie
}
```

### **digitalWrite(broche, valeur)**

Met un niveau logique HIGH (HAUT en anglais) ou LOW (BAS en anglais) sur une broche numérique.

**broche:** le numéro de la broche de la carte Arduino

**valeur :** HIGH ou LOW (ou bien 1 ou 0)

```
int ledPin = 13; // LED connectée à la broche numérique n° 13
void setup()
{
pinMode(ledPin, OUTPUT); // met la broche utilisée avec la LED en SORTIE
}
void loop()
{
digitalWrite(ledPin, HIGH); // allume la LED
}
```

### **digitalRead(broche)**

Lit l'état (= le niveau logique) d'une broche précise en entrée numérique, et renvoie la valeur HIGH (HAUT en anglais) ou LOW (BAS en anglais).

```
val = digitalRead(inPin); // lit l'état de la broche en entrée
// et met le résultat dans la variable
```

### **Entrées analogiques**

#### **analogRead(broche\_analogique)**

Lit la valeur de la tension présente sur la broche spécifiée.

```
val = analogRead(analogPin); // lit la valeur de la tension analogique présente
sur la broche
```

### **Sorties "analogiques" (génération d'impulsion)**

#### **analogWrite(broche, valeur);**

Génère une impulsion de largeur / période voulue sur une broche de la carte Arduino (onde

PWM - Pulse Width Modulation en anglais ou MLI - Modulation de Largeur d'Impulsion en

français). Ceci peut-être utilisé pour faire briller une LED avec une luminosité variable ou contrôler un moteur à des vitesses variables.

**broche:** la broche utilisée pour "écrire" l'impulsion.

**valeur:** la largeur du "duty cycle" (proportion de l'onde carrée qui est au niveau HAUT) : entre 0 (0% HAUT donc toujours au niveau BAS) et 255 (100% HAUT donc toujours au niveau HAUT).

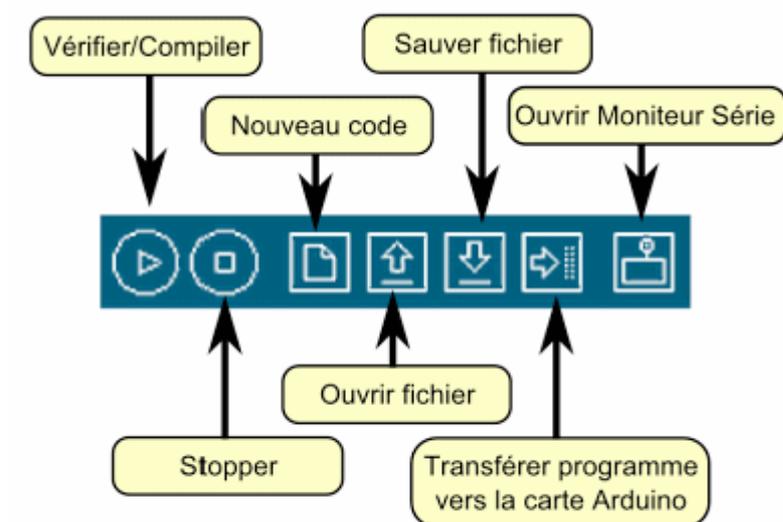
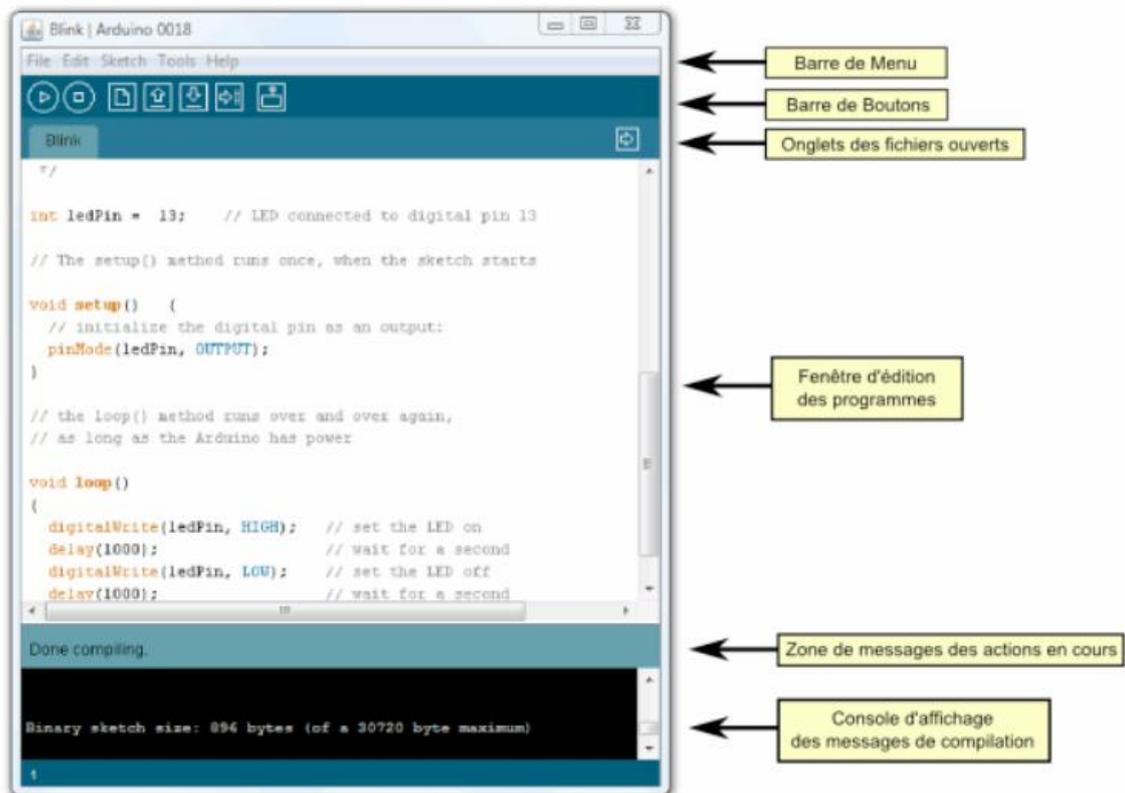
```
int ledPin = 9; // LED connectée sur la broche 9
int analogPin = 3; // le potentiomètre connecté sur la broche analogique 3
int val = 0; // variable pour stocker la valeur de la tension lue
void setup()
{
  pinMode(ledPin, OUTPUT); // configure la broche en sortie
}
void loop()
{
  val = analogRead(analogPin); // lit la tension présente sur la broche en entrée
  analogWrite(ledPin, val / 4); // Résultat d'analogRead entre 0 to 1023,
  // résultat d'analogWrite entre 0 to 255
  // => division par 4 pour adaptation
```

### ***Développement d'un projet***

Le développement sur Arduino est très simple :

- on code l'application : comme on l'a déjà vu, le langage Arduino est basé sur les langages C/C++ , avec des fonctions et des bibliothèques spécifiques à Arduino (gestions des e/s).
- on relie la carte Arduino au PC et on transfère le programme sur la carte,
- on peut utiliser le circuit !

Le logiciel de programmation des modules Arduino est une application Java multiplateformes (fonctionnant sur tout système d'exploitation), servant d'éditeur de code et de compilateur, et qui peut transférer le firmware (et le programme) au travers de la liaison série (RS232, Bluetooth ou USB selon le module).



*Détail de la barre de boutons*

Le logiciel comprend aussi un moniteur série (équivalent à hyperterminal) qui permet de d'afficher des messages textes émis par la carte Arduino et d'envoyer des caractères vers la carte Arduino (en phase de fonctionnement)

## ETUDE ET REALISATION DU CAPTEUR TRIFLUXGATE

La détection de champ magnétique s'appuie sur des techniques de précision. Le capteur Trifluxgate est un instrument de mesure des intensités des champs magnétiques contrairement à la première vocation de la sonde fluxgate qui est destinée pour mesurer les angles. Dans notre travail, nous avons conçu et réalisé les sondes et le dispositif électronique d'un appareil de mesure de l'intensité d'un champ magnétique multidirectionnel. Nos sondes sont commandées par le circuit électronique numérique du dispositif. Un signal rectangulaire est généré au niveau des six bobines d'excitation. Les résultantes des champs alternatifs vues par la bobine de détection sont nulles. Un champ externe constant induit dans la bobine de détection, une tension de fréquence double de courant d'excitation.

S'appuyant sur ce phénomène d'induction le dispositif électronique de la sonde extrait l'information véhicule par la tension. L'arduino est chargé de transmettre la commande de compensation et d'acheminer l'information vers le PC. Le PC assure le traitement et l'affichage des signaux.

**Mots clés** : trifluxgate, capteur, sonde, champ magnétique, bobine, résidu

## STUDY OF A SENSOR TRIFLUXGATE MAGNETOMETER

Magnetic field detection is based on precision techniques. The Trifluxgate sensor is an instrument for measuring the intensities of the magnetic field contrary to the first purpose of the fluxgate probe which is intended for measuring angles. In our work, we designed and realized the probes and the electronic device of a measuring device the intensity of a multidirectional magnetic field. Our probes are controlled by the digital electronic circuit of the device. A rectangular signal generates at the level of the six excitation coils. The resultants of the alternative fields seen by the detection coil are zero. A constant external field induced in the detection coil, a double frequency voltage excitation current.

Based on this phenomenon of induction the electronic device of the probe extracts the information vehicle by the tension. The arduino is responsible for transmitting the compensation command and forwarding the information to the PC. The PC processes and displays the signals.

**Keywords** : trifluxgate, sensor, probe; magnetic field; detection; winding, residue

**Co-directeur de thèse :**  
**RAKOTOMALALA Minoson Sendrahasina**  
Professeur Titulaire  
Sciences et Technologies – Université d'Antananarivo.  
**Téléphone** : 034 96 720 47  
**E-mail** : [minoson2002@yahoo.fr](mailto:minoson2002@yahoo.fr)  
**RANAIVO-NOMENJANAHARY Flavien**  
Professeur Titulaire  
Sciences et Technologies – Université d'Antananarivo.  
**Téléphone** : 034 05 124 89  
**E-mail** : [frranai@gmail.com](mailto:frranai@gmail.com)

**ANDRIANAIVOARIVELO Jaolalaina Arisoa**  
**Adresse** : BATIMENT CROUA CYBER CAMPUS  
Ankatso IIB, Antananarivo (101)  
**Téléphone** : 033 12 624 01  
**e-mail** : [jaolalaina@gmail.com](mailto:jaolalaina@gmail.com)