



HOGERE ZEEVAARTSCHOOL ANTWERPEN
FACULTÉ DE MÉCANIQUE NAVALE

Le palier magnétique

GUITTET Alexandre

Mémoire présenté pour l'obtention
du titre de Bachelor en Mécanique Navale

Promoteur : BUEKEN Stefaan
Année académique : 2020-2021

Résumé

A travers l'histoire de l'humanité les phénomènes magnétiques ont attiré l'homme, déjà en l'intriguant et puis par la suite en l'aidant à son développement quand ce dernier a su comprendre et maîtriser ses propriétés physiques.

Le magnétisme a été étudié tout au cours de l'histoire et les applications se sont diversifiées en plusieurs branches d'applications.

L'application qui nous intéresse ici est celle de la répulsion/attraction magnétique et électromagnétique appliquée à de petits objets.

Mon approche dans ce mémoire est de démontrer que l'application aux objets tournants tels que les séparateurs ou les pompes est réalisable, et qu'il est possible de rendre ce genre de palier accessible tant financièrement que mécaniquement.

En effet, le but est de remplacer les roulements conventionnels pour y insérer des paliers dits magnétiques.

Abstract

Throughout the history of mankind, magnetic phenomena have always attracted, first by intriguing and then by helping us to develop when we were able to understand and master its physical properties.

Magnetism has been studied throughout history and the subjects have diversified into several branches of applications.

The application that interests us here is that of magnetic and electromagnetic applied to small objects.

My approach in this thesis is to demonstrate that the application to rotating objects such as separators or pumps is possible, and that it is interesting to make this kind of bearing accessible both financially and mechanically.

Indeed, the goal is to replace conventional bearings to insert so-called magnetic bearings.

Index

Aimants permanents	11
Buttée compensatrice.....	36
Circuit de commande	33
Comparateur double.....	32
Lévitacion magnétique active	24
Lévitacion magnétique passive	21
Magnétisme.....	9
Mosfet	33
Palier de buttée	24
Palier magnétique passif	18
Polarisation	16
Réaction active.....	36
Rotor	18
Roulements à billes	19
Solénoïde.....	16
Spires.....	16
Stator	18
Supraconductivité.....	44
Théorème d'Ampère.....	15

Table des matières

Résumé.....	3
Abstract.....	3
Index	4
Table des matières.....	5
Table des figures.....	6
Liste des symboles.....	7
Introduction	8
Le palier magnétique.....	9
Aspect historique du magnétisme	9
Principes de fonctionnement du magnétisme	11
Les aimants en néodyme.....	13
Solénoïde et champ magnétique	15
Principe et fonctionnement du palier magnétique par la lévitation magnétique passive	18
Le roulement classique.....	18
L'aimant passif magnétique	21
Avantages et inconvénient de la construction passive	23
Principe et fonctionnement du palier magnétique par la lévitation magnétique active.....	24
Réalisation du palier à lévitation magnétique active	25
Améliorations et progrès du prototype	38
Application en vigueur dans certains milieux	42
Développement technologique futur.....	44
Conclusion	45
Sources.....	46

Table des figures

Figure 1 La magnétite à l'état naturel ¹	9
Figure 2 Helmut Habermann ²	10
Figure 3 Polarisation d'un aimant et de ses lignes de champ ³	11
Figure 4 Aimants et les permutations possible donnant une attraction ou une répulsion. ⁴ ..	11
Figure 5 Aimant en néodyme ⁵	12
Figure 6 Etapes de conceptions ⁶	14
Figure 7 Champ magnétique autour d'un fil ⁷	15
Figure 8 Théorème d'Ampère ⁸	15
Figure 9 Relation Tesla/Ampère ⁹	16
Figure 10 Polarisation d'une bobine ¹⁰	17
Figure 11 Pallier standard ¹¹	18
Figure 12 Déformement des billes ¹²	19
Figure 13 Structure du roulement standard ¹³	19
Figure 14 Roulement standard endommagé ¹⁴	20
Figure 15 Roulement magnétique ¹⁵	21
Figure 16 Suspension magnétique Mendochino ¹⁶	22
Figure 17 Pallier de butée ¹⁷	24
Figure 18 Cadre structurel (source personnelle).....	25
Figure 19 Aimants en néodyme ¹⁸	26
Figure 20 Vue coupée du support (source personnelle)	26
Figure 21 Coupe longitudinale du rotor (source personnelle)	27
Figure 22 Partie centrale du pallier (source personnelle).....	27
Figure 23 Solénoïde employé (source personnelle).....	28
Figure 24 Principales dimensions des bobines (source personnelle).....	28
Figure 25 Bobines finale (source personnelle).....	29
Figure 26 Capteur KY-024 monté sur solénoïde (source personnelle).....	29
Figure 27 Capteur KY-024 ¹⁹	30
Figure 28 Schéma électronique du capteur KY-024 ²⁰	31
Figure 29 Senseur 49 E ²¹	32
Figure 30 Comparateur double IC Im393 ²²	32
Figure 31 Circuit de contrôle ²⁰ (source avec modifications personnelles)	33
Figure 32 Mosfet IRFZ44N ²³	34
Figure 33 Disposition des solénoïdes (source personnelle).....	34
Figure 34 Réaction active (source personnelle).....	35
Figure 35 Contrôle de l'écartement du pallier (source personnelle)	35
Figure 36 Butée compensatrice longitudinale (source personnelle).....	36
Figure 37 Disposition des aimants premier essai (source personnelle)	38
Figure 38 Etude de l'interaction magnétique (source personnelle)	39
Figure 39 Champ magnétique irrégulier (source personnelle)	40
Figure 40 Champ magnétique régulier (source personnelle)	40
Figure 41 Aimants radiaux et solénoïdes (source personnelle).....	41
Figure 42 Pallier magnétique actif industriel ²⁴	42

Liste des symboles

β Champ magnétique exprimé en Tesla (T)

i Intensité du courant (A)

L Longueur (m)

μ Perméabilité du vide (m/A)

G Gravité (m/s²)

H Excitation magnétique (T)

r Rayon (m)

N Nombre de spires

Introduction

Dans le milieu maritime nous pouvons dénombrer une multitude d'installations fonctionnant en deux parties, comme les moteurs, arbres d'hélice etc., dont une partie est statique (le stator) et une partie mobile (le rotor).

Ces deux parties sont généralement reliées entre elles par l'intermédiaire de roulements à billes afin d'assurer une rotation efficace et simple.

Cette réunion tend à former ce que nous appelons un palier.

Néanmoins des vibrations et des frictions créées par le fonctionnement mécanique de l'installation sont à l'origine de nombreuses maintenances coûteuses et sont parfois complexes à effectuer (accès difficile).

Peut-on donc trouver une manière de remédier à ces désavantages ?

Dans un premier temps nous étudierons les aspects historiques du magnétisme. Les principes fondamentaux du magnétisme, ainsi que ses applications seront à la suite de cette partie. Dans un second temps nous nous intéresserons au fonctionnement du palier dit magnétique, avec à l'étude une partie passive puis une autre active. Dans un troisième temps nous procéderons à la réalisation et à l'explication d'un prototype de ce système. Nous étudierons la combinaison des deux principes de fonctionnement magnétique au travers de mon prototype de palier.

En effet le but de ce mémoire est de présenter et de mettre en avant l'existence et l'intérêt d'un tel système de palier magnétique au sein de la marine marchande.

L'idée est d'étudier le principe de lévitation magnétique en partant des bases élémentaires.

Nous fournirons également de plus amples informations sur les diverses possibilités qui s'offrent aux marins et aux compagnies maritimes d'utiliser cet instrument au sein de leurs navires et lieux de travail.

Cette technologie pourrait en effet à l'avenir changer grandement la vie à bord sur plusieurs fronts : financier, médical, pertes énergétiques, entretien etc.

Le palier magnétique

Aspect historique du magnétisme

Le terme de magnétisme désigne l'ensemble des phénomènes qui ont lieu au cœur et autour de matériaux aimantés. Cette magnétisation peut être soit naturelle, soit être le résultat d'un champ d'induction (électrique ou magnétique).

A l'origine du magnétisme se trouve la magnétite, minerais comportant les caractéristiques physiques du magnétisme à l'état naturel.



Figure 1 La magnétite à l'état naturel!

Le magnétisme résulte de l'attraction des électrons en couche extérieure d'un atome et de leur mouvement dit orbital.

Les applications du magnétisme sont nombreuses, de l'informatique à la médecine en passant par la physique des particules.

Les premières observations remontent à l'Antiquité mais le phénomène n'a été étudié avec attention qu'à partir du XVIII^e siècle. Charles Augustin de Coulomb, grand ingénieur et physicien, établit alors que les forces qui s'exercent entre deux charges magnétiques sont inversement proportionnelles au carré de la distance qui les sépare.

Aujourd'hui, il est admis que le magnétisme est un phénomène quantique dont les effets s'observent à l'échelle macroscopique.

Au niveau de l'atome, chaque électron possède un petit moment (aussi appelé flux) magnétique. Naturellement, les électrons de moments magnétiques opposés ont tendance à se regrouper par paires. À l'échelle macroscopique, la capacité à s'aimer est alors nulle. Mais, si des électrons se retrouvent sans partenaires, leurs moments magnétiques s'additionnent. Ils produisent alors une aimantation globale du matériau.

Les métaux de transition (fer, nickel, etc.) et les terres rares, sont les seuls éléments à porter un tel moment magnétique.

Il existe plusieurs formes de magnétisme qui rendent compte notamment des conséquences statistiques des comportements individuels des systèmes atomiques (contribution des moments magnétiques et du remplissage des sous-couches atomiques)

Néanmoins même s'il existe une multitude de domaines magnétiques à explorer, nous allons nous focaliser ici sur deux fonctions principales, la lévitation passive et la lévitation active.

Intéressons-nous dans un premier temps aux personnages historiques à l'origine du palier magnétique.

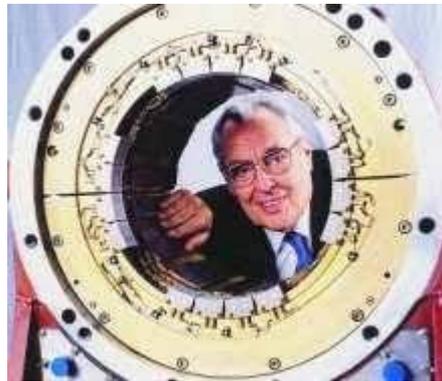


Figure 2 Helmut Habermann ²

D'un point de vue historique le principe de lévitation magnétique est venu au monde vers 1972 grâce à Helmut Habermann, un autrichien né en 1917 qui a suivi des études d'ingénieur en Tchécoslovaquie à la fin des années 1930.

Cet homme fut l'un des pionniers de la mécanique magnétique.

En effet il est à l'origine du principe en proposant de réaliser un arbre qui flotte dans un champ magnétique.

Le but est de réduire au maximum les forces de frottement dans l'arbre, la conduction de vibrations et de retirer des pièces tels que les billes pour gagner en poids.

Principes de fonctionnement du magnétisme

Dès lors intéressons-nous au principe de fonctionnement des aimants permanents.

De manière vulgarisée un aimant se compose de matière métallique naturellement polarisée ou magnétisée par un champ magnétique artificiel.

Cette polarisation ou magnétisation donne au métal la capacité d'attirer d'autres métaux du fait de l'existence de lignes de champ.

La schématisation suivante donne une représentation de ces lignes de champ d'un aimant permanent simple :

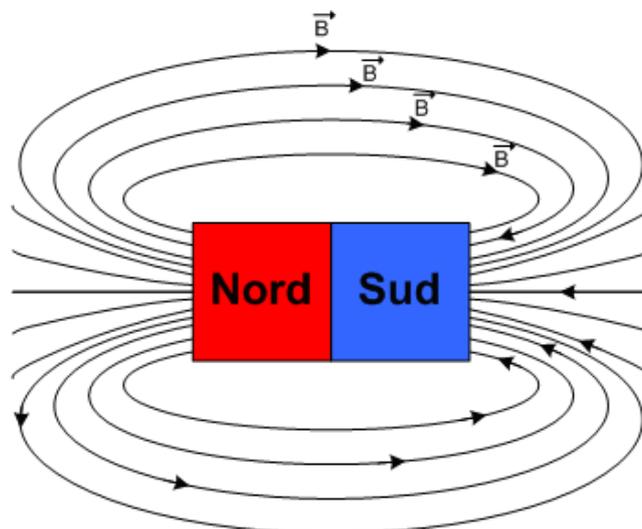


Figure 3 Polarisation d'un aimant et de ses lignes de champ ³

La particularité qui nous intéresse ici est la capacité d'une matière ferromagnétique à attirer une matière ferreuse mais plus encore la réaction d'attraction et de répulsion de deux aimants en modifiant leurs positions polaires.

En effet la schématisation suivante démontre les permutations polaires possibles :

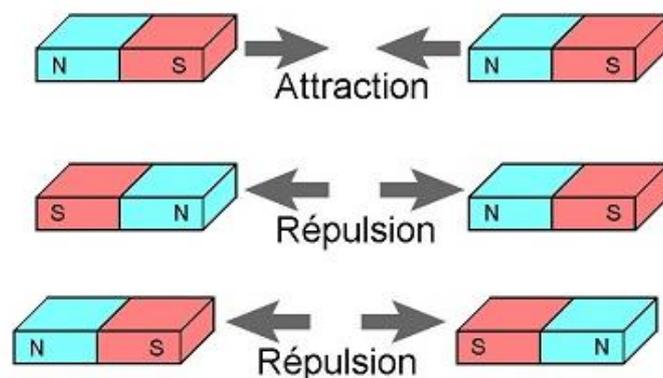


Figure 4 Aimants et les permutations possible donnant une attraction ou une répulsion. ⁴

Les aimants sont généralement constitués de matière ferromagnétique comme par exemple la magnétite.

D'autre part il est possible de rendre magnétique une matière à base de fer en l'exposant à un champ magnétique. C'est ce que nous appelons le phénomène d'induction.

En approchant un matériau en acier à proximité d'un aimant permanent cela va permettre de faire un transfert de magnétisme et donc de créer un aimant temporaire. On utilise ce procédé pour réaliser, par exemple, un tournevis magnétique.



Figure 5 Aimant en néodyme ⁵

Il existe un grand nombre d'aimants, que l'on peut classer en fonction de leur alliage et de leur force. Dans ce mémoire nous allons nous intéresser en particulier aux aimants dits à néodyme. Car ce sont les plus puissants.

Les aimants en néodyme

Les aimants permanents en néodyme ont la particularité d'être très puissants.

Comment sont-ils donc fabriqués et d'où viens leur force ?

Tout d'abord il est de rigueur de comprendre ce qui compose un tel type de matière.

En effet cet aimant aussi appelé « NdefeB » est composé de trois matériaux principaux dont deux terres rares : l'alliage de néodyme (Nd), le fer (Fe) et le bore (B).

La composition donne une forme cristalline tétragonale capable d'emmagasiner une grande quantité d'énergie magnétique.

La principale technique de fabrication se fait par frittage.

Comme le souligne Mr. Hugonnet :

« La première étape est l'obtention de l'alliage. Cela est généralement réalisé par la fusion par induction sous atmosphère contrôlée de néodyme, de ferro-bore et de fer suivi de la solidification rapide du mélange pour éviter la formation de fer dans l'alliage. L'alliage est ensuite broyé de manière à obtenir une poudre monocristalline. Cette poudre est ensuite orientée sous champ magnétique et compactée selon diverses méthodes puis frittées. Les aimants subissent un revenu pour améliorer les propriétés magnétiques. Enfin les aimants sont rectifiés et leur surface est recouverte d'une fine couche métallique afin de les protéger contre l'oxydation. Les principales différences entre les diverses voies d'élaborations utilisant la métallurgie des poudres se trouvent lors de l'orientation et de la compaction. Le $(BH)_{max}$ le plus élevé s'obtient avec l'orientation suivie de la compaction isostatique. »⁶

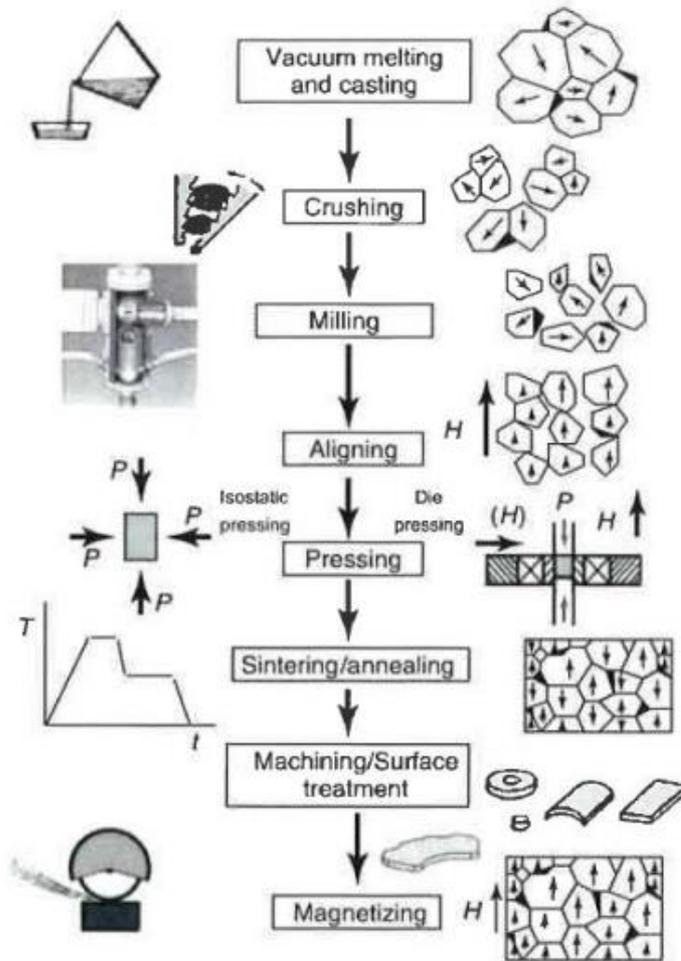


Figure 6 Etapes de conceptions⁶

Ce processus de fabrication nous permet donc de réaliser des aimants de la taille et de la forme qui nous conviens le mieux.

D'autre part il est aussi possible de magnétiser l'acier ou un quelconque alliage en le soumettant à un champ d'induction.

Par exemple nous allons enrouler un fil de cuivre autour d'une tige d'acier et faire parcourir du courant à travers ce fil.

Solénoïde et champ magnétique

Je proposé donc dans un premier temps d'expliquer cette manière de créer un champ magnétique.

Le schéma suivant illustre ce phénomène physique, pour un fil simple.

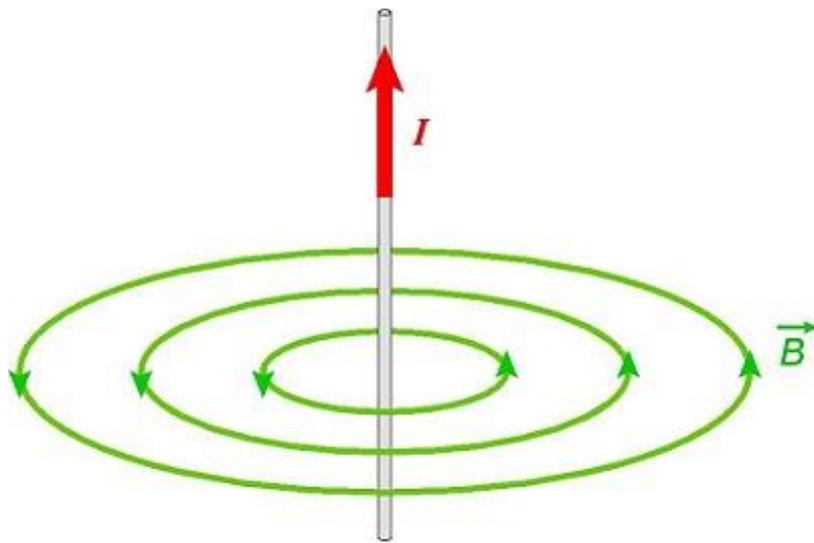


Figure 7 Champ magnétique autour d'un fil ⁷

Afin de faire varier la force d'un champ magnétique on peut modifier la valeur de l'intensité, en effet la force du champ est fonction de l'intensité.

Par calcul, nous pouvons nous représenter la force de ces champs, en utilisant, par exemple, le théorème d'Ampère.

Méthode de calcul : théorème d'Ampère

- ▶ Pour calculer le champ magnétique, le théorème d'Ampère est souvent utilisée.
- ▶ Dans le cas d'un fil, on a l'expression suivante :

$$\oint_S \vec{H} \cdot d\vec{l} = I$$

$$H_\theta \cdot 2\pi r = I \quad H_\theta = \frac{I}{2\pi r}$$

$$B_\theta = \mu_0 \frac{I}{2\pi r}$$

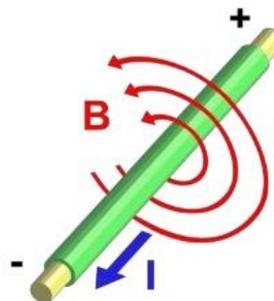


Figure 8 Théorème d'Ampère ⁸

Maintenant que nous avons vu le principe fondamental, intéressons-nous au cas d'un champ induit par un solénoïde :

Un solénoïde est un fil enroulé de manière à former un certain nombre de spires.

De même que dans le cas précédent, la force du champ magnétique est fonction de la valeur fournie en ampères.

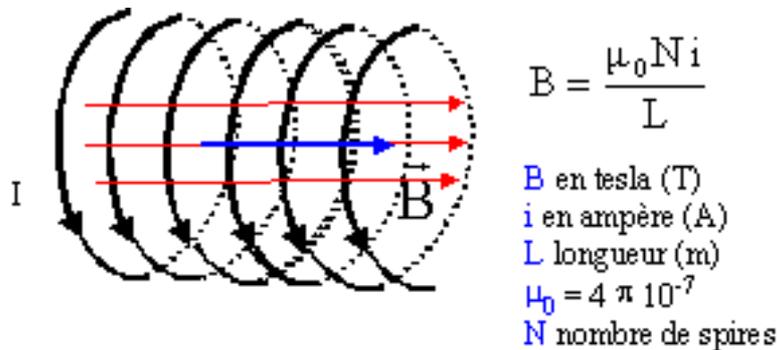


Figure 9 Relation Tesla/Ampère⁹

Il y a quelques paramètres facilement modifiables dans la formule, à savoir le nombre de spires et la longueur du solénoïde.

On comprend donc par cette formule que pour avoir un champ magnétique conséquent, il faut un grand nombre de spires, une forte intensité, un solénoïde court et aussi un fil d'une section suffisamment importante (ou un matériau très conducteur pour passer un courant important dans une section plus petite).

Le fil idéal serait donc un fil de cuivre plein d'environ 0.5 ou 1mm de diamètre.

Ce champ magnétique induit peut servir à la détection de métaux, transfert d'énergie par induction ou encore bien d'autres applications.

Cela serait très intéressant de débattre de ces possibles alternatifs mais ne nous égarons pas, le sujet est la polarisation d'un solénoïde afin de créer une suspension magnétique.

En effet le champ émis par les solénoïdes qui nous intéresse ici est la répulsion et l'attraction magnétique.

La polarisation de la bobine se fera en choisissant le sens du courant en fonction de l'usage recherché.

Le phénomène recherché est illustré ci-dessous :

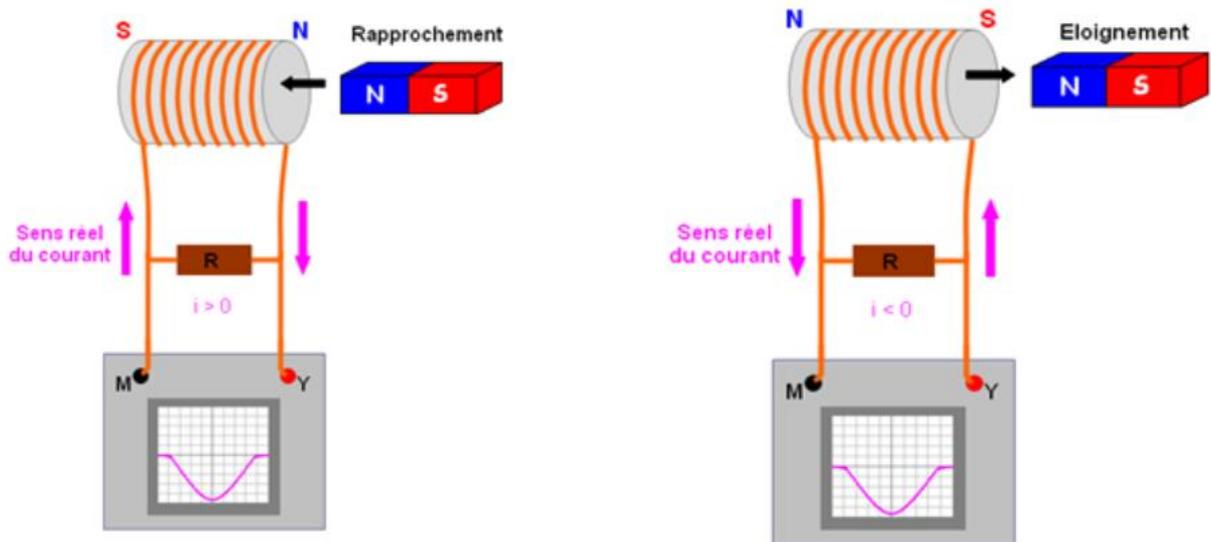


Figure 10 Polarisation d'une bobine ¹⁰

Nous étudierons ce phénomène plus amplement lors de la réalisation pratique de mon projet.

Principe et fonctionnement du palier magnétique par la lévitation magnétique passive

Le roulement classique

Afin de bien comprendre le palier magnétique passif, il est primordial d'étudier ses principaux composants et notamment le palier traditionnel.

Ce type de palier se compose d'un rotor (partie mobile) et d'un stator (partie fixe).

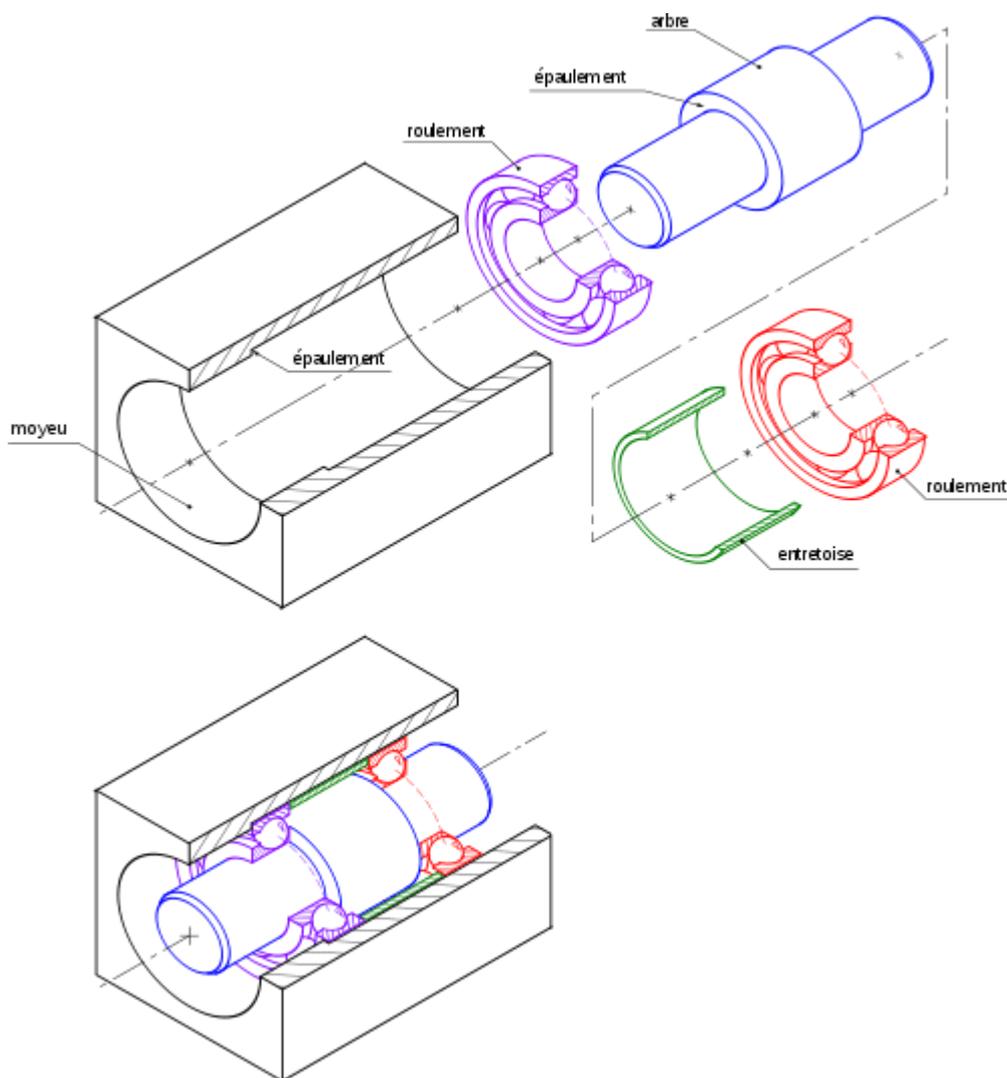


Figure 11 Palier standard¹¹

Sur cette schématisation d'un palier commun, nous pouvons voir la stabilisation verticale des roulements à billes mécaniques (en rouge et en violet).

Ici la stabilisation longitudinale (dans le sens de la longueur de l'arbre central) est faite par les roulements eux-mêmes, on n'a pas besoin de butée car il n'y aura pas de dérives longitudinales.

Afin d'éviter que ces deux parties ne rentrent en contact (rotor et stator), il est d'usage d'utiliser des roulements à billes. Ces derniers permettent aux deux parties de tourner l'une sur l'autre en minimisant la surface de contact.

Néanmoins les roulements à billes sont soit construits avec de petites billes, ou sur d'autres modèles, avec des petits rouleaux. Ils sont faits en métal, céramique et même parfois en plastique.

De par leur nature et leur positionnement, ils conduisent très bien les vibrations et la chaleur. Ils nécessitent soit un entretien régulier avec par exemple, un renouvellement de la lubrification, soit un changement périodique, car la piste de roulement et les billes se déforment au bout d'un certain temps en fonction de la charge appliquée.

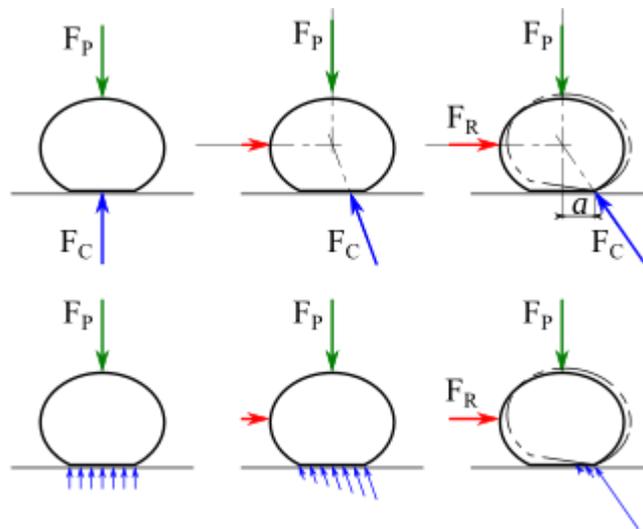


Figure 12 Déformement des billes ¹²

Le schéma précédent représente la force F_p qui s'applique sur les billes ou les cylindres de roulement à l'origine des déformations structurelles.

Les deux images suivantes montrent un roulement neuf et un roulement endommagé :

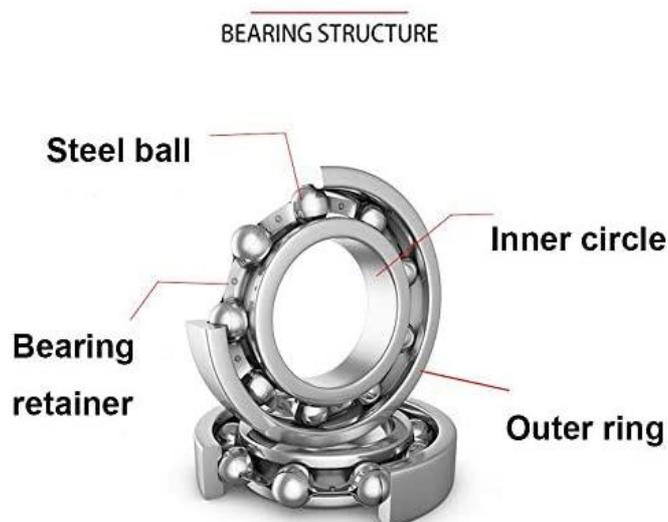


Figure 13 Structure du roulement standard ¹³



Figure 14 Roulement standard endommagé ¹⁴

De part ce modèle de fonctionnement nous allons retirer les billes et trouver un moyen de créer un espace entre les axes sans contact. On retirera donc ce problème de déformation plastique des billes et du métal de soutiens

L'aimant passif magnétique

Dans un premier temps intéressons nous à la lévitation magnétique passive.

Cette dénomination indique que la lévitation sera effectuée avec des aimants permanents positionnés de manière à rappeler la forme d'un roulement standard mais sans billes.

En travaillant sur la forme d'un aimant, il est possible de lui donner une forme circulaire.

Voici une ébauche schématique d'un roulement magnétique :

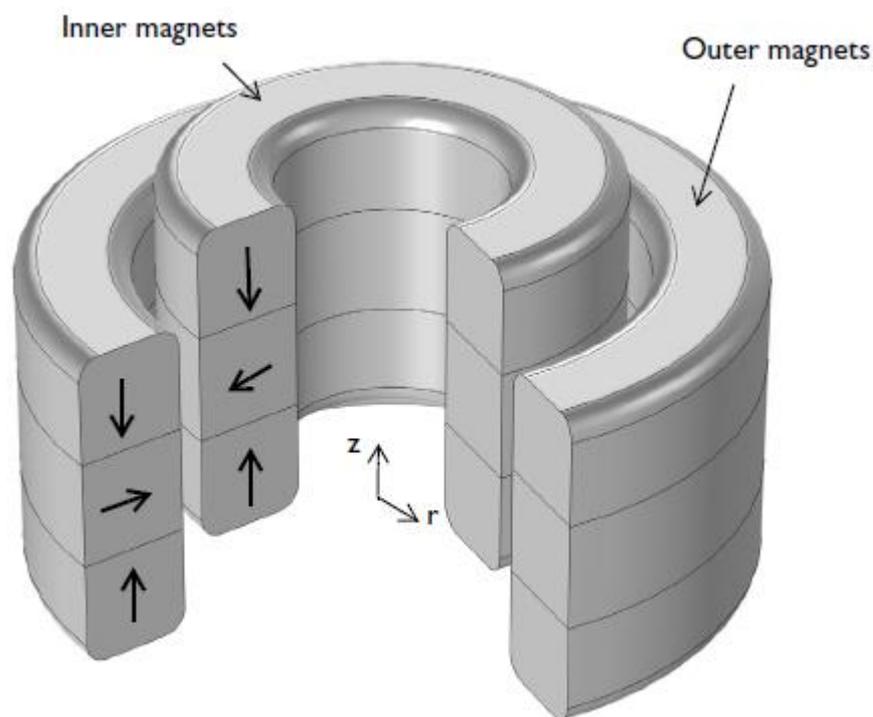


Figure 15 Roulement magnétique ¹⁵

Ici on peut facilement visualiser les deux parties fondamentales, à savoir le rotor et le stator (rotor=partie avec les inner magnets, stator= partie avec les outer magnets).

Afin de pouvoir parler de palier magnétique nous devons donc assembler plusieurs parties ensemble.

Nous avons vu précédemment qu'un palier standard se compose d'un arbre principal connecté à un châssis fixe par l'intermédiaire de roulements ce qui garde l'axe dans sa position sous tous ses axes.

Néanmoins dans le cas d'une lévitation magnétique, une telle dérive ou glissement apparaîtra inéluctablement si on ne trouve pas un système de compensation ou un système de butée.

Un disque magnétique vertical est donc intéressant pour éviter que l'arbre ne s'écarte de sa position originelle.

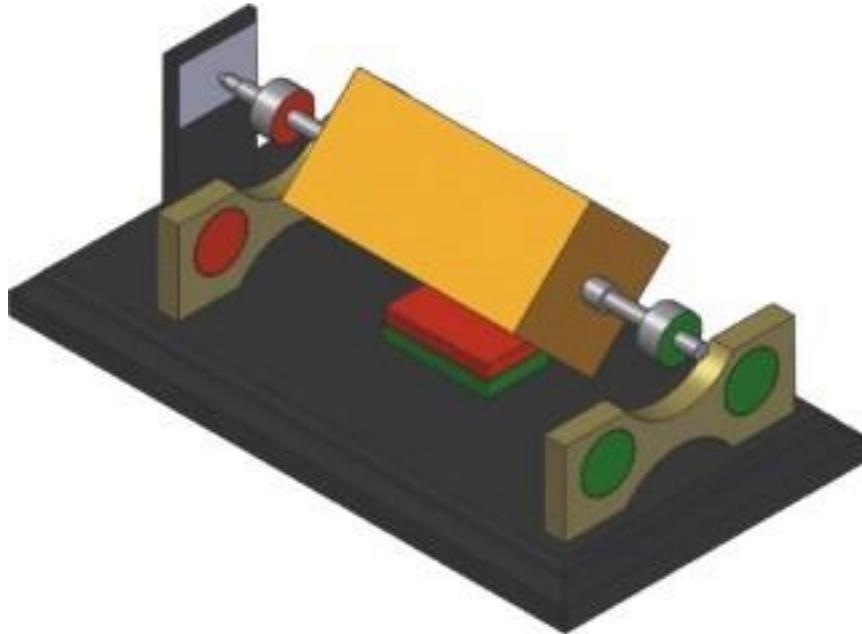


Figure 16 Suspension magnétique Mendochino ¹⁶

Sur cette modélisation de moteur Mendochino, nous pouvons visualiser la suspension magnétique en vert et en rouge et le système de butée verticale permettant de compenser la dérivation magnétique.

Sur cette schématisation il s'agit d'une butée mécanique mais il est tout à fait possible de placer deux magnets ou disques magnétiques en opposition polaire pour donner le même résultat.

Maintenant que nous nous sommes intéressés à l'approche mécanique du principe, nous pouvons comprendre que ce système fonctionne pour un système fixe, c'est-à-dire que les aimants pourront supporter l'arbre ou autre chose à très hautes vitesses mais la compensation au sein de l'arbre reste passive.

Avec une compensation passive il devient rapidement compliqué de faire varier les charges de l'arbre sans entraîner de déformations de centrage, ce qui à hautes vitesses peut être catastrophique.

Avantages et inconvénient de la construction passive

Il est donc temps de faire de point sur les principaux avantages et inconvénients relatifs à ce type de construction passive :

Points positifs :

- Les vibrations sont très grandement amorties car il n'y a plus de connections mécaniques directe entre le stator et le rotor. L'aspect au niveau médical est intéressant à souligner car les vibrations au sein du milieu maritime sont liées à la santé des marins.

En effet les vibrations affectent grandement les articulations de ces derniers.

De plus, moins il y a de vibrations, moins il y a de risques de dommages sur les machines elles-mêmes.

- Il n'y a presque plus besoin de maintenances car tout frottement mécanique a été retiré.

De plus s'il n'y a plus de frottements il n'y a plus de risques d'échauffements de matières par friction donc plus de limite de vitesses mis à part la force centrifuge à haute vitesse qui peut créer des dommages structurels.

Il n'y a également plus besoin de lubrification ce qui, comme l'aspect médicale, retire des frais financiers de l'équation finale.

- Le système peut atteindre de très hautes vitesses s'il est bien équilibré. L'absence de frottement est donc très intéressante d'un point de vue du rendement de la machine munie d'un tel système (moins de perte mécanique).

Les points négatifs :

- Le prix d'une telle installation n'est pas intéressant de nos jours car pas suffisamment démocratisé pour être rentable.
- Le système à lévitation passive a besoin d'être équilibré à la perfection pour permettre un fonctionnement optimal (bon rendement).

En pesant le pour et le contre nous nous rendons donc compte que certains points peuvent être améliorés avec la technologie actuelle ce qui va être le thème de la prochaine partie de ce mémoire.

Principe et fonctionnement du palier magnétique par la lévitation magnétique active

Comme expliqué précédemment le palier se composera d'un stator, d'un rotor et ce qui nous intéressera ici sera le type de suspension utilisée, en effet nous allons nous intéresser à la lévitation magnétique active.

Dans le cadre de la réalisation du prototype de palier magnétique nous allons utiliser un solénoïde dit à cœur d'air.

Pour cela nous aurons besoin de plusieurs électroaimants que nous assembleront sur un châssis de manière circulaire.

La compensation verticale étant compensée par les bobines de compensation il est également nécessaire de compenser la dérive longitudinale du palier.

Cette dérive sera compensée en utilisant le même principe que précédemment.

Nous allons donc concevoir un palier de butée qui est représenté sur le schéma ci-dessous :

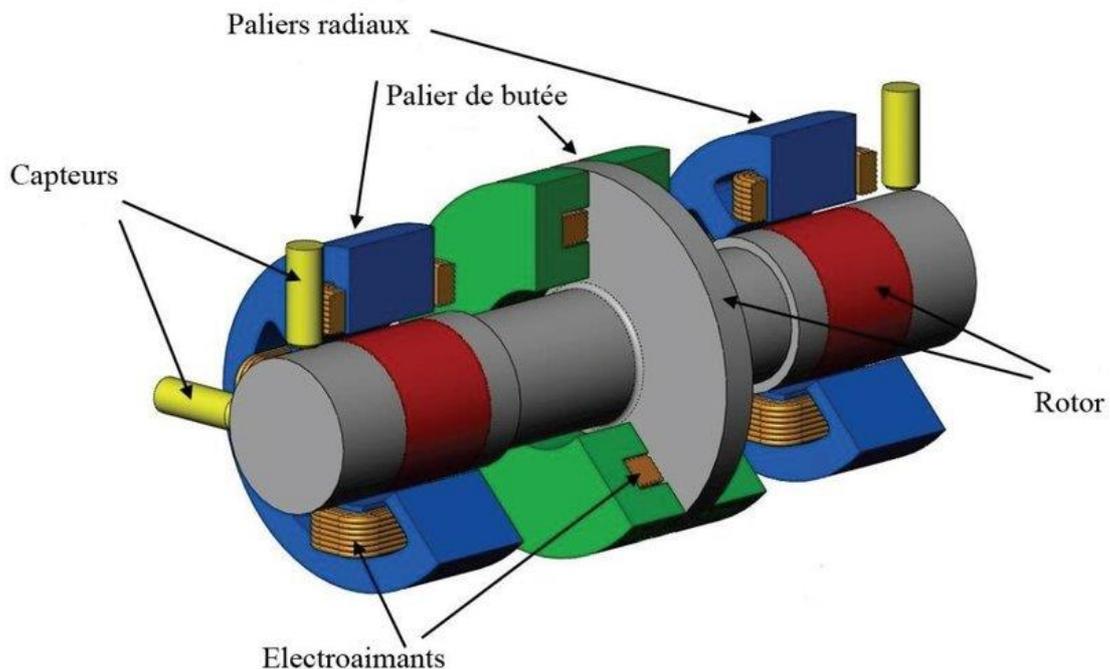


Figure 17 Palier de butée ¹⁷

Comme nous pouvons le voir sur cette schématisation, l'assemblage simple se compose basiquement de deux roulements magnétiques actif et d'un roulement de butée.

Réalisation du palier à lévitation magnétique active

L'idée de la réalisation de ce projet m'est venue en m'intéressant aux propriétés physiques du magnétisme et en travaillant à bord d'un navire.

En effet quand on se rends compte que la maintenance des roulements pourrait être évitée on se demande rapidement s'il n'existe pas une solution plus simple à proposer.

De plus au-delà de la maintenance, la conduction de vibration physique du métal via les roulements à bille est conséquente. Il est donc intéressant de se pencher sur le problème.

J'ai donc eu l'idée de reprendre le principe de palier magnétique et de le refaire à mon idée.

Dans un premier temps j'ai assemblé un cadre en bois afin de soutenir les composants principaux, en l'occurrence le stator.

Schéma du cadre :

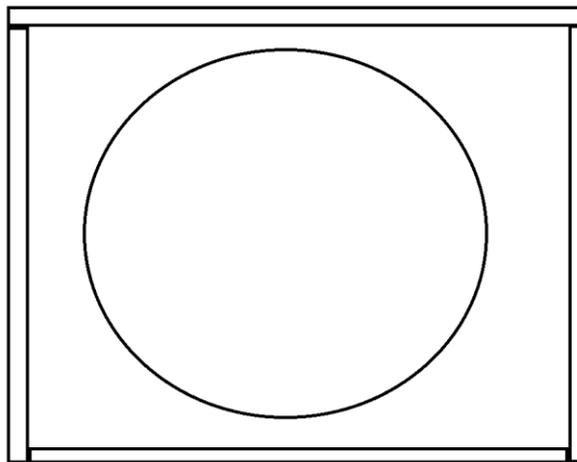


Figure 18 Cadre structural (source personnelle)

Ce châssis principal se compose de tasseaux en bois de sapin en 2*2.5cm et environ 40cm de long.

Ces quatre tiges en bois sont disposées de manière à créer un carré ou un rectangle (au choix).

Le principal but est de permettre de soutenir le dispositif central. On aurait très bien pu le faire en rond ou prendre toute forme géométrique. Ce support a en effet la particularité d'être très polyvalent, ce qui lui permet de s'adapter partout.

La partie circulaire interne a été creusée dans du carton afin d'avoir une matière facile à modeler.

En effet le carton est une ressource facile à trouver dans les magasins et ne coûte rien.

La raison principale qui m'a conduit à prendre du carton est que j'ai pu modifier encore et encore le prototype sans que je sois contraint à recommencer depuis le début. C'est donc un élément modulaire fort intéressant.

Afin de réaliser la forme voulue du projet il y a deux plaques disposées parallèlement. Elles sont du même type, et viennent former les deux supports de lévitation passive.

Cette disposition permet de retrouver le cercle central au même niveau de chaque côté.

Ces deux plaques se situent à environ 20 centimètres l'une de l'autre.

Chacune de ces faces supporte une piste de deux centimètres de large sur laquelle j'ai disposé au milieu des petits aimants en néodyme afin de réaliser une piste magnétique passive.



Figure 19 Aimants en néodyme ¹⁸

Voici une vue coupée de ce type de support :

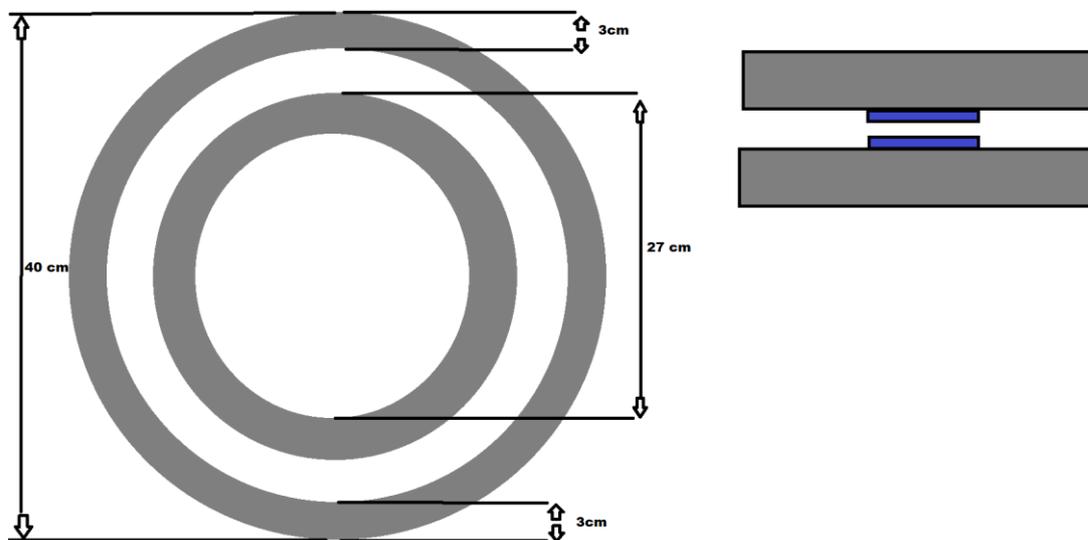


Figure 20 Vue coupée du support (source personnelle)

Ici on distingue à gauche du schéma en gris la partie interne (le rotor) et la partie externe (le stator). Le rotor est également réalisé en carton.

A droite de ce schéma nous pouvons voir la disposition de piste et en opposition de champ des petits aimants de néodyme.

Chacun de ces aimants a une force en charge de 2.5 kg de force attractive ou répulsive.

Les dimensions sont de 3 millimètres d'épaisseur pour un centimètre de diamètre.

En ce qui concerne la partie centrale du prototype nous allons trouver le rotor dont voici une schématisation en vue coupée longitudinale :

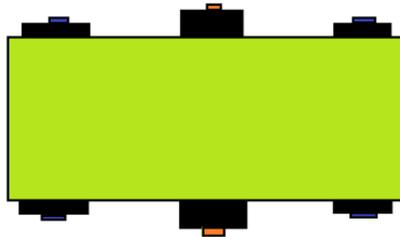


Figure 21 Coupe longitudinale du rotor (source personnelle)

Sur ce schéma il est aisé de distinguer en vert l'axe principale (le rotor qui fait office d'axe de palier). Les trois anneaux noirs sont les bagues de soutiens. Les deux externes font un centimètre d'épais par cinq centimètres de large.

La bague centrale elle fait deux centimètres d'épaisseur pour aussi cinq centimètres de large. Sur les deux anneaux extérieurs (la partie en bleu) il est monté une piste d'aimants de 3mm d'épaisseur. Ces aimants sont collés les uns à côté des autres afin d'être en ligne.

Sur la partie centrale, la partie orange du schéma, nous allons installer des aimants légèrement plus épais, en effet nous opteront pour du 5mm d'épaisseur. Car leurs forces de répulsion/attraction est plus importante.

Chaque anneau est séparé de 5 centimètres l'un de l'autre afin d'avoir suffisamment de place pour visualiser facilement le montage.



Figure 22 Partie centrale du palier (source personnelle)

L'anneau central représente la partie magnétique active, en effet la compensation et le soutien magnétique sera réalisé par une compensation électromagnétique effectuée via des solénoïdes.



Figure 23 Solénoïde employé (source personnelle)

Chaque bobine contient un fil de 30 mètres de long. Le diamètre de ce fil est d'environ 1 mm (isolation comprise).

Le fil utilisé est extrait de câbles Ethernet de type RJ45.

L'avantage de ce type de câble est son cout très bas et dans chaque câble nous avons 8 brins à utiliser.

Soit avec trois bobines de 10 mètres chacune nous nous retrouvons avec 240metres de fil exploitable.

Chacune des bobines fait 1.5 cm d'épais, 5cm de diamètre externe et 1cm de cœur creux.

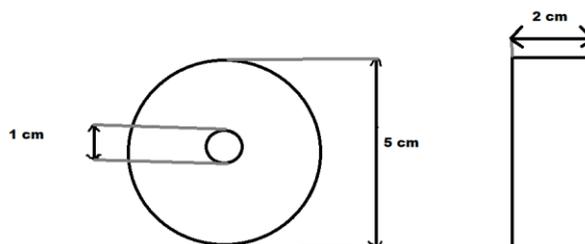


Figure 24 Principales dimensions des bobines (source personnelle)

Pour chaque bobine, nous avons donc $(2.5-0.5\text{cm}) \times 1.5\text{cm} / (0.1\text{cm} \times 0.1\text{cm}) = 300$ spires.

En partant du principe où nous soumettons un courant de 2 ampères dans la bobine, nous obtiendront alors :

$$B = (4 \times 3.14 \times 10^{-7} \times 300) / 0.015 = 0.05 \text{ tesla}$$

Cette valeur est très faible pour un prototype viable mais reste correct dans le cas d'une démonstration.

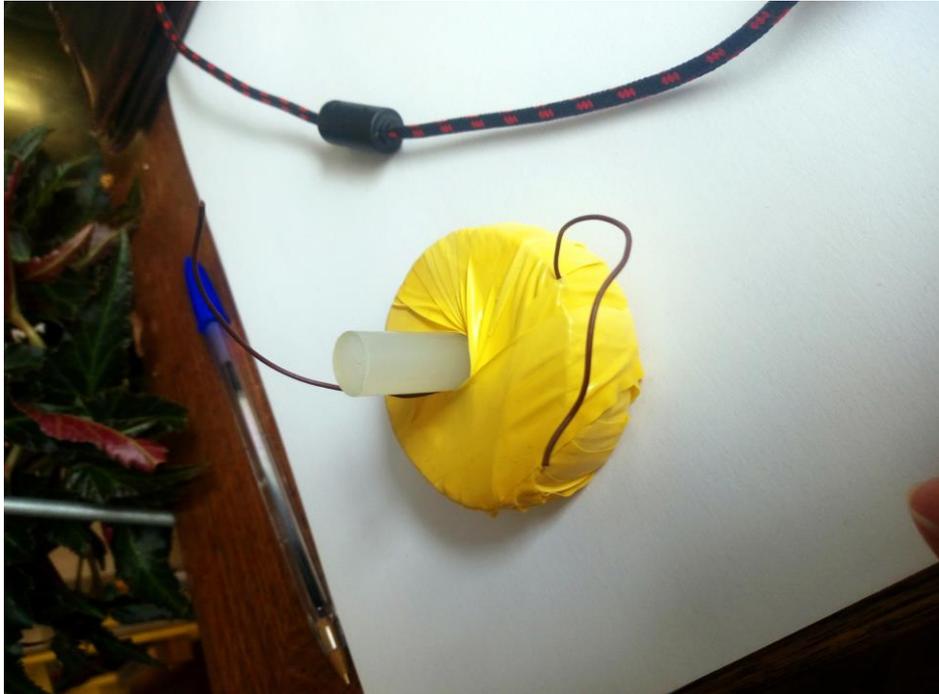


Figure 25 Bobines finale (source personnelle)

Sur chacune des bobines sera ajouté un capteur à effet Hall (capteur de champ magnétique). En effet dans la version pratique de ce mémoire, le prototype présenté est muni de tels capteurs et plus précisément le KY-024.

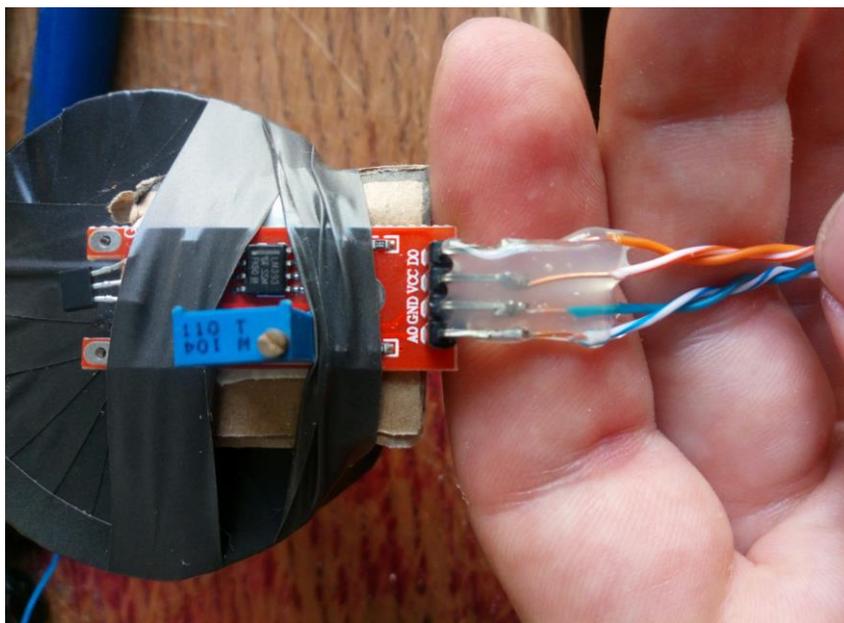


Figure 26 Capteur KY-024 monté sur solénoïde (source personnelle)

Voici a quoi ce module ressemble :

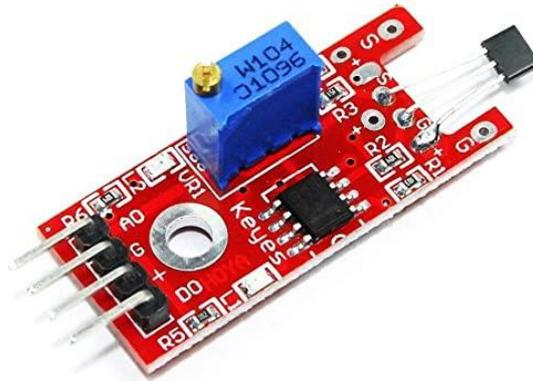


Figure 27 Capteur KY-024 ¹⁹

Lorsque le senseur détectera une variation de champ, il va pouvoir déterminer si l'aimant à l'origine du champ s'approche ou s'éloigne (sur la ligne du rayon perpendiculaire au mouvement, donc péremptoire).

En fonction de cette information le circuit d'analyse déterminera s'il faut envoyer une commande pour activer la bobine de compensation ou non.

Par rétroingénierie et recherches il est intéressant d'essayer de comprendre le fonctionnement d'un tel dispositif.

Cela nous permet d'obtenir le schéma électronique suivant :

Sur ce schéma, on comprend que si un champ magnétique s'écarte du senseur a effet hall, un signal sera créé.

Ce signal sera capté pal le senseur 49E et envoyé vers un ic lm393 qui est un comparateur double.

Voici une photo de ce senseur :



Figure 29 Senseur 49 E²¹

Voici une représentation de l'ic:

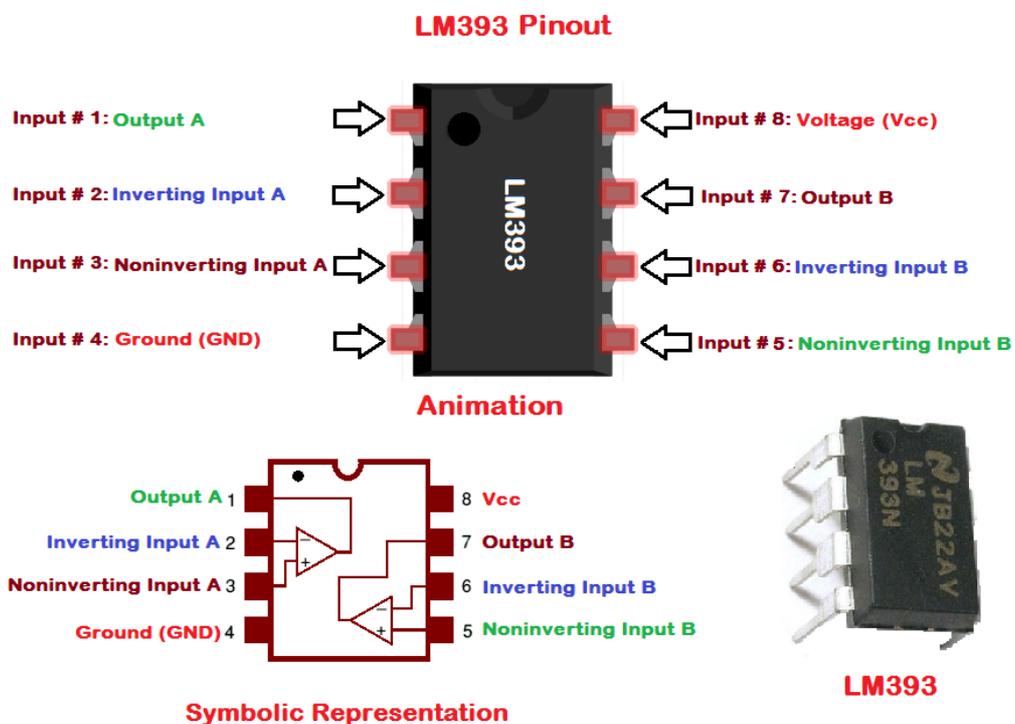


Figure 30 Comparateur double IC lm393²²

Ce petit circuit intégré peut être utilisé dans plusieurs domaines, ici il va permettre de générer un signal de commande vers le connecteur D0 comme représenté sur le schéma.

Le circuit de commande se situe juste à côté, il va permettre de commander l'acheminement de courant à travers le solénoïde.

On comprend donc que le circuit s'active quand le capteur ressent une baisse du champ magnétique.

Pour ce contrôleur j'ai également créé une base schématique :

circuit de controle

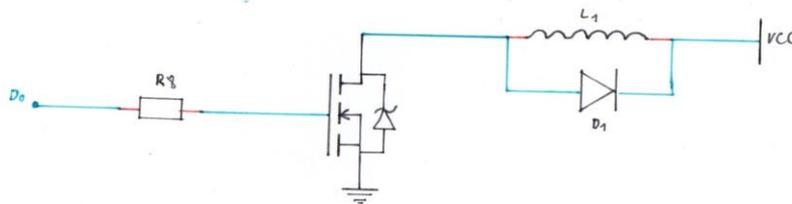


Figure 31 Circuit de contrôle²⁰ (source avec modifications personnelles)

Sur ce circuit, nous pouvons remarquer l'entrée du signal en D0.

Cette entrée de signal va permettre de contrôler le mosfet (un amplificateur contrôlé).

Pour un meilleur contrôle il serait intéressant d'ajouter un ic pilote de mosfet pour avoir une meilleure gestion du circuit.

Pour la réalisation du prototype ce pilote de mosfet ne sera pas présent du fait du temps de livraison.

Le fonctionnement est relativement simple, le signal émis par D0 permet l'ouverture du mosfet, ici nous utiliseront un IRFZ44N :



Figure 32 Mosfet IRFZ44N ²³

Ce mosfet est intéressant car dans le cadre de mes tests il me fallait un composant suffisamment solide pour pouvoir effectuer mes tests de circuit.

Nous remarquons également qu'il y a une diode installée en parallèle du solénoïde. Il s'agit d'une diode disposée de manière à réaliser un circuit dit « anti roues libre ».

L'idée de ce circuit « anti roue libre » est d'éviter des retours de courant quand le mosfet se coupe, pour ne pas l'endommager.

Les bobines sont alimentées en 12v DC.

Dans le cadre de la réalisation du prototype j'utiliserai en tout six solénoïdes disposés en étoile de la manière suivante :

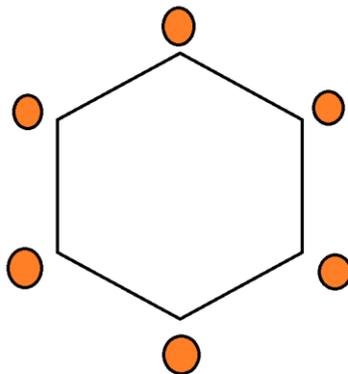


Figure 33 Disposition des solénoïdes (source personnelle)

Les bobines sont symbolisées par les points orange.

Chaque solénoïde sera contrôlé en opposition de réaction de champ, en effet le choix de cette disposition est arbitraire, on aurait très bien pu faire l'inverse.

Ce modelé de fonctionnement est basé sur le fait qu'au moment ou un capteur est activé, il va déclencher son solénoïde situé de l'autre cote de l'axe.

Voici un schéma simplifié pour visualiser le phénomène de réaction active :

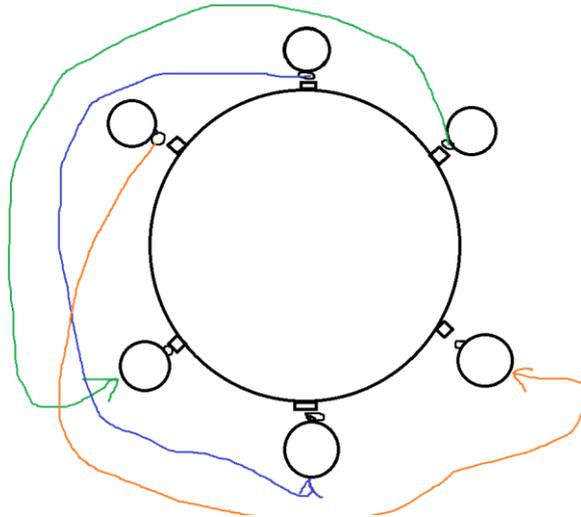


Figure 34 Réaction active (source personnelle)

Prenons un exemple, l'axe se déplace vers le bas :

Le centre de gravite sera déplacé vers le bas impliquant une modification du parcours des aimant.

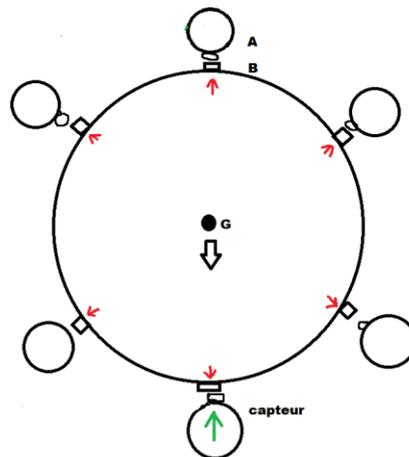


Figure 35 Contrôle de l'écartement du pallier (source personnelle)

Chaque bobine a en sa possession un capteur, la représentation schématique précédente nous permet de visualiser le phénomène lié au contrôle.

Les points A et B vont s'écarter au moment où le point G va quitter son centrage.

L'espace créé sera interprété par le capteur qui va interpréter l'information et demander à la bobine a son opposée d'orienter son champ dans le sens opposé de celui du magnet juste au-dessus pour effectuer un phénomène de répulsion.

Sur le dessin, la flèche rouge symbolise le sens du champ magnétique le l'aiment en néodyme et la flèche verte celui induit par le solénoïde.

De part cette répulsion le point G sera poussé vers le haut et retrouvera sa position d'origine.

Cette action est répétée à chaque fois que le point G quitte da position centrale.

De part ce phénomène on qualifie ce montage de réaction active car les solénoïdes s'activent que quand le système dévie de sa trajectoire originelle.

Ce type d'installation a pour intérêt de permettre au système d'avoir une stabilité plus grande, plus réactive et surtout adaptative en fonction de l'application et de la charge donnée.

L'alimentation sera effectuée par une alimentation de laboratoire.

Les électroaimants utilisés sont de petits DC 12V.

Jusqu'à présent nous auront travaillé sur la compensation transversale su système.

Pour que le projet soit fonctionnel, il faut une compensation longitudinale.

Cette compensation sera effectuée en reprenant le même principe de fonctionnement que précédemment.

Voici une représentation schématique de la butée compensatrice longitudinale (le palier de butée) :

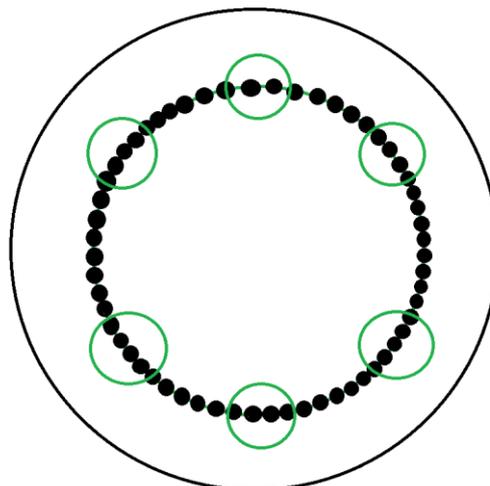


Figure 36 Butée compensatrice longitudinale (source personnelle)

Sur ce schéma les petits ronds noirs représentent la piste magnétique réalisée pas des petits aimant en néodyme et les cercles verts sont les bobines de réaction.

Sur le prototype il ne sera pas possible de présenter cette réalisation car il me manque des aimants et du fil pour les bobines.

Ce système serait idéalement réalisé des deux côtés du rotor pour éviter que l'axe dévie de sa position centrale.

Il faudrait donc 12 bobines supplémentaires.

Améliorations et progrès du prototype

Comme indiqué précédemment mon projet est améliorable. En effet certaines adaptations sont réalisables, par exemple pour le miniaturiser, pour le rendre plus fonctionnel, plus abordable ou encore plus modulable (pour l'installation ou l'adaptation).

Dans cette optique, il est intéressant de nous demander quels sont les points à travailler sur ce projet.

Tout premièrement nous pouvons nous intéresser à la disposition des aimants, en effet est-il plus intéressant de savoir si plusieurs petits aimants assemblés les uns à côtés des autres sont plus efficace qu'un gros aimant ou inversement.

Traitons d'abord de l'interaction des aimants entre eux.

De par mes expériences j'ai constaté que les aimants ne réagissaient pas comme je m'y attendais lors des premiers essais.



Figure 37 Disposition des aimants premier essai (source personnelle)

Comme nous pouvons le voir sur la photo j'ai essayé de disposer les aimants les uns à côté des autres afin de créer une sorte de tapis magnétique.

Cependant, j'ai constaté qu'en approchant un autre aimant en opposition de polarité ils ne se repoussaient pas.

J'ai donc procédé a d'autres petites expériences afin de poursuivre mon projet :

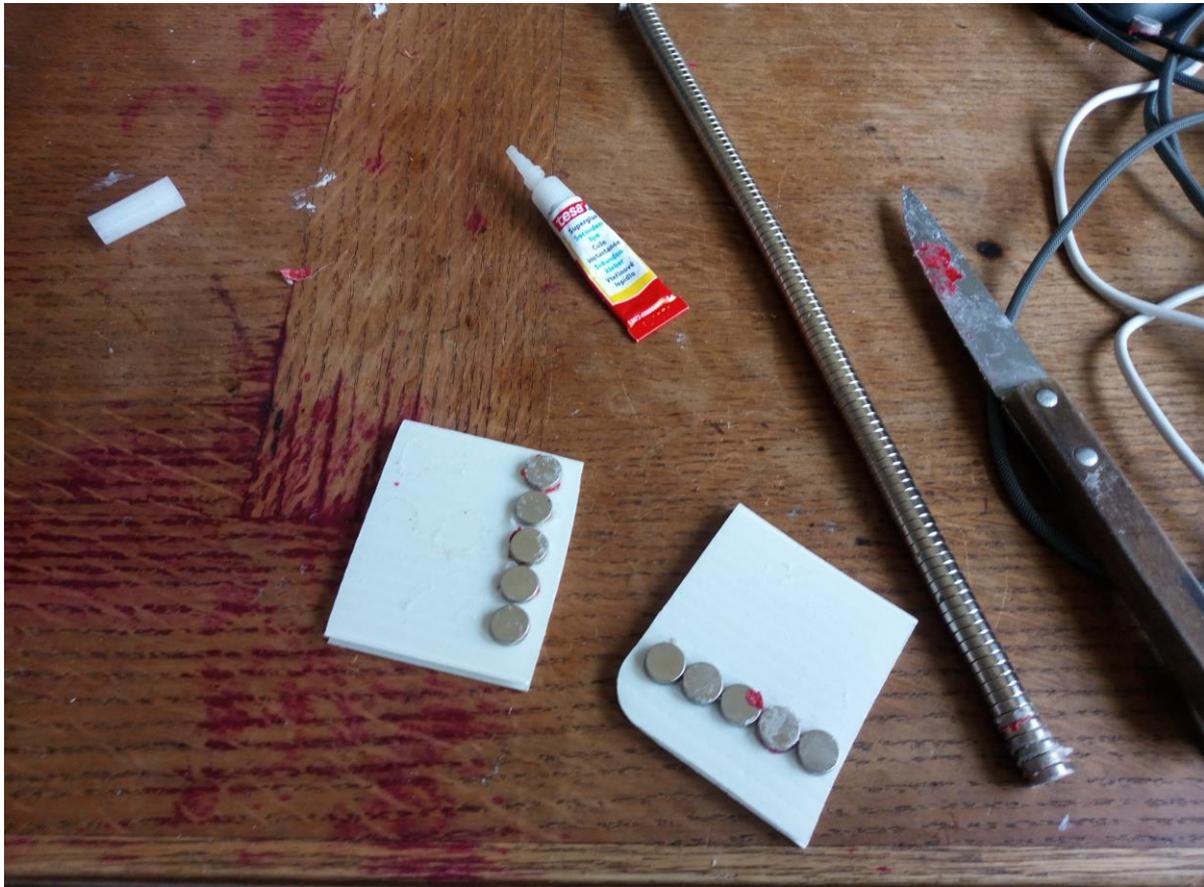


Figure 38 Etude de l'interaction magnétique (source personnelle)

En disposant des magnets en lignes j'ai pu me représenter ce qu'il se passais.

En effet lorsque l'on met deux aimant côte à côte leurs lignes de champ vont se perturber les unes des autres.

En ligne cette perturbation va avoir tendance à déplacer le flux de champ sur les côtés alors que s'ils sont colles les uns a cote des autres le champ va s'annuler et je me suis retrouvé avec une plaque presque inerte.

Voici un simple schéma explicatif du phénomène :

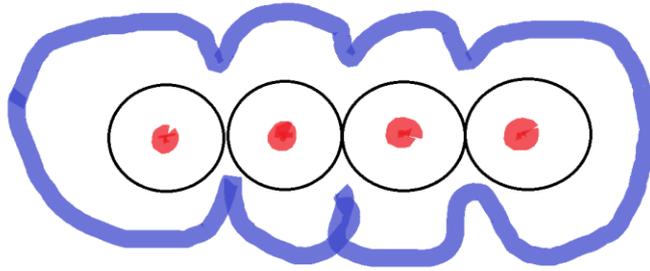


Figure 39 Champ magnétique irrégulier (source personnelle)

En bleu nous pouvons visualiser le champ externe et en rouge, à l'intérieur des aimants, le champ en provenance de ces derniers.

Afin d'avoir un champ en bleu uniforme il faudrait un aimant rectangulaire comme le représente le schéma suivant :

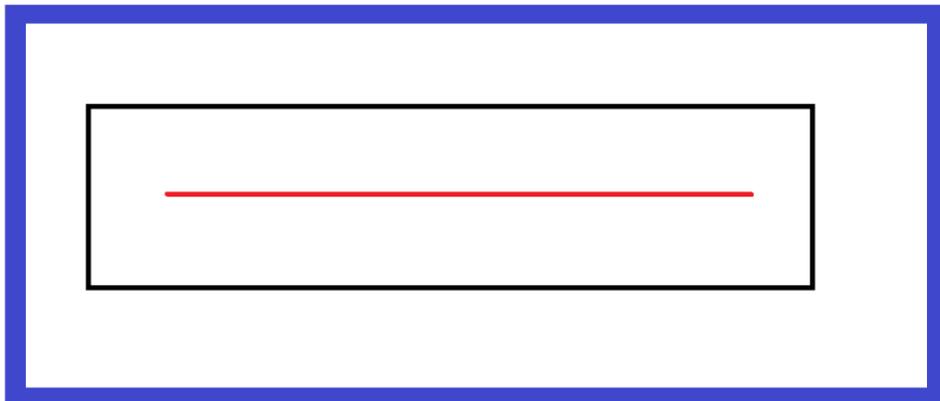


Figure 40 Champ magnétique régulier (source personnelle)

Nous pouvons donc nous rendre compte qu'il serait pratique d'avoir un aimant rectangulaire ou taurique unique à la taille que l'on souhaite, disposé de manière circulaire, pour obtenir un champ uniforme et donc une bien meilleure stabilité.

Dans le cadre du palier plusieurs de ces aimants seraient nécessaires, au niveau du stator et du rotor notamment, pour qu'ils puissent se repousser mutuellement.

Lors de mes observations, j'ai également remarqué que lorsque l'on soumet un aimant à une charge inductive dans le cœur d'une bobine, il est possible de faire varier la force de l'aimant en question.

Il serait donc intéressant de positionner, comme dans mon prototype, des solénoïdes en périphérie des aimants radiaux.

Une représentation schématique de ce fonctionnement :

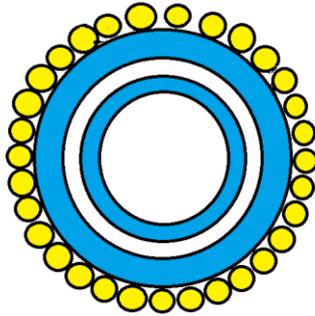


Figure 41 Aimants radiaux et solénoïdes (source personnelle)

On peut distinguer sur ce schéma les deux aimants permanents en bleu et les solénoïdes en jaune.

L'idée de placer plein de solénoïdes tout autour permet d'avoir une stabilité et une réaction plus précise.

Le système de contrôle serait aussi à repenser, en effet pour que les capteurs de champ soient moins brouillés par les lignes de champ résiduelles, il serait intéressant de les placer à un endroit plus adapté, ou utiliser des capteurs de position plus précis.

Application en vigueur dans certains milieux

En effet ce principe de fonctionnement est en d'autres termes ce que l'on peut qualifier comme étant le graal du mécanicien et certaines compagnies se sont penchées sur le sujet.

De nos jours ce type de palier est d'ores et déjà appliqué sur des séparateurs et aussi sur les plateformes pétrolières.

Comme dit précédemment, la société SKF propose le système de roulement magnétique actif au milieu industriel.

Cette société suédoise est née en 1909 grâce à l'ingénieur suédois Sven Gustaf Wingquist.

Spécialisée dans le domaine du roulement a bille a l'international, elle fait de nos jours partie des leaders mondiaux dans ce domaine.

Afin de continuer à avancer dans le domaine de l'innovation industriel les ingénieurs de cette société ont réussi a mettre au point une version contemporaine de ce qu'on appelle aujourd'hui le palier magnétique actif.



Figure 42 *Pallier magnétique actif industriel* ²⁴

La photo ci -dessus représente une vue coupée de notre système appliqué à une turbine.

Comme le souligne Mr.Dieul :

«

DES CAPTEURS DE SURVEILLANCE D'ÉTAT INTÉGRÉS

Le stator du palier magnétique est constitué de tôles empilées autour desquelles sont enroulées des bobines de cuivre formant une série de pôles nord et sud. Chaque bobine est alimentée en courant pour produire la force d'attraction qui provoque la lévitation de l'arbre à l'intérieur du palier. Le contrôleur vérifie le courant appliqué aux bobines en surveillant le signal de position envoyé par les capteurs de position afin de maintenir l'arbre dans la position souhaitée tout au long du fonctionnement de la machine. Selon l'application, on prévoit généralement un entrefer de 0,5 à 1 mm entre le rotor et le stator. Habituellement, l'arbre est entraîné par une machine externe, comme une turbine ou un moteur intégré sur l'arbre. SKF propose une gamme de paliers magnétiques associés à des moteurs haute vitesse, ces derniers utilisant la technologie d'aimants permanents. Des capteurs intégrés de surveillance d'état transmettent en continu des informations sur des paramètres clés tels que la température, les vibrations, l'isolation électrique, le contrôle du courant, etc.

ACCROISSEMENT DU RENDEMENT DES SYSTÈMES D'ENTRAÎNEMENT

Les systèmes d'entraînement traditionnels des compresseurs centrifuges sont composés d'un moteur à vitesse fixe, d'une boîte d'engrenages étagée et de paliers lubrifiés à l'huile. Le rendement de ces systèmes est compris entre 82 % et 85 %. Si l'on remplace le système d'entraînement par des paliers magnétiques intégrés au moteur à haute vitesse de SKF, la boîte d'engrenages et les paliers lubrifiés à l'huile deviennent inutiles. Cette solution permet d'obtenir une amélioration des points de rendement de +10% à +12% par rapport à la technologie d'entraînement traditionnelle. Par exemple, Johnson Controls a choisi les systèmes magnétiques SKF (paliers magnétiques et moteurs à haute vitesse à aimant permanent) pour équiper sa nouvelle gamme de compresseurs pour les solutions de climatisation York, appelée YMC².

»²⁵

L'application de ce type de système rencontre de moins en moins de limites du fait de l'évolution technologique liée à la miniaturisation des composants et est donc de plus en plus applicable.

SKF décline ses produits magnétiques en de nombreuses variantes.

Ce type de technologie est, comme dit précédemment, implémentée dans des turbines, et sera certainement applicable pour n'importe quelle machine tournante à haute vitesse de rotation comme par exemple des séparateurs, des pompes, etc...

Développement technologique futur

Il est intéressant de se projeter dans les éventuelles améliorations technologiques.

En effet pour le moment nous nous basons sur une lévitation émise par un champ magnétique émis grâce à un courant électrique.

Néanmoins une autre avancée majeure est de nos jours en train de faire son apparition, il s'agit de la supraconductivité.

Conclusion

En nous basant sur les principes fondamentaux exploités dans cette thèse et sur les technologies déjà mises à l'œuvre, nous pouvons aisément nous projeter dans un avenir où ce système de palier magnétique sera omniprésent.

Mon idée de la réalisation individuelle de ce système reposant sur l'accessibilité de la structure tant matérielle que structurelle tend à ouvrir de nouvelles perspectives sur les principes de production et d'assemblage.

Cette technologie étant exploitée que très récemment dans le domaine maritime ouvre la voie à de futures études sur le sujet. Notamment comme dit plus haut, il serait intéressant de tenter d'appliquer et d'étudier le phénomène de supraconductivité afin d'obtenir de meilleures performances.

Sources

1. Magnétite. *Wikipédia* (2021).
2. habermann.pdf.
3. aimant permanent champ magnétique – Recherche Google.
https://www.google.com/search?q=aimant+permanent+champ+magn%C3%A9tique&tbm=isch&ved=2ahUKEwjL8oq5-fjuAhWXwCoKHSedB0cQ2-cCegQIABAA&oq=aimant+permanent+champ+magn%C3%A9tique&gs_lcp=CgNpbWcQA1CDiQVYm7cFYoe5BWgAcAB4AIABjwulAfRSkgENMi0xLjEuMi4yLjluNZgBAKABAaoBC2d3cy13aXotaW1nwAEB&sclient=img&ei=mEExYMvGBJeBqwGnup64BA&bih=937&biw=1920#imgrc=RAhN9RGSKHgxFM.
4. Le champ magnétique de la Terre. <https://les-aurores-boreales-39.websself.net/le-champ-magnetique-de-la-terre>.
5. www.neodyme-shop.com. AIMANT NEODYME : FABRICATION ET PROVENANCE.
[www.neodyme-shop.com https://neodyme-shop.com/blogs/neodyme-shop/aimant-neodyme](https://neodyme-shop.com/blogs/neodyme-shop/aimant-neodyme).
6. Hugonnet, B. Frittage et évolution de la microstructure au cours des traitements thermiques d'aimants NdFeB: influence sur les propriétés magnétiques. 164.
7. champ magnétique fil – Recherche Google.
https://www.google.com/search?q=champ+magn%C3%A9tique+fil&sxsrf=ALeKk02_wpgNP4D-_x_YShsqN2rI0D0nyQ:1613910976965&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwj9Iuzz_vruAhXcBhAIHbywBoMQ_AUoAXoECBcQAw&biw=1920&bih=880#imgrc=9_uUcQfO8cOUhM.
8. Calculs des champs électromagnétiques - ppt video online télécharger.
<https://slideplayer.fr/slide/1144068/>.
9. champ magnétique. <http://www.chimix.com/T-fiches/Ch-magn.htm>.

10. Les hydroliennes: L'alternateur. *Les hydroliennes* <http://tpe-hydroliennes.blogspot.com/p/sur-terre-il-existe-de-nombreux-moyens.html>.
11. Roulement mécanique. *Wikipédia* (2021).
12. Résistance au roulement. *Wikipédia* (2021).
13. 6200-2RS Cuscinetto a Sfere a Gola Profonda,Doppio Cuscinetto Sigillato,Mini Cuscinetti a Doppia Tenuta per Meccanici/Apparecchiature/Strumenti Elettrici/Giocattoli, 10 * 30 * 9mm (10 Pezzi): Amazon.it: Commercio, Industria e Scienza. <https://www.amazon.it/Cuscinetto-Sigillato-Cuscinetti-Apparecchiature-Giocattoli/dp/B086C43HCP>.
14. Comment remplacer un roulement de roue de moto. <http://www.freebiker.net/FichesPratiques/changer-roulement-roue-moto/index.html>.
15. Magnetic Bearings. *COMSOL Multiphysics* <https://www.comsol.com/blogs/magnetic-bearings/>.
16. |bis0uhr| Frequenzen - eigene wissenschaftliche Projekte. <http://www.bis0uhr.de/index.htm?http://www.bis0uhr.de/projekte/magnet/english.html%99>
<https://www.google.com/>.
17. Figure 1.3. Rotor supporté par des paliers magnétiques [9]. *ResearchGate* https://www.researchgate.net/figure/Rotor-supporte-par-des-paliers-magnetiques-9_fig3_322466222.
18. 100 Aimant Neodyme Super Puissant N42 Rond et Plat Magnétique Permanent 10mm x 2mm d'épaisseur CGGK TECH®: Amazon.fr: Commerce, Industrie et Science. <https://www.amazon.fr/Neodyme-Puissant-magn%C3%A9tique-permanent-CGGK/dp/B07NYSGX3>.
19. The4. 5 stks ky-024 4-pins lineaire magnetische schakelaars snelheidsteller-sensormodule. *Dennisdeal.com* https://www.dennisdeal.com/products/5-stks-ky-024-4-pins-lineaire-magnetische-schakelaars-snelheidsteller-sensormodule_1398711.
20. GreatScott! *Comment fonctionne la lévitation magnétique? || Circuit de léviteur brut.*

21. 10 pcs 49E Hall Element OH49E SS49E Hall Effect Sensor Lineaire Schakelaar goede. *Grandado* <https://nl.grandado.com/products/10-pcs-49e-hall-element-oh49e-ss49e-hall-effect-sensor-lineaire-schakelaar-goede?variant=UHJvZHVjdFZhcmIhbnQ6MzE1MjQ0NDM>.
22. Introduction to LM393 - The Engineering Projects. <https://www.theengineeringprojects.com/2017/08/introduction-to-lm393.html>.
23. IRFZ44NPBF Infineon / IR | Mouser. *Mouser Electronics* <https://eu.mouser.com/ProductDetail/942-IRFZ44NPBF>.
24. Paliers et systèmes magnétiques | SKF | SKF. <https://www.skf.com/fr/products/magnetic-bearings-systems>.
25. Les paliers magnétiques actifs : une alternative aux roulements traditionnels. *PEI-FRANCE - Produits Equipements Industriels* <https://www.pei-france.com/article/les-paliers-magnetiques-actifs-une-alternative-aux-roulements-traditionnels/>.