



# **Développement d'un concept de compensation statique magnétique pour une articulation robotique**

**Mémoire**

**Julien Boisclair**

**Maîtrise en Génie mécanique**  
Maître ès sciences (M.Sc.)

Québec, Canada

© Julien Boisclair, 2015



# Résumé

L'équilibrage statique d'un manipulateur robotique apporte plusieurs avantages. Ceux-ci comprennent notamment : une diminution des efforts d'actionnement dans un contexte statique, l'augmentation de la charge utile, une commande simplifiée et un robot plus sécuritaire dans un contexte d'interaction avec un humain.

Incorporer une telle technologie à un manipulateur existant est donc souhaitable. Par contre, les techniques actuelles ne permettent pas l'intégration facile d'une compensation statique. Pour répondre à cette problématique, une nouvelle technique d'équilibrage est développée dans ce mémoire.

Le concept présenté se base sur l'interaction entre des champs magnétiques pour produire un couple. En utilisant des cylindres d'Halbach imbriqués, un couple sinusoïdal théorique correspondant parfaitement à une charge gravitationnelle est obtenu. Cette technique est générale et peut être adaptée à différents contextes.

Dans ce mémoire, la géométrie est optimisée dans le but de maximiser le couple produit et la compacité du prototype. Les aimants résultants sont assez complexes. Cela dit, dans un concept pratique, ils peuvent être segmentés afin de simplifier leur fabrication et leur intégration.

Afin de démontrer qu'une compensation statique magnétique est une solution viable, un prototype est intégré à un robot industriel existant. Les résultats obtenus prouvent que le module de compensation statique développé réduit significativement le couple d'actionnement requis et ils justifient la poursuite des travaux dans ce domaine.



# Table des matières

Résumé	iii
Table des matières	v
Liste des tableaux	vii
Liste des figures	ix
Remerciements	xiii
Introduction	1
<b>1 Étude des interactions entre les aimants</b>	<b>9</b>
1.1 Généralités	10
1.2 Introduction à la théorie des aimants permanents	10
1.3 Équilibrage statique de référence	13
1.4 Attraction ou répulsion linéaire	14
1.5 Rotation coaxiale	17
1.6 Agencement d’Halbach	19
1.7 Conclusion	26
<b>2 Développement du concept retenu</b>	<b>27</b>
2.1 Sélection du type d’aimants	28
2.2 Étude de la forme des cylindres d’Halbach	30
2.3 Discrétisation des aimants	37
2.4 Étude de la démagnétisation	40
2.5 Conclusion	44
<b>3 Conception de prototypes</b>	<b>47</b>
3.1 Première itération - Preuve de concept	48
3.2 Deuxième itération	52
3.3 Troisième itération	62
3.4 Validation des analyses par éléments finis	72
3.5 Conclusion	75
Conclusion	77
A Propriétés des aimants NdFeB	81

<b>B Propriétés des appareils de mesures</b>	<b>89</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>95</b>

# Liste des tableaux

1.1	Paramètres du mécanisme de référence équilibré avec des ressorts. . . . .	15
1.2	Paramètres des aimants utilisés pour caractériser l'attraction et la répulsion. . .	16
1.3	Paramètres des aimants du concept d'équilibrage par rotation coaxiale. . . . .	18
1.4	Paramètres des aimants du concept d'équilibrage par cylindres d'Halbach im- briqués. . . . .	23
2.1	Résumé des propriétés des différentes familles d'aimants . . . . .	29
2.2	Proportions géométriques de la géométrie d'aimants utilisée pour caractériser l'effet de la forme et du volume sur le couple. . . . .	33
2.3	Paramètres des cylindres d'Halbach utilisés dans les simulations de discrétisation.	40
3.1	Propriétés des aimants utilisés pour la preuve de concept, à 20°C (tirées de la Figure A.2). . . . .	50
3.2	Propriétés des aimants utilisés pour le second prototype . . . . .	54
3.3	Propriétés des aimants utilisés pour le troisième prototype. . . . .	65



# Liste des figures

0.1	Schéma d'un mécanisme équilibré avec contrepoids. . . . .	2
0.2	Manipulateur sériel équilibré grâce à l'ajout de contrepoids (tiré de Kolarski et collab. (1994)). . . . .	3
0.3	Manipulateur équilibré grâce à l'ajout de contrepoids déportés et couplés par une transmission hydraulique (tiré de Lacasse et collab. (2013)). . . . .	4
0.4	Schéma d'une membrure équilibrée avec un ressort en tension. . . . .	5
0.5	Schéma d'un mécanisme à deux degrés de liberté équilibré avec des ressorts en tension. . . . .	6
0.6	Manipulateur utilisé pour tester l'intégration du prototype développé (tiré de Allan et collab. (2008)). . . . .	8
1.1	Champ magnétique autour d'un aimant, généré par une magnétisation unidirectionnelle (flèche). . . . .	10
1.2	Comparaison entre l'induction magnétique $\vec{B}$ et l'intensité du champ magnétique $\vec{H}$ . . . . .	12
1.3	Propriétés du ressort sélectionné pour l'équilibrage de référence (tiré de Associated Spring Raymond (2015)). . . . .	14
1.4	Répartition du champ magnétique autour d'aimants en attraction et en répulsion. . . . .	15
1.5	Force produite par les aimants cylindriques de la table 1.2 en attraction et en répulsion. . . . .	16
1.6	Équilibrage statique par rotation coaxiale d'aimants en forme de disque. . . . .	17
1.7	Couple produit par le concept d'équilibrage par rotation coaxiale. . . . .	18
1.8	Comparaison entre les ressorts et les aimants en rotation coaxiale requis pour équilibrer la charge de référence. . . . .	19
1.9	Arrangement d'Halbach linéaire avec magnétisation continue. . . . .	20
1.10	Arrangement d'Halbach linéaire avec magnétisation discrétisée. . . . .	21
1.11	Cylindres d'Halbach avec configuration extérieure (a,b) ou intérieure (c,d) et avec une (a,c) ou deux (b,d) paires de pôles. . . . .	22
1.12	Schéma du concept d'équilibrage statique avec des cylindres d'Halbach imbriqués ( $k = 1$ pour le cylindre intérieur tandis que $k = -1$ pour le cylindre extérieur). . . . .	22
1.13	Paramètres géométriques des cylindres d'Halbach imbriqués. . . . .	23
1.14	Couple produit par le concept des cylindres d'Halbach imbriqués, pour différents nombres de paires de pôles (pp). . . . .	24
1.15	Couple produit par le concept des cylindres d'Halbach imbriqués, pour différents nombres de paires de pôles (pp), reporté sur $180^\circ$ . . . . .	24
1.16	Comparaison entre les ressorts et les aimants des cylindres d'Halbach requis pour équilibrer la charge de référence. . . . .	25

2.1	Paramètres géométriques des cylindres d’Halbach imbriqués. . . . .	31
2.2	Représentation du maillage utilisé dans le modèle de simulation. . . . .	32
2.3	Effet du ratio de forme et du volume des aimants sur le couple maximal produit par des cylindres d’Halbach imbriqués. . . . .	34
2.4	Couple produit en fonction du volume, pour différents facteurs de forme $\beta$ . . . . .	35
2.5	Couple normalisé produit en fonction du volume, pour différents facteurs de forme $\beta$ . . . . .	35
2.6	Couple produit en fonction du facteur de forme $\beta$ , pour différents volumes d’aimants. . . . .	36
2.7	Couple normalisé produit en fonction du facteur de forme $\beta$ . . . . .	36
2.8	Effet du ratio $\alpha$ sur le couple produit pour un volume de $57.3e04mm^3$ et un ratio $\beta = 1$ . . . . .	37
2.9	Discrétisation du cylindre d’Halbach extérieur avec des aimants standards. . . . .	38
2.10	Comparaison du couple produit par les différentes techniques de discrétisation présentées pour une géométrie décrite dans la Table 2.3 . . . . .	39
2.11	Effet de la discrétisation du cylindre d’Halbach intérieur sur le couple. . . . .	41
2.12	Chemin emprunté par un champ magnétique dans un circuit ouvert et fermé . . . . .	42
2.13	Flux magnétique résultant ( $B$ ) d’un aimant soumis à un champ démagnétisant $H_d$ . . . . .	42
2.14	Courbes d’hystérésis typiques d’un aimant permanent où $J = \mu_0 M$ . . . . .	44
2.15	Courbe de démagnétisation typique d’un aimant permanent où $J = \mu_0 M$ . . . . .	45
3.1	Photographie et modèle CAO du premier prototype, dans une vue générale. . . . .	48
3.2	Discrétisation en aimants cylindriques utilisée pour la preuve de concept. . . . .	49
3.3	Vues détaillées de la preuve de concept. . . . .	50
3.4	Matrices du rotor et du stator de la preuve de concept. . . . .	51
3.5	Photographies de la preuve de concept dans différentes positions d’équilibre. . . . .	52
3.6	Comparaison entre le couple perçu et le couple mesuré de la preuve de concept. . . . .	53
3.7	Configuration d’aimants utilisée pour produire le couple du second prototype. . . . .	54
3.8	Régions susceptibles de subir une démagnétisation permanente avec et sans les pièces en fer (Simulations effectuées avec COMSOL). . . . .	55
3.9	Effet de l’ajout de pièces en fer sur le couple produit par le second prototype. . . . .	56
3.10	Photographie du second prototype dans une vue générale. . . . .	57
3.11	Vue explosée du second prototype. . . . .	57
3.12	Assemblage mécanique du stator du second prototype. . . . .	58
3.13	Assemblage mécanique du rotor du second prototype. . . . .	59
3.14	Gabarit utilisé pour usiner le plat sur les aimants du second prototype. . . . .	59
3.15	Photographie du plat usiné sur un aimant du second prototype . . . . .	60
3.16	Photographie de l’anneau d’Halbach extérieur utilisé pour le second prototype. . . . .	60
3.17	Comparaison entre le couple mesuré et le couple idéal du second prototype. . . . .	61
3.18	Photographies du second prototype dans différentes positions d’équilibres. . . . .	61
3.19	Illustration d’un défaut de l’alésage de l’aimant utilisé pour le stator du second prototype. . . . .	62
3.20	Mesures du flux magnétique, prises dans le plan central de l’aimant intérieur avec un teslamètre (présenté dans l’annexe B). . . . .	63
3.21	Comparaison entre les répartitions théorique et estimée du champ magnétique autour de l’aimant intérieur du second prototype. . . . .	63
3.22	Arrangement d’aimants utilisé pour générer le couple du troisième prototype. . . . .	64

3.23	Aimant en arc de cercle constituant l’anneau extérieur du troisième prototype.	64
3.24	Aimant en arc de cercle constituant l’anneau intérieur du troisième prototype. .	65
3.25	Troisième prototype d’équilibrage magnétique. . . . .	66
3.26	Vue en coupe détaillée du troisième prototype. . . . .	67
3.27	Intérieur du troisième prototype, une fois assemblé. . . . .	68
3.28	Pièces nécessaires pour l’intégration du prototype au robot UMIS. . . . .	68
3.29	Troisième prototype, intégré à l’articulation du robot. . . . .	69
3.30	Mesure du courant consommé par le moteur du second joint avec la courbe de tendance associé et estimation de la friction. . . . .	70
3.31	Couple produit par le module de compensation magnétique, comparé au couple idéal. . . . .	71
3.32	Comparaison entre le couple simulé et le couple mesuré du premier prototype. .	73
3.33	Comparaison entre le couple simulé et le couple mesuré du second prototype. .	74
3.34	Comparaison entre le couple simulé et le couple mesuré du troisième prototype.	74
3.35	Couplage des stators avec un système de câbles et de poulies afin d’équilibrer plusieurs degrés de liberté. . . . .	79
A.1	Grades standards des aimants néodymes (tiré de NdFeB-info (2015)). . . . .	83
A.2	Courbes de démagnétisation des aimants du prototype 1 (tirées de KJ Magnetics Inc. (2015)). . . . .	84
A.3	Courbes de démagnétisation à 20° des aimants du prototype 2. . . . .	85
A.4	Courbes de démagnétisation utiliser pour interpoler les propriétés à 40°C des aimants du prototype 2 (tiré de Arnold Magnetic Technologies (2014)). . . . .	86
A.5	Courbes de démagnétisation à 20° des aimants du prototype 3. . . . .	87



# Remerciements

Mon parcours en ingénierie a commencé très tôt dans mon enfance par une curiosité parfois maladroite du monde qui m'entourait et un bac de blocs LEGO. Plusieurs années plus tard, une étape importante de ce parcours se termine avec l'aboutissement de ma maîtrise en génie mécanique. Durant cette étape, j'ai eu la chance de bénéficier du soutien de nombreuses personnes. J'aimerais les remercier dans cette courte section.

Premièrement, j'aimerais remercier mon directeur de maîtrise, Clément Gosselin. L'ingéniosité humaine et le progrès scientifique m'ont toujours fasciné. À mes yeux, Clément personnifie ces concepts et représente un modèle à suivre ainsi qu'une constante source d'inspiration. Merci Clément pour vos conseils et votre aide inestimable.

Merci aux membres du Laboratoire de Robotique de l'Université Laval, qui ont su rendre cette expérience des plus plaisantes. Merci aux professionnels de recherche du laboratoire Thierry et Simon pour leur grande disponibilité et leurs judicieux conseils. Merci à tous pour les nombreuses activités sportives, les soirées Gaming et le bon temps passé en votre compagnie. Grâce à vous, je conserverai un excellent souvenir de ma maîtrise, mais plus important encore, je conserverai de bons amis.

J'aimerais aussi remercier mes parents. Sans leur soutien et leur amour inconditionnel, je n'aurais probablement pas eu la chance de poursuivre des études graduées. Les valeurs d'éducation et de persévérance qu'ils m'ont transmises m'ont permis de développer tous les outils nécessaires à mon succès.

Finalement, un merci spécial à Julie qui, par son appui et ses encouragements, m'a permis de surmonter les moments les plus difficiles de ma maîtrise. Merci Julie pour l'aide, le soutien et le bonheur que tu m'as apporté tout au long de ces années.



# Introduction

## Mise en contexte

La robotique moderne est un domaine en pleine effervescence. Son utilisation s'étend dans beaucoup d'industries pour effectuer des tâches variées. Ces tâches se diversifient constamment grâce à l'amélioration de technologies qui augmentent l'efficacité des robots utilisés. L'équilibrage statique est un bon exemple de ce type de technologies. Ce concept, bien développé dans la littérature, est largement utilisé en robotique afin d'améliorer le comportement et les performances d'un manipulateur. Un équilibrage statique parfait est obtenu lorsque le poids des membrures du manipulateur n'engendre aucun couple aux articulations, dans des conditions statiques, pour toute configuration du robot. De cette façon, le moteur d'une articulation n'a donc plus besoin de fournir le couple nécessaire pour maintenir le robot en place, mais il doit continuer à fournir le couple requis pour déplacer la charge utile du robot (efforts inertiels). Dans le cas des robots d'architecture sérielle, qui sont constitués d'une série de moteurs et de membrures, la masse du robot est souvent élevée comparativement à sa charge utile. Une compensation statique peut donc devenir très avantageuse.

L'équilibrage statique est généralement utilisé pour répondre à deux besoins. En premier lieu, cette technique augmente la charge utile du robot, lui permettant ainsi de diversifier les tâches qu'il peut accomplir. En second lieu, la compensation statique peut être utilisée pour réduire la puissance requise pour effectuer une tâche. En étant moins puissant, le robot devient par le fait même plus sécuritaire, car la force d'actionnement impliquée dans une collision du robot avec le milieu est réduite. Cette pratique est souvent utilisée dans un cadre où un humain doit coopérer avec un robot pour effectuer une tâche.

Dans ce mémoire, un nouveau type d'équilibrage statique est présenté. En utilisant l'interaction entre des aimants pour produire le couple d'équilibrage, plusieurs faiblesses des technologies actuelles peuvent être évitées. Avant de présenter les travaux menant au développement d'un prototype, un survol des principales techniques d'équilibrage statique existantes est présenté. Deux types d'approches sont généralement utilisées lors du design d'un manipulateur statiquement équilibré. La première méthode utilise des contrepoids pour compenser la gravité, tandis que la deuxième méthode utilise des éléments élastiques pour emmagasiner la variation

d'énergie potentielle.

## Équilibrage avec contre-poids

La première technique d'équilibrage présentée est l'utilisation de contre-poids. Ce type d'équilibrage est simple à réaliser, une masse équivalente à la masse totale des membrures en aval d'une articulation doit être ajoutée pour compenser le moment généré au pivot. Ce principe est illustré simplement par le mécanisme à deux degrés de liberté présenté à la Figure 0.1. Dans un manipulateur équilibré statiquement, le centre de masse global de la structure est fixe. Cette condition est vraie peu importe l'orientation de la base du manipulateur par rapport au vecteur d'accélération gravitationnelle. De plus, les vibrations et les efforts transmis par la base lors du déplacement des membrures sont grandement réduits par ce type de compensation statique. Ces conditions sont particulièrement intéressantes lorsque le manipulateur doit opérer dans des conditions où l'orientation de sa base est arbitraire.

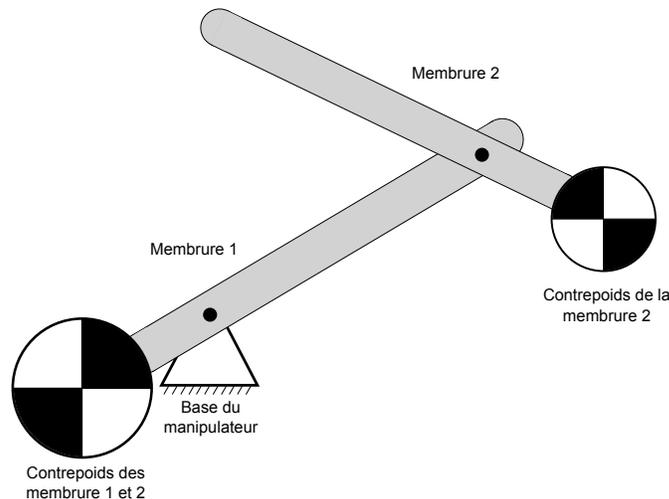


FIGURE 0.1 – Schéma d'un mécanisme équilibré avec contre-poids.

L'équilibrage statique de robots d'architecture sérielle à l'aide de contre-poids est effectué dans Lim et collab. (1990), Agrawal et Fattah (2004), Wang et Gosselin (1999). De plus, un exemple de l'utilisation de cette technique est montré à la Figure 0.2. Bien que l'utilisation de contre-poids est simple à mettre en œuvre, elle entraîne également plusieurs inconvénients. L'importante masse ajoutée nuit à la dynamique du robot et est souvent très encombrante.

Étant donné ses désavantages importants, l'équilibrage statique par contre-poids est rarement obtenu par l'ajout de masse sur le manipulateur. Un équilibrage partiel ou complet peut être obtenu simplement en redistribuant adéquatement la masse déjà présente dans le manipulateur. Un robot équilibré statiquement par redistribution de masse est conçu et analysé dans

Kazerooni (1989). La redistribution de masse apporte des résultats optimaux puisque peu de masse est ajoutée aux membrures. Les effets d'un équilibrage statique complet avec contre-poids, ainsi que ceux d'un équilibrage partiel avec redistribution de masse sont discutés dans Kolarski et collab. (1994).

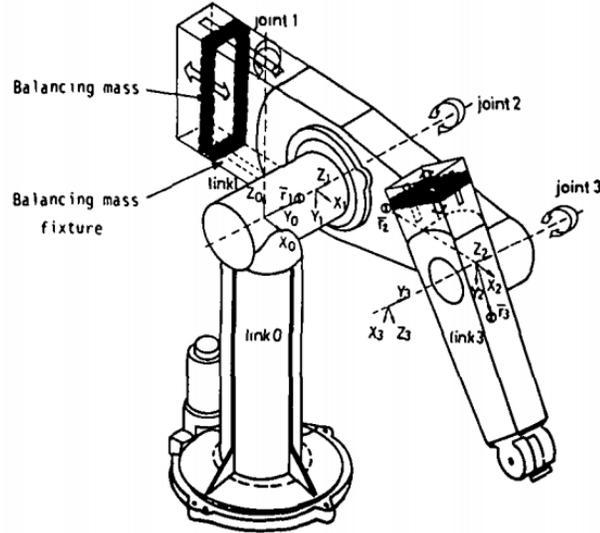


FIGURE 0.2 – Manipulateur sériel équilibré grâce à l'ajout de contreponds (tiré de Kolarski et collab. (1994)).

Une autre méthode utilisée pour réduire les effets négatifs des contreponds est de les déporter afin qu'ils ne soient plus sur le manipulateur. Les contreponds doivent ensuite être couplés au manipulateur en utilisant une transmission hydraulique, comme démontré dans Lauzier et collab. (2009) et Lacasse et collab. (2013), une transmission à câble, comme démontrée dans Laliberté et collab. (2010), ou toute autre technique de couplage. De cette façon, le manipulateur n'est pas encombré par les contreponds, bien qu'il soit encore affecté par l'inertie ajoutée. De plus, l'équilibrage est alors valide pour une seule orientation de la base du manipulateur, contrairement au cas général présenté précédemment. Une image d'un manipulateur équilibré par contreponds déportés et de son banc d'équilibrage, couplé au manipulateur par une transmission hydraulique, est présentée à la Figure 0.3.

## Équilibrage avec élément élastique

Dans le second type d'équilibrage statique, la variation de l'énergie potentielle, causée par le déplacement des membrures du robot, est reprise par la contraction ou l'élongation d'éléments élastiques. Typiquement, des ressorts sont utilisés pour constituer ces éléments élastiques. Ce type de compensation ajoute moins de masse et d'inertie au manipulateur que l'utilisation de

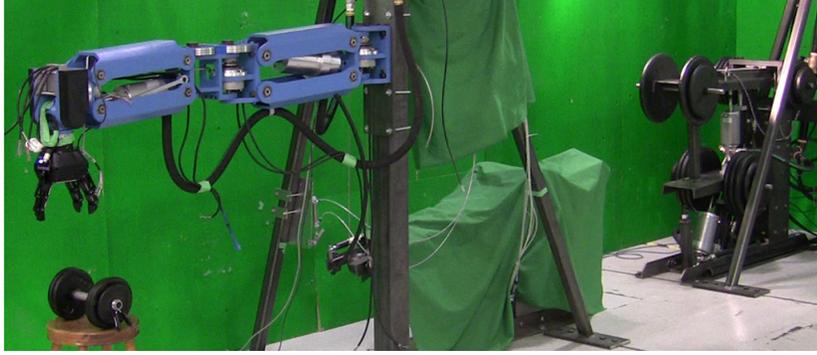


FIGURE 0.3 – Manipulateur équilibré grâce à l’ajout de contrepoids déportés et couplés par une transmission hydraulique (tiré de Lacasse et collab. (2013)).

contrepoids. Par contre, l’équilibrage avec ressorts est souvent plus complexe à réaliser qu’un équilibrage avec contrepoids.

Une grande variété de ressorts et de mécanismes peuvent être utilisés afin d’obtenir une compensation statique adéquate. L’utilisation de ressorts en tension ou en compression est la méthode la plus fréquemment utilisée, mais l’utilisation de ressorts en torsion ou de ressorts à grande raideur est également envisageable. Divers manipulateurs équilibrés avec des ressorts en tension sont présentés dans Streit et Shin (1993), Simionescu et Ciupitu (2000) et Streit et Gilmore (1989). De plus, un manipulateur équilibré avec des ressorts en torsion est développé dans Gopalswamy et collab. (1992). Enfin, une étude approfondie de l’équilibrage statique avec des ressorts est présentée dans Herder (2001).

Le modèle de base d’un équilibrage statique avec des ressorts linéaires en tension ou compression est présenté à la Figure 0.4. Les conditions d’équilibre statique d’une telle configuration sont facilement développées. Utilisant le principe selon lequel l’énergie potentielle du mécanisme doit rester constante pour que celui-ci soit en équilibre, les propriétés du ressort à utiliser peuvent être déterminées. D’abord, l’énergie potentielle d’un ressort ( $V_{ressort}$ ) est donnée par :

$$V_{ressort} = \frac{1}{2}k\Delta x^2 \quad (1)$$

où  $\Delta x$  représente l’élongation du ressort et  $k$ , sa raideur. À la Figure 0.4, si on fait l’hypothèse que la longueur libre du ressorts est nulle (ce qui est possible en utilisant un câble et un pivot), l’élongation est définie par :

$$\Delta x = \sqrt{a^2 + r_1^2 - 2ar_1 \cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right)}. \quad (2)$$

Ensuite, l’énergie potentielle liée à l’élévation de la masse est définie par :

$$V_{masse} = mgr_2 \sin \theta. \quad (3)$$

Pour que la membrure soit en équilibre statique, son énergie potentielle doit être constante peu importe la valeur de l'angle  $\theta$ . Cette condition est définie par :

$$V_{const} = V_{ressort} + V_{masse} \quad (4)$$

$$V_{const} = \frac{1}{2}k(a^2 + r_1^2) - kar_1 \cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right) + mgr_2 \sin \theta \quad (5)$$

$$= \frac{1}{2}k(a^2 + r_1^2) + (mgr_2 - kar_1) \sin \theta \quad (6)$$

Lorsque l'énergie potentielle est dérivée par rapport à  $\theta$ , on obtient une équation caractérisant les paramètres du ressort nécessaire pour équilibrer parfaitement la charge :

$$r_1ka = mgr_2. \quad (7)$$

En d'autres termes, si on choisit la raideur telle que

$$k = \frac{mgr_2}{ar_1}. \quad (8)$$

et que la longueur libre du ressort effectif est nulle, on obtient un équilibrage parfait pour toute valeur de  $\theta$ .

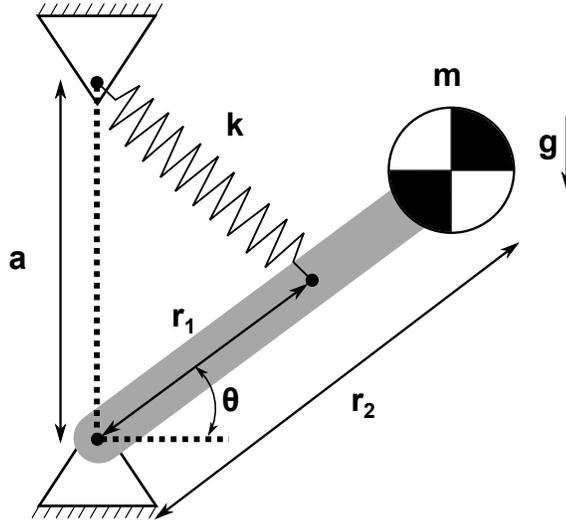


FIGURE 0.4 – Schéma d'une membrure équilibrée avec un ressort en tension.

S'il n'y a pas d'interférence entre le ressort et la membrure présentée à la Figure 0.4, les conditions d'équilibre sont valides pour des rotations illimitées. Par contre, en pratique, cette condition est difficile à respecter. En effet, l'utilisation de ressorts pour atteindre l'équilibre statique pose souvent plusieurs contraintes qui limitent la plage angulaire du mécanisme. De plus, ces conditions d'équilibre sont valides seulement pour la première articulation. Afin d'équilibrer les articulations subséquentes, les ressorts doivent être fixés sur un repère dont l'orientation ne

change pas par rapport à la gravité. Des mécanismes auxiliaires, comme des parallélogrammes, sont requis pour équilibrer plusieurs articulations en série. Un schéma de ce type de mécanisme est présenté à la Figure 0.5. Cet ajout vient complexifier le manipulateur et peut être très encombrant.

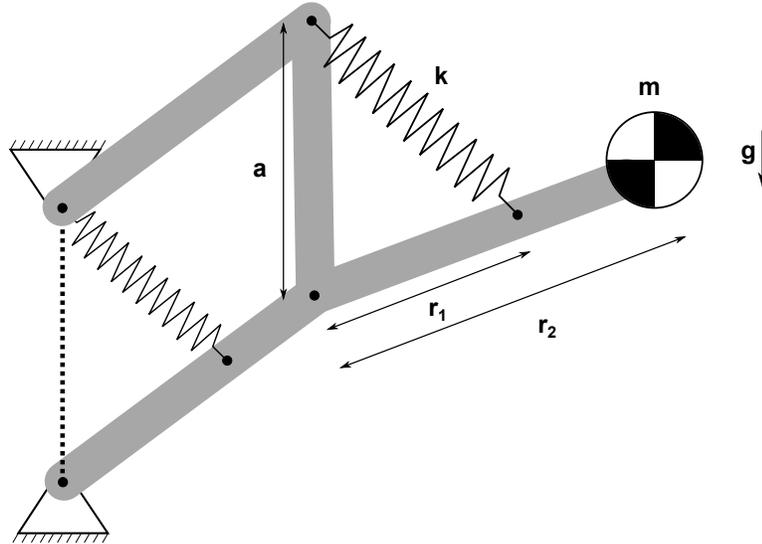


FIGURE 0.5 – Schéma d'un mécanisme à deux degrés de liberté équilibré avec des ressorts en tension.

## Problème à l'étude et objectifs

Les techniques d'équilibrage standards présentées précédemment sont efficaces pour équilibrer une faible charge. Par contre, lorsque la charge gravitationnelle est élevée, de nombreux problèmes font surface. Effectivement, dans cette situation, les contrepoids ajoutent beaucoup de masse et d'inertie, tandis que les ressorts nécessaires sont très volumineux et restrictifs.

De plus, les techniques standards nécessitent une intégration intrinsèque au manipulateur pour être efficaces. Bien qu'il soit théoriquement possible de les intégrer à un manipulateur déjà construit, la structure ajoutée serait beaucoup trop limitative. Ces mécanismes s'apparentent aux exosquelettes utilisés en réadaptation. Des exemples de mécanismes externes servant à équilibrer des bras ou des jambes humaines sont présentés dans Moubarak et collab. (2010) et dans Banala et collab. (2006).

Le Laboratoire de robotique de l'Université Laval, en partenariat avec l'Institut de recherche d'Hydro-Québec (IREQ), souhaite développer une méthode d'équilibrage statique permettant de solutionner les problèmes associés à l'utilisation de techniques d'équilibrage standards, présentées précédemment. Plus précisément, la solution développée vise un équilibrage efficace

et compact de charge gravitationnelle élevée. De plus, dans le but de favoriser son utilisation, cette solution doit pouvoir être intégrée facilement à une articulation. De cette façon, l'équilibrage de robots déjà construits pourra être effectué.

Pour répondre à cette problématique, un nouveau type d'équilibrage a été développé. L'objectif du projet est de développer une technique d'équilibrage statique simple, pouvant être rétrofitée sur un manipulateur existant et permettant la compensation d'un important couple gravitationnel. Cette technique utilise l'interaction entre des aimants pour produire le couple requis. Le mécanisme résultant est compact et peut être intégré axialement au moteur de l'articulation. Cette caractéristique réduit grandement la complexité de l'intégration au robot puisque très peu de pièces sont nécessaires pour y raccorder l'équilibreur. De plus, la nature du couple produit peut fournir un équilibrage théorique parfait sur  $360^\circ$ , permettant ainsi des rotations illimitées. La stratégie d'équilibrage développée peut également être étendue à divers types d'applications. Le développement de cette technique est détaillé dans ce mémoire.

Afin de tester le concept développé, un prototype est intégré à un manipulateur construit par l'IREQ. Le développement de ce manipulateur est détaillé dans [Allan et collab. \(2008\)](#). Le but de ce robot est d'effectuer des opérations sur les panneaux de contrôle des lignes de distribution d'énergie souterraines du Québec, évitant ainsi d'exposer un travailleur aux dangers potentiels de ces lignes à haute tension. Le prototype est intégré sur le deuxième axe du robot. Puisque cet axe est le premier affecté par la gravité, il perçoit un couple très élevé et contient le moteur le plus puissant du robot. L'équilibrage de ce dernier est donc particulièrement avantageux. Une image du manipulateur, qui expose les axes des membrures, est introduite à la Figure 0.6. Lorsque celui-ci est complètement déplié dans une position horizontale, le couple perçu à la seconde articulation est d'environ 280Nm.

## Organisation du mémoire

Le mémoire est structuré de la façon suivante. Dans le premier chapitre, la production d'un couple d'équilibrage avec des aimants est étudiée. Pour commencer, afin de mieux comprendre les interactions entre les aimants, un résumé de la théorie sur le magnétisme et des propriétés importantes des aimants permanents est introduit. Ensuite, différentes configurations d'aimants sont étudiées dans le but d'obtenir un couple produit semblable au couple généré par une charge gravitationnelle.

Le second chapitre détaille la conception d'un arrangement d'aimants réaliste. Les différents types d'aimants disponibles sur le marché sont introduits et leur forme est analysée dans le but de maximiser le couple produit par la configuration. Par la suite, pour simplifier la fabrication des aimants, des méthodes de discrétisation sont présentées. Finalement, la problématique de démagnétisation dans les aimants permanents est discutée.

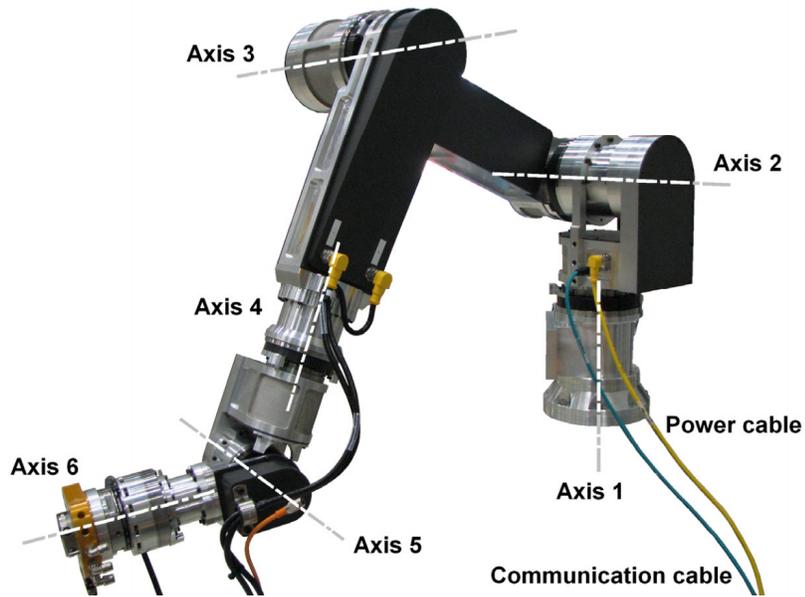


FIGURE 0.6 – Manipulateur utilisé pour tester l’intégration du prototype développé (tiré de Allan et collab. (2008)).

Le dernier chapitre traite de la conception du prototype. En premier lieu, deux itérations sont construites dans le but de valider le concept et de tester différentes hypothèses. Les informations pertinentes, tirées de l’analyse de ces itérations, ont permis d’acquérir des connaissances essentielles, utilisées lors de la conception du prototype final. Ce prototype est finalement intégré sur le robot de l’IREQ.

## Chapitre 1

# Étude des interactions entre les aimants

Dans ce chapitre, l'utilisation d'aimants permanents pour produire un couple d'équilibrage est étudiée. Avant de discuter des configurations possibles, une description sommaire des aimants permanents et de leurs propriétés importantes est présentée. Ces informations sont utilisées pour mieux comprendre les interactions et pour effectuer le bon choix d'aimants pour l'application visée. Ensuite, trois types d'interactions entre des aimants sont étudiés afin d'obtenir un couple qui correspond à une charge gravitationnelle. Pour chaque type de configurations, la force produite est caractérisée et la viabilité du concept est évaluée. La configuration d'aimants sélectionnée est développée en profondeur dans le prochain chapitre.

## 1.1 Généralités

Un aimant permanent produit intrinsèquement un champ magnétique autour de sa surface. Autour de ce dernier, ce champ magnétique circule de son pôle nord vers son pôle sud et est caractérisé dans l'espace par une orientation ainsi qu'une intensité ou amplitude. Une représentation typique du champ magnétique autour d'un aimant permanent est présentée à la Figure 1.1. Lorsque les champs magnétiques produits par deux aimants différents interagissent, des forces d'attraction ou de répulsion sont générées. Ces forces sont étudiées dans ce chapitre afin d'obtenir le couple nécessaire pour équilibrer parfaitement une charge gravitationnelle.

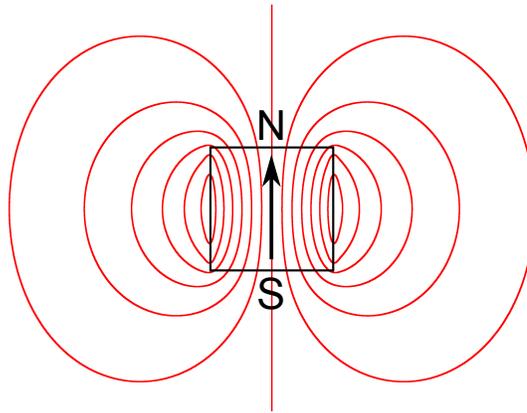


FIGURE 1.1 – Champ magnétique autour d'un aimant, généré par une magnétisation unidirectionnelle (flèche).

Les interactions entre les aimants peuvent être caractérisées de façon analytique pour des cas relativement simples. Par exemple, les forces entre des aimants cylindriques sont calculées analytiquement dans [Agashe et Arnold \(2008\)](#). Par contre, ces méthodes sont complexes à mettre en œuvre et sont généralement très spécifiques. Afin de pouvoir caractériser des cas diversifiés et complexes, une méthode d'analyse par éléments finis est adoptée. Dans le cadre de ce mémoire, le logiciel de simulation COMSOL Multiphysics est utilisé pour modéliser le comportement des aimants. Les différents résultats de simulation obtenus sont ensuite comparés entre eux. Ces résultats seront validés dans le troisième chapitre du mémoire.

## 1.2 Introduction à la théorie des aimants permanents

Avant de présenter les différentes configurations d'aimants étudiées, la théorie de base sur les aimants permanents est introduite afin de mieux comprendre les interactions entre les aimants et l'effet des différentes propriétés sur la force générée. Ces forces résultent de l'interaction entre des champs magnétiques. Ces derniers sont produits par l'alignement de dipôles magnétiques dans une certaine direction, à l'intérieur d'un matériel magnétique, ce qui résulte en un aimant.

Les aimants peuvent être divisés en deux grandes classes, soit les électroaimants et les aimants

permanents. Les électroaimants sont constitués de matériau ferromagnétique doux. Dans ce type de matière, les dipôles magnétiques ont tendance à s'aligner facilement dans la direction d'un champ magnétique extérieur. Pour aligner les dipôles du cœur ferromagnétique, un courant électrique est appliqué dans un bobinage enroulé autour de ce cœur. La direction de l'alignement sera dans l'axe du bobinage et représentera les pôles de l'aimant. Étant donné qu'un courant électrique est nécessaire, un électroaimant ne peut pas fonctionner seul. En cessant l'alimentation en courant, les dipôles retrouvent leur orientation initiale, cessant ainsi la production du champ magnétique.

À l'inverse, un aimant permanent est constitué de matériau ferromagnétique dur. Pour aligner les dipôles de ce type de matériau dans une direction particulière, un très fort champ magnétique doit être appliqué dans cette direction. Une fois le champ magnétique retiré, les dipôles conserveront leur alignement et produiront un champ magnétique de façon permanente.

Bien que les deux familles d'aimants soient viables pour générer un couple d'équilibrage statique, les électroaimants ne seront pas étudiés dans ce mémoire. Comparativement aux aimants permanents, ils sont trop restrictifs pour justifier leur utilisation. De plus, pour une même intensité de champ magnétique produit, les aimants permanents sont beaucoup plus compacts.

Les détails concernant la physique du magnétisme, le processus de magnétisation et les différents matériaux magnétiques ne seront pas abordés dans ce mémoire, mais plus d'informations peuvent être trouvées dans Jiles (1998).

### 1.2.1 Propriétés importantes

Les variables et constantes importantes à considérer lors de l'utilisation d'aimants permanents sont décrites dans cette section. Plusieurs sections du mémoire feront référence à ces propriétés. Elle seront d'ailleurs utilisées lors de la sélection du type d'aimant pour la construction des prototypes.

#### Champ magnétique

Un champ magnétique est défini en tout point d'un espace par une amplitude, une direction et un sens. Autour d'un aimant permanent, celui-ci se dirige du pôle nord vers le pôle sud. L'intensité de ce champ magnétique est noté  $\vec{H}$ , sa norme  $H$  et ses unités sont en ampère par mètre ( $A/m$ ).

En pratique, la densité du flux magnétique est plutôt utilisée pour caractériser un champ magnétique. Aussi appelée induction magnétique elle est notée  $\vec{B}$ , son module est noté  $B$  et son unité est le Tesla ( $T$ ). L'induction magnétique est étroitement liée à l'intensité du champ magnétique par la perméabilité magnétique  $\mu$ . Pour les matériaux linéaires, cette interdépendance

est traduite par la relation suivante :

$$\vec{B} = \mu \vec{H}$$

La différence entre ces deux représentations du champ magnétique est illustrée à la Figure 1.2.

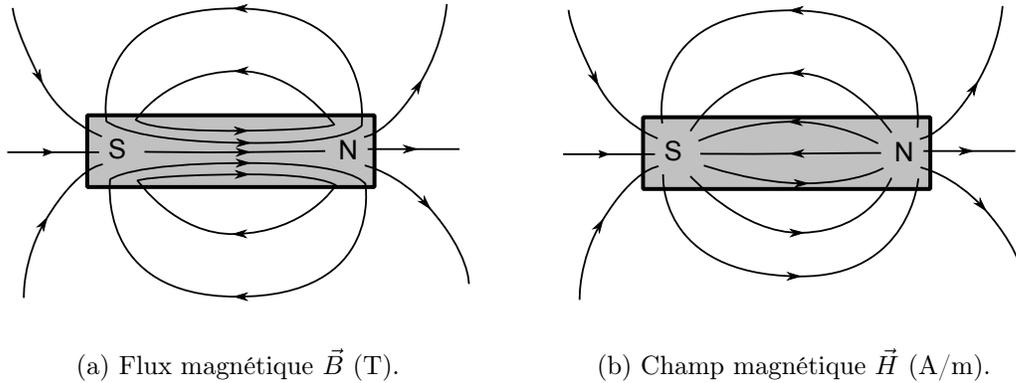


FIGURE 1.2 – Comparaison entre l’induction magnétique  $\vec{B}$  et l’intensité du champ magnétique  $\vec{H}$ .

### Perméabilité magnétique

Dans le domaine du magnétisme, la perméabilité d’un matériau est une mesure de sa capacité à soutenir la formation d’un champ magnétique. La perméabilité  $\mu$  est définie par la relation entre  $\vec{B}$  et  $\vec{H}$  et les unités qui y sont associées sont le Henry par mètre ( $H/m$ ). En pratique, la perméabilité relative du matériau,  $\mu_r$ , est plus souvent utilisée. Elle est définie comme étant le rapport entre la perméabilité du matériel et la perméabilité du vide :  $\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$ , où  $\mu_0 = 4\pi e10^{-7} H/m$ . Plus la perméabilité relative d’une matière est élevée, plus cette matière aura tendance à conduire les champs magnétiques. Par exemple, pour le fer,  $\mu_r \approx 5000$  tandis que pour l’aluminium,  $\mu_r \approx 1$ .

### Magnétisation

Initialement, le matériel ferromagnétique utilisé pour produire l’aimant permanent ne possède aucune aimantation. Pour le magnétiser, un champ magnétique externe lui est imposé. Lorsque ce champ magnétique est retiré, l’aimant conserve alors une magnétisation  $\vec{M}$  qui lui est propre. Cette magnétisation varie en fonction du champ magnétique extérieur appliqué sur l’aimant, selon une relation décrite par les courbes d’hystérésis propres au type et au grade de l’aimant utilisé. Cette notion sera discutée plus en profondeur dans le prochain chapitre. L’unité de la magnétisation est le Tesla ( $T$ ).

## Induction rémanente

Lorsque qu'aucun champ magnétique extérieur n'est appliqué sur l'aimant, ce dernier aura une magnétisation (induction) maximale appelée induction ou magnétisation rémanente, qui est dénotée  $B_r$ . Cette propriété est fournie par le manufacturier de l'aimant et donne une bonne indication sur l'intensité du champ magnétique produit. L'unité de la magnétisation rémanente est le Tesla.

## Température de Curie

Dénotée  $T_c$ , la température de Curie est la température à laquelle un aimant permanent perd sa magnétisation. Par contre, si l'aimant est magnétisé de nouveau, il peut récupérer sa magnétisation initiale. Les performances d'un aimant diminuent avec l'augmentation de la température. Il est important que la température d'opération d'un aimant soit loin de sa température de Curie.

## Champ coercitif

Le champ coercitif,  $H_c$ , est le champ magnétique à appliquer sur un aimant pour annuler complètement sa magnétisation. Si un champ externe supérieur au champ coercitif est appliqué sur un aimant, ce dernier subira des dommages permanents au niveau de sa magnétisation. Le champ coercitif est une représentation de la résistance d'un aimant à la démagnétisation.

## 1.3 Équilibrage statique de référence

Dans le but de quantifier les performances d'un équilibrage magnétique, les configurations d'aimants présentées seront comparées à un équilibrage avec des ressorts conventionnels en tension. En comparant les ressorts avec les aimants nécessaires pour équilibrer une charge donnée, la viabilité du concept sera évaluée. Cette méthode ne tient pas compte de la masse et du volume des éléments auxiliaires nécessaires pour l'intégration des ressorts ou des aimants. De plus, cette comparaison est approximative, puisque différentes hypothèses ont dû être posées pour pouvoir la réaliser. D'abord, les résultats de simulations sont considérés comme étant exacts. Ensuite, la fatigue n'est pas prise en compte lors de la sélection des ressorts.

La charge gravitationnelle de référence à équilibrer est fixée arbitrairement à  $m = 5kg$  au bout d'un bras de levier de  $r_2 = 1m$ , ce qui produit un couple maximal de  $49Nm$ . Les configurations d'aimants et les ressorts seront conçues dans le but d'équilibrer cette masse.

L'équilibrage avec ressorts est basé sur le schéma de la Figure 0.4. En premier lieu, les points d'attache du ressort sont déterminés. Ces distances permettent de calculer la raideur du ressort avec l'équation 8, présentée dans l'introduction. Utilisant  $a = r_1 = 0.1m$ , la raideur nécessaire est donc égale à :

$$k = \frac{r_2 mg}{r_1 a},$$

$$k = 4.9 N/mm$$

Ensuite, un ressort correspondant à l'allongement maximal désiré est sélectionné parmi les catalogues de manufacturiers. Cette élongation maximale correspond à la situation où le bras est à la verticale vers le bas et est donnée par :

$$d_l = a + r_1,$$

$$d_l = 0.2m$$

Le ressort présenté à la Figure 1.3 est sélectionné. Pour obtenir la bonne raideur, plusieurs ressorts sont ajoutés en parallèle. En utilisant six ressorts, la raideur de l'ensemble est de  $5.05 N/mm$  et l'élongation maximale admissible est de  $213 mm$ . Les propriétés du mécanisme de référence équilibré avec des ressorts sont résumées dans le Tableau 1.1.

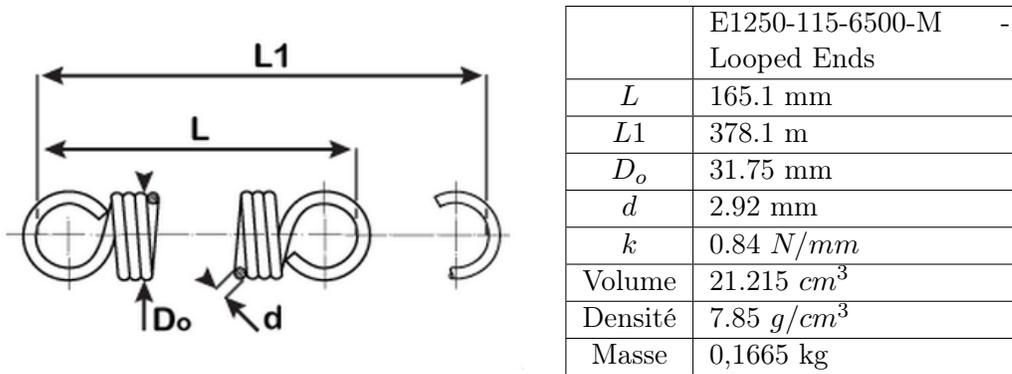


FIGURE 1.3 – Propriétés du ressort sélectionné pour l'équilibrage de référence (tiré de Associated Spring Raymond (2015)).

## 1.4 Attraction ou répulsion linéaire

Le premier type d'interaction magnétique étudié est l'attraction ou la répulsion linéaire entre deux aimants ou deux groupes d'aimants. La force résultante pourrait ensuite être transformée en couple par l'intermédiaire de mécanismes auxiliaires. Ce type d'interaction est probablement le plus simple à imaginer. Il est illustré avec des aimants simples à la Figure 1.4.

### 1.4.1 Caractérisation de la force produite

Afin de caractériser le comportement des aimants en attraction ou en répulsion, deux aimants cylindrique on été utilisés. La force simulée en fonction de la distance entre les aimants peut

TABLE 1.1 – Paramètres du mécanisme de référence équilibré avec des ressorts.

$m$	1 kg
$a$	0.1 m
$r_1$	0.1 m
$r_2$	1 m
$k$	5.04 N/mm
$d_l$	0.2 m
$g$	9.81 $m/s^2$
Quantité	6
Masse totale	1kg

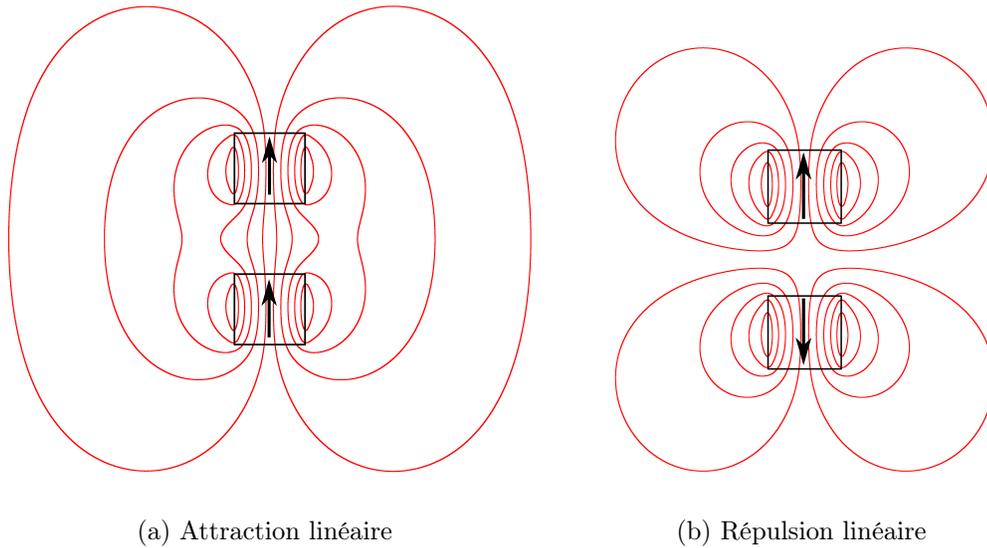


FIGURE 1.4 – Répartition du champ magnétique autour d'aimants en attraction et en répulsion.

être visualisée à la Figure 1.5. Les caractéristiques des aimants utilisés dans ces simulations sont présentées dans le Tableau 1.2. Pour fins de comparaison, les forces résultantes de l'attraction et de la répulsion ont été superposées en inversant le signe de la force de répulsion. On remarque qu'il y a peu de différence entre le module de la force en attraction et celui de la force en répulsion. Les deux méthodes pourraient donc être considérées. De plus, la force produite décroît de façon exponentielle avec la distance entre les aimants. La force générée lorsque les aimants sont proches peut être très grande comparativement à la dimension des aimants.

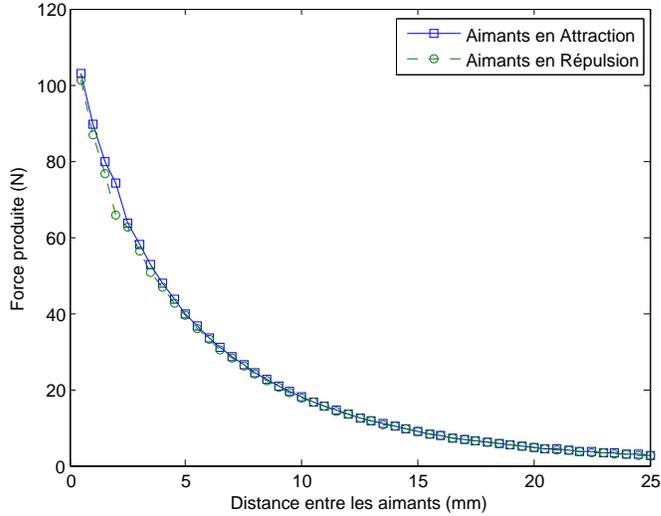


FIGURE 1.5 – Force produite par les aimants cylindriques de la table 1.2 en attraction et en répulsion.

TABLE 1.2 – Paramètres des aimants utilisés pour caractériser l’attraction et la répulsion.

Hauteur	10 mm
Diamètre	20 mm
$\mu_r$	1.05
$B_r$	1.3 T

#### 1.4.2 Viabilité d’un concept en attraction ou répulsion

Les interactions linéaires ont l’avantage d’utiliser des aimants simples et standards pour produire des forces importantes. Par contre, plusieurs inconvénients majeurs rendent l’utilisation de cette configuration d’aimants pratiquement impossible dans un contexte d’équilibrage.

Premièrement, étant donné la décroissance exponentielle de la force produite, les déplacements admissibles de la configuration seraient très faibles comparativement au mouvement de l’articulation à équilibrer. Une transmission pourrait être intégrée au mécanisme pour réduire le déplacement des aimants, par contre, l’ajout d’un tel mécanisme viendrait augmenter la complexité, la masse et l’encombrement de l’équilibrateur. Ensuite, contrairement aux ressorts, la force résultante n’est pas une fonction linéaire du déplacement. Le caractère exponentiel de la force nécessiterait un couplage non linéaire complexe afin de pouvoir équilibrer une charge adéquatement. Pour ces raisons, la configuration en attraction et répulsion linéaire ne sera pas développée davantage dans ce mémoire.

## 1.5 Rotation coaxiale

Dans le concept d'attraction ou de répulsion linéaire, les forces produites deviennent rapidement négligeables avec l'augmentation de la distance entre les aimants. Afin de conserver les aimants près les uns des autres, un mouvement de rotation peut être utilisé. La prochaine technique présentée se base sur ce type de mouvement pour équilibrer une charge.

La configuration d'aimants consiste en deux disques juxtaposés de façon coaxiale, magnétisés diamétralement. Dans leur position neutre, les deux aimants sont alignés dans une position où ils s'attirent. Ensuite, un couple est requis pour effectuer la rotation d'un aimant par rapport à l'autre. Durant cette manœuvre, les deux aimants restent le plus proche possible pour maximiser la densité du champ magnétique, mais un espace est quand même maintenu entre eux. Cette configuration et ses paramètres géométriques sont introduits à la Figure 1.6.

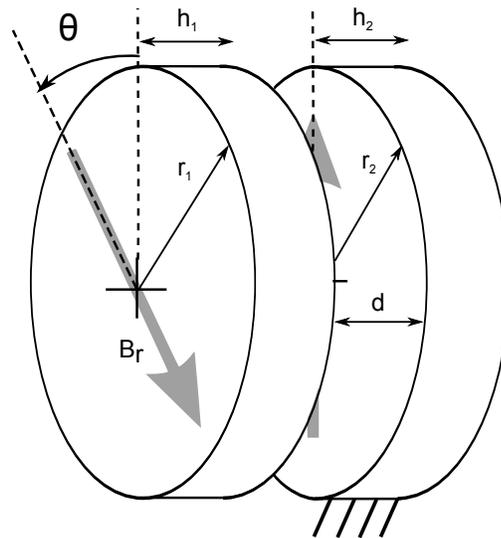


FIGURE 1.6 – Équilibre statique par rotation coaxiale d'aimants en forme de disque.

### 1.5.1 Caractérisation du couple produit

Le couple généré par la rotation des aimants de la Figure 1.6 a été simulé avec les paramètres décrits dans le Tableau 1.3. Ces paramètres géométriques ont été ajustés par essais et erreurs afin d'obtenir un couple maximal de 49Nm et de pouvoir comparer le concept à l'équilibrage avec ressorts développé précédemment.

Les résultats des simulations pour une rotation de 0° à 360° sont présentés à la Figure 1.7. Ces simulations montrent clairement que le couple produit par une telle configuration varie de façon sinusoïdale. Cette caractéristique peut être expliquée par la nature bipolaire des aimants.

TABLE 1.3 – Paramètres des aimants du concept d'équilibrage par rotation coaxiale.

$h_1$	25 mm
$h_2$	25 mm
$r_1$	60 mm
$r_2$	60 mm
$d$	2 mm
$\mu_r$	1.05
$B_r$	1.3 T
Volume	565.5 $cm^3$
Densité	7.4 $g/cm^3$
Masse	4.18 kg

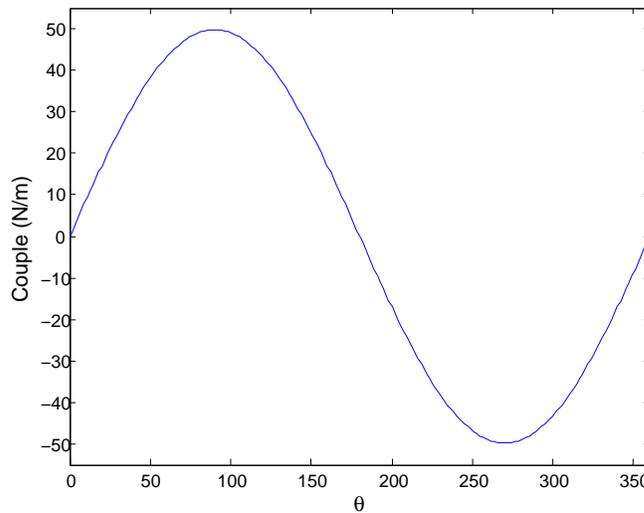


FIGURE 1.7 – Couple produit par le concept d'équilibrage par rotation coaxiale.

Effectivement, en utilisant des disques avec plus de deux pôles, la fréquence spatiale du couple augmenterait.

### 1.5.2 Viabilité d'un concept en rotation coaxiale

Les caractéristiques du couple produit par ce type de configuration correspondent parfaitement à celles d'un couple produit par la gravité (si une configuration à une paire de pôles est utilisée). Cette propriété est particulièrement intéressante, car elle permet de réduire grandement la complexité de l'intégration à une articulation. Effectivement, puisque qu'un couple est produit intrinsèquement par les aimants, aucun mécanisme auxiliaire n'est nécessaire. De plus, ce type de concept peut être intégré de façon axiale au moteur de l'articulation, réduisant davantage la complexité ainsi que les interférences possibles.

Une comparaison géométrique des aimants et des ressorts requis pour équilibrer la membrure

de référence est présentée à la Figure 1.8. Celle-ci montre que les aimants sont théoriquement plus compacts que les ressorts pour le même couple équilibré. Par contre, la masse des aimants est beaucoup plus grande que celle des ressorts. Cette comparaison ne tient pas compte des problématiques de conception. En effet, l'utilisation de ressorts implique un concept d'équilibrateur plus complexe nécessitant des pièces plus volumineuses pour l'intégration.

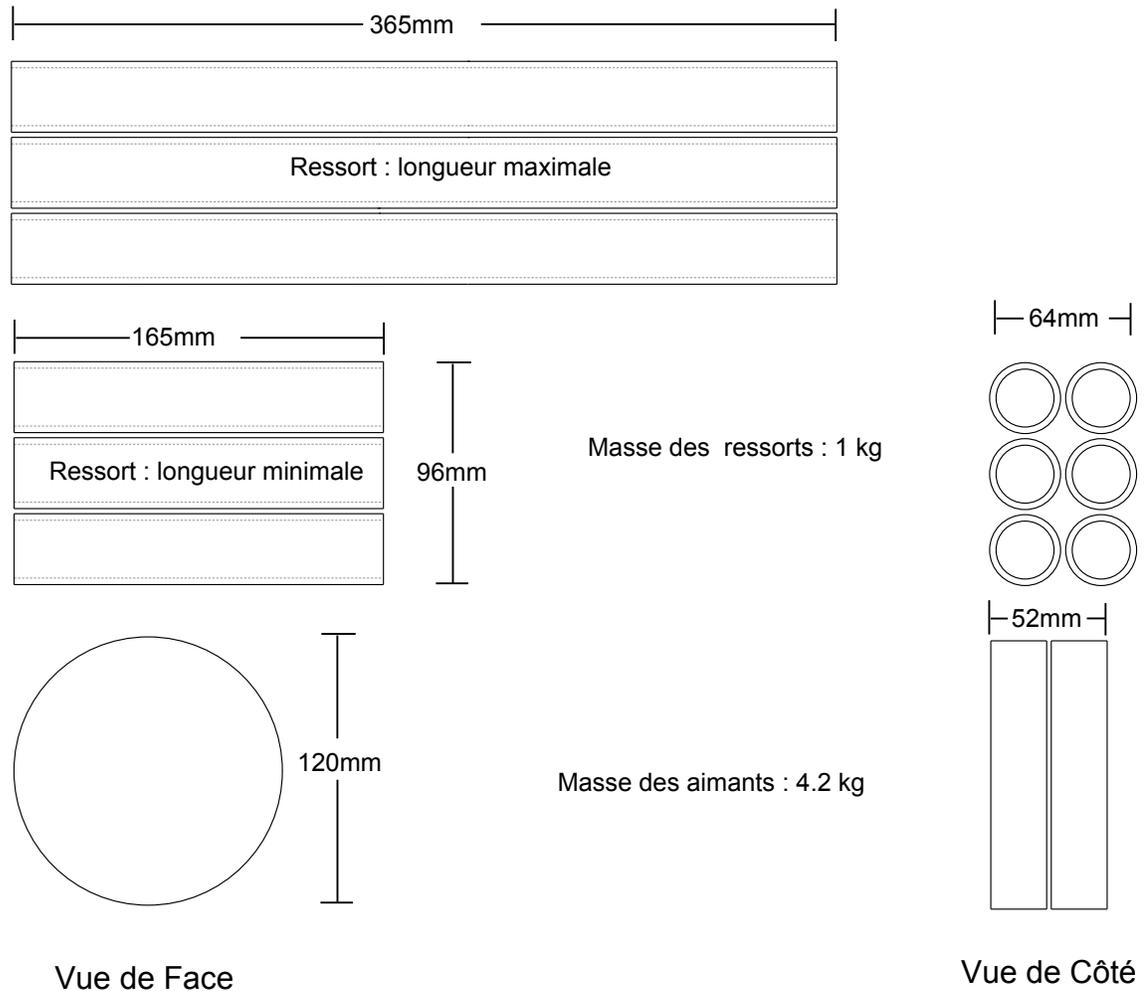


FIGURE 1.8 – Comparaison entre les ressorts et les aimants en rotation coaxiale requis pour équilibrer la charge de référence.

## 1.6 Agencement d'Halbach

Dans le concept de rotation coaxiale, le champ magnétique produit par les aimants est symétrique et une seule face des disques est effective. De cette façon, une partie importante du champ magnétique est non utilisé, puisqu'elle n'est pas dirigée vers l'interface entre les aimants. Afin de maximiser le couple produit pour un volume d'aimant donné, le champ magnétique peut être concentré d'un seul côté, ce qui augmente la densité du champ magnétique.

Cette caractéristique peut être obtenue en utilisant un arrangement d'aimants particulier, appelé arrangement d'Halbach. Cette propriété a été découverte par Mallinson (1973) et tient son nom des travaux effectués par Halbach (1981). Une revue de plusieurs applications industrielles utilisant des aimants en configuration d'Halbach est présentée dans Zhu et Howe (2001). L'utilisation de ce groupe d'aimants dans le but de produire un couple d'équilibrage est étudiée dans cette section. Un cas linéaire est d'abord présenté, pour ensuite converger vers un concept d'équilibrateur.

### 1.6.1 Arrangement d'Halbach linéaire

Un arrangement d'Halbach est obtenu lorsque la magnétisation à l'intérieur de l'aimant respecte une orientation particulière. De cette façon, le champ magnétique peut être concentré d'un côté de l'aimant, tandis qu'il est minimisé de l'autre. Dans le cas idéal, l'orientation de la magnétisation est continue à l'intérieur de l'aimant. Le champ magnétique est ainsi parfaitement redirigé d'un seul côté. La Figure 1.9 illustre ce phénomène dans un aimant linéaire. La magnétisation est représentée par les flèches, tandis que les lignes représentent les isocontours du champ magnétique. En pratique, une magnétisation continue comme celle de la Figure 1.9 peut être difficile à obtenir. L'arrangement peut être grandement simplifié en utilisant plusieurs aimants pour concentrer le champ magnétique. De cette façon, des aimants standards peuvent être utilisés, réduisant le coût associé à l'arrangement. Le champ magnétique résultant n'est pas parfaitement concentré d'un seul côté, mais la densité du champ magnétique est presque optimale. La Figure 1.10 montre l'arrangement d'Halbach approximé avec des aimants cubiques. La discrétisation des aimants sera discutée en profondeur dans le second chapitre.

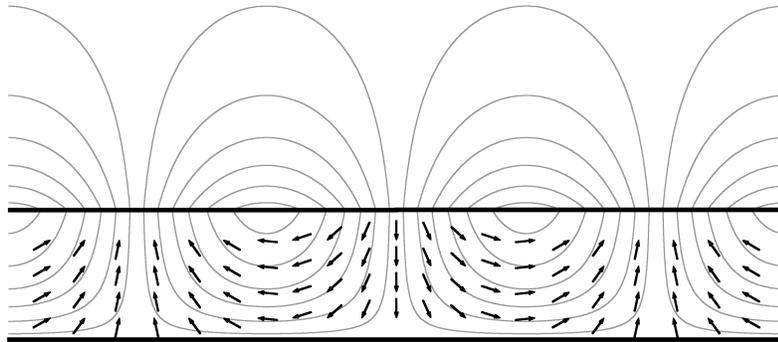


FIGURE 1.9 – Arrangement d'Halbach linéaire avec magnétisation continue.

### 1.6.2 Arrangement d'Halbach cylindrique

Pour obtenir un mouvement de rotation, l'arrangement d'Halbach linéaire présenté dans la section précédente peut être fermé sur lui-même pour former un cylindre d'Halbach. Selon la direction de l'enroulement, le champ magnétique sera concentré à l'intérieur ou à l'extérieur du

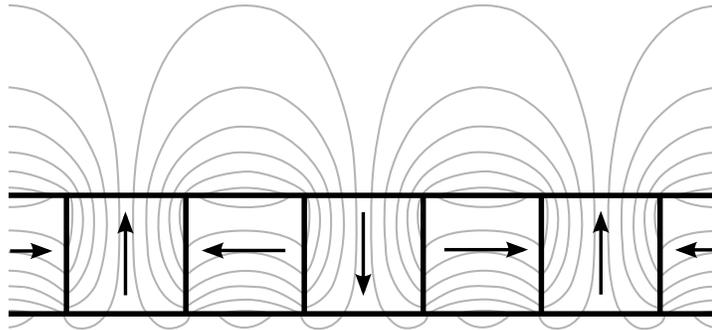


FIGURE 1.10 – Arrangement d’Halbach linéaire avec magnétisation discrétisée.

cylindre. Les cylindres peuvent également avoir différents nombres de paires de pôles (pp). La Figure 1.11 montre des configurations où le champ magnétique est concentré à l’extérieur et à l’intérieur des cylindres, avec une ou deux paires de pôles. Les flèches représentent la direction de la magnétisation rémanente à l’intérieur de l’aimant. Celle-ci suit les relations suivantes :

$$B_{rr} = B_r \cos(k\theta), \quad (1.1)$$

$$B_{r\theta} = B_r \sin(k\theta). \quad (1.2)$$

Dans cette équation,  $B_{rr}$  est la composante radiale de la magnétisation, tandis que  $B_{r\theta}$  est sa composante tangentielle. L’entier  $k$  représente le nombre de paires de pôles du cylindre. Une configuration extérieure aura une constante  $k$  négative et vice versa.

Les cylindres d’Halbach ayant une configuration où le champ magnétique est concentré à l’intérieur et possédant une seule paire de pôles peuvent générer un champ magnétique uniforme dans leur alésage. Cette propriété est largement utilisée dans des domaines comme la résonance magnétique, les accélérateurs de particules et le refroidissement magnétique. L’optimisation de cylindres d’Halbach dans le but d’obtenir la meilleure uniformité du champ magnétique est étudiée dans Bjørk et collab. (2008). De plus, en imbriquant deux cylindres ayant un champ magnétique intérieur, l’intensité du champ magnétique produit dans l’alésage commun peut être modulé avec la rotation relative des cylindres. Cet effet est détaillé dans Ni Mhiochain et collab. (1999), mais ne sera pas utilisé dans le cadre des travaux présentés dans ce mémoire.

Pour produire un couple avec des cylindres d’Halbach, il suffit d’imbriquer un cylindre avec une configuration externe à l’intérieur d’un cylindre avec une configuration interne. De cette façon, les champs magnétiques produits par les cylindres ont tendance à rester alignés, ce qui produit le couple désiré. Un schéma représentant ce concept est présenté à la Figure 1.12.

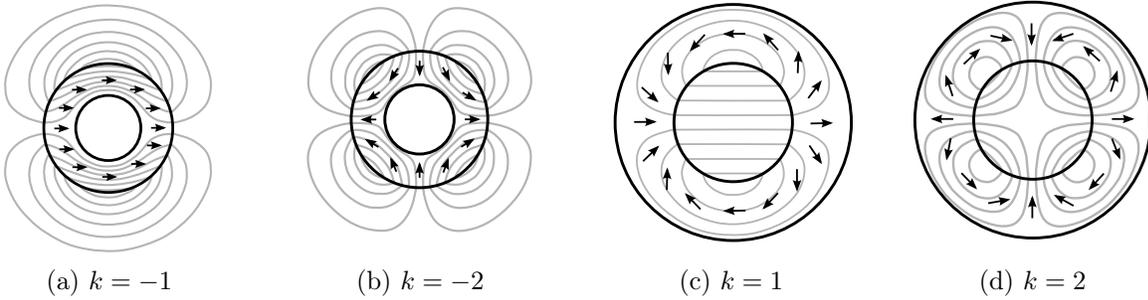


FIGURE 1.11 – Cylindres d’Halbach avec configuration extérieure (a,b) ou intérieure (c,d) et avec une (a,c) ou deux (b,d) paires de pôles.

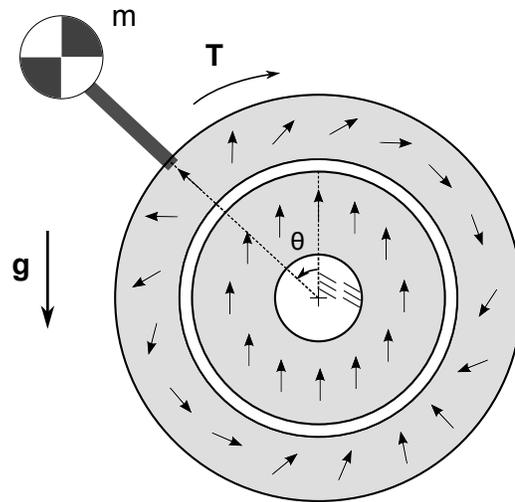


FIGURE 1.12 – Schéma du concept d’équilibrage statique avec des cylindres d’Halbach imbriqués ( $k = 1$  pour le cylindre intérieur tandis que  $k = -1$  pour le cylindre extérieur).

### 1.6.3 Caractéristique du couple

Tout comme la configuration avec des aimants en rotation présentée précédemment, la configuration avec des cylindres d’Halbach produit un couple sinusoïdal. Étant donné que le champ magnétique est concentré dans l’interface entre les aimants, une faible portion du champ magnétique est perdu, augmentant ainsi le couple produit par le concept pour une même quantité d’aimants. Différents nombres de paires de pôles peuvent également être utilisés. Les résultats des simulations du couple produit pour différents nombres de paires de pôles sont présentés à la Figure 1.14. La géométrie utilisée dans les simulations est présentée à la Figure 1.13 et les valeurs des paramètres sont détaillées dans le Tableau 1.4.

On remarque que le couple correspond parfaitement à la gravité lorsque la configuration possède une paire de pôles. En augmentant le nombre de pôles de la configuration, le couple

TABLE 1.4 – Paramètres des aimants du concept d'équilibrage par cylindres d'Halbach imbriqués.

$R_e$	48 mm
$R_i$	30 mm
$r_i$	28 m
$r_e$	10 mm
$L$	50 mm
$\mu_r$	1.05
$B_r$	1.3 T
Volume	327.98 $cm^3$
Densité	7.4 $g/cm^3$
Masse	2.426 kg

est augmenté, mais la plage angulaire utile est diminuée. Pour qu'une configuration avec plusieurs paires de pôles produise un couple correspondant à celui de la gravité, une transmission doit être intégrée entre le mécanisme équilibrateur et la membrure à équilibrer. La Figure 1.15 montre le couple en fonction de l'angle entre les cylindres, reporté sur  $180^\circ$ . Les résultats montrent qu'une configuration à deux paires de pôles produit le couple normalisé le plus élevé. Passé ce point, utiliser plus de paires de pôles diminue le couple normalisé produit. Par contre, il est important de noter que l'efficacité du réducteur n'est pas intégrée aux valeurs de couple simulées.

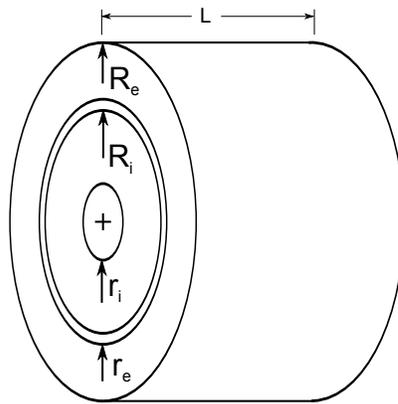


FIGURE 1.13 – Paramètres géométriques des cylindres d'Halbach imbriqués.

#### 1.6.4 Viabilité du concept

Une configuration utilisant des cylindres d'Halbach semble être idéale pour fournir un couple d'équilibrage statique. Le couple produit correspond parfaitement à la gravité et l'agencement d'aimants utilisé permet de minimiser les pertes de champ magnétique, maximisant ainsi le couple produit. De plus, comme démontré dans Choi et Yoo (2008), l'utilisation de l'arrange-

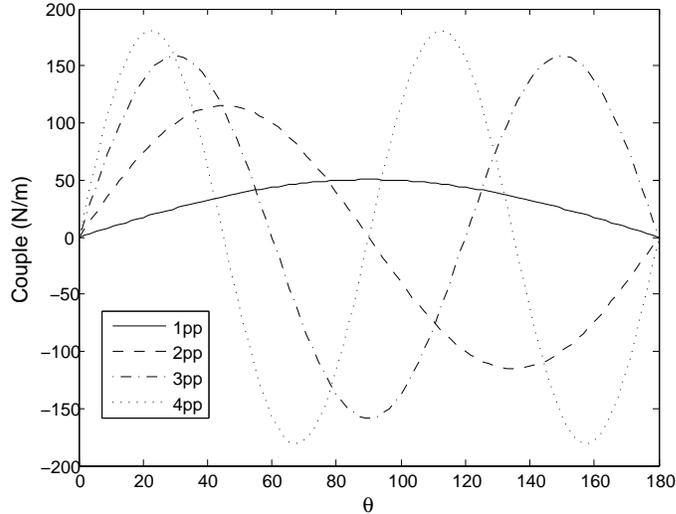


FIGURE 1.14 – Couple produit par le concept des cylindres d’Halbach imbriqués, pour différents nombres de paires de pôles (pp).

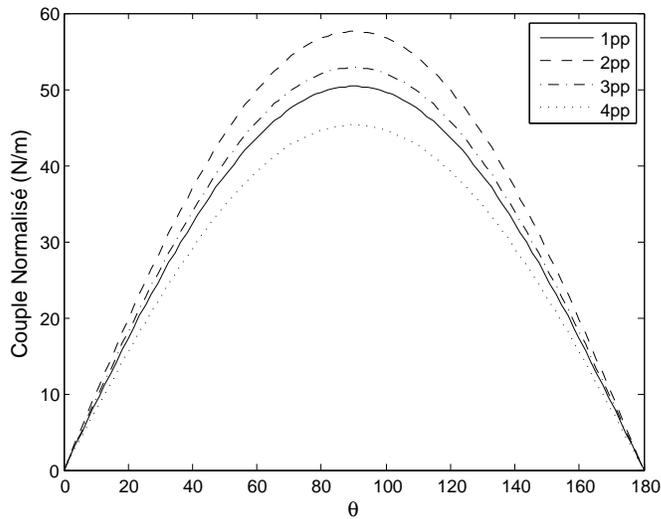


FIGURE 1.15 – Couple produit par le concept des cylindres d’Halbach imbriqués, pour différents nombres de paires de pôles (pp), reporté sur  $180^\circ$ .

ment d’Halbach vient optimiser la force de répulsion et d’attraction entre des aimants. Cette technique convient donc très bien à la problématique d’équilibrage statique étudiée.

La Figure 1.16 compare le volume et la masse des aimants nécessaires pour équilibrer la charge de référence avec le concept des cylindres imbriqués à la masse et le volume des ressorts. Cette comparaison agit comme indicateur arbitraire puisque les aimants utilisés dans chacun des concepts n’ont pas été optimisés.

Les cylindres d’Halbach présentent une nette amélioration comparativement aux disques en rotation coaxiale. Pour le même couple équilibré, ils sont beaucoup plus léger. Malgré le

fait que la comparaison présentée ne permette pas de conclure que le concept des cylindres d'Halbach soit systématiquement la meilleure option, sa simplicité d'intégration ainsi que l'optimisation de la distribution de son champ magnétique font de ce concept l'option avec le plus de potentiel. D'un autre côté, les aimants requis pour le concept des cylindres imbriqués sont plus complexes que ceux du concept en rotation coaxiale. Étant donné l'orientation de magnétisation nécessaire pour concentrer le champ magnétique, une discrétisation des aimants ou une fabrication sur mesure doit être envisagée.

Malgré le coût supplémentaire engendré par l'utilisation des cylindres d'Halbach, la différence de couple produit justifie leur utilisation. Le concept à une paire de pôles sera donc utilisé pour la suite des travaux. Bien qu'une configuration à deux paires de pôles produise un couple théorique plus élevé, la complexité supplémentaire qu'apporte le réducteur vient à priori réduire grandement les bénéfices associés.

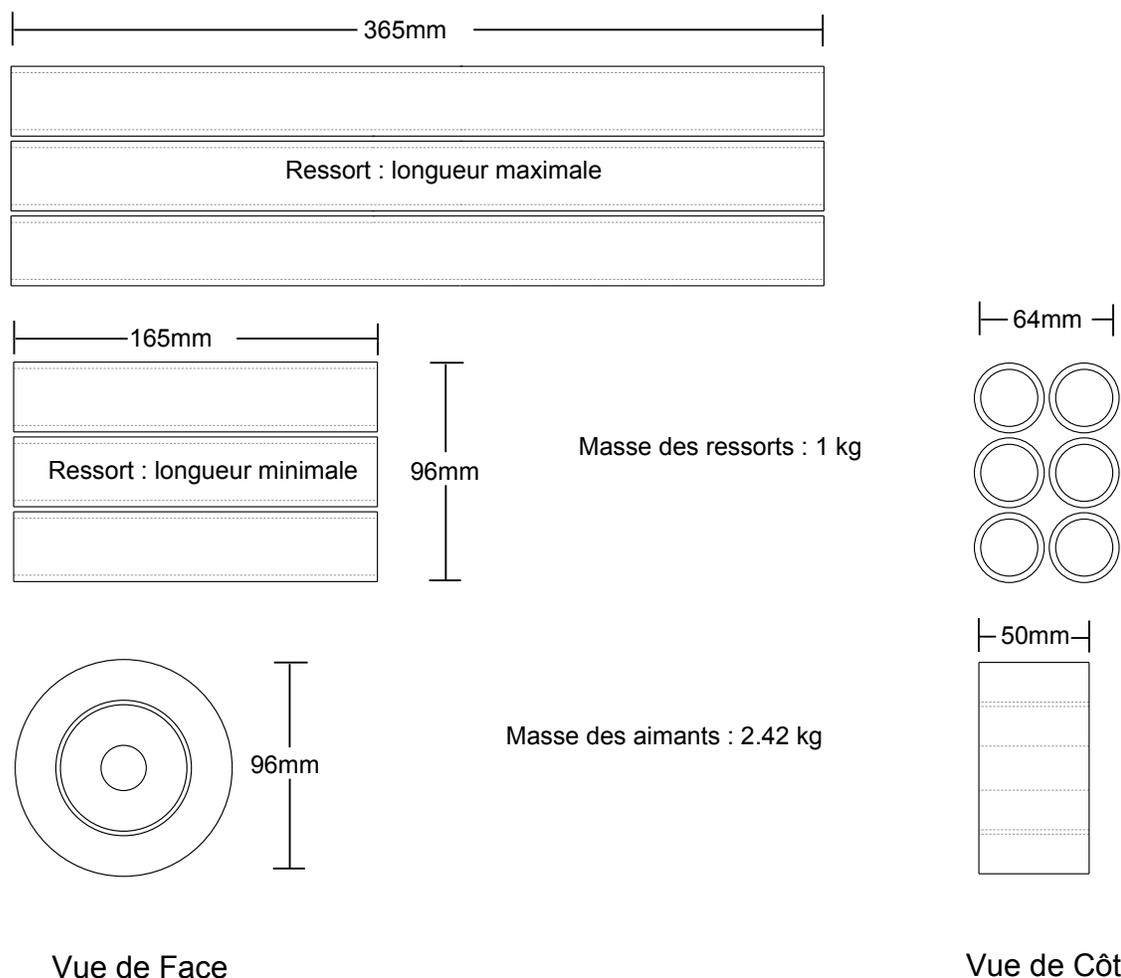


FIGURE 1.16 – Comparaison entre les ressorts et les aimants des cylindres d'Halbach requis pour équilibrer la charge de référence.

## 1.7 Conclusion

Dans ce chapitre, les interactions entre différentes configurations d'aimants ont été étudiées. Le but de cette étude est de trouver la configuration permettant la production d'un couple qui correspond le mieux possible à celui créé par la masse d'une membrure montée sur un pivot. Afin d'évaluer la performance des concepts développés, ces derniers ont été comparés avec un équilibrage par ressorts.

Le premier type de configuration étudié a été l'attraction et la répulsion linéaire entre des aimants. La nature exponentielle de la force produite par ce concept rend l'utilisation de ce dernier très difficile en pratique. Puisque la complexité d'un tel concept dépasse largement les solutions d'équilibrage présentement disponibles, il ne sera pas développé davantage.

Ensuite, des aimants en forme de disque, magnétisés diamétralement ont été utilisés pour produire un couple correspondant parfaitement à la gravité. L'encombrement associé à ce concept est moins grand que celui associé au concept avec ressorts, mais sa masse est beaucoup plus grande.

Finalement, le dernier concept présente la solution retenue pour le développement d'un équilibrage magnétique. Celui-ci utilise deux cylindres d'Halbach imbriqués pour produire un couple sinusoïdal. Lorsque le nombre de paire de pôles de cette configuration est égal à un, le couple produit correspond parfaitement à une charge gravitationnelle. Toutefois, une configuration à deux paires de pôles pourrait être utilisée si son mouvement est réduit par rapport à celui de la membrure équilibrée.

La suite des travaux s'effectuera donc avec des cylindres d'Halbach imbriqués avec une configuration à une paire de pôles afin de simplifier la conception d'un prototype. Ce concept sera développé plus en profondeur dans le prochain chapitre.

## Chapitre 2

# Développement du concept retenu

Dans le chapitre précédent, différents concepts d'équilibrage statique avec des aimants ont été présentés. La solution retenue utilise des cylindres d'Halbach imbriqués pour produire un couple d'équilibrage théorique correspondant parfaitement à une charge gravitationnelle. Dans ce chapitre, le concept d'équilibrage est développé plus en profondeur. Plus précisément, les points importants à considérer lors de la conception de la configuration d'aimants sont étudiés. Les conclusions tirées dans ce chapitre seront utilisées par la suite lors de la conception du prototype.

Pour commencer, le processus de sélection des aimants est présenté. Les différents types d'alliages d'aimants disponibles sur le marché sont décrits afin de choisir l'option la mieux adaptée à l'application visée. Par la suite, les divers paramètres géométriques de la configuration d'aimants sont étudiés pour converger vers une géométrie optimale. Ensuite, étant donné les divers problèmes associés à la magnétisation continue des cylindres d'Halbach, une étude sur la discrétisation des aimants est présentée. Finalement, le problème de la démagnétisation dans les aimants permanents est étudié afin de pouvoir réduire son effet sur le couple produit par la géométrie.

## 2.1 Sélection du type d'aimants

Le marché des aimants permanents offre un vaste éventail de propriétés pour répondre à différents besoins. Dans cette section, les principales familles d'aimants disponibles sont étudiées dans le but de sélectionner le type le plus approprié pour la construction d'un prototype. Chaque famille peut être divisée en plusieurs grades d'aimants, ayant des propriétés variées. Les options possibles pour chaque grade ne seront pas présentées en totalité, une plage de valeur est plutôt donnée pour chaque propriété. Les résultats pour chaque famille d'aimants sont finalement résumés dans le tableau 2.1. Les caractéristiques des familles et les valeurs numériques des propriétés sont tirées de Petrie (1993), Ruoho (2006) et Trout (2001).

### Aimants Ferrite

Les aimants en ferrite sont très répandus sur le marché depuis plusieurs années. Constitués principalement d'oxyde de fer, ils ont l'avantage d'être très peu dispendieux et de pouvoir être facilement produits en grande quantité. Étant donné les multiples années de développement derrière cette famille d'aimants, une très grande variété de produits spécialisés sont disponibles à faible coût. Leur comportement face à un champ magnétique est linéaire dans la plage d'utilisation. Les aimants en ferrite ont également une bonne résistance à la corrosion et peuvent donc être utilisés sans enduit protecteur. Par contre, leur magnétisation rémanente et leur coercivité sont relativement basses, comparativement à celle des autres types d'aimants. Comme leur puissance est généralement faible, ils sont plus souvent utilisés pour des applications où une bonne densité de force n'est pas nécessaire.

### Aimants AlNiCo

Tout comme les aimants en ferrite, les aimants AlNiCo ont une grande variété de produits et de propriétés. Ce type d'aimant a l'avantage d'être très résistant à la température, tout en ayant une bonne magnétisation rémanente. Les processus de fabrication variés permettent des formes complexes et, étant moins durs que les autres aimants, leur usinage peut se faire facilement et à faible coût. Bien qu'ils soient relativement puissants, ils n'ont pas un comportement linéaire dans leur plage d'utilisation. De plus, leur coercivité est très faible. Ces deux conditions font en sorte que l'aimant est vulnérable à la démagnétisation. Leur intégration dans un concept est donc plus difficile.

### Aimants en terre rare - NdFeB

Aussi appelés aimants néodymes, ils sont plus récents que les aimants présentés précédemment. Leur principal avantage réside dans le fait qu'ils possèdent une très grande résistance à la démagnétisation, tout en conservant une grande puissance et une grande magnétisation rémanente. Pour cette raison, ils sont largement utilisés dans le domaine des machines électriques. Leur comportement est linéaire sur une vaste plage de fonctionnement, ce qui simplifie

leur utilisation et la prédiction de leur comportement. Ils sont constitués de matériaux peu dispendieux, mais la complexité du processus de fabrication les rend assez coûteux. Tout comme les aimants en ferrite, ils sont friables et doivent être manipulés avec soin.

Le principal défaut des aimants néodymes réside dans la dégradation rapide de leur magnétisation face à une augmentation de la température. De plus, ils ont une faible résistance à la corrosion. Ils doivent donc être recouverts d'un enduit protecteur.

### Aimants en terre rare - SmCo

Le comportement des aimants samarium-cobalt est très semblable à celui des aimants néodymes. Leur magnétisation rémanente et leur coercivité sont légèrement plus basses, mais ils possèdent une bonne résistance à la température ainsi qu'une bonne résistance à la corrosion. Par contre, ils sont plus dispendieux que les aimants néodymes.

### Aimants liés

Ce type d'aimants n'est pas une famille en soi, mais est plutôt un procédé de fabrication. Ce procédé utilise un polymère pour lier les particules des différents matériaux présentés précédemment. Puisqu'il existe beaucoup de combinaisons de matériaux possibles, les aimants liés sont très diversifiés. Ce procédé permet des formes d'aimants plus complexes, mais les propriétés magnétiques sont généralement plus basses. Les aimants liés sont souvent plus résistants que leur contrepartie standard et peuvent être transformés plus facilement.

TABLE 2.1 – Résumé des propriétés des différentes familles d'aimants

Matériel	$B_r$ (T)	$H_c$ (A/m)	$T_c$ (°C)	coût
Ferrite	0.15-0.43	150-350	450	\$
AlNiCo	0.5-1.35	40-150	700-850	\$\$
NdFeB	1-1.4	900-3200	300	\$\$
SmCo	0.9-1.1	700-2400	500-850	\$\$\$

#### 2.1.1 Choix du type d'aimants

Comme la production du couple d'équilibrage repose sur des interactions d'attraction ou de répulsion entre de nombreux aimants, l'intensité du champ magnétique appliqué sur les aimants sera très élevée. Pour cette raison, il est important que le type d'aimant choisi soit résistant à la démagnétisation. Cette condition exclut donc les aimants de type AlNiCo, qui ont une coercivité très faible comparativement aux autres types. Ensuite, afin de minimiser le poids du mécanisme, le meilleur rapport puissance/poids sera recherché. Les aimants en ferrite sont donc exclus étant donné leur faible magnétisation rémanente. Suite à ces éliminations, les aimants

en terres rares apparaissent comme le choix à privilégier. Afin de choisir entre les aimants néodyme et les aimants SmCo, la température d'opération du mécanisme doit être étudiée. Lorsque les aimants néodyme sont utilisés à température ambiante, ils sont typiquement plus puissants que les aimants SmCo. Par contre, au-delà d'une certaine température, l'aimant au SmCo devient suffisamment puissant comparativement à l'aimant néodyme pour justifier son prix plus élevé.

Dans le cas étudié dans ce mémoire, le prototype sera utilisé à température de la pièce et sera conçu pour fonctionner sous une température maximale de 40 ° C. À cette température, on observe typiquement une légère dégradation dans la magnétisation de l'aimant néodyme, mais l'utilisation du SmCo n'est pas justifiée. Pour conclure, l'aimant néodyme est idéal pour l'application à cause de sa grande résistance à la démagnétisation et de la puissance qu'il peut atteindre. Les conditions normales d'utilisation restent très loin du point de Curie. L'utilisation d'aimants au SmCo, qui sont plus dispendieux, n'est donc pas justifiée. Les grades standards d'aimants néodymes et leurs propriétés sont détaillées à la Figure A.1 de l'annexe.

## 2.2 Étude de la forme des cylindres d'Halbach

Maintenant que le type d'aimant à utiliser pour la construction du prototype est déterminée, la forme des cylindres d'Halbach est étudiée. Le concept de compensation statique présenté est général et peut être intégré dans des applications variées.

La forme de la géométrie d'aimants dépend fortement de l'application visée, elle peut être adaptée pour répondre à différents besoins ou contraintes imposées par le contexte. Dans ce mémoire, l'emphase est mise sur l'équilibrage statique d'un manipulateur sériel. Plus précisément, de la première articulation de ce manipulateur. Comme cette articulation doit déplacer la masse totale du robot, en plus de la charge utile, elle est généralement la plus puissante du manipulateur. L'équilibrage de cet axe est donc particulièrement avantageux.

Dans cette section, la forme des cylindres d'Halbach est étudiée dans le but d'optimiser le couple produit pour un volume d'aimants donné, tout en conservant une géométrie aussi compacte que possible. Étant donné la nature complexe des interactions entre les aimants, un logiciel d'analyse par éléments finis est utilisé pour calculer le couple produit entre deux cylindres d'Halbach. Ce modèle de simulation est introduit avant de présenter l'analyse de la géométrie des aimants.

Dans l'analyse présentée, plus d'importance est accordée à la compacité du mécanisme qu'à la masse totale des aimants, car le poids ajouté sur l'axe de la première articulation a peu de répercussions sur les performances du robot. Effectivement, celui-ci perçoit seulement l'inertie du mécanisme ajouté. Or, la masse peut être concentrée près du pivot, minimisant ainsi les effets négatifs associés.

Pour atteindre le but visé, des corrélations entre différents paramètres géométriques et le couple maximal produit par la rotation des cylindres d’Halbach sont évaluées. Ces corrélations serviront à obtenir des ratios entre certaines dimensions, qui maximiseront le couple produit pour un volume d’aimants donné. Les dimensions étudiées sont présentées dans le schéma général du concept, introduit à la Figure 1.13 et repris à la Figure 2.1. De plus, deux ratios de forme sont introduits afin de mieux caractériser la géométrie d’aimants. Premièrement, le ratio  $\alpha$ , défini par l’équation 2.1, représente le rapport des épaisseurs des parois des cylindres. Ensuite, le ratio  $\beta$ , défini par l’équation 2.2, caractérise la forme générale de la géométrie, c’est-à-dire

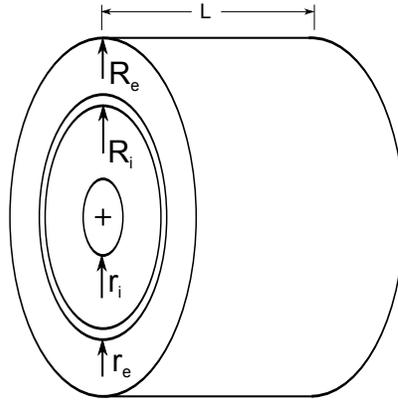


FIGURE 2.1 – Paramètres géométriques des cylindres d’Halbach imbriqués.

$$\alpha = \frac{R_e - r_e}{R_i - r_i} \quad (2.1)$$

$$\beta = \frac{L}{2R_e}. \quad (2.2)$$

Une configuration ayant une paire de pôles a été utilisée pour simuler le couple, mais les résultats peuvent être transposés à une configuration à deux paires de pôles. De plus, les aimants et la magnétisation sont continus pour l’étude. Dans le but de limiter le temps de calcul requis, seulement le couple maximal ( $\theta = 90^\circ$ ) a été simulé pour chaque géométrie.

### 2.2.1 Modèle de simulation

Avant de présenter les résultats de l’analyse géométrique effectuée. Le développement du modèle de simulation, implémenté dans le logiciel de simulation par éléments finis COMSOL Multiphysics, est tout d’abord présenté. Ce modèle sera ensuite utilisé pour simuler le couple produit entre deux cylindres d’Halbach

Pour un cylindre d’Halbach très long comparativement à son diamètre, une simplification en deux dimensions peut être envisageable. Par contre, comme les ratios beta étudiés sont compris entre 0.1 et 1.5, la géométrie est trop courte pour considérer une simplification en deux dimensions. Une géométrie en trois dimensions doit donc être utilisée pour tenir compte des effets de bout non négligeables. Toutefois, grâce à une symétrie au centre de la longueur de la géométrie, la moitié des aimants peuvent être modélisés réduisant ainsi la taille des simulations. Les aimants sont ensuite entourés d’un cylindre d’air, commençant dans le plan de symétrie et centré dans l’axe des aimants. Le cylindre d’air a une longueur de  $2L$  et un rayon de  $2Re$ . Trois constantes, soit la conductivité électrique, la perméabilité relative et la permittivité, doivent être spécifiées pour caractériser chaque matériau utilisé dans le modèle. Ensuite, le comportement de chaque entité face à un champ magnétique est spécifié grâce à des relations prédéfinies. Pour les aimants permanents, la relation  $B = \mu H + B_r$ , où  $B_r$  est une constante dépendante du grade d’aimant utilisé, permet de définir le champ magnétique produit. Pour l’air, la relation  $B = \mu H$  est utilisée. Une fois la géométrie du modèle complétée, le maillage des différentes composantes est effectué. Des éléments en forme de tétraèdre sont utilisés pour remplir le volume. Pour l’air autour des aimants, des tétraèdres plus grossiers sont utilisés. Ces tétraèdres se raffinent progressivement jusqu’à l’interface entre les aimants où ils ont une grosseur minimale. Une image du maillage dans le plan de symétrie du modèle de simulation est présentée à la Figure 2.2. Sur la circonférence du modèle, les tétraèdres ont une longueur d’arête maximale de 25mm tandis que les tétraèdres de l’interface entre les aimants ont une longueur d’arête maximale de 3mm.

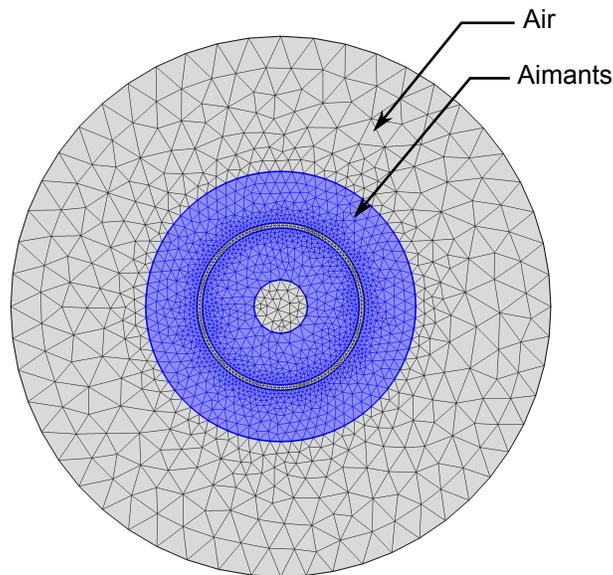


FIGURE 2.2 – Représentation du maillage utilisé dans le modèle de simulation.

Ensuite, pour assurer un traitement adéquat de la symétrie du modèle, une condition limite d'isolation magnétique est appliquée sur le plan de symétrie. Cette condition empêche la face du modèle située sur le plan de symétrie de développer un champ magnétique normal au plan de symétrie.

Finalement, le logiciel de simulation résout le modèle de façon statique et itérative. Lorsque le taux de convergence du modèle atteint un certain seuil, la simulation est arrêtée et les résultats peuvent être visualisés.

### 2.2.2 Effet du ratio de forme

La première série de simulations présentée a pour but de caractériser l'effet de la forme générale de la géométrie d'aimants sur le couple maximal produit. Plus précisément, l'effet du ratio entre la longueur et le diamètre de la géométrie. Tel que discuté précédemment, la forme générale est fortement liée à l'application. Dans un contexte d'équilibrage statique, la compacité sera le critère d'optimisation principal. Pour identifier le ratio de forme  $\beta$  optimal, le couple produit par la géométrie est simulé pour différentes valeurs de ratio  $\beta$  allant de 0.1 à 1.5. Ces simulations sont ensuite répétées avec plusieurs volumes d'aimants afin de déterminer l'effet d'une mise à l'échelle de la géométrie. Dans ces simulations, la valeur des rayons caractérisant les cylindres d'Halbach est basées sur une proportion fixe du rayon extérieur. Ces proportions peuvent être visualisées dans le Tableau 2.2. De plus, la valeur du rayon intérieur est fixé à  $0.2R_e$  dans le but de conserver une géométrie compacte. Cette dimension représente grossièrement l'espace nécessaire autour de l'axe de rotation pour inclure les éléments de transmission permettant la rotation entre les cylindres.

TABLE 2.2 – Proportions géométriques de la géométrie d'aimants utilisée pour caractériser l'effet de la forme et du volume sur le couple.

Variable	Valeur
$R_i$	$0.58R_e$
$r_e$	$0.62R_e$
$r_i$	$0.2R_e$
$L$	$\beta 2R_e$

Les résultats du couple maximum simulé en fonction du ratio de forme et du volume sont présentés en trois dimensions au graphique de la Figure 2.3. À partir de ce graphique, l'effet du volume est isolé à la Figure 2.4. Cette dernière illustre que pour chaque facteur de forme  $\beta$  le couple évolue de façon linéaire avec le volume. Cet effet est normalisé avec le couple maximal pour chaque valeur de ratio  $\beta$  à la Figure 2.5. Ce graphique démontre que, peu importe la forme de la configuration, doubler le volume des aimants sans changer la forme de la configuration a pour effet de doubler le couple produit. Cette propriété est particulièrement

intéressante dans un contexte d'équilibrage statique général. Effectivement, l'évolution linéaire du couple en fonction du volume vient augmenter la polyvalence du concept. Pour simplifier au maximum l'intégration de cette technologie, un module d'équilibrage standard pourrait être conçu. Par la suite, pour équilibrer une charge quelconque, il suffirait d'ajouter plusieurs modules en parallèle jusqu'à ce que l'objectif d'équilibrage soit atteint. Cette technique pourrait également être utilisée pour réduire les problèmes d'interférences. En distribuant les mécanismes adéquatement sur l'articulation, une configuration avantageuse pourrait être trouvée. Cela dit, un seul mécanisme, spécifiquement conçu pour l'application visée, pourrait aussi être construit. De cette façon, le mécanisme résultant serait plus compact, étant donné que les pièces entourant les aimants ne seraient incluses qu'une seule fois.

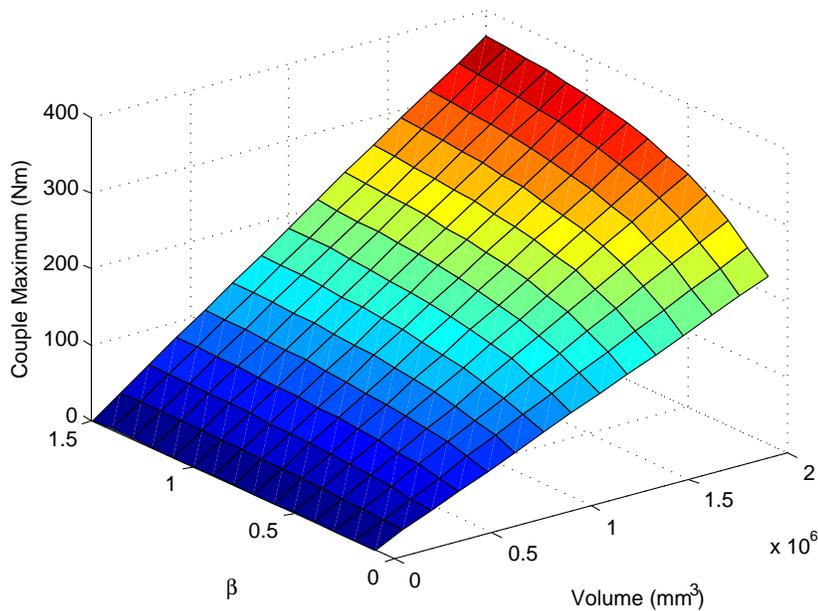


FIGURE 2.3 – Effet du ratio de forme et du volume des aimants sur le couple maximal produit par des cylindres d'Halbach imbriqués.

Ensuite, à partir des résultats de la Figure 2.3, l'effet du ratio de forme  $\beta$  sur le couple, pour plusieurs volumes différents, est isolé à la Figure 2.6. Tout comme le graphique représentant l'effet du volume, les courbes sont très semblables une fois normalisées avec le couple maximal. Les courbes normalisées sont présentées à la Figure 2.7. Le couple produit augmente de façon logarithmique avec l'augmentation du ratio  $\beta$ . Conséquemment, une géométrie plus longue assure une meilleure répartition du volume. Par contre, une longueur excessive du mécanisme peut nuire à sa compacité et son intégration. Utiliser un ratio de forme autour de un semble donc être un bon compromis.

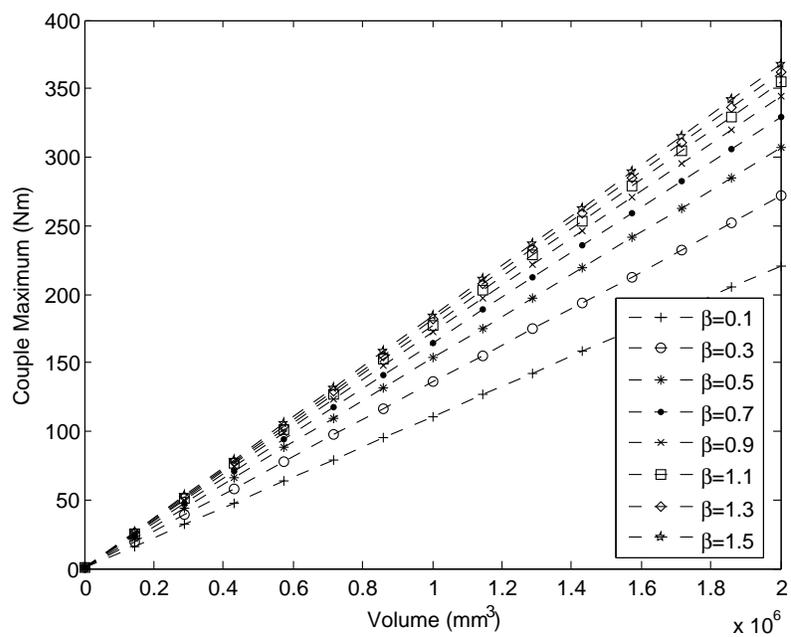


FIGURE 2.4 – Couple produit en fonction du volume, pour différents facteurs de forme  $\beta$ .

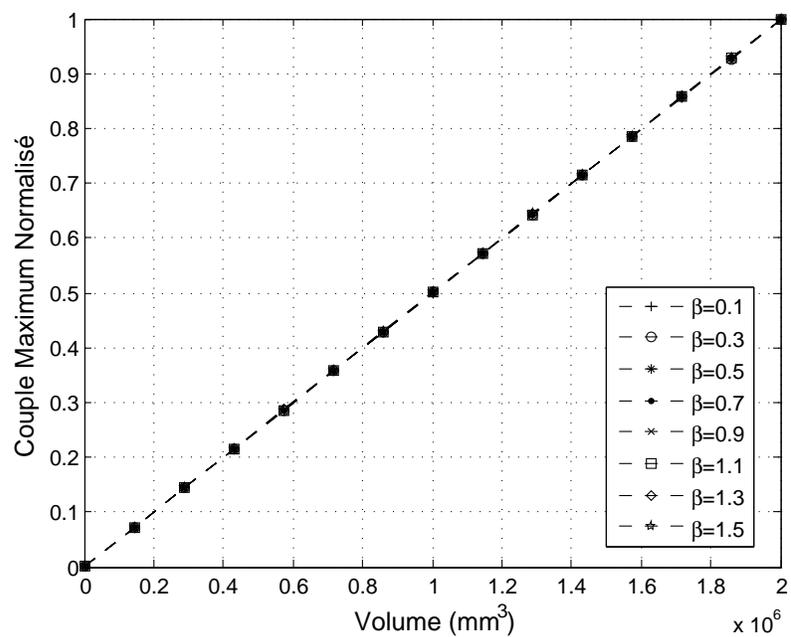


FIGURE 2.5 – Couple normalisé produit en fonction du volume, pour différents facteurs de forme  $\beta$ .

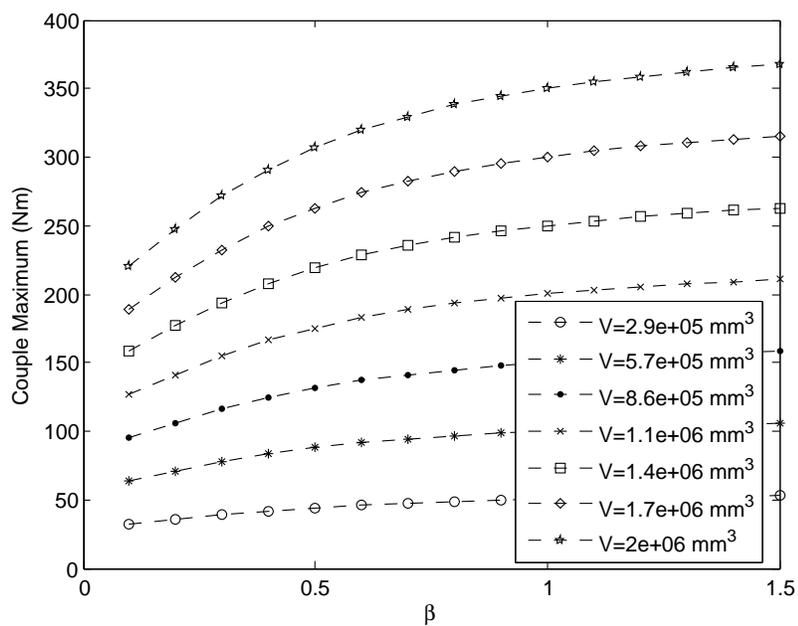


FIGURE 2.6 – Couple produit en fonction du facteur de forme  $\beta$ , pour différents volumes d'aimants.

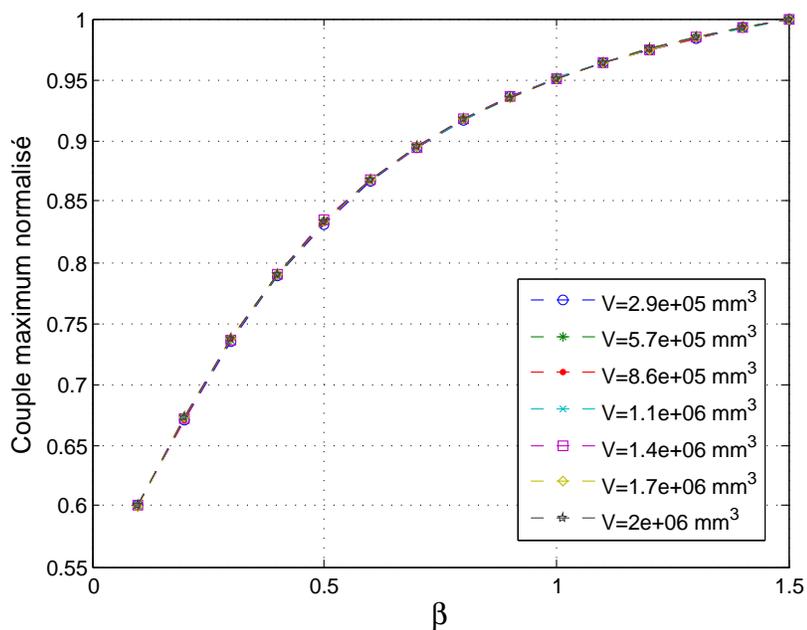


FIGURE 2.7 – Couple normalisé produit en fonction du facteur de forme  $\beta$ .

### 2.2.3 Effet du ratio d'épaisseur

Dans les simulations précédentes, l'épaisseur des parois des cylindres extérieur et intérieur correspondait à une proportion fixe du diamètre extérieur. Dans cette section, l'effet de l'épaisseur des parois sur le couple produit est étudié. Le ratio d'épaisseur  $\alpha$ , défini dans l'équation 2.1, donne une représentation de la position de l'interface entre les deux cylindres.

Les simulations pour un ratio  $\alpha$  donné ont été effectuées avec différents ratios  $\beta$  et plusieurs volumes différents. Une fois normalisées avec le couple maximal, les courbes du couple en fonction du ratio  $\alpha$  étaient toutes très semblables. Une courbe typique représentant l'effet de ce ratio est présentée à la Figure 2.8. Dans ce cas, le couple résultant est optimal lorsque le ratio entre les épaisseurs est d'environ 0.827.

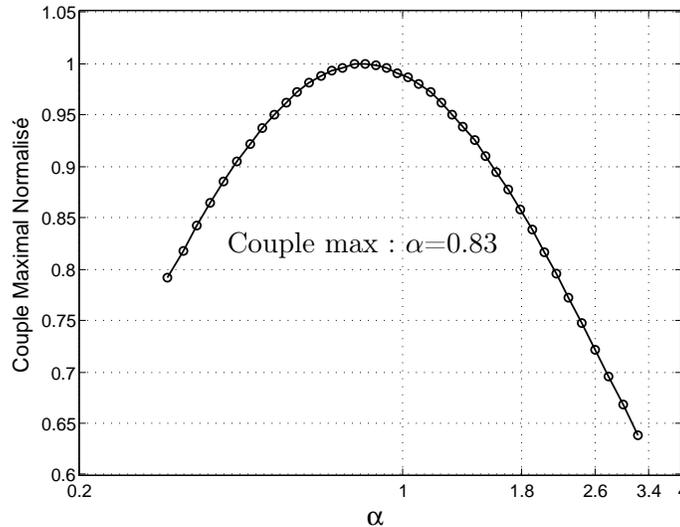


FIGURE 2.8 – Effet du ratio  $\alpha$  sur le couple produit pour un volume de  $57.3e04mm^3$  et un ratio  $\beta = 1$ .

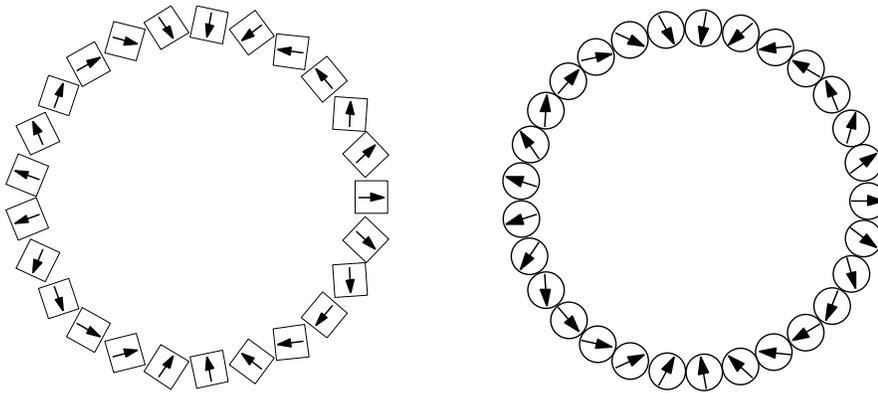
Un jeu fonctionnel est requis entre les cylindres pour assurer le bon fonctionnement du mécanisme. L'épaisseur de ce jeu peut avoir une grande influence sur le couple produit. En effet, réduire la distance entre les deux cylindres à un minimum fonctionnel permet de maximiser le couple.

## 2.3 Discrétisation des aimants

Afin de magnétiser un aimant permanent, un fort champ magnétique est appliqué dans la direction de magnétisation voulue. L'aimant conserve par la suite une partie du champ magnétique appliqué, de façon permanente. Lorsque la magnétisation souhaitée est unidirectionnelle, le processus de magnétisation est simple. Par contre, si une orientation complexe de la magné-

tisation est nécessaire, des gabarits spécialement conçus doivent être utilisés pour magnétiser l'aimant. Des exemples de gabarits utilisés pour obtenir la magnétisation continue requise pour former un cylindre d'Halbach sont présentés dans Zhu et collab. (2000) et Atallah et Howe (1998).

Bien qu'une magnétisation continue dans les aimants permette d'obtenir une densité d'aimant maximale, les méthodes permettant de réaliser cette magnétisation sont très coûteuses et difficilement applicables à de grandes géométries. Pour ces raisons, des solutions alternatives à la magnétisation continue sont présentées dans cette section. En discrétisant les cylindres d'Halbach en plusieurs aimants magnétisés dans une même direction, le coût de l'arrangement d'Halbach est substantiellement réduit. Par contre, l'utilisation de plusieurs aimants augmente significativement la complexité du montage.



(a) Discretisation avec des aimants cubiques.

(b) Discretisation avec des aimants cylindriques.

FIGURE 2.9 – Discretisation du cylindre d'Halbach extérieur avec des aimants standards.

Pour discrétiser les cylindres d'Halbach et approximer une magnétisation continue, des formes simples comme des cylindres ou des cubes peuvent être utilisées. Ce type d'aimants est l'option la moins dispendieuse pour la construction d'un prototype, puisque l'utilisation d'aimants standards peut être considérée. La Figure 2.9a illustre une discrétisation avec des aimants cubiques, tandis que la Figure 2.9b illustre une discrétisation avec des aimants cylindriques. Bien que le coût de ce type de discrétisation soit minimal, le couple résultant est faible comparativement au cas où les cylindres sont continus. Effectivement, l'utilisation de formes simplifiées engendre des espaces entre les aimants. Ceux-ci réduisent significativement le couple produit par la configuration. De plus, cette approche est limitée lorsqu'une longue géométrie est désirée. Effectivement, comme les tailles standardisées d'aimants ont une longueur restreinte, une forme ayant un ratio  $\beta$  avantageux peut être difficile à obtenir. L'utilisation de formes simplifiées comme méthode de discrétisation ne doit donc être privilégiée que lorsque le coût est

un facteur important lors de la construction du mécanisme. Dans ce cas, des compromis sont effectués sur la forme et la densité optimale pour simplifier autant que possible les aimants utilisés. Un exemple de cylindre d’Halbach construit avec des aimants cubiques est présenté dans Raich et Blümler (2004).

Une alternative à cette approche est l’utilisation d’aimants en forme d’arc de cercle. De cette façon, la densité d’aimants dans les cylindres d’Halbach est améliorée, mais les aimants n’ont plus l’avantage d’avoir une forme standardisée et simple. Effectivement, chaque aimant possède une magnétisation unique et nécessite donc une fabrication spéciale, contrairement au cas précédent où tous les aimants étaient identiques. Grâce à une symétrie dans la magnétisation du cylindre, le nombre d’aimants différents à fabriquer correspond au nombre total d’aimants, divisé par deux. Tout dépendant de la quantité de segments utilisés pour compléter le cylindre, une telle géométrie peut rapidement devenir complexe à réaliser. De plus, l’intensité du couple produit par ce type de configuration varie en fonction de la quantité de segments constituant les cylindres. Plus le nombre de segments est important, plus la magnétisation s’approche du cas continu, où le couple est maximal.

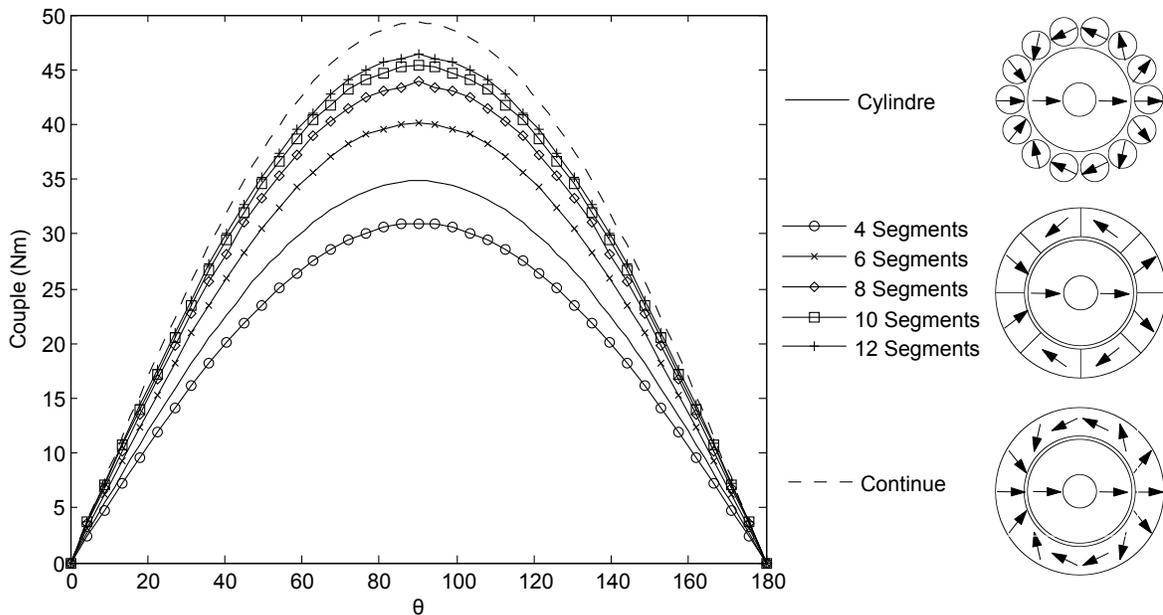


FIGURE 2.10 – Comparaison du couple produit par les différentes techniques de discrétisation présentées pour une géométrie décrite dans la Table 2.3 .

Lorsqu’une configuration ayant une seule paire de pôles est utilisée, la magnétisation du cylindre intérieur est unidirectionnelle. Dans ce cas, un cylindre continu magnétisé diamétralement peut être utilisé sans discrétisation. De cette façon, la densité d’aimant est maximisée et la configuration est simplifiée. De plus, le prix des aimants spéciaux simples, magnétisés unidirectionnellement, est généralement fonction du volume de l’aimant. L’utilisation d’un cylindre plein est donc un choix nettement avantageux. Toutefois, une discrétisation du cylindre

TABLE 2.3 – Paramètres des cylindres d’Halbach utilisés dans les simulations de discrétisation.

$R_e$	50 mm
$R_i$	33 mm
$r_i$	31 m
$r_e$	10 mm
$L$	80 mm
$\mu_r$	1.05
$B_r$	1.3 T

intérieur peut comporter certains avantages. Effectivement, comme ce cylindre peut s’avérer assez volumineux, sa discrétisation permet de simplifier sa fabrication, sa manutention et son intégration.

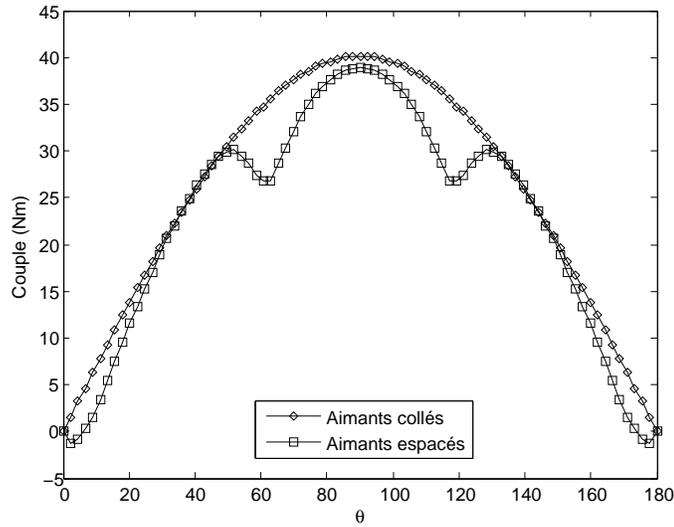
Les deux méthodes de discrétisation présentées précédemment sont comparées au cas idéal continu à la Figure 2.10. Aux fins de comparaison, toutes les simulations ont été effectuées avec une configuration ayant un cylindre intérieur continu. Le volume de l’enveloppe de chaque type de discrétisation était identique. Par conséquent, le volume d’aimants d’une configuration discrétisée avec des aimants cylindriques est plus faible que celui résultant d’une discrétisation avec segments d’arc.

Lorsque qu’une discrétisation avec segments d’arc est utilisée, le couple produit augmente avec la quantité de segments, jusqu’à atteindre un effet de saturation à environ 10-12 segments. Augmenter davantage le nombre de segments procure peu de gain au couple produit, comparativement à la complexité ajoutée. De plus, si peu de segments sont utilisés pour compléter le cylindre, un couple relativement faible est obtenu.

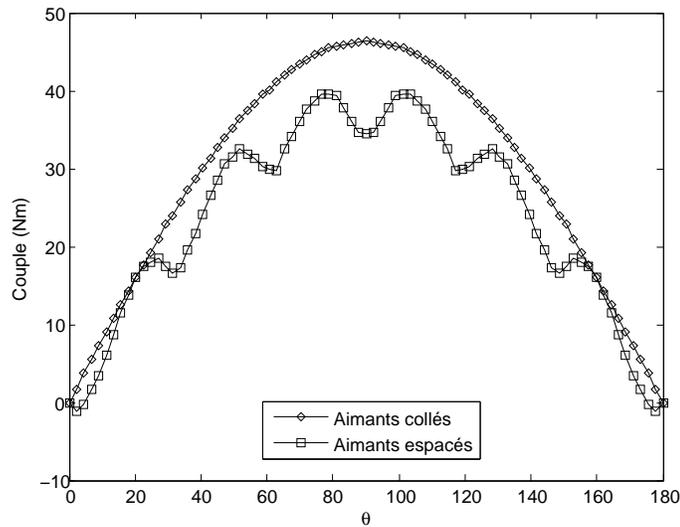
En pratique, il peut être assez difficile d’obtenir des cylindres d’Halbach complets, sans espaces entre les segments. Étant donné les forces importantes qui résultent des interactions entre les aimants, une matrice permettant une intégration individuelle de chaque aimant sera probablement nécessaire. L’espacement requis entre les segments réduit la densité d’aimants de la configuration, diminuant ainsi le couple produit. De plus, si des espaces sont introduits dans le cylindre intérieur, la caractéristique de couple peut être altérée. Cet effet est démontré à la Figure 2.11, où un écart de  $5^\circ$  est introduit entre les aimants de la configuration à 6 segments (Figure 2.11a) et à 12 segments (Figure 2.11b). Le couple est ensuite comparé à celui produit par une configuration sans écarts entre les segments. Cet espacement est exagéré afin de démontrer l’effet sur le couple. En réalité, un espace plus petit sera généralement utilisé.

## 2.4 Étude de la démagnétisation

La magnétisation d’un aimant permanent dépend directement du champ magnétique appliqué au travers de sa section. Quand ce champ magnétique est inversé par rapport à l’orientation



(a) Discrétisation en 6 segments.



(b) Discrétisation en 12 segments.

FIGURE 2.11 – Effet de la discrétisation du cylindre d’Halbach intérieur sur le couple.

de la magnétisation de l’aimant, la norme de cette magnétisation diminue. Cette relation est décrite par la courbe d’hystérésis de l’aimant et est un facteur important à considérer lors de la conception d’un système d’aimants. Ainsi, ce phénomène est étudié dans cette section afin de limiter les problèmes qui lui sont associés.

La magnétisation d’un aimant est maximale quand le champ magnétique qu’il produit peut

circuler dans un milieu extrêmement perméable, comme le fer pur. Dans ce cas, aucun champ magnétique ne circule à l'intérieur de l'aimant, puisqu'un chemin moins résistant est disponible. Une telle condition caractérise un circuit magnétique fermé et est illustrée à la Figure 2.12b. Si, au contraire, l'aimant est placé dans un milieu ayant une faible perméabilité, comme l'air, le champ magnétique qu'il produit pourra circuler au travers de son propre volume. Dans ce cas, le champ magnétique sera inverse à la magnétisation de l'aimant et aura donc tendance à le démagnétiser. Le champ démagnétisant, dénoté  $H_d$ , représente l'addition de tous les champs magnétiques extérieurs circulant au travers de l'aimant. Cette interaction est schématisée à la Figure 2.13.

Quand la valeur du champ démagnétisant dépasse un seuil critique, l'aimant risque de subir une démagnétisation permanente. Dans cette section, ce phénomène est étudié dans le but de réduire son effet sur le couple produit. Comme les aimants utilisés dans le concept présenté fonctionneront dans l'air, ils subiront un fort champ démagnétisant et seront vulnérables aux dommages causés par la démagnétisation.

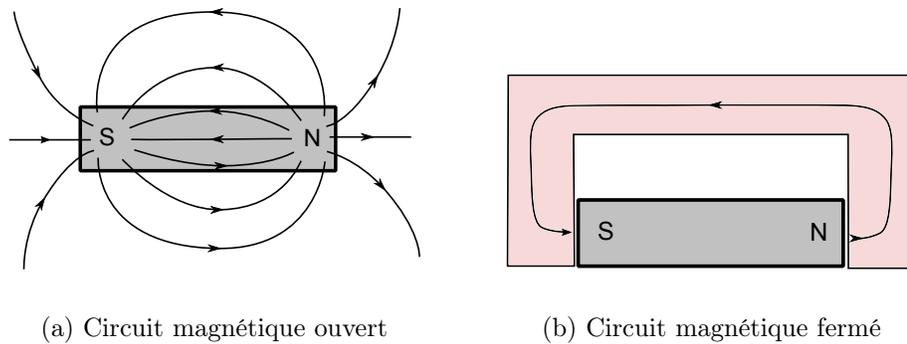


FIGURE 2.12 – Chemin emprunté par un champ magnétique dans un circuit ouvert et fermé



FIGURE 2.13 – Flux magnétique résultant ( $B$ ) d'un aimant soumis à un champ démagnétisant  $H_d$ .

### 2.4.1 Courbe d'hystérésis

Le comportement des matériaux ferromagnétiques face à un champ magnétique externe est décrit par leurs courbes d'hystérésis. Ces courbes caractérisent l'effet d'un champ magnétique  $H$  sur la magnétisation d'un aimant  $M$ , ainsi que sur le flux magnétique  $B$  qui circule au travers de sa section. Ces trois variables sont liées par la relation suivante :

$$B = \mu_0(H + M) \quad (2.3)$$

Les courbes d'hystérésis typiques d'un aimant permanent peuvent être visualisées à la Figure 2.14. La courbe pointillée est la courbe intrinsèque d'hystérésis. Elle décrit le comportement des propriétés d'un aimant, comme sa magnétisation, face à un champ magnétique. La condition initiale de l'aimant est représentée par le point 1. Lorsque le champ magnétique est augmenté progressivement, l'aimant est magnétisé pour la première fois. Sa magnétisation suivra la courbe 1-2-3 jusqu'à ce qu'il soit saturé. Si le champ magnétique est inversé et augmenté graduellement jusqu'à saturation dans la direction négative de l'axe de magnétisation, la magnétisation suivra la courbe 3-4-5. Finalement, si le champ magnétique est de nouveau inversé, la magnétisation suivra la courbe 5-6-3. Sur la courbe intrinsèque d'hystérésis, le croisement avec l'ordonnée représente la magnétisation rémanente  $B_r$ , tandis que le croisement avec l'abscisse représente la coercivité intrinsèque de l'aimant  $H_{ci}$ .

La seconde courbe, représentée par un trait plein à la Figure 2.14, est la courbe normale d'hystérésis. Elle est obtenue en additionnant le champ magnétique externe à la magnétisation de l'aimant. Cette courbe est généralement utilisée lors de la sélection d'un aimant, puisqu'elle représente les conditions de démagnétisation. De plus, l'intersection avec l'ordonnée correspond toujours à la magnétisation rémanente, tandis que l'intersection avec l'abscisse donne maintenant la coercivité normale  $H_c$ . De plus, la pente de cette courbe donne la perméabilité magnétique de l'aimant  $\mu$ .

### Conditions de démagnétisation

Étant donné que le champ démagnétisant est inverse à la magnétisation, le second quadrant des courbes d'hystérésis décrit les conditions de démagnétisation. Un agrandissement de cette région est montré à la Figure 2.15. Le point d'opération d'un aimant circule sur la ligne normale (ligne pleine). Si ce point est confiné dans la partie linéaire de la courbe (1-2), la démagnétisation dans l'aimant est réversible. C'est-à-dire qu'il pourra revenir à sa magnétisation rémanente initiale si le champ magnétique est retiré. À l'inverse, si le point d'opération dépasse le coude de la courbe (2), l'aimant subira une démagnétisation permanente. Par exemple, c'est le cas du point d'opération situé en (3). À ce point, lorsque le champ magnétique sera retiré, le flux magnétique de l'aimant évoluera selon une courbe d'hystérésis secondaire (3-5) et ne pourra pas retrouver sa magnétisation initiale. L'aimant sera donc partiellement démagnétisé et fonctionnera avec une nouvelle magnétisation rémanente. Toutefois, si l'aimant est pleinement magnétisé de nouveau, il pourra retrouver sa magnétisation rémanente initiale.

Afin de s'assurer qu'aucune démagnétisation ne se produira dans les aimants, leur point d'opération doit toujours rester dans la partie linéaire de la courbe de démagnétisation. Le champ démagnétisant ne doit donc pas dépasser un certain seuil. La prédiction de l'intensité du

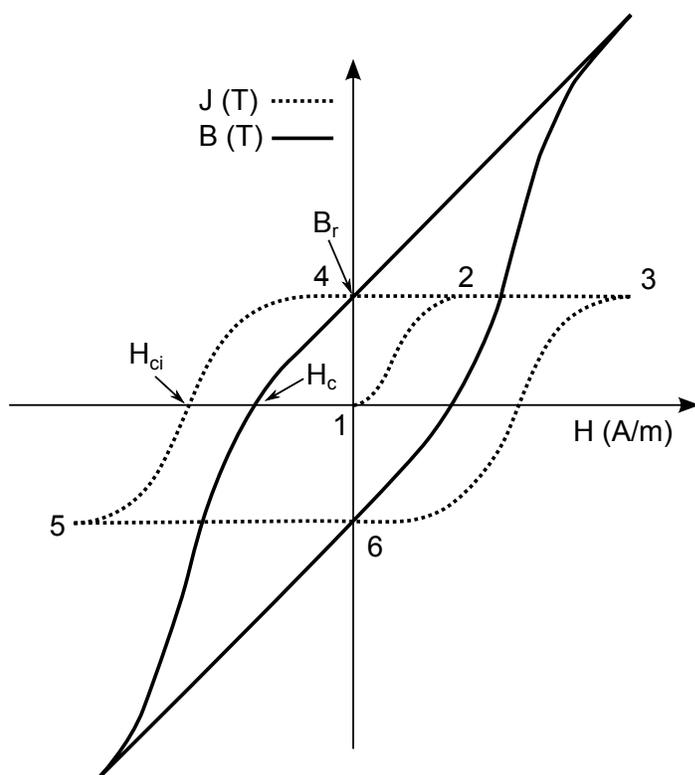


FIGURE 2.14 – Courbes d’hystérésis typiques d’un aimant permanent où  $J = \mu_0 M$ .

champ démagnétisant est toutefois complexe et dépend de plusieurs facteurs, tels que la forme de l’aimant, sa magnétisation et la perméabilité du milieu. Ces paramètres peuvent servir à calculer un facteur de démagnétisation qui déterminera où se situe le point d’opération de l’aimant dans sa courbe de démagnétisation. Le facteur de forme lié à la démagnétisation peut être calculé analytiquement pour des formes ellipsoïdes, mais il est beaucoup plus difficile à obtenir pour les autres formes. En utilisant une analyse par éléments finis, ce champ magnétique peut être facilement déterminé. Comme les courbes de démagnétisation varient avec la température, il est important d’utiliser celles qui correspondent à la température d’utilisation maximale.

## 2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, des lignes directrices à suivre lors de la conception d’un équilibrateur magnétique ont été développées. Premièrement, le choix du type d’aimant a été détaillé. Suite à l’étude des différents types d’alliages disponibles, les aimants néodymes semblent être la meilleure option. Leur résistance à la démagnétisation et leur importante magnétisation ré-

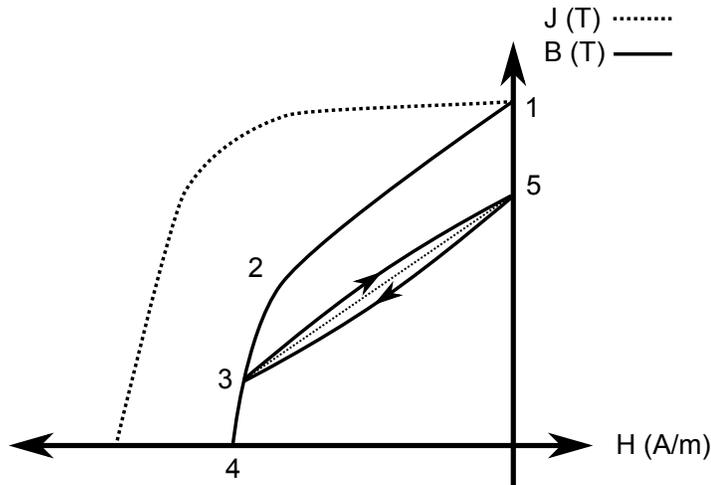


FIGURE 2.15 – Courbe de démagnétisation typique d’un aimant permanent où  $J = \mu_0 M$ .

manente font de ce type d’aimant un choix adapté à l’application visée.

Ensuite, la forme des aimants a été étudiée afin d’optimiser le volume disponible pour l’intégration du mécanisme. À partir des relations entre certaines dimensions, des ratios avantageux, maximisant le couple produit, ont été déterminés. Premièrement, il a été établi qu’une valeur élevée du ratio  $\beta$ , qui caractérise la longueur d’une configuration d’aimants par rapport à son diamètre, permet une meilleure répartition du volume. Ensuite, de nombreuses simulations ont permis d’identifier qu’un ratio  $\alpha$  de 0.83, correspondant au rapport des épaisseurs des cylindres d’Halbach, semble maximiser le couple produit.

De plus, le processus de discrétisation, ainsi que ses effets, ont été étudiés. Étant donné la complexité de la magnétisation dans le cylindre d’Halbach extérieur, une discrétisation en aimants simplifiés peut être nécessaire pour la construction d’un prototype. L’utilisation d’aimants standards, comme des cylindres ou des cubes, réduit le coût associé aux aimants, mais réduit également la magnitude du couple produit. Une alternative à cette approche est l’utilisation de segments d’arc. De cette façon, le couple produit est amélioré, mais les aimants doivent être fabriqués sur mesure. Une discrétisation du cylindre d’Halbach intérieur peut également être envisagée. Dans ce cas, la caractéristique du couple peut être altérée si l’espace entre les aimants est trop élevé.

Finalement, une description de la démagnétisation a été présentée. Comme les aimants agissent fortement les uns sur les autres et sont dans un milieu peu perméable, ils sont sujets à subir des dommages permanents causés par un champ démagnétisant trop élevé. Ce champ magnétique peut être évalué grâce à des analyses par éléments finis et ne doit pas dépasser un certain

seuil. Ce seuil est déterminé par l'étude des courbes de démagnétisation du grade d'aimant sélectionné.

## Chapitre 3

# Conception de prototypes

Dans le chapitre précédent, la géométrie de la configuration d'aimants nécessaire à l'équilibrage statique magnétique a été étudiée dans le but d'obtenir un concept optimal et réalisable en pratique. Les conclusions tirées de cette étude sont utilisées dans le présent chapitre pour la conception d'un prototype à intégrer sur un robot déjà construit par l'IREQ.

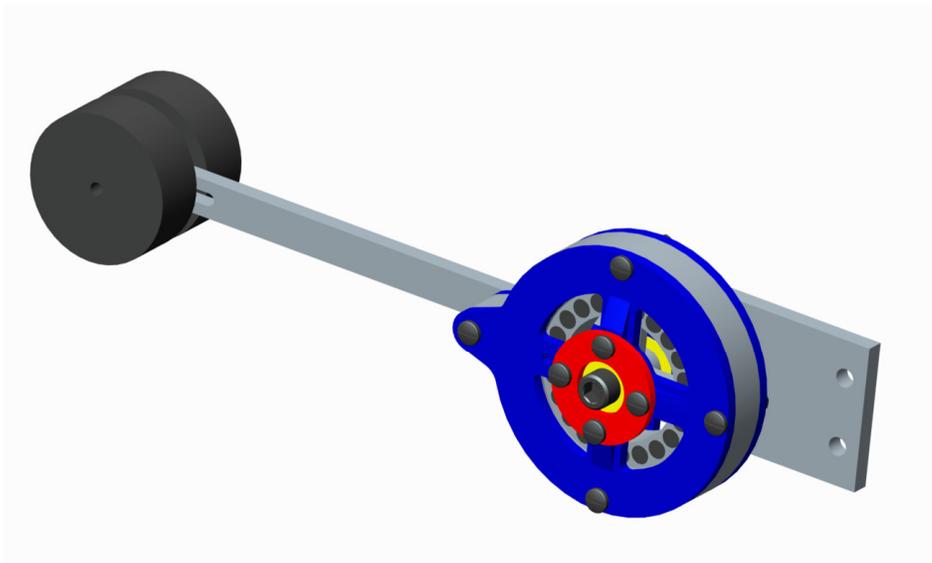
Avant de présenter l'itération finale du design, deux prototypes intermédiaires sont détaillés. En premier lieu, un mécanisme utilisé pour démontrer la viabilité d'un concept d'équilibrage statique avec des cylindres d'Halbach est présenté. Ensuite, un second prototype, de taille moyenne, est introduit. Ce prototype a pour but de tester le concept dans un contexte plus représentatif de la réalité. Subséquemment, la conception du prototype final est développée. L'intégration de ce prototype à l'articulation d'un robot existant est aussi présentée. Finalement, le couple mesuré, produit par les prototypes, est comparé au couple simulé et la validité des simulations est discutée.

### 3.1 Première itération - Preuve de concept

La première itération construite consiste en une preuve de fonctionnement du concept d'équilibrage statique magnétique. L'utilisation de pièces de plastique fabriquées par prototypage rapide ainsi que d'aimants standards a permis la construction d'un prototype simple et peu dispendieux. Monté sur un support, le prototype vise l'équilibrage d'une masse simple sur 360°. Une vue générale de ce prototype est montrée à la Figure 3.1.



(a) Photographie du prototype.



(b) Modèle CAO.

FIGURE 3.1 – Photographie et modèle CAO du premier prototype, dans une vue générale.

### 3.1.1 Configuration d'aimants

La configuration d'aimants utilisée dans la preuve de concept est présentée à la Figure 3.2. Une discrétisation en aimants cylindriques est utilisée afin de minimiser les coûts associés à la construction du prototype. La géométrie est constituée de 50 aimants cylindriques standards, ayant un diamètre de 1/4" et une longueur de 1/2". Les aimants sont magnétisés diamétralement et leurs propriétés sont détaillées dans le Tableau 3.1. Ces propriétés, ainsi que les courbes de démagnétisation, sont données par le distributeur des aimants et sont présentées à la Figure A.2 de l'annexe.

Les dimensions du prototype n'ont pas été basées sur les résultats de l'étude de forme présentée dans le chapitre précédent. Effectivement, comme ces conclusions ont été tirées ultérieurement, la forme de la géométrie est plutôt arbitraire. Les résultats de l'étude de forme ont par contre été pris en compte lors du design des prototypes subséquents.

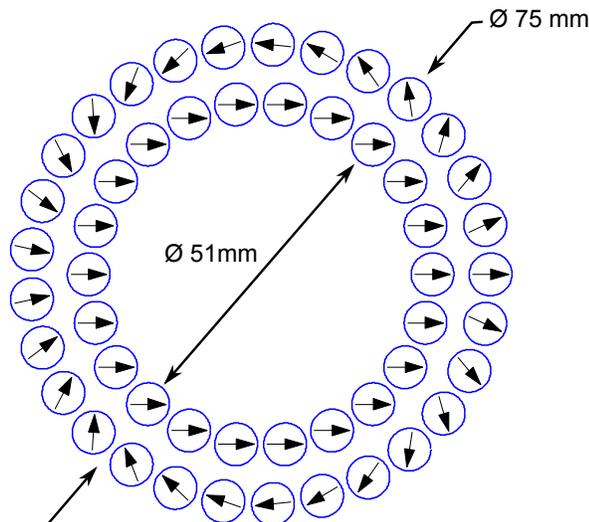


FIGURE 3.2 – Discrétisation en aimants cylindriques utilisée pour la preuve de concept.

### 3.1.2 Conception Mécanique

Afin de simplifier la conception et la construction du prototype, le prototypage rapide a été largement utilisé pour la fabrication des différentes pièces de plastique (ABS). L'assemblage est détaillé à la Figure 3.3. Les principales composantes et les dimensions hors-tout y sont identifiées. Le cylindre d'Halbach intérieur fait office de stator et est maintenu en place sur le support grâce à la friction engendrée par le serrage du boulon passant dans l'axe du mécanisme. Une portée de roulement est montée sur ce boulon et permet la rotation des flancs par rapport

TABLE 3.1 – Propriétés des aimants utilisés pour la preuve de concept, à 20°C (tirées de la Figure A.2).

Dimension	$\phi 1/4" \times 1/2"$
Grade	N42
$B_r$	1.32 T
$H_{ci}$	1173.7 kA/m
Coût total	70.00 \$

au stator. La matrice extérieure fait office de rotor et est fixée sur ces flancs. Finalement, la masse est vissée sur un des flancs.

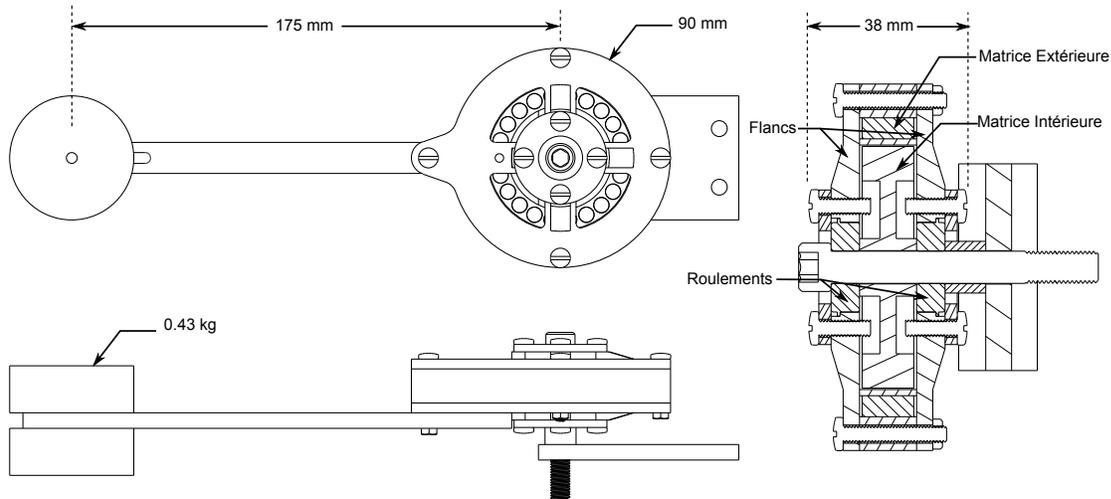


FIGURE 3.3 – Vues détaillées de la preuve de concept.

Les aimants sont insérés dans des matrices trouées et leur orientation est conservée grâce à un ajustement serré entre l'aimant et l'alésage de la matrice. Pour aligner correctement les aimants, la direction de leur magnétisation est tout d'abord évaluée avec une boussole. Ensuite, ils sont insérés dans l'alésage avec un guide visuel. Une représentation de l'orientation théorique des aimants dans la matrice ainsi qu'une photographie du résultat final sont présentées à la Figure 3.4.

### 3.1.3 Résultats

Comme il a été mentionné précédemment, la preuve de concept est conçue pour équilibrer une masse sur un banc d'essais. Cette masse peut générer un couple allant jusqu'à 0.74Nm lorsque le bras est à l'horizontal. Des images du montage en équilibre pour plusieurs positions

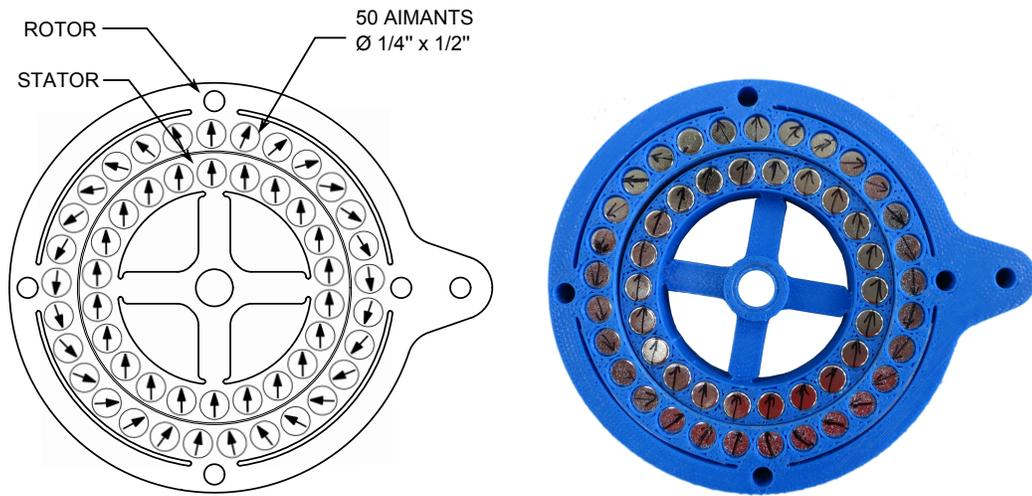


FIGURE 3.4 – Matrices du rotor et du stator de la preuve de concept.

angulaires sont présentées à la Figure 3.5. Comme prévu, le prototype compense adéquatement la masse, et ce, pour des rotations illimitées. Le déplacement du bras est fluide et peu de friction survient lors de la rotation de la masse.

Le couple produit par les aimants est évalué en mesurant la force nécessaire pour maintenir le prototype dans une position donnée. Cette force est évaluée grâce à un dynamomètre placé à l'extrémité du bras et mesure la différence entre le couple produit par le mécanisme et la charge gravitationnelle créée par la masse. Le couple généré par la force mesurée est ensuite additionné à la charge gravitationnelle pour déterminer le couple produit par le prototype. Les caractéristiques du dynamomètre utilisé ainsi que sa précision sont présentées dans l'annexe B. Le couple produit par le prototype est appelé couple mesuré et est comparé à la charge gravitationnelle perçue à la Figure 3.6.

### 3.1.4 Discussion

Les résultats obtenus avec le premier prototype ont démontré la faisabilité d'un équilibrage statique magnétique et ont justifié le développement de cette technologie. De plus, suite à la construction et l'analyse du prototype, plusieurs conclusions ont été tirées.

D'abord, l'insertion des aimants dans une matrice en plastique obtenue par prototypage rapide peut s'avérer problématique. Effectivement, l'uniformité de l'impression peut varier légèrement, ce qui cause des irrégularités dans l'ajustement serré nécessaire pour maintenir l'orientation des aimants. Comme ceux-ci sont positionnés dans une configuration où ils subissent d'importantes forces, ils peuvent facilement pivoter si le serrage est inadéquat. De plus,

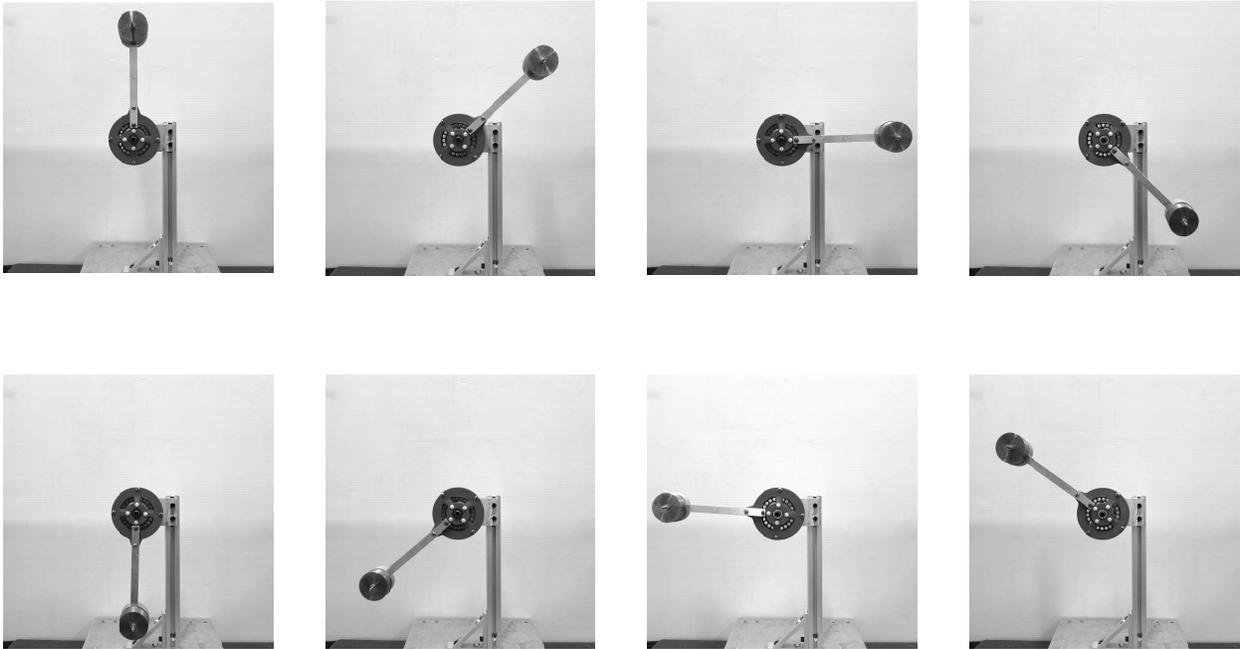


FIGURE 3.5 – Photographies de la preuve de concept dans différentes positions d'équilibre.

sans guide mécanique pour insérer les aimants, il est difficile de les orienter avec précision dans l'alésage.

Comme le prototypage rapide nécessite une épaisseur de paroi minimale, un espace important doit être prévu entre les aimants. Comme il a été discuté dans le chapitre précédent, une discrétisation de l'anneau intérieur, combinée avec un espace important entre les aimants, entraînent des irrégularités dans le couple produit. Cet effet est observé dans les résultats de la Figure 3.6. Une tendance sinusoïdale peut quand même être perçue dans le couple mesuré.

## 3.2 Deuxième itération

La viabilité du concept ayant été démontré avec un prototype simple dans la section précédente, un second prototype plus robuste est maintenant conçu. Cette itération vise à valider la fonctionnalité du concept présenté, lorsqu'il est utilisé pour équilibrer une charge plus représentative de la réalité. Tout comme le premier prototype, cette version est conçue pour fonctionner sur un banc d'essai et ne sera pas intégrée sur une articulation robotique. L'optimisation géométrique développée dans le chapitre précédent est appliquée sur la géométrie, mais l'accent est mis sur la simplicité des aimants. Des compromis ont donc été faits sur le ratio de forme et d'épaisseur de la géométrie.

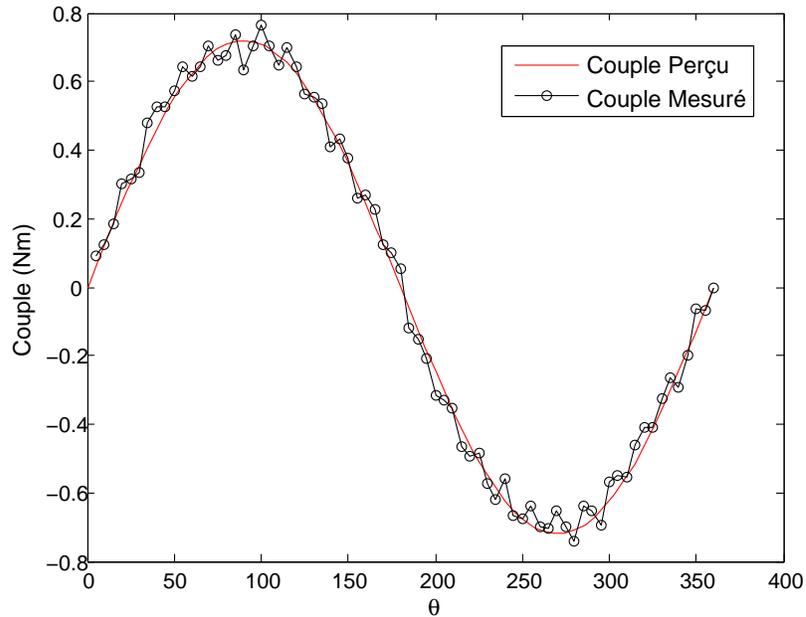


FIGURE 3.6 – Comparaison entre le couple perçu et le couple mesuré de la preuve de concept.

### 3.2.1 Configuration d'aimants

La configuration d'aimants du second prototype est illustrée à la Figure 3.7. Tout comme pour le premier prototype, une discrétisation en aimants cylindriques est utilisée pour compléter l'anneau extérieur. Afin d'améliorer la densité d'aimants de la configuration, deux tailles sont utilisées. Ainsi, deux aimants ayant un diamètre de 1/4" et une longueur de 2" sont intercalés entre les aimants ayant un diamètre de 1/2" et une longueur de 2". Cette répétition d'aimants n'est pas conservée sur toute la circonférence de l'anneau pour des raisons liées à la démagnétisation. Cette problématique est détaillée plus tard dans la section.

Ensuite, l'anneau intérieur est constitué d'un seul aimant. Bien que cet aimant requiert une fabrication sur mesure, son utilisation simplifie grandement le concept tout en maximisant la densité du champ magnétique produit par l'anneau intérieur. De plus, en utilisant un aimant plein, l'effet d'oscillation du couple produit, qui est causé par une discrétisation, est évité.

La forme de la géométrie n'est pas tout à fait en accord avec l'étude géométrique du chapitre 2. Effectivement, comme des aimants cylindriques sont utilisés, leur longueur maximale est limitée. Un aimant excessivement long est très fragile et requiert généralement une fabrication spéciale. Pour cette raison, une forme plus mince est adoptée.

Le grade des aimants utilisés ainsi que leurs propriétés à 20°C sont résumés dans le Tableau 3.2. Ces propriétés sont tirées des courbes de démagnétisation fournies par le fabricant des

aimants. Elles sont présentées à la Figure A.3 de l'annexe.

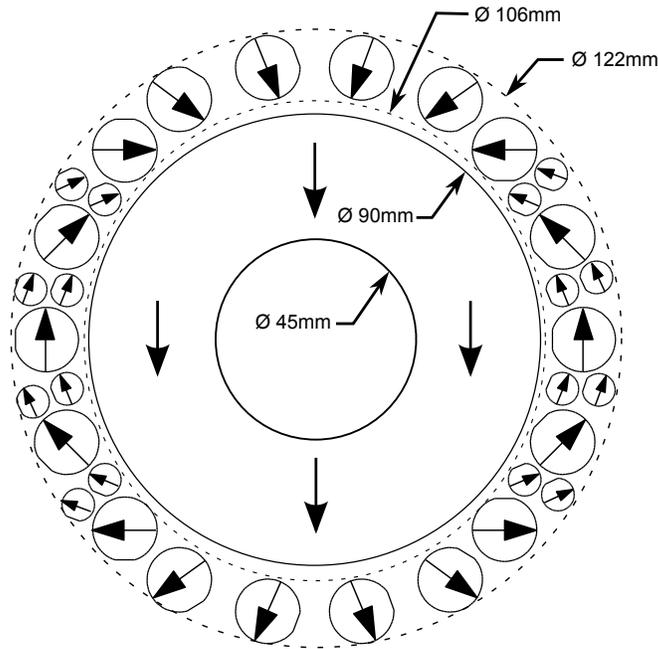


FIGURE 3.7 – Configuration d'aimants utilisée pour produire le couple du second prototype.

TABLE 3.2 – Propriétés des aimants utilisés pour le second prototype

Dimension 1	$\phi$ 1/4" X 2"
Dimension 2	$\phi$ 1/2" X 2"
Grade	N45
$B_r$	1.35 T
$H_{ic}$	1113 kA/m
Coût total	1112.36 \$

### Validation de la démagnétisation

Lorsque l'anneau extérieur est constitué d'une répétition symétrique d'aimants, des problèmes de démagnétisation peuvent survenir. Des opérations particulières sur l'arrangement ont donc été effectuées afin de limiter l'intensité du champ magnétique dans certaines régions et ainsi réduire le risque de démagnétisation permanente.

Le seuil maximal pour éviter des dommages permanents est basé sur les courbes de démagnétisation à 40°C. Comme le fabricant des aimants ne peut pas fournir ces informations, les propriétés importantes sont interpolées en utilisant les données d'un autre fournisseur. Les courbes utilisées pour interpoler la limite de démagnétisation sont illustrées à la Figure A.4,

présentée en annexe. Le seuil de démagnétisation a donc été fixé à  $800000\text{ka/m}$  afin d'inclure un léger facteur de sécurité.

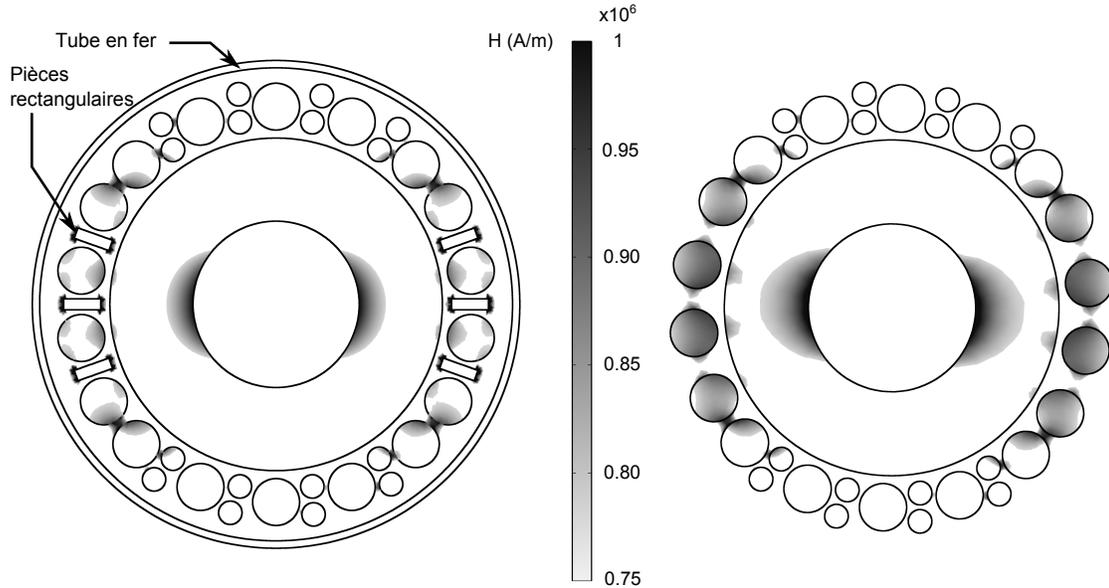


FIGURE 3.8 – Régions susceptibles de subir une démagnétisation permanente avec et sans les pièces en fer (Simulations effectuées avec COMSOL).

Les aimants de l'arrangement risquent de subir une démagnétisation permanente lorsque les anneaux effectuent une rotation relative de  $180^\circ$ . Dans cette position, la forte répulsion entre les aimants crée le champ démagnétisant maximal. Pour réduire son effet, les petits aimants sont retirés des endroits critiques et sont remplacés par des pièces rectangulaires en fer. Ces pièces ont une très grande perméabilité magnétique, ce qui leur permet de canaliser une partie du champ magnétique, réduisant ainsi l'intensité du champ démagnétisant dans les aimants adjacents. De plus, un tube en fer est placé autour de la circonférence extérieure de l'arrangement. Ce tube a pour effet de réduire l'intensité du champ magnétique dans l'aimant intérieur et de limiter les pertes de champ magnétique radiales à la géométrie, réduisant ainsi les interférences magnétiques avec les alentours. L'effet de ces pièces de fer sur l'intensité du champ magnétique est illustré à la Figure 3.8. Cet ajout réduit la démagnétisation, mais réduit également le couple produit. À la Figure 3.9, le couple d'une géométrie avec pièces de fer est comparé à celui d'une géométrie sans pièces de fer. Une réduction du couple d'environ 10% est observée.

D'autres options sont également envisageables pour réduire la démagnétisation. Premièrement, l'utilisation d'aimants plus gros permettrait de diminuer le champ démagnétisant qu'ils subissent. Effectivement, augmenter la distance entre les pôles d'un aimant augmente sa résistance à la démagnétisation. Cela dit, cette option est écartée car l'utilisation d'aimants plus gros diminue la densité d'aimant de l'anneau et nécessite une géométrie plus volumineuse. Ensuite, un grade d'aimant possédant une coercivité plus élevée pourrait être sélectionné. Par

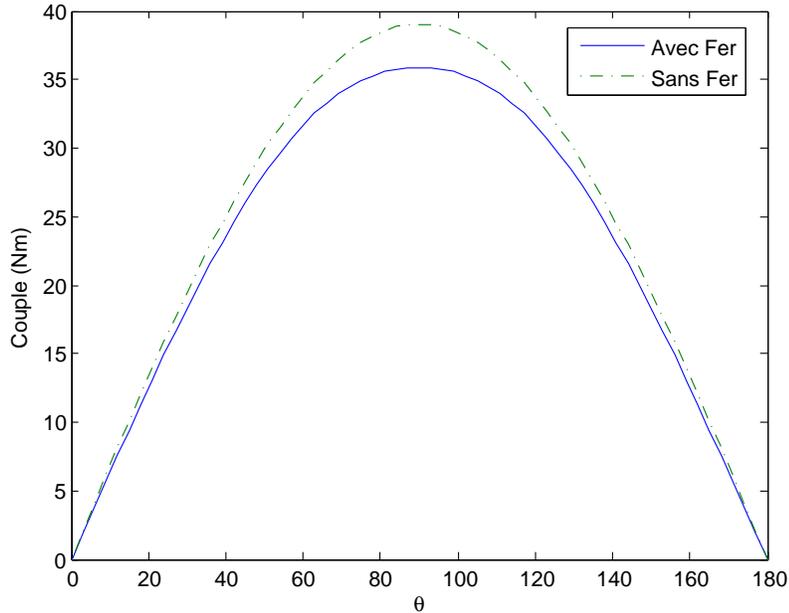


FIGURE 3.9 – Effet de l’ajout de pièces en fer sur le couple produit par le second prototype.

exemple, les grades N45M et N45H réduiraient la démagnétisation sans réduire le couple produit. Par contre, ces grades sont généralement plus dispendieux, ils n’ont donc pas été retenus. En dernier lieu, il pourrait être décidé de ne pas prendre action pour réduire la démagnétisation. De cette façon, la magnétisation des aimants serait réduite jusqu’à l’obtention d’un équilibre sous le nouveau seuil de démagnétisation. L’impact de cette méthode est cependant difficile à modéliser et à prévoir. Pour cette raison, elle est donc écartée.

### 3.2.2 Conception Mécanique

Pour le second prototype, une mécanique plus robuste et durable est désirée afin d’équilibrer une masse de 5.4 kg au bout d’un bras de levier de 35 cm. Le prototypage rapide a donc été évité et remplacé par des métaux ayant une faible perméabilité, comme l’aluminium ou le titane. Une photographie du résultat final est tout d’abord introduite à la Figure 3.10. Ensuite, la Figure 3.11 montre une vue explosée du mécanisme décrit en détail dans cette section.

Comme pour le premier prototype, le cylindre d’Halbach intérieur du second prototype constitue le stator et est fixé à un banc d’essai. Une vue en coupe du stator est présentée à la Figure 3.12. L’arbre en bleu (1) effectue la liaison entre le mécanisme et le support. Une clavette empêche la rotation du moyeu (2) sur cet arbre. Ce moyeu supporte l’aimant intérieur (3). Ce dernier est collé sur le moyeu avec un adhésif structural de marque LOCTITE. La translation de l’aimant est limitée par l’ajout de butées (4) sur chacun des côtés. Une portée de roulement



FIGURE 3.10 – Photographie du second prototype dans une vue générale.

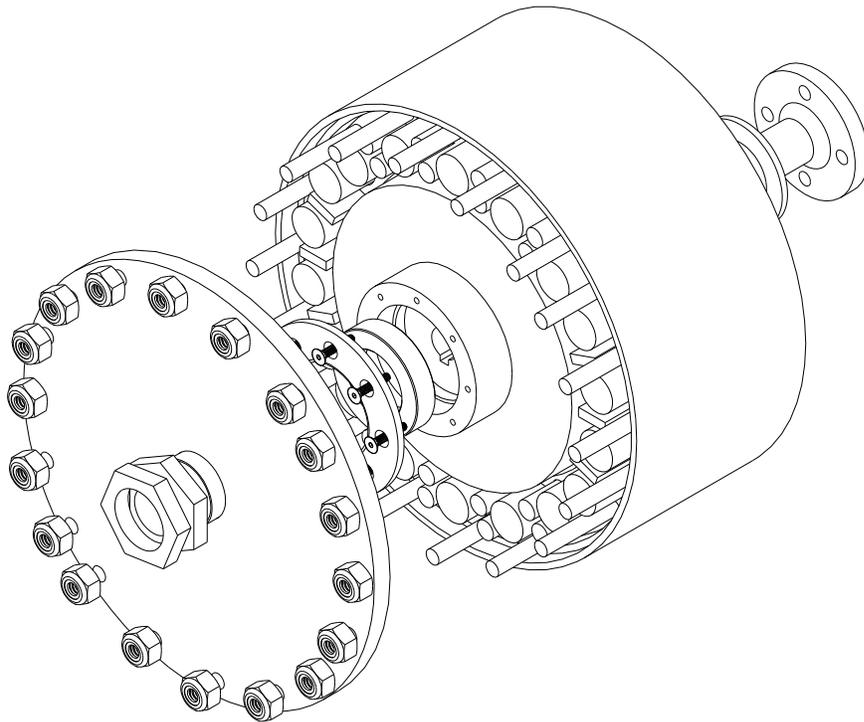


FIGURE 3.11 – Vue explosée du second prototype.

(5) est insérée dans le moyeu et permet la rotation avec le rotor par l'intermédiaire de deux arbres creux (6).

Ensuite, une vue en coupe du rotor est présentée à la Figure 3.13. Les arbres creux (6) sont reliés aux flancs du rotor (7), qui sont à leurs tours contraints dans le couvercle (8). Le couvercle est constitué d'acier à faible teneur en carbone, ce qui lui permet d'agir comme bouclier pour

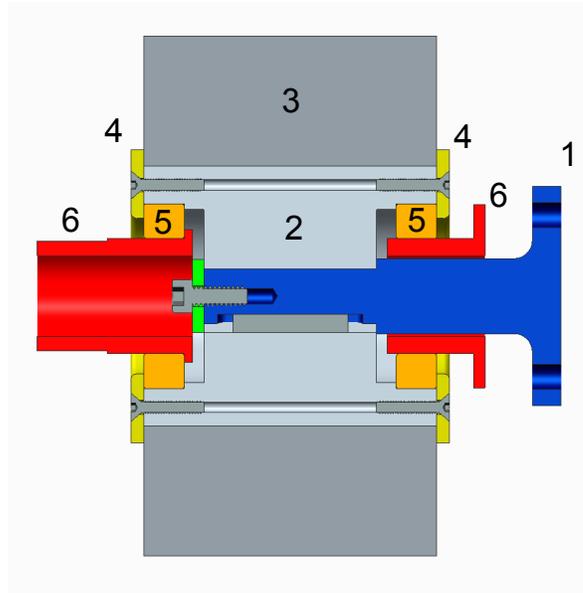


FIGURE 3.12 – Assemblage mécanique du stator du second prototype.

réduire les interférences magnétiques en canalisant une partie du champ magnétique produit par les aimants. Ce phénomène a aussi comme effet de réduire la démagnétisation. Ensuite, les aimants (9) sont insérés dans une matrice en titane (10). Cette matrice est contrainte en rotation par une série de tiges filetées (11) traversant les flancs et la matrice.

Étant donnée que l'intégration des aimants dans le premier prototype a été problématique, une nouvelle approche est adoptée pour cette itération. Au lieu d'utiliser un ajustement serré pour maintenir l'orientation des aimants, une butée mécanique qui contraint la rotation est plutôt utilisée. Pour ce faire, un plat parallèle à la magnétisation est usiné sur la surface des aimants. Pour déterminer la position des pôles résultant de cette magnétisation, les aimants sont collés les uns sur les autres. De cette façon, les pôles s'alignent fortement, ce qui permet de les identifier facilement. Ensuite, cette configuration d'aimant est insérée dans un gabarit qui contraint ses déplacements lors de l'usinage. Ce gabarit est présenté à la Figure 3.14 et un aimant usiné par cette méthode est illustré à la Figure 3.15.

Les aimants usinés sont ensuite insérés dans une matrice en titane. Des plats équivalents à ceux des aimants sont incorporés dans la matrice. De cette façon, les aimants sont positionnés dans la bonne orientation. Une fois l'aimant placé, une colle époxy fixe le tout. La matrice, quant à elle, est fabriquée en utilisant l'impression 3D de titane. Cette technologie permet d'intégrer facilement les plats dans les trous. Pour dimensionner le jeu entre les aimants et la matrice, plusieurs tests de diamètre ont été effectués avant de converger vers un jeu permettant un positionnement adéquat des aimants. Une photographie du cylindre d'Halbach extérieur résultant est présentée à la Figure 3.16.

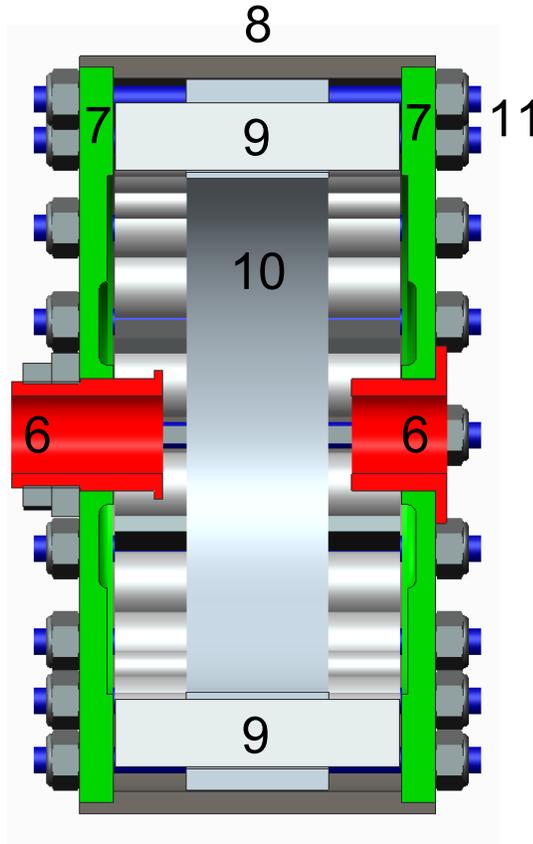


FIGURE 3.13 – Assemblage mécanique du rotor du second prototype.



FIGURE 3.14 – Gabarit utilisé pour usiner le plat sur les aimants du second prototype.

### 3.2.3 Résultats

La méthode utilisée pour tester le second prototype est essentiellement identique à celle utilisée pour tester le premier prototype. Le couple est calculé en mesurant la force nécessaire pour maintenir le bras à une certaine position. Ce couple, calculé grâce à un dynamomètre (présenté dans l'annexe B), est ensuite additionné à la charge gravitationnelle pour obtenir



FIGURE 3.15 – Photographie du plat usiné sur un aimant du second prototype .



FIGURE 3.16 – Photographie de l'anneau d'Halbach extérieur utilisé pour le second prototype.

le couple produit par le mécanisme. Les résultats sont présentés à la Figure 3.17, tandis que des photographies du prototype dans quatre positions d'équilibre sont présentées à la Figure 3.18. Le couple produit par le prototype suit relativement bien le couple gravitationnel, mais quelques irrégularités sont observées. Une cause probable de ces perturbations sera discutée dans la section suivante.

### 3.2.4 Discussion

Le but du second prototype est de concevoir une solution de compensation statique robuste, pouvant équilibrer un couple gravitationnel représentatif. Le prototype réussit à équilibrer une masse de 5.4kg au bout d'un bras de levier de 35cm. Pour minimiser les coûts de production, une discrétisation avec des aimants cylindriques est choisie pour former l'anneau d'Halbach extérieur. Cette technique fut facile à mettre en œuvre, mais le couple résultant est assez faible comparativement au couple idéal (aimants continus). Ce type de discrétisation est bien

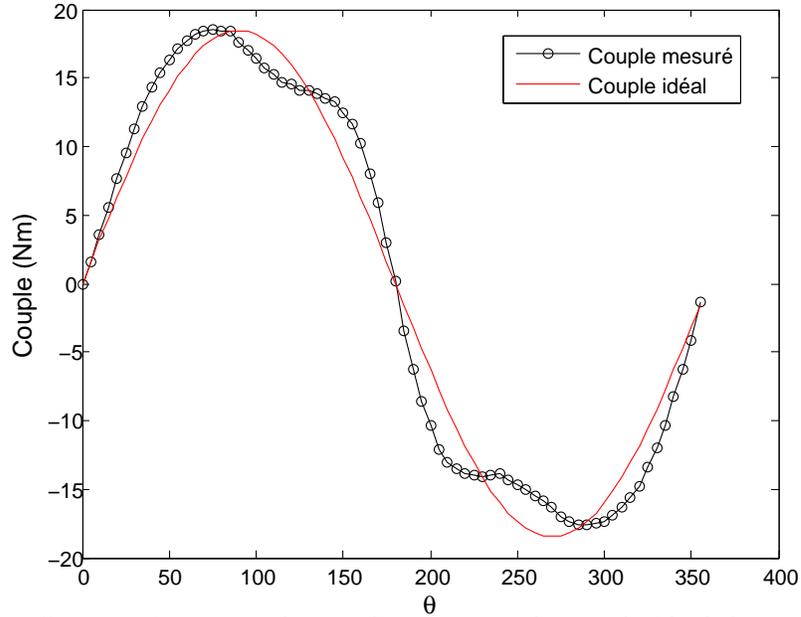


FIGURE 3.17 – Comparaison entre le couple mesuré et le couple idéal du second prototype.

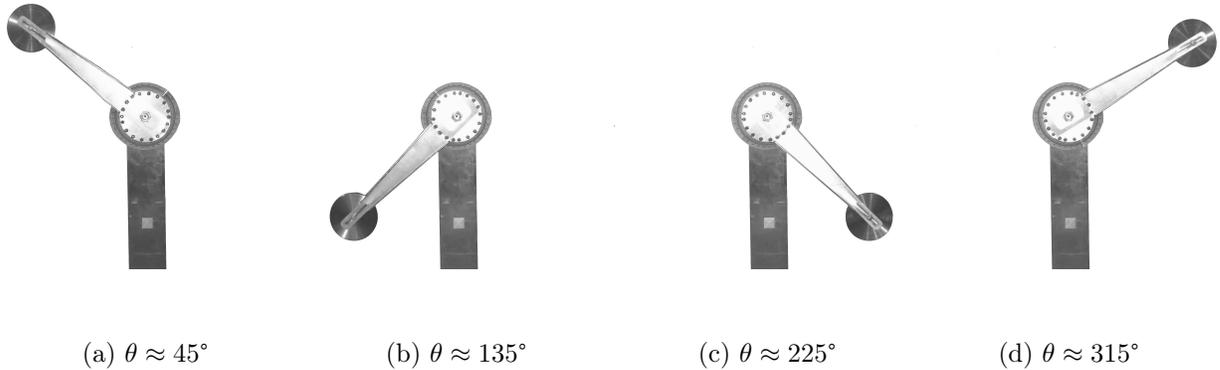


FIGURE 3.18 – Photographies du second prototype dans différentes positions d'équilibres.

adapté pour des petits mécanismes puisque des aimants standards peuvent ainsi être achetés. Lorsque la taille du mécanisme augmente, des aimants cylindriques personnalisés doivent être considérés. Pour les itérations futures, des aimants en forme d'arc de cercle fabriqués sur mesure seront plutôt considérés pour la construction de l'anneau extérieur.

Ensuite, les résultats montrent que l'utilisation d'un anneau plein comme aimant intérieur réduit efficacement les oscillations sur le couple produit. Les mesures sont plus continues en comparaison avec celles obtenues avec le premier prototype. Par contre, l'anneau plein apporte également plusieurs problématiques.

D'abord, étant relativement gros, l'anneau plein peut être difficile à fabriquer avec précision. En effet, l'aimant reçu du manufacturier ne respecte pas les tolérances de fabrication fournies

et son recouvrement présente quelques imperfections. Un des défauts de l'alésage de l'aimant est présenté à la Figure 3.19. Pour intégrer l'aimant dans le concept, le diamètre intérieur doit être uniforme et avoir un ajustement glissant précis avec le moyeu. Pour respecter ces critères, l'aimant a donc été être rectifié. Cette tâche doit être effectuée avec soin, car la grande puissance de l'aimant rend les interactions avec des structures métalliques dangereuses pour le machiniste ainsi que pour l'aimant.

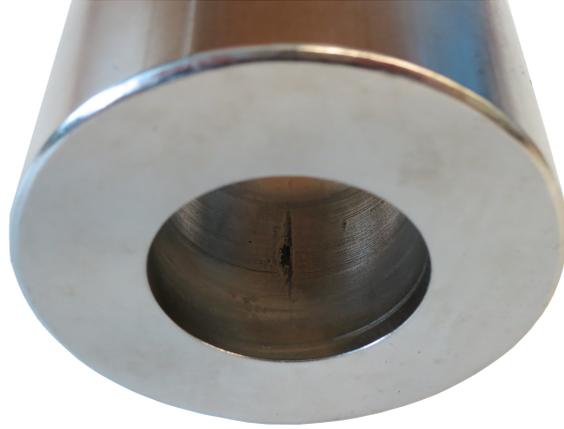


FIGURE 3.19 – Illustration d'un défaut de l'alésage de l'aimant utilisé pour le stator du second prototype.

L'aimant intérieur reçu présente aussi des signes d'erreurs dans l'orientation de sa magnétisation. En utilisant un teslamètre, le flux magnétique autour de l'aimant peut être mesuré. Ces mesures sont effectuées dans le plan central de l'aimant. La Figure 3.20 montre une vue du dessus avec les points où les mesures sont prises. Le teslamètre mesure le flux magnétique passant au travers d'une surface représentée par les rectangles noirs. La magnétisation théorique, représentée par la flèche noire, produit normalement un champ magnétique symétrique. Or, l'écart important qui est observé entre la mesure au point 1 et celle au point 3 indique que le champ magnétique autour de l'aimant est asymétrique. La Figure 3.21 présente une estimation de la répartition réelle du champ magnétique autour de l'aimant. Cette erreur peut causer les irrégularités perçues dans le couple mesuré de la Figure 3.17. Une discrétisation de l'anneau intérieur peut permettre une magnétisation plus facile des aimants et ainsi minimiser le risque que ce type d'erreur survienne.

### 3.3 Troisième itération

Dans les deux itérations précédentes, différentes méthodes de conception et de discrétisation ont été testées. Les conclusions tirées de l'analyse de ces prototypes permettent une meilleure conception pour le prototype final. Cette conception est détaillée dans la présente section.

Cette itération est conçue dans le but d'être intégrée directement sur un robot de l'IREQ

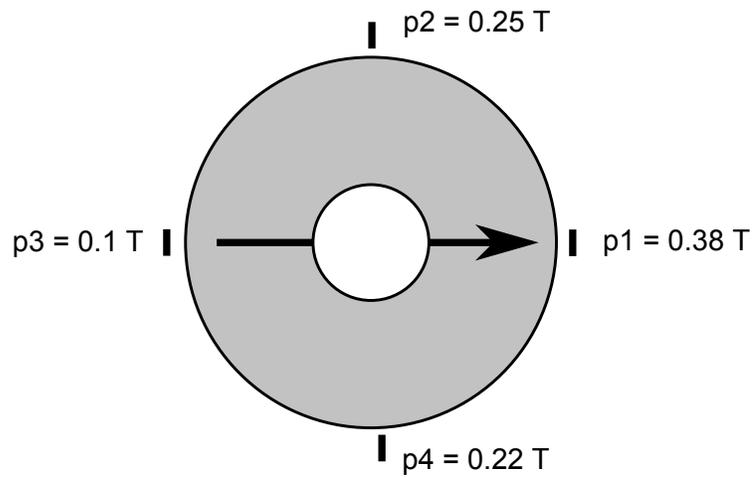


FIGURE 3.20 – Mesures du flux magnétique, prises dans le plan central de l’aimant intérieur avec un teslamètre (présenté dans l’annexe B).

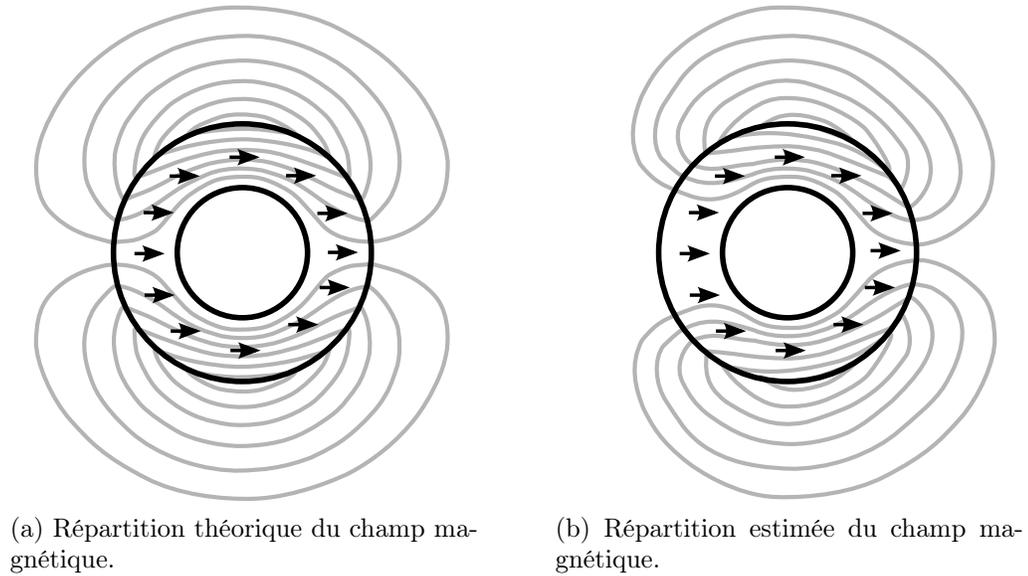


FIGURE 3.21 – Comparaison entre les répartitions théorique et estimée du champ magnétique autour de l’aimant intérieur du second prototype.

pour équilibrer une partie importante du couple perçu par la seconde articulation. Cet axe supporte une charge gravitationnelle maximale de 280Nm lorsque le bras est positionné à l’horizontale en pleine extension. Le mécanisme d’équilibrage vise une compensation d’environ 70% de cette charge. De plus, les dimensions hors-tout du prototype sont choisies dans le but de correspondre à la forme du robot.

### 3.3.1 Agencement d'aimants

Pour maximiser le couple produit, la troisième itération utilise une discrétisation en forme de segment d'arc. La densité des aimants est ainsi améliorée comparativement aux itérations précédentes, mais plusieurs types d'aimants fabriqués sur mesure sont nécessaires. L'arrangement d'aimants du prototype est illustré à la Figure 3.22.

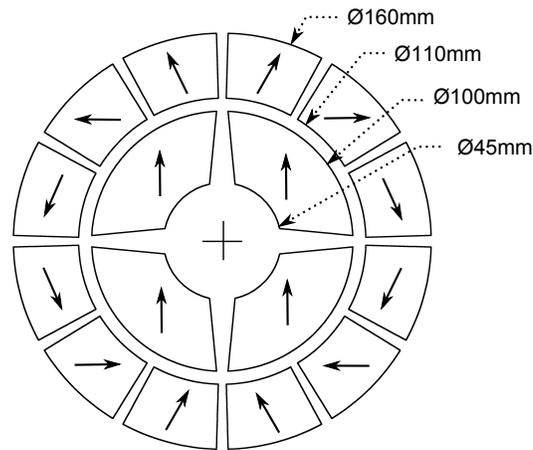


FIGURE 3.22 – Arrangement d'aimants utilisé pour générer le couple du troisième prototype.

L'anneau extérieur est constitué de 12 aimants en arc de cercle. Grâce à une symétrie dans la configuration, six types d'aimants différents sont requis pour compléter l'arrangement. La forme des aimants extérieurs ainsi que les six orientations de la magnétisation sont présentées à la Figure 3.23.

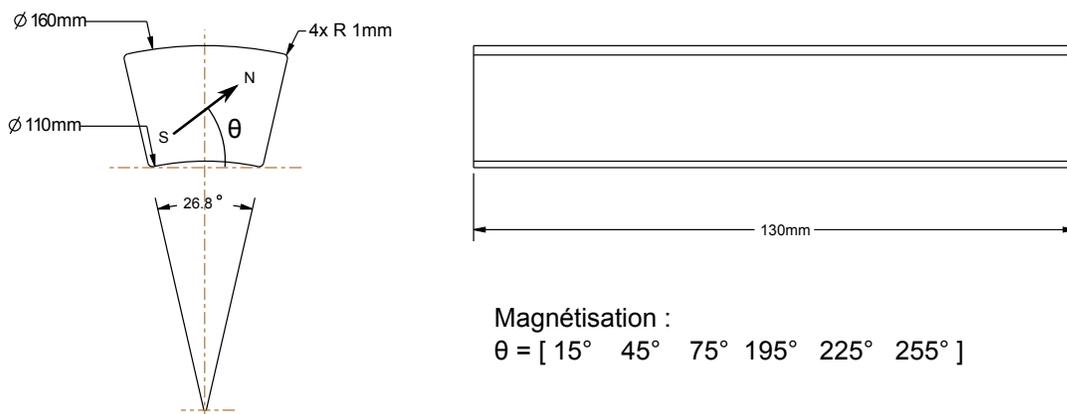


FIGURE 3.23 – Aimant en arc de cercle constituant l'anneau extérieur du troisième prototype.

L'anneau intérieur est également discrétisé en arc de cercle. Cette discrétisation permet l'uti-

lisation d'aimants plus petits, facilitant ainsi leur production, leur magnétisation ainsi que leur manutention. Quatre aimants sont requis pour compléter l'arrangement, tandis que deux orientations de magnétisation ont été utilisées. La forme des aimants intérieurs ainsi que l'orientation de leur magnétisation sont présentées à la Figure 3.24. Ces aimants ne forment pas un arc de cercle parfait. En effet, l'arc intérieur est plus court que l'arc extérieur. Cette modification est effectuée dans le but d'améliorer la résistance mécanique de la matrice qui supporte les aimants.

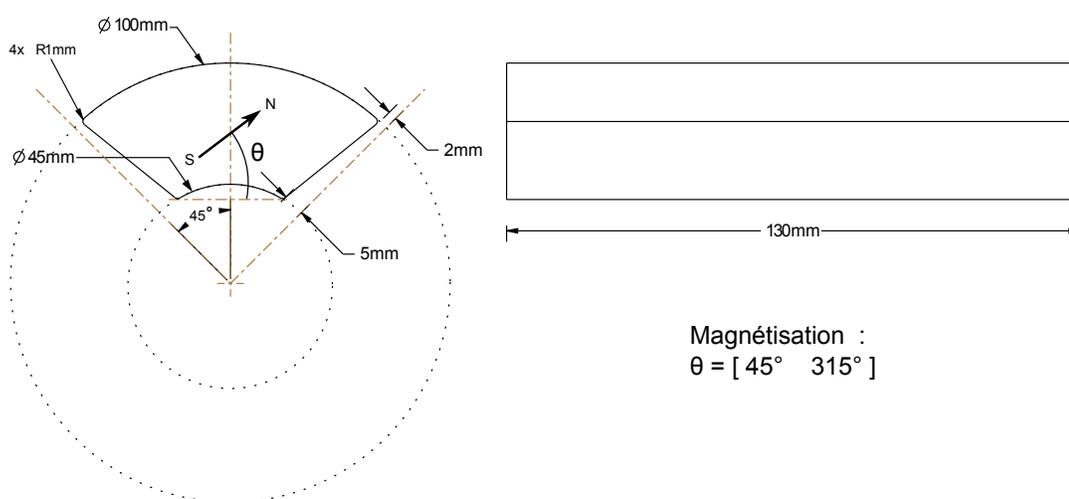


FIGURE 3.24 – Aimant en arc de cercle constituant l’anneau intérieur du troisième prototype.

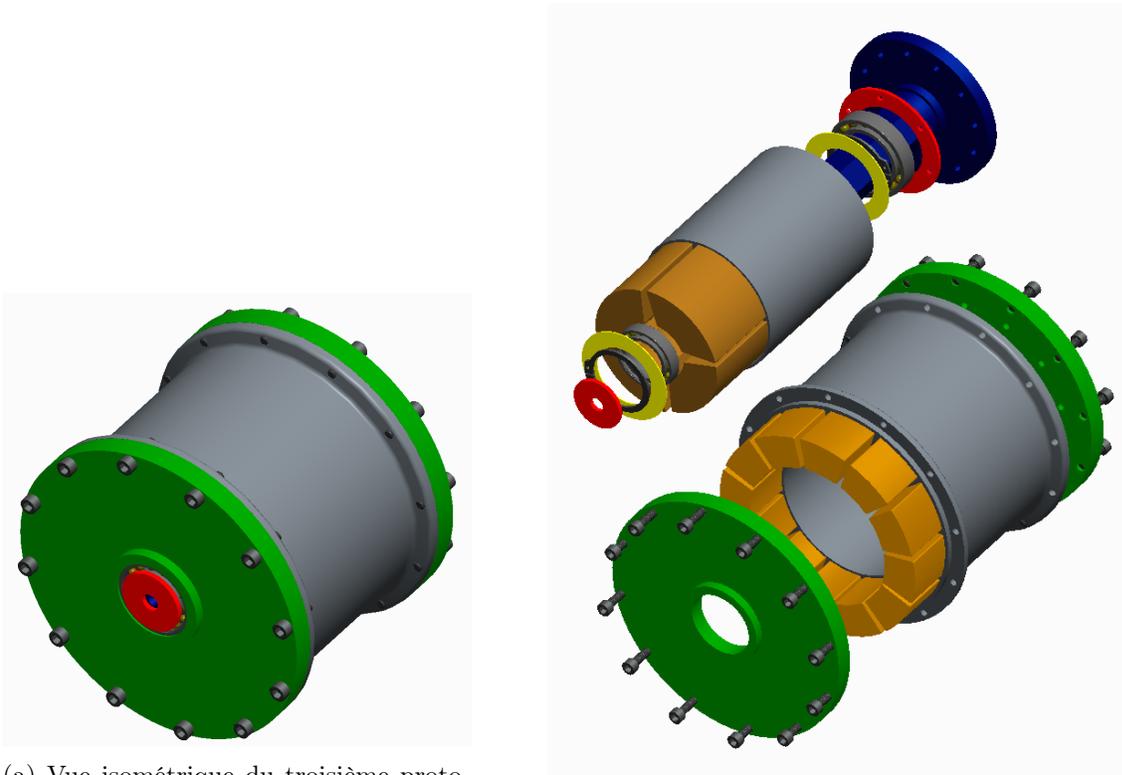
TABLE 3.3 – Propriétés des aimants utilisés pour le troisième prototype.

Grade	N45-H
$B_r$	1.346 T
$H_{ic}$	1457 kA/m
Recouvrement	NiCuNi
Coût total	2722.00 \$

Afin de limiter les dangers de démagnétisation et d’éviter l’intégration de pièces additionnelles dans la géométrie, un grade d’aimant très résistant à la démagnétisation est sélectionné. Les propriétés de ce grade sont résumées dans le Tableau 3.3. Elles sont tirées des courbes de démagnétisation présentées à la Figure A.5 de l’annexe. L’utilisation de segments d’arc aide également à réduire la démagnétisation. En étant plus gros, les aimants subissent un champ démagnétisant réduit.

### 3.3.2 Conception mécanique

Le troisième prototype vise une conception plus robuste et simplifiée par rapport à l'itération précédente. Il est conçu dans l'optique d'une intégration axiale à l'articulation et pour reprendre un couple pur. Une vue isométrique et une vue explosée sont d'abord introduites à la Figure 3.25.



(a) Vue isométrique du troisième prototype.

(b) Vue explosée du troisième prototype.

FIGURE 3.25 – Troisième prototype d'équilibrage magnétique.

La conception du prototype est détaillée à la Figure 3.26. Le mécanisme est rattaché à la base du robot grâce au flanc de droite (1) et à la membrure mobile du robot grâce à l'arbre de transmission (2). Dans cette configuration, l'anneau extérieur représente le stator, tandis que l'anneau intérieur représente le rotor. Ces rôles sont toutefois interchangeables, selon la méthode d'intégration sélectionnée.

L'arbre (2) possède une forme hexagonale qui lui permet de transmettre le couple à la matrice intérieure (3). Les aimants de l'anneau d'Halbach intérieur sont insérés dans cette matrice et ils sont contraints en translation grâce à deux anneaux élastiques. La rotation par rapport au stator est assurée par une portée de roulement placée sur l'arbre de transmission. Le roulement à billes droit et le flanc droit (1) sont surdimensionnés dans le but de reprendre la majorité des efforts internes causés par les interactions entre les aimants. Le roulement et le flanc gauche

(4) servent plutôt à guider la rotation. Le roulement droit est pleinement contraint avec une butée (5) vissée dans le flanc, tandis que le roulement gauche possède un degré en translation non contraint afin de pouvoir accommoder les jeux fonctionnels.

Les deux flancs sont vissés dans la matrice extérieure (6), qui a un rôle structural. Les aimants sont glissés dans cette matrice et maintenus en place par les flancs. Une image des deux matrices et des aimants assemblés est présentée à la Figure 3.27.

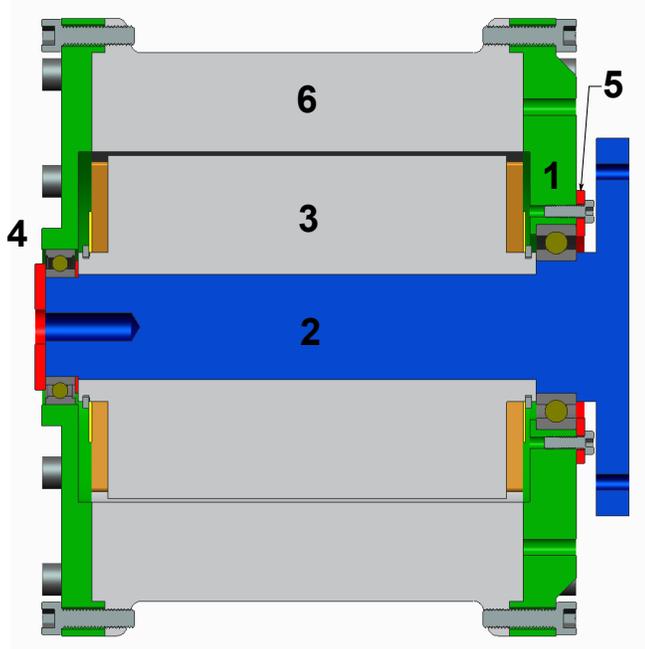


FIGURE 3.26 – Vue en coupe détaillée du troisième prototype.

### 3.3.3 Intégration

Pour intégrer le module de compensation statique développé au bras robotisé du robot UMIS de l'IREQ, trois pièces additionnelles sont nécessaires. Ces pièces sont illustrées dans la vue en coupe de l'articulation du robot, présentée à la Figure 3.28. La pièce 3 est fixée sur la structure du robot et supporte la pièce 2, qui contraint la rotation du flanc du prototype. La pièce 1 est fixée sur l'arbre de transmission du mécanisme et transmet la rotation de la membrure du robot au rotor. Pour installer le mécanisme, il suffit de positionner le bras dans une position verticale. Ensuite, la pièce 2 est vissée dans la membrure, tandis que la pièce 1 est vissée dans la pièce 3. Ces pièces sont préalablement vissées sur le mécanisme d'équilibrage. La précision générale des pièces requises pour l'intégration est importante, car une petite erreur dans la coaxialité de l'assemblage peut générer des forces importantes et imprévues dans le prototype. Finalement, une photographie du prototype installé sur le robot est présentée à la Figure 3.29.



FIGURE 3.27 – Intérieur du troisième prototype, une fois assemblé.

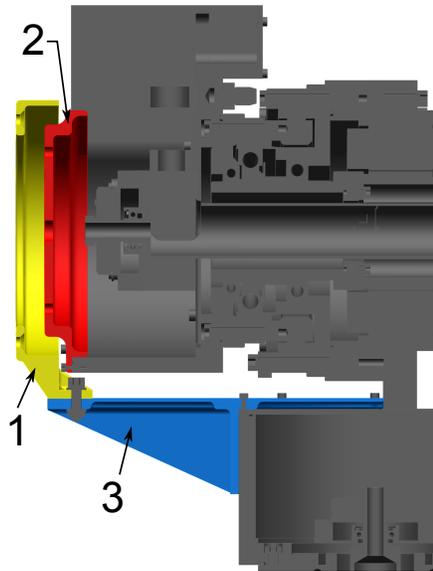


FIGURE 3.28 – Pièces nécessaires pour l'intégration du prototype au robot UMIS.

### 3.3.4 Résultats

Afin de quantifier l'effet du mécanisme sur le couple perçu par le moteur de l'articulation, le courant consommé par ce dernier est mesuré pour une trajectoire avec et sans module de compensation statique. Cette trajectoire représente une rotation de  $90^\circ$  de la seconde articulation du robot. Le bras est alors en pleine extension et passe d'une configuration horizontale où le couple est maximal à une configuration verticale où le couple est minimal. La trajectoire est répétée en montée et en descente. Pour se rapprocher le plus possible d'un comportement sta-

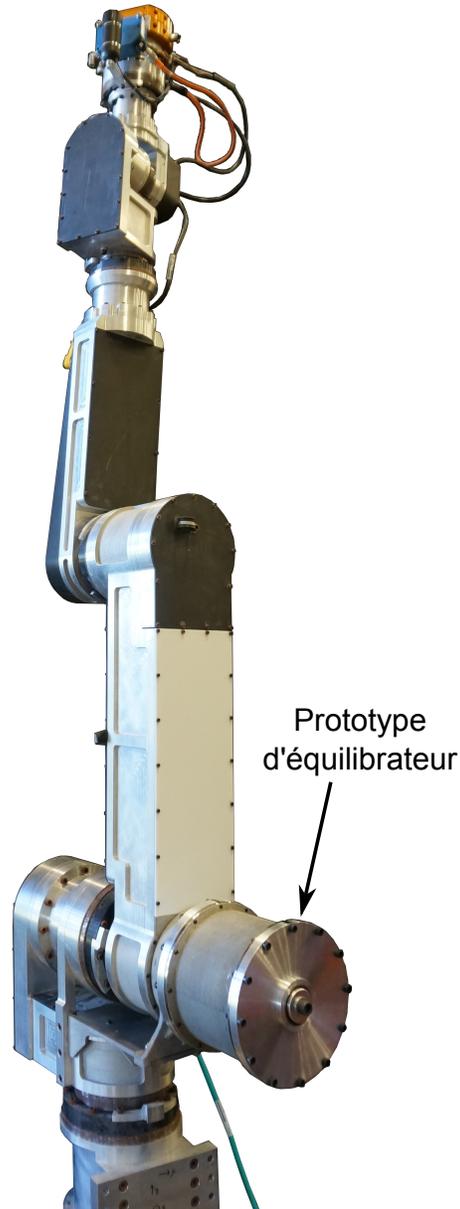
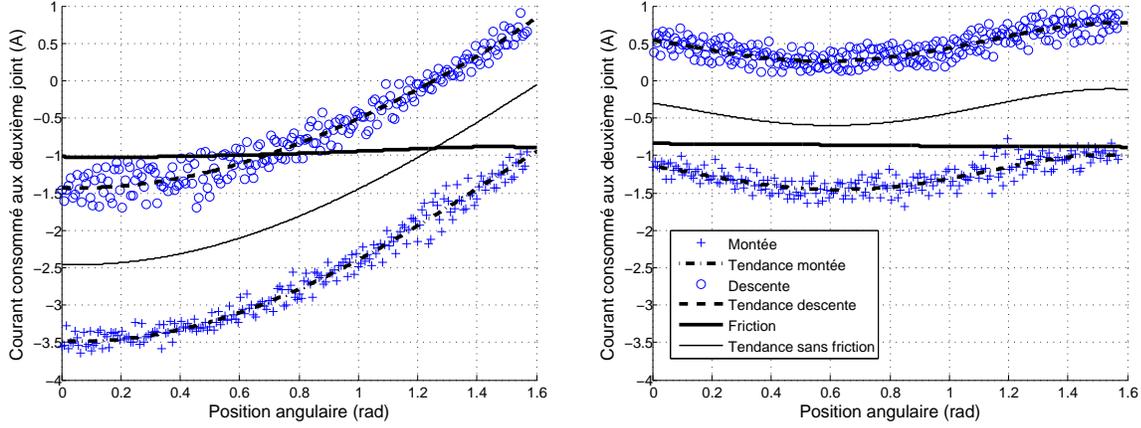


FIGURE 3.29 – Troisième prototype, intégré à l’articulation du robot.

tique, la trajectoire est effectuée très lentement (la trajectoire est complétée en 25 secondes). De cette façon, le couple associé à l’inertie des membrures est minimisé. Le courant consommé par le moteur caractérise donc directement la charge gravitationnelle perçue par le robot et la friction du joint.

Les mesures du courant consommé par le moteur du deuxième joint pour une trajectoire en montée et en descente sont présentées à la Figure 3.30. Pour mieux visualiser le comportement, une courbe de tendance est ajoutée sur ces mesures de courant. Les courbes résultantes incluent la friction importante de l’articulation. Pour déterminer le couple réel, produit par le



(a) Trajectoire sans module de compensation.

(b) Trajectoire avec module de compensation.

FIGURE 3.30 – Mesure du courant consommé par le moteur du second joint avec la courbe de tendance associé et estimation de la friction.

mécanisme de compensation, cette friction doit être retirée des mesures. Pour ce faire, la friction peut être estimée en utilisant la trajectoire en montée et en descente grâce aux relations suivante :

Le couple en montée est donné par :

$$T_m = T_g + T_f \quad (3.1)$$

où  $T_g$  est le couple gravitationnel, tandis que  $T_f$  est le couple de friction. Ensuite, le couple en descente est donné par :

$$T_d = T_g - T_f. \quad (3.2)$$

En soustrayant le couple en descente au couple en montée, le couple de friction est estimé avec

$$T_f = \frac{T_m - T_d}{2}. \quad (3.3)$$

De plus, en additionnant le couple en montée et en descente, le couple gravitationnel réel est estimé, c'est-à-dire

$$T_g = \frac{T_m + T_d}{2}. \quad (3.4)$$

Ce modèle de friction simplifié prend comme hypothèse que la friction est constante, peu importe la configuration du robot, le couple perçu ou la trajectoire effectuée. Cette hypothèse peut être justifiée par la ressemblance des courbes du courant en montée et en descente. Les frictions estimées avec une trajectoire avec et sans compensation sont tracées à la Figure 3.30. La caractéristique de friction obtenue n'est pas tout à fait constante. De plus, la friction estimée avec ce modèle est plus grande pour une trajectoire non compensée. Ce résultat démontre qu'une composante de la friction est proportionnelle au couple perçu. Toutefois, ces différences sont faibles par rapport au courant maximal.

En utilisant ce modèle de friction, la charge gravitationnelle perçue par le moteur pour des articulations avec et sans compensation, est déterminée. Les résultats sont présentés par la courbe de tendance sans friction de la Figure 3.30. À partir de ces informations, le couple produit par le prototype d'équilibrateur peut être approximé. Tout d'abord sachant que la charge gravitationnelle à l'articulation est de 280Nm lorsque le bras est dans une position angulaire de zéro, le courant consommé par le moteur peut être transformé en couple. Ensuite, en soustrayant le couple de l'articulation compensée à celui de l'articulation non compensée, le couple produit par le mécanisme est obtenu. Ce couple est finalement comparé avec la charge gravitationnelle à la Figure 3.31.

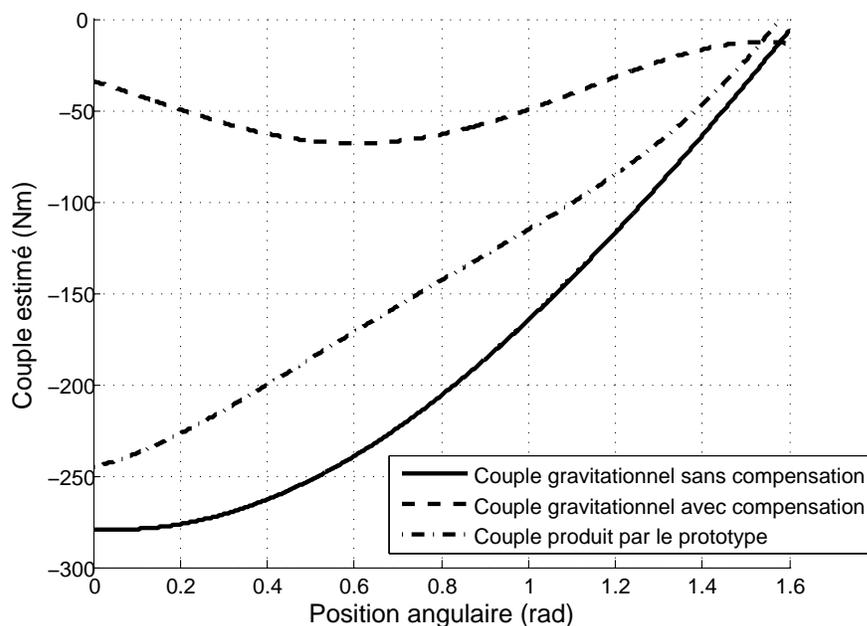


FIGURE 3.31 – Couple produit par le module de compensation magnétique, comparé au couple idéal.

### 3.3.5 Discussion

Le but de l'itération finale est de fournir une compensation statique partielle au deuxième axe du manipulateur du robot UMIS. Le couple d'équilibrage obtenu, présenté à la Figure 3.31, est très satisfaisant, puisqu'il coupe drastiquement le courant nécessaire pour effectuer une rotation de l'axe visé. Bien qu'une erreur existe entre la caractéristique de couple obtenue et celle du couple idéal, cette différence affecte peu la compensation statique. Si cette dernière est assez constante, le contrôleur du robot n'aura pas de difficulté à s'adapter. Il bénéficiera donc de tous les avantages de la compensation.

L'utilisation d'aimants en arc de cercle simplifie grandement la construction du prototype. Toutefois, comme les aimants sont volumineux, un gabarit est nécessaire pour les insérer dans leur matrice. Autrement, les forces d'interactions élevées compliquent leur manipulation. En effet, les déplacements incontrôlés d'un aimant peuvent causer le bris de ce dernier ou encore des blessures.

La qualité des aimants utilisés est assez bonne. Dans certains cas, l'orientation de la magnétisation varie légèrement par rapport à la valeur théorique, mais elle reste néanmoins acceptable. La combinaison de ces erreurs peut avoir causé l'irrégularité dans le couple obtenu.

Bien que le mécanisme résultant soit compact, sa masse (22 kg) est élevée. Son utilisation convient donc très bien à une articulation immobile dans la direction de la gravité. Cela dit, pour intégrer le concept aux articulations subséquentes, une meilleure optimisation de la masse serait nécessaire. Sans quoi, la masse ajoutée à une membrure mobile augmenterait de façon importante le couple perçu par les articulations en amont.

Malgré tout, le concept d'équilibrage statique fournit une solution adéquate pour compenser des charges gravitationnelles élevées. Sa compacité et sa simplicité rendent son utilisation très facile. Par contre, l'utilisation d'aimants performants et fabriqués sur mesure engendre des coûts largement supérieurs aux techniques d'équilibrage conventionnelles avec ressorts ou contrepoids.

## 3.4 Validation des analyses par éléments finis

Dans cette section les résultats obtenus à partir des prototypes sont comparés avec ceux obtenus par simulation avec le logiciel d'analyse par éléments finis COMSOL Multiphysics. La comparaison réalisée pour le premier prototype est présentée à la Figure 3.32, tandis que celle réalisée pour le second prototype est présentée à la Figure 3.33. Dans ces deux cas, une importante différence entre le couple simulé et le couple mesuré est observée. Ensuite, la comparaison pour le troisième prototype est présentée à la Figure 3.34. Dans ce cas, la différence perçue entre le couple simulé et le couple mesuré est moins importante que celle observée pour les deux premiers prototypes. Les causes probables de l'erreur dans les résultats

des analyses par éléments finis sont détaillées dans la présente section.

L'importante différence observée entre le couple simulé et le couple mesuré rend la prédiction du couple produit difficile. Par contre, les résultats des simulations sont cohérents et caractérisent bien le comportement réel. Pour ces raisons, les conclusions tirées dans le second chapitre, concernant l'optimisation de la géométrie, restent valides.

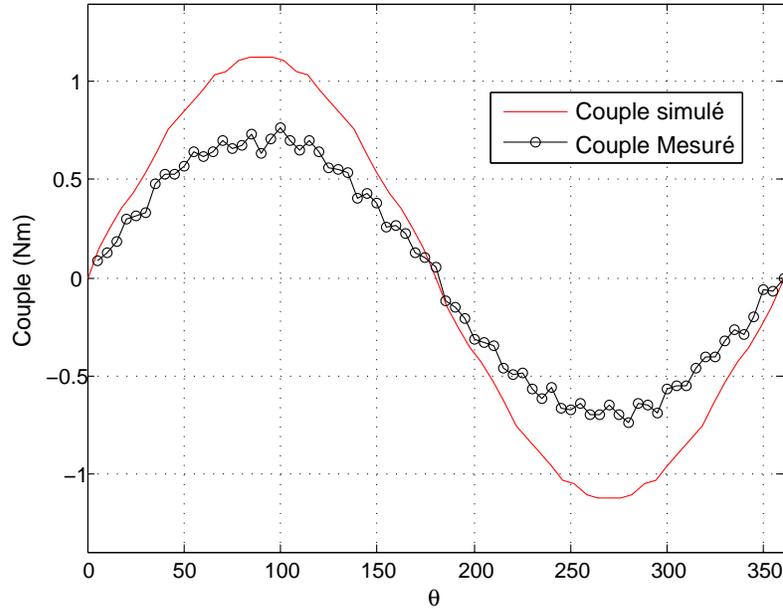


FIGURE 3.32 – Comparaison entre le couple simulé et le couple mesuré du premier prototype.

Deux sources d'erreurs peuvent causer la différence observée entre la pratique et les résultats des simulations.

En premier lieu, les aimants utilisés peuvent présenter plusieurs défauts de fabrication ou être mal positionnés dans l'arrangement. Dans le cas du premier prototype, l'orientation des aimants à l'intérieur des matrices est peu précise puisqu'aucune référence n'existe pour les positionner. La position des pôles sur les aimants est déduite avec une boussole et l'alignement dans la matrice est validé visuellement. De plus, étant donné la tolérance de fabrication sur les pièces en prototypage rapide, l'ajustement serré nécessaire pour maintenir l'orientation des aimants varie de trou en trou. Certains aimants peuvent donc pivoter dans leur alésage, induisant ainsi une erreur supplémentaire dans leur orientation. Dans le cas du second prototype, les aimants sont positionnés précisément dans les matrices, mais ils comportent plusieurs défauts de fabrication. Effectivement, l'asymétrie dans la magnétisation du cylindre d'Halbach intérieur semble aplatir la courbe du couple mesuré et réduire le couple maximal produit par le prototype.

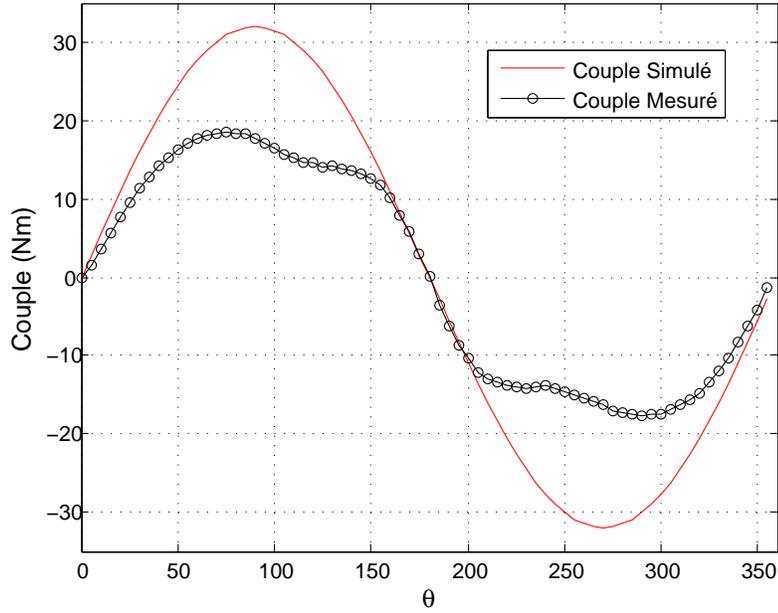


FIGURE 3.33 – Comparaison entre le couple simulé et le couple mesuré du second prototype.

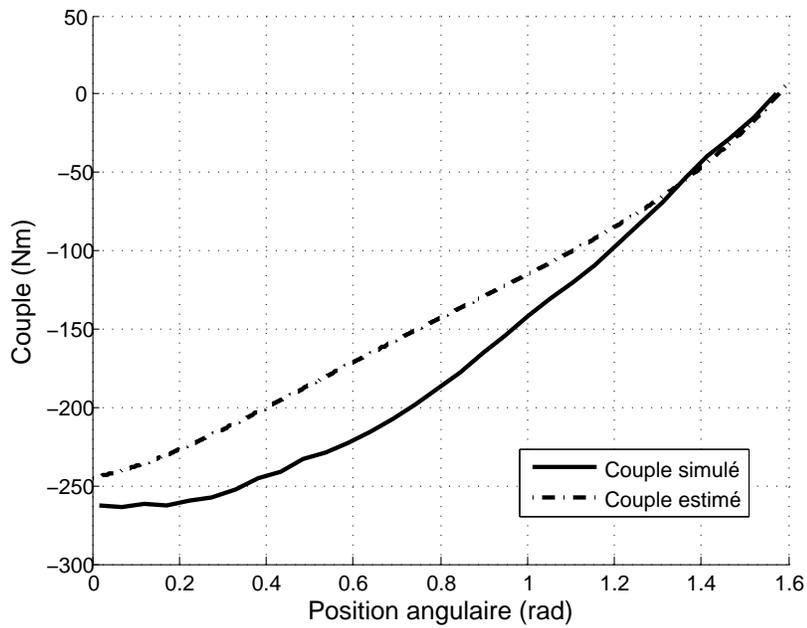


FIGURE 3.34 – Comparaison entre le couple simulé et le couple mesuré du troisième prototype.

En deuxième lieu, le modèle d'aimant utilisé dans les simulations peut également induire une erreur dans les couples simulés pour chaque prototype. Étant donné la nature complexe des interactions tridimensionnelles entre les aimants, le comportement de ces derniers est linéarisé sur leur plage d'utilisation. Cette approximation est généralement bonne, puisque la plage d'utilisation normale d'un aimant néodyme est quasi linéaire. Par contre, cette simplification ne prend pas en compte les effets de démagnétisation. Pour tenir compte de cet effet, les courbes de démagnétisation doivent être intégrées dans la boucle de rétroaction du solveur, ce qui augmente la complexité des simulations. Cela dit, lorsque la démagnétisation est intégrée aux simulations du comportement des prototypes, ces dernières ne convergent pas. Un travail approfondi devra être effectué sur ces simulations avant de pouvoir simuler précisément le comportement du module de compensation statique magnétique.

La différence entre les simulations et la pratique est plus élevée lorsqu'une discrétisation cylindrique est utilisée. Ce type de discrétisation pourrait donc résulter en une géométrie plus difficile à modéliser numériquement. Cette hypothèse n'est toutefois pas testée.

### 3.5 Conclusion

Le troisième chapitre a présenté les trois prototypes développés dans le cadre de ce mémoire. Les deux premières itérations ont été conçues dans le but de tester différents concepts en lien avec la forme des aimants et le type de discrétisation utilisé. La dernière itération, quant à elle, a été intégrée sur le manipulateur du robot UMIS.

Le premier prototype utilisait des pièces en prototypage rapide et des aimants cylindriques très simples afin de prouver la viabilité du concept d'équilibrage statique magnétique. Les résultats obtenus avec ce prototype conçu pour équilibrer un balancier simple se sont avérés suffisamment satisfaisants pour que les travaux utilisant l'équilibrage statique magnétique soient poursuivis.

Le second prototype avait pour but de vérifier la capacité du concept présenté à équilibrer une charge plus représentative de la réalité. Comme c'était le cas pour la première itération, l'anneau extérieur de ce prototype utilisait une discrétisation cylindrique. Pour l'anneau intérieur, l'utilisation d'un seul aimant, magnétisé diamétralement, était testée. Cet aimant s'est avéré problématique, puisqu'il comportait plusieurs défauts de fabrication. En effet, sa magnétisation n'était pas symétrique et son recouvrement n'était pas régulier. Ces défauts peuvent avoir été causés par la taille importante de l'aimant. Une discrétisation aurait pu limiter ce genre de problèmes.

Finalement, en utilisant les conclusions tirées des itérations précédentes, le prototype final a été construit. Celui-ci utilisait une discrétisation en forme d'arc de cercle pour les anneaux extérieur et intérieur. La discrétisation de l'anneau intérieur a été retenue, puisqu'elle réduisait

la complexité de fabrication des aimants, permettant ainsi de minimiser le risque d'erreurs de fabrication. Ce prototype a ensuite été testé sur la deuxième articulation du robot UMIS. Les résultats obtenus sont satisfaisants puisque la presque totalité de la charge gravitationnelle de l'articulation a pu être équilibrée.

# Conclusion

Ce mémoire a présenté le développement d'un concept d'équilibrage statique magnétique développé en partenariat avec l'Institut de recherche d'Hydro-Québec. L'utilisation d'aimants pour produire le couple requis a permis d'équilibrer une charge gravitationnelle importante, tout en conservant un mécanisme compact et mécaniquement simple.

Dans le premier chapitre, les aimants permanents ont été étudiés dans le but d'obtenir un type d'interaction pouvant générer un couple sinusoïdal correspondant à une charge gravitationnelle. Parmi les configurations étudiées, l'utilisation de cylindres d'Halbach s'est avérée être la voie la plus prometteuse. En effet, en imbriquant un premier cylindre dont le champ magnétique était concentré à l'extérieur dans un second cylindre dont le champ magnétique était concentré à l'intérieur, un couple correspondant parfaitement à la gravité a été obtenu. Le mécanisme obtenu à l'aide de cette méthode était très compact comparativement à ceux obtenus avec une méthode utilisant des contrepoids ou des ressorts. De plus, comme les cylindres sont concentriques, le concept peut être intégré de façon axiale à une articulation, ce qui facilite son utilisation.

Dans le second chapitre, le concept retenu était étudié afin d'obtenir des lignes directrices, permettant un concept réalisable en pratique. Pour commencer, le choix d'aimants permanents a été justifié. Parmi les options présentées, les aimants en terre rare ont constitué le meilleur choix pour la construction de la géométrie. Il a été établi que, si le prototype fonctionne à une température ambiante relativement faible, les aimants au néodyme sont la meilleure option. Par contre, si la température d'opération est élevée, l'utilisation d'aimants au Samarium-Cobalt, qui se dégradent moins rapidement, peut être justifiée malgré leur coût plus élevé.

Ensuite, une étude paramétrique de la géométrie d'aimants a été effectuée dans le but de maximiser le couple produit. Cette étude a permis de déterminer des ratios avantageux entre certaines dimensions. Par exemple, un ratio élevé entre la longueur de la géométrie et son diamètre augmente le couple produit. De plus, un ratio de 0.83 entre l'épaisseur du cylindre extérieur et celle du cylindre intérieur maximise le couple. Toutefois, la forme peut être adaptée à l'application visée.

Par la suite, le processus de discrétisation d'aimants, ainsi que ses avantages et ses inconvé-

nients ont été analysés. La géométrie d'aimants peut être complexe à fabriquer étant donné la magnétisation non linéaire. Pour contourner ce problème, les cylindres d'Halbach peuvent être segmentés en aimants plus simples, magnétisés dans une seule direction. Par contre, cette discrétisation peut réduire le couple produit.

Finalement, suite à la conception du profil d'aimants, une analyse de la démagnétisation a dû être effectuée. Il a été établi qu'un champ magnétique trop élevé peut causer des dommages permanents.

Dans le troisième chapitre, la conception du prototype final a été détaillée. Tout d'abord, deux itérations ont été conçues. Ces versions simplifiées d'équilibrateur ont permis de vérifier la viabilité du concept présenté et de tester différents types de discrétisations. Suite aux conclusions tirées de l'analyse de ces itérations, un concept final a été construit et intégré sur un manipulateur robotique. Le prototype résultant fournit un équilibrage partiel adéquat à l'articulation visée. De plus, le mécanisme est compact et son intégration est grandement facilitée comparativement aux techniques standards.

## Travaux futurs

Le concept d'équilibrage magnétique présenté est une nouveauté dans la littérature. Par conséquent, une grande variété de travaux futurs sont possibles afin d'améliorer le concept.

D'abord, l'amélioration des résultats de simulation permettrait de faciliter la conception d'un mécanisme en accélérant le processus de conception de la géométrie d'aimants. En effet, des simulations plus précises permettraient une prédiction adéquate du couple produit par les cylindres d'Halbach imbriqués. Pour améliorer ces simulations, des modèles d'aimants plus complexes sont nécessaires.

Ensuite, des optimisations plus poussées de la géométrie pourraient augmenter davantage le couple produit pour un volume donné. Pour ce faire, plus de paramètres et de critères secondaires doivent être introduits dans l'optimisation.

Dans le cadre de ce mémoire, les aimants sont optimisés dans le but d'obtenir le mécanisme le plus compact possible. Cependant, l'ajout d'un objectif secondaire comme la minimisation de la masse, pourrait permettre d'obtenir un mécanisme mieux adapté pour certaines applications. Par exemple, un mécanisme optimisé pour l'intégration à un degré d'actionnement mobile pourrait être conçu.

Le concept permet des rotations illimitée. Or, peu de manipulateurs possèdent une plage angulaire aussi grande. En permettant à l'optimisation de modifier l'orientation de la magnétisation des aimants, une nouvelle caractéristique de couple pourrait être obtenue. De cette façon, un couple plus élevé pourrait être atteint pour une plage angulaire plus petite.

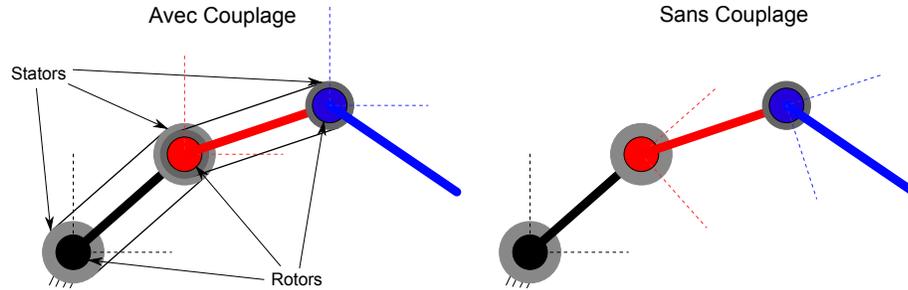


FIGURE 3.35 – Couplage des stators avec un système de câbles et de poulies afin d’équilibrer plusieurs degrés de liberté.

L’équilibrage statique magnétique présenté est intégré à une articulation qui ne bouge pas par rapport à la gravité. Le concept pourrait toutefois être exporté aux articulations subséquentes. Cela dit, comme le couple perçu à une articulation varie en fonction de la position des articulations en aval, les mécanismes d’équilibrage devraient être couplés en reliant les stators. De cette façon, les référentiels de chaque articulation resteraient toujours alignés avec la gravité. Cette condition pourrait être facilement obtenue avec un système de poulies et de câbles ou courroies crantées. Un schéma démontrant l’intégration d’un couplage est présenté dans la Figure 3.35. Cette pratique imite les parallélogrammes fréquemment utilisés pour équilibrer plusieurs degrés de liberté avec des ressorts. Étant donné que le poids actuel du prototype est relativement élevé, une meilleure optimisation de la masse est nécessaire avant de pouvoir équilibrer plusieurs degrés de liberté successifs.

L’équilibrage statique magnétique présente beaucoup de potentiel. Son utilisation permet d’ajouter une compensation à un manipulateur qui, autrement, ne pourrait pas bénéficier de cette technologie. De plus, bien que le concept ait été développé pour des manipulateurs robotiques, il pourrait facilement être exporté à plusieurs autres applications.



## Annexe A

# Propriétés des aimants NdFeB

Cette annexe présente les grades standards d'aimants néodymes, ainsi que les courbes de démagnétisation des différents grades d'aimants utilisés dans ce mémoire.

**Chinese Standard - commonly used globally, especially in EU**

Minimum Values									
Material		Br		Hcb (Hc)		Hcj (Hci)		(BH)max	
		mT	G	kA/m	Oe	kA/m	mT	G	kA/m
N27		1,030	10,300	796	10,000	955	12,000	119	25
N30		1,080	10,800	796	10,000	955	12,000	223	28
N33		1,130	11,300	836	10,500	955	12,000	247	31
N35		1,170	11,700	868	10,900	955	12,000	263	33
N38		1,220	12,200	899	11,300	955	12,000	287	36
N40		1,250	12,500	907	11,400	955	12,000	302	38
N42		1,280	12,800	915	11,500	955	12,000	318	40
N45		1,320	13,200	923	11,600	955	12,000	342	43
N48		1,380	13,800	923	11,600	955	12,000	366	46
N50		1,400	14,000	796	10,000	876	11,000	382	48
N52		1,430	14,300	796	10,000	876	11,000	398	50
N30	M	1,080	10,800	796	10,000	1,115	14,000	223	28
N33	M	1,130	11,300	836	10,500	1,115	14,000	247	31
N35	M	1,170	11,700	868	10,900	1,115	14,000	263	33
N38	M	1,220	12,200	899	11,300	1,115	14,000	286	36
N40	M	1,250	12,500	923	11,600	1,115	14,000	302	38
N42	M	1,280	12,800	955	12,000	1,115	14,000	318	40
N45	M	1,320	13,200	995	12,500	1,115	14,000	342	43
N48	M	1,380	13,800	1,027	12,900	1,115	14,000	366	46
N50	M	1,400	14,000	1,033	13,000	1,115	14,000	382	48
N30	H	1,080	10,800	796	10,000	1,355	17,000	223	28
N33	H	1,130	11,300	836	10,500	1,355	17,000	247	31
N35	H	1,170	11,700	868	10,900	1,355	17,000	263	33
N38	H	1,220	12,200	899	11,300	1,355	17,000	286	36
N40	H	1,250	12,500	923	11,600	1,355	17,000	302	38

N42	H	1,280	12,800	955	12,000	1,355	17,000	318	40
N45	H	1,320	13,200	955	12,000	1,355	17,000	342	43
N48	H	1,370	13,700	995	12,500	1,355	17,000	366	46
N30	SH	1,080	10,800	804	10,100	1,590	20,000	223	28
N33	SH	1,130	11,300	844	10,600	1,590	20,000	247	31
N35	SH	1,170	11,700	876	11,000	1,590	20,000	263	33
N38	SH	1,220	12,200	907	11,400	1,590	20,000	286	36
N40	SH	1,250	12,500	939	11,800	1,590	20,000	302	38
N42	SH	1,280	12,800	987	12,400	1,590	20,000	318	40
N45	SH	1,320	13,200	1,003	12,600	1,590	20,000	342	43
N28	UH	1,020	10,200	764	9,600	1,990	25,000	207	26
N30	UH	1,080	10,800	812	10,200	1,990	25,000	223	28
N33	UH	1,130	11,300	852	10,700	1,990	25,000	247	31
N35	UH	1,180	11,800	860	10,800	1,990	25,000	263	33
N38	UH	1,220	12,200	899	11,300	1,990	25,000	287	36
N40	UH	1,250	12,500	899	11,300	1,990	25,000	302	38
N28	EH	1,040	10,400	780	9,800	2,385	30,000	207	26
N30	EH	1,080	10,800	812	10,200	2,385	30,000	223	28
N33	EH	1,140	11,400	836	10,500	2,385	30,000	247	31
N35	EH	1,170	11,700	876	11,000	2,385	30,000	263	33
N38	EH	1,220	12,200	899	11,300	2,385	30,000	287	36
N33	VH / AH	1,130	11,300	836	10,500	2,706	34,000	239	30

FIGURE A.1 – Grades standards des aimants néodymes (tiré de NdFeB-info (2015)).

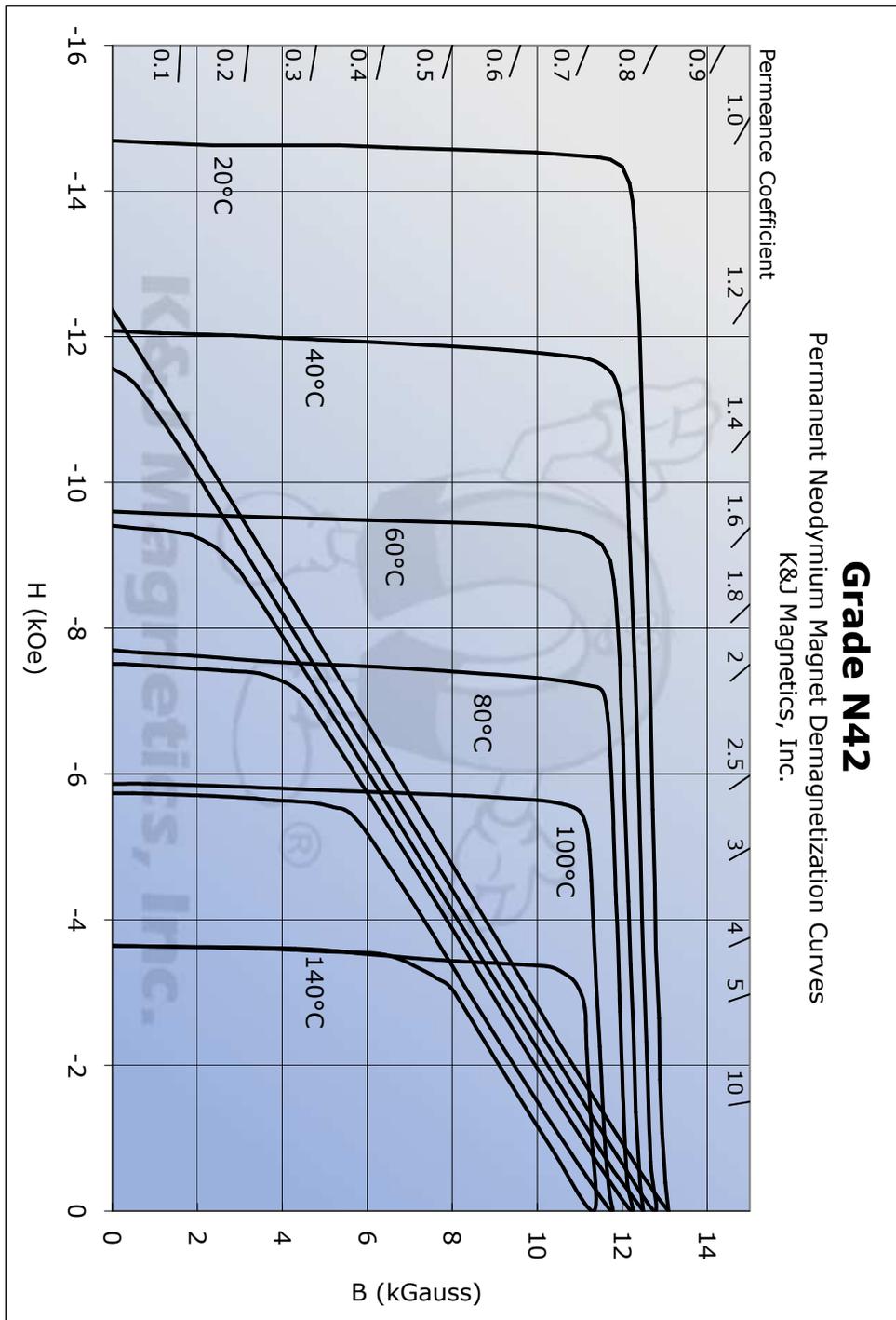
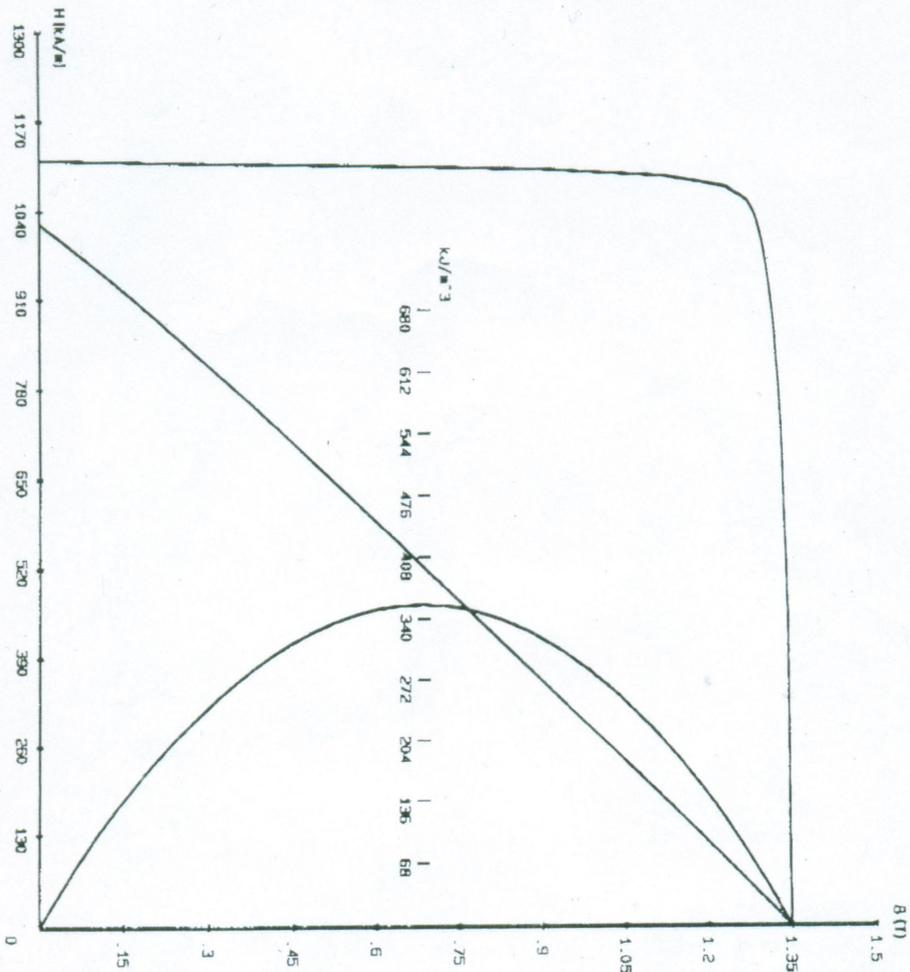


FIGURE A.2 – Courbes de démagnétisation des aimants du prototype 1 (tirées de KJ Magnetics Inc. (2015)).

# NIM-10000H HYSTERESIGRAPH TEST REPORT



### Measurement Results

Br	=	1.349	T
Hcb	=	13.49	KGS
Hcj	=	1021	KA/m
BHm	=	12.83	KDe
HK	=	1113	KDe
HK/Hcj	=	13.99	KDe
Bd	=	355	KJ/m <sup>3</sup>
Hd	=	44.6	MGSDe
	=	1068	KA/m
	=	13.43	KDe
	=	96	T
	=	684	KGS
	=	519	KA/m
	=	6.52	KDe

### Test Condition

Sample No.: 040210\1#-6  
 Temperature: 20 C  
 Material: M45  
 Shape: Square 4.81x 4.81cm  
 Date: 02-10-2004  
 Tester: 001

FIGURE A.3 – Courbes de démagnétisation à 20° des aimants du prototype 2.

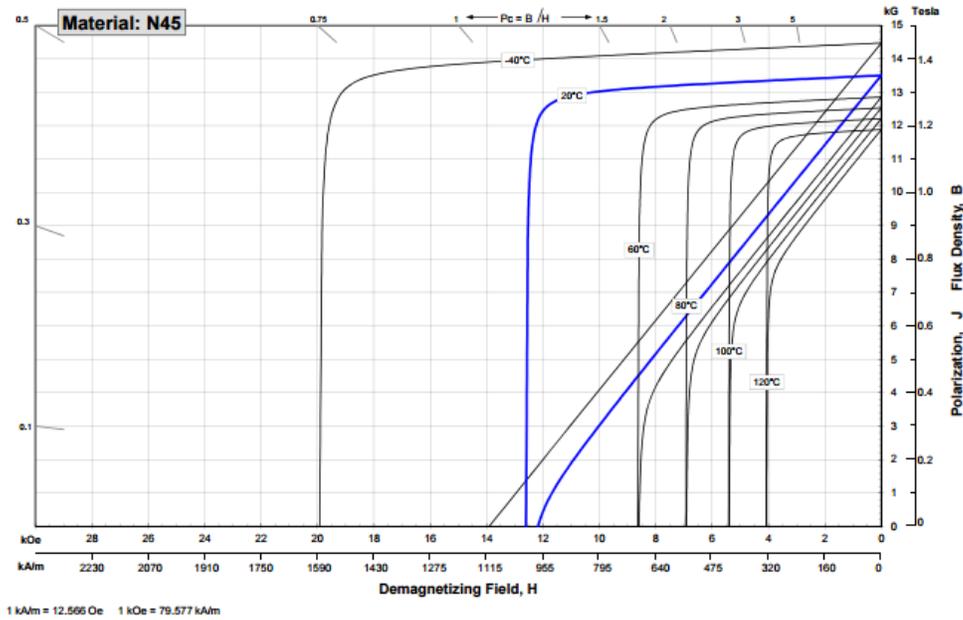
**Sintered Neodymium-Iron-Boron Magnets**

These are also referred to as "Neo" or NdFeB magnets. They offer a combination of high magnetic output at moderate cost. Please contact Arnold for additional grade information and recommendations for protective coating. Assemblies using these magnets can also be provided.

Characteristic	Units	Magnetic Properties		
		min.	nominal	max.
<b>Br</b> , Residual Induction	Gauss	13,200	13,500	13,800
	mT	1320	1350	1380
<b>H<sub>CB</sub></b> , Coercivity	Oersteds	10,800	12,000	13,200
	kA/m	860	955	1050
<b>H<sub>CJ</sub></b> , Intrinsic Coercivity	Oersteds	12,000		
	kA/m	955		
<b>BHmax</b> , Maximum Energy Product	MGOe	42	44	46
	kJ/m <sup>3</sup>	334	350	366

Characteristic	Units	Thermal Properties		
		C //	C ⊥	
Reversible Temperature Coefficients <sup>(1)</sup>				
of Induction, α(Br)	%/°C		-0.120	
of Coercivity, α(Hc)	%/°C		-0.750	
Coefficient of Thermal Expansion <sup>(2)</sup>	ΔL/L per °Cx10 <sup>-6</sup>	7.5	-0.1	
Thermal Conductivity	W / (m · K)		7.6	
Specific Heat <sup>(3)</sup>	J / (kg · K)		460	
Curie Temperature, T <sub>c</sub>	°C		310	
Other Properties	Flexural Strength	psi	41,300	
		MPa	285	
	Density	g/cm <sup>3</sup>		7.5
	Hardness, Vickers	Hv		620
	Electrical Resistivity, ρ	μΩ · cm		180

Notes: (1) Coefficients measured between 20 and 80 °C  
(2) Between 20 and 200 °C  
(3) Between 20 and 140 °C



**Notes** The material data and demagnetization curves shown above represent typical properties that may vary due to product shape and size. Magnets can be supplied thermally stabilized or magnetically calibrated to customer specifications. Additional grades are available. Please contact the factory for information.

FIGURE A.4 – Courbes de démagnétisation utiliser pour interpoler les propriétés à 40°C des aimants du prototype 2 (tiré de Arnold Magnetic Technologies (2014)).

# NIM-2000 HYSTERESIS GRAPH TEST REPORT

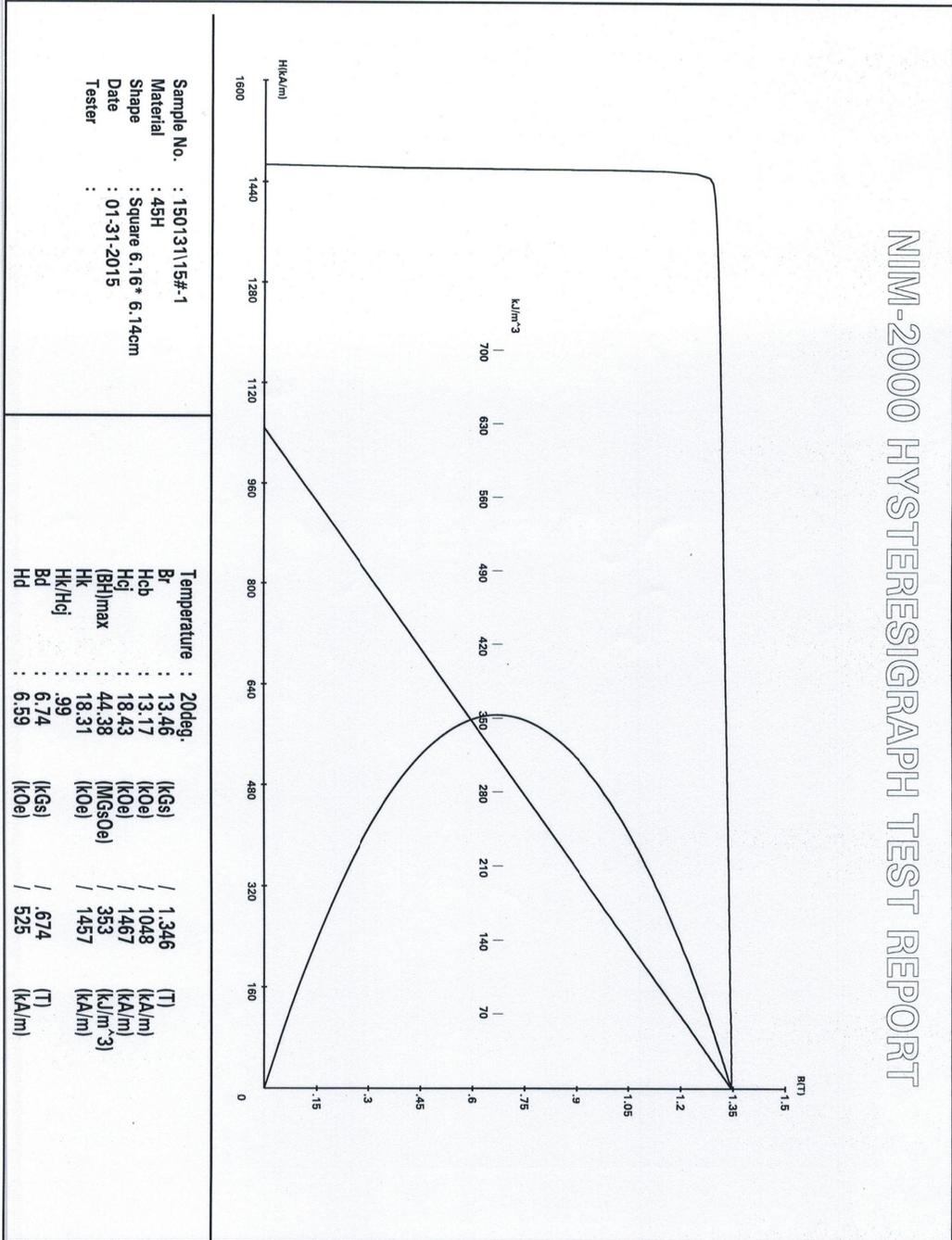


FIGURE A.5 – Courbes de démagnétisation à 20° des aimants du prototype 3.



## Annexe B

# Propriétés des appareils de mesures

Cette annexe présente les fiches de données des appareils de mesures utilisés dans ce mémoire.

# FORCE ONE™

## FDIX

**ADVANCED SIMPLICITY  
 PLUG 'N PLAY VERSATILITY  
 DIGITAL CLARITY**

**\$650\***

- PLUG 'N PLAY FORCE CELL MODULES
- TENSION & COMPRESSION
- CAPACITIES TO: 200 lbf/100 kgf/1000 N
- USB CABLE & DATA SOFTWARE
- SELECTABLE PEAK FORCE SAMPLING
- ACCURACY: ± 0.2% - Dedicated  
 ± 0.3% - Interchangeable

### CONSTRUCTION

- Patented Plug 'n Play with seven Force Cell Modules.
- 5 digit, 0.5" LCD and 5 button keypad.
- Split housing for upright display with shaft up or down.
- Displays: LO BAT, T, C and PEAK.
- American standard threads on load shaft and mounting holes.

### OPERATION

- Change Force Cell Module to change capacity.
- USB & RS232 computer outputs.
- Selectable baud rates: 4800, 9600, 19200 or 38400.
- Selectable units of force: lbf, kgf, N and ozf.
- Selectable peak force sampling: 100 or 1000/second.

### POWER REQUIREMENTS

- Rechargeable 50 hour NiMH battery.
- Continuous operation with AC adapter/charger.
- Auto-off conserves battery power.

### ACCESSORIES

- NiMH battery, AC adapter/charger, hook and flat, case, USB cable, USB driver & MESURLite software on CD, manual and NIST Calibration Certificate.

### ACCURACY

- ± 0.2% of Full Scale - Dedicated.
- ± 0.3% of Full Scale - Interchangeable.

### WEIGHT & DIMENSIONS

- 0.8 lb. [360 g] Shipping: 2 lb. [1 kg]
- 2 3/4" [70 mm] W x 4" [100 mm] H x 1 1/4" [32 mm] D



\*All capacities except 200 lbf

The **Unique Force One™ FDIX** is a low cost digital force gage with many useful features beginning with **interchangeable Plug 'n Play Force Cell Modules**. Select any capacity from **2 to 200 pounds**, attach it to the Force Display Module and start testing.

**Two versions** of FDIX are available:

- **Dedicated** - Single Force Cell Module at ± 0.2% accuracy.
- **Interchangeable** - Multiple Force Cell Modules at ± 0.3% accuracy.

The basic FDIX consists of a **Force Display Module (FDMIX)** and a **Force Cell Module (FCMI)**. Add other Force Cell Modules as needed to increase or decrease the FDIX Force Gage capacity. Changing Force Cell Modules changes capacity, accuracy and resolution.

**Selectable Peak Sampling Rate** - FDIX primary function, measuring static and dynamic forces, is enhanced with menu selectable **100 or 1000/second peak sampling rates** - 100/second for slow dynamic or static testing, 1000/second for high speed break testing.

**Overload Protection** - FDIX has built-in overload stops with **strain gage** and **structural failure protection**.

**Data Collection Software** - FDIX includes simple MESURLite data logging software and USB cable.

**Bi-Directional Computer Interface** - Versatile bi-directional data transmission to and from a computer is provided with **single data point or continuous data** transmission initiated by FDIX or by computer.



Force One™ FDIX mounted on Wagner STK100 Spring Tester

Prices and specifications are subject to change without notice.

**CALL US TOLL FREE 800-345-4188**





## PLUG 'N PLAY FORCE GAGE

### SELECTING A FORCE ONE™ FDX FORCE GAGE SYSTEM

Customize an FDX Force Gage to Suit Your Needs:

- Basic system consists of a Force Display Module and a Force Cell Module.
- Add other Force Cell Modules as needed to increase or decrease capacity.
- Changing Force Cell Modules changes capacity, accuracy and resolution to suit your requirements.
- Switching Force Cell Modules is quick and easy and provides the ultimate in force gage economy.

- Large 0.5" 5 Digit Display
- Aluminum Housing
- Menu Selectable Features
- Firm Grip Design
- Auto Calibration
- Overload Protection

Patent Number 5,471,885



**FORCE CELL MODULES**  
 Dedicated: ± 0.2% Accuracy  
 Interchangeable: ± 0.3% Accuracy

- USB Cable & Data Logging Software
- Selectable 100 or 1000 Peak Force Sampling
- Rechargeable NiMH 50 hour Battery
- Selectable Units lbf/kgf/N/ozf
- American Standard Threads

TABLE 1

FORCE ONE™ DIGITAL FORCE GAGE

MODEL	PRICE	FCMI* MODEL	PRICE	CAPACITY / GRADUATION				OVERLOAD PROTECTION TO	LOADSHAFT MOVEMENT AT CAPACITY
FDIX 2	\$650	FCMI 2	\$350	2 x 0.002 lbf	32 x 0.04 ozf	1 x 0.001 kgf	10 x 0.01 N	250 lbf	0.015"
FDIX 5	650	FCMI 5	350	5 x 0.005 lbf	80 x 0.1 ozf	2.5 x 0.002 kgf	25 x 0.02 N	250 lbf	0.011"
FDIX 10	650	FCMI 10	350	10 x 0.01 lbf	160 x 0.2 ozf	5 x 0.005 kgf	50 x 0.05 N	250 lbf	0.007"
FDIX 25	650	FCMI 25	350	25 x 0.02 lbf	400 x 0.5 ozf	10 x 0.01 kgf	100 x 0.1 N	250 lbf	0.007"
FDIX 50	650	FCMI 50	350	50 x 0.05 lbf	800 x 1 ozf	25 x 0.02 kgf	250 x 0.2 N	250 lbf	0.007"
FDIX 100	650	FCMI 100	350	100 x 0.1 lbf	1600 x 2 ozf	50 x 0.05 kgf	500 x 0.5 N	250 lbf	0.007"
FDIX 200	900	FCMI 200	500	200 x 0.2 lbf	3200 x 4 ozf	100 x 0.1 kgf	1000 x 1 N	400 lbf	0.005"

ALL MODELS INCLUDE: Force Display Module (FDMIX), Force Cell Module (FCMI), battery, AC adapter/charger, flat head and hook, case, USB cable, USB driver & MESURLite software on CD, manual and NIST Calibration Certificate.

\* Optional Interchangeable Force Cell Modules - Interchangeable with original Force Cell Module of any FDX Force Gage.

TABLE 2

FORCE ONE™ OPTIONAL ACCESSORIES

FD/S-1	Steel Hook - Large (100 lbf)	\$20*	FDIX/CA-210	Cable, USB, FDX to PC, Male A	\$30*
FD/B-1	Steel Hook - XL (200 lbf)	35*	FDIX/CA120	Cable, RS232, FDX to PC, 9 pin/DB	75**
FD/S-2	Flat Head (5/8" diameter)	20*	15-1004	MESURgauge Force Testing Software	495***
FD/S-3	Cone Point	20	FD/NMH	NiMH Battery - 9V Size	5
FD/S-4	Chisel Head	20	FDI/AC110	AC Adapter - 110 Vac	25
FD/S-5	Vee Tip	20	FDI/AC220	AC Adapter - 220 Vac	40
FD/S-6	Extension Rod	20			
FD/A-7	Hinged Hook - Small (20 lbf)	45			
FD/S-7	Hinged Hook - Large (100 lbf)	45			
FD/ HDL	Aluminum Handles	95			
FD/ RT	Rubber Tip	25			
FD/ CP2	2" Compression Plate	25			

\* Flat Head and appropriate Steel Hook included with FDIX. All FDX implements have American Standard #10-32 threads.

\* Replacement USB cable, driver and MESURLite data collection software on a CD.

\*\* Requires RS232 serial port on the computer.

\*\*\* Feature rich force testing software - force vs. distance.

Note: MESURLite download is also available at: [www.mark-10.com](http://www.mark-10.com)

Prices and specifications are subject to change without notice.

[www.wagnerinstruments.com](http://www.wagnerinstruments.com)

CALL US TOLL FREE 800-345-4188





**SPECIFICATIONS, MODEL 5170 & 5180 GAUSS / TESLAMETER** without probe, 23 ±3°C, RH <85%

	5170	5180
DC MODE, Low Range:	1.25 + 4	0.8 + 4
Mid & High Ranges:	1.00 + 3	0.6 + 3
AC MODE (for sinewave >6G or 0.6mT) {1}		
10 - 20 Hz	3.50 + 8	3.0 + 8
20 - 20,000 Hz :	2.50 + 5	2.0 + 5
20kHz to 25kHz (1x axial probe only)	N/A	3.0 + 5

{1} additional ±8 counts tolerance for signals < 4% of lowest range and >2kHz

**ACCURACY, Analog Output of Model 5180** (±% of Reading ± mV)

DC MODE	Low Range:	0.75 + 6
	Mid & High Ranges:	0.50 + 5
AC MODE : (for sinewave >6G or 0.6mT) {2}		
	10 - 20Hz	3.00 + 8
	20 - 5000Hz	2.50 + 5
Analog output -3dB point is approximately 22kHz		
Delay Time: 30µs		
Sample Rate: 8µs with variable moving average filtering		
Risetime: DC Mode = 250µs DC peak hold = 60µs		
AC Mode and AC Peak Hold; from 30µs to 2ms depending on freq.		

{2} additional ±8 mV tolerance for signals < 4% of lowest range and >2kHz

**Battery Type:** 1.5V AA (x4)

**Battery Life:** 20 hours typical, alkaline batteries

**Auxilliary Power:** +5 Vdc, 300 mA (Regulated)

**Auxilliary Power Connector:** Standard 2.5mm I.D. / 5.5mm O.D. connector. Center post is (+) polarity.

**Analog Output Connector:** BNC

**Operating Temperature:** 0 to +50°C (+32 to +122°F)

**Storage Temperature:** -25 to +70°C (-13 to +158°F)

**Meter Dimensions:** Length: 17.5 cm (6.9 in)  
Width: 9.9 cm (3.9 in)  
Height: 3.6 cm (1.4 in)

**Weight:** Meter w/batteries: 400 g (14 oz.)  
Shipping: 1.59 kg (3 lb., 8 oz.)

**Probe accuracy must be added to meter accuracy to determine overall accuracy**

Warmup Time To Rated Accuracy:	5 minutes
Min / Max Hold Acquisition Time:	DC mode: 100 ms typical AC mode: 700 ms at 10 Hz to 500 ms at 300 Hz 250 ms at 300 - 4000 Hz 100 ms > 4kHz
Peak Hold Acquisition Time:	DC or AC mode: 128 µs minimum
Analog Output Scaling:	DC mode: ± 3 Vdc AC mode: 3 Vrms
Analog Output Noise:	(Hi- Range) 1.5mV rms (Mid- Range) 4.5mV rms (Low- Range) 15.5mV rms
Analog Output Load:	10 kOhm min, 100 pF max.
Accuracy Change with Temperature (not including probe) 0-20°C and 26-50°C (typical) Low Range: ±0.25% + 3.0 counts / °C Mid & High Ranges: ±0.02% + 0.2 counts / °C	

**Regulatory Information:**

Compliance was demonstrated to the following specifications as listed in the official Journal of the European Communities:

EN 61326-1:1997+A1:1998 Electrical equipment for measurement, control and laboratory use EMC requirements

**Immunity:**

IEC 61000-4-2 Electrostatic Discharge (ESD)

IEC 61000-4-3 Electromagnetic Field (RF)

**Emissions:**

EN 55022 Class B Radiated and conducted emissions

**Communications Port:**

Format: Universal Serial Bus (USB)

Lines supported: Transmit, receive, common.

Connector type: Mini USB Type B

Cable length: 3 m (9.8 ft.) maximum

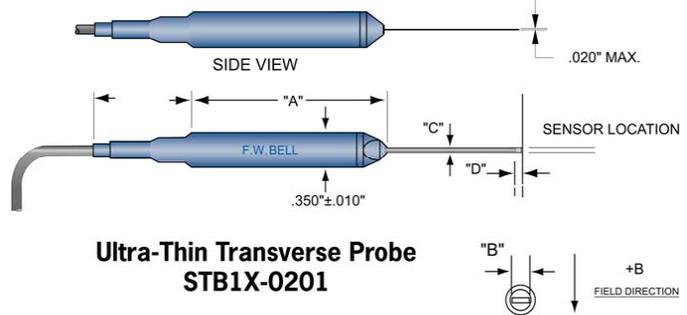
Standards supported: IEEE-1987.2, SCPI-1991

**STANDARD TRANSVERSE PROBE**

**Model Number:** (5180): STD18-0404  
(5170): STH17-0404

**Frequency Bandwidth:** (5180): 0 to 20 kHz  
(5170): 0 to 10 kHz

**Offset change with Temperature:** ±300 mG / °C (typical)  
**Accuracy change with Temperature:** -0.05%/°C (typical)  
**Operating Temperature Range:** 0 to +75°C (+32 to +167°F)  
**Storage Temperature Range:** -25 to +75°C (-13 to +167°F)



Model	A ± 0.063"	B	C	D	Material	Corrected Linearity	Sensitivity	Active Area	Operating Temp. Range	Temp. stability (typ)		Frequency Response
										Zero	Calibrate	
STD18-0402	2"	0.158" ±.004	0.045" ±.004	0.0335" (NOM)	Polypropylene **see note	0.5%/30kG	1X	0.015" DIA (NOM)	0 to +75°C (32 to 167°F)	±0.030 Gauss/°C (typical)	-0.05 %/°C (typical)	DC to 20kHz
STD18-0404	4"					1.0%/20kG						DC to 10kHz
STH17-0402	2"				1.0%/20kG	DC to 10kHz						
STH17-0402	4"				0.5%/30kG	DC to 20kHz						
HTH17-0604	4"	0.180" ±.004	0.060" +.000 -.004		ALUMINUM 3003 ¾ FH	1.0%/20kG						DC to 10kHz
HTD18-0604	4"					0.5%/30kG						
STB1X-0201	1"	.050" ±.005	.020" MAX	0.030" (NOM)	KAPTON	1.0%/10kG		0.025" DIA (NOM)		±0.200 Gauss /°C	-0.1% /°C	DC only

**Note:** Due to continuous process improvement, specifications are subject to change without notice.  
 \*\* Prior to late 2006 Transverse Probe Stems were rigid glass epoxy, .150 x .040".

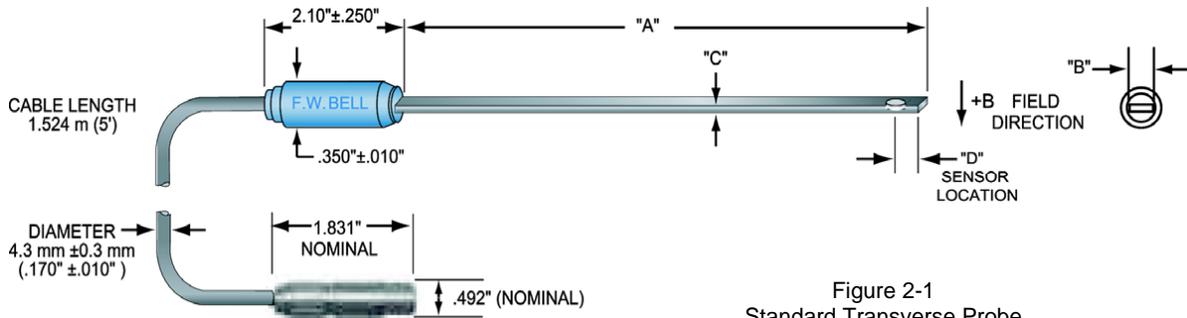


Figure 2-1  
Standard Transverse Probe

# Bibliographie

- Agashe, J. S. et D. P. Arnold. 2008, «A study of scaling and geometry effects on the forces between cuboidal and cylindrical magnets using analytical force solutions», *Journal of Physics D : Applied Physics*, vol. 41, n° 10, p. 105 001. URL <http://stacks.iop.org/0022-3727/41/i=10/a=105001>.
- Agrawal, S. K. et A. Fattah. 2004, «Reactionless space and ground robots : novel designs and concept studies», *Mechanism and Machine Theory*, vol. 39, n° 1, doi :[http://dx.doi.org/10.1016/S0094-114X\(03\)00102-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0094-114X(03)00102-2), p. 25 – 40, ISSN 0094-114X.
- Allan, J.-F., G. Lambert, S. Lavoie et S. Reiher. 2008, «Development of a mobile robotic platform for the underground distribution lines», dans *Advanced Intelligent Mechatronics, 2008. AIM 2008. IEEE/ASME International Conference on*, p. 406–411.
- Arnold Magnetic Technologies. 2014, «Neodymium-iron-boron magnet catalogs», [http://www.arnoldmagnetics.com/Neodymium\\_Literature.aspx](http://www.arnoldmagnetics.com/Neodymium_Literature.aspx).
- Associated Spring Raymond. 2015, «Mechanical wire spring catalogue», <http://www.asraymond.com/>.
- Atallah, K. et D. Howe. 1998, «The application of Halbach cylinders to brushless ac servo motors», *Magnetics, IEEE Transactions on*, vol. 34, n° 4, p. 2060–2062, ISSN 0018-9464.
- Banala, S., S. Agrawal, A. Fattah, V. Krishnamoorthy, H. Wei-Li, J. Scholz et K. Rudolph. 2006, «Gravity-balancing leg orthosis and its performance evaluation», *Robotics, IEEE Transactions on*, vol. 22, n° 6, p. 1228–1239, ISSN 1552-3098.
- Bjørk, R., C. R. H. Bahl, A. Smith et N. Pryds. 2008, «Optimization and improvement of Halbach cylinder design», *Journal of Applied Physics*, vol. 104, n° 1, p. 013 910.
- Choi, J.-S. et J. Yoo. 2008, «Design of a halbach magnet array based on optimization techniques», *Magnetics, IEEE Transactions on*, vol. 44, n° 10, p. 2361–2366, ISSN 0018-9464.
- Gopalswamy, A., P. Gupta et M. Vidyasagar. 1992, «A new parallelogram linkage configuration for gravity compensation using torsional springs», dans *Robotics and Automation, 1992. Proceedings., 1992 IEEE International Conference on*, p. 664–669 vol.1.

- Halbach, K. 1981, «Physical and optical properties of rare earth cobalt magnets», *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, vol. 187, n° 1, p. 109 – 117, ISSN 0167-5087.
- Herder, J. 2001, *Energy-free systems : theory, conception, and design of statically balanced spring mechanisms*, thèse de doctorat, TU Delft, Delft University of Technology.
- Jiles, D. 1998, *Introduction to Magnetism and Magnetic Materials, Second Edition*, Taylor & Francis, ISBN 9780412798603.
- Kazerooni, H. 1989, «Statically balanced direct drive manipulator», *Robotica*, vol. 7, doi : 10.1017/S0263574700005452, p. 143–149, ISSN 1469-8668.
- KJ Magnetics Inc. 2015, «Neodymium-iron-boron magnet catalogs», <https://www.kjmagnetics.com/proddetail.asp?prod=D48DIA>.
- Kolarski, M., M. Vukobratović et B. Borovac. 1994, «Dynamic analysis of balanced robot mechanisms», *Mechanism and Machine Theory*, vol. 29, n° 3, doi :http://dx.doi.org/10.1016/0094-114X(94)90128-7, p. 427 – 454, ISSN 0094-114X.
- Lacasse, M.-A., G. Lachance, J. Boisclair, J. Ouellet et C. Gosselin. 2013, «On the design of a statically balanced serial robot using remote counterweights», dans *Robotics and Automation (ICRA), 2013 IEEE International Conference on*, ISSN 1050-4729, p. 4189–4194.
- Laliberté, T., C. Gosselin et D. Gao. 2010, «Closed-loop transmission routings for cartesian scara-type manipulators», dans *ASME 2010 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, American Society of Mechanical Engineers, p. 281–290.
- Lauzier, N., C. Gosselin, T. Laliberté et P. Tremblay. 2009, «Adaptive gravity compensation of decoupled parallel and serial manipulators using a passive hydraulic transmission», *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C : Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 223, n° 12, p. 2871–2879.
- Lim, T. G., H. S. Cho et W. K. Chung. 1990, «Payload capacity of balanced robotic manipulators», *Robotica*, vol. 8, doi :10.1017/S0263574700007682, p. 117–123, ISSN 1469-8668.
- Mallinson, J. 1973, «One-sided fluxes – a magnetic curiosity ?», *Magnetics, IEEE Transactions on*, vol. 9, n° 4, p. 678–682, ISSN 0018-9464.
- Moubarak, S., M. T. Pham, R. Moreau et T. Redarce. 2010, «Gravity compensation of an upper extremity exoskeleton», dans *Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2010 Annual International Conference of the IEEE*, ISSN 1557-170X, p. 4489–4493.
- NdFeB-info. 2015, «Grades of neodymium», [http://www.ndfeb-info.com/neodymium\\_grades.aspx](http://www.ndfeb-info.com/neodymium_grades.aspx).

- Ni Mhiochain, T., D. Weaire, S. M. McMurry et J. Coey. 1999, «Analysis of torque in nested magnetic cylinders», *Journal of Applied Physics*, vol. 86, n° 11, p. 6412–6424, ISSN 0021-8979.
- Petrie, R. 1993, «Permanent magnets in review», dans *Electrical Electronics Insulation Conference and Electrical Manufacturing amp ; Coil Winding Conference, 1993. Proceedings., Chicago '93 EEIC/ICWA Exposition*, ISSN 1071-6270, p. 207–210.
- Raich, H. et P. Blümler. 2004, «Design and construction of a dipolar halbach array with a homogeneous field from identical bar magnets : Nmr mandhalas», *Concepts in Magnetic Resonance Part B : Magnetic Resonance Engineering*, vol. 23B, n° 1, p. 16–25, ISSN 1552-504X.
- Ruoho, S. 2006, «Demagnetisation of permanent magnets in electrical machines», *OH presentation, Helsinki University*.
- Simionescu, I. et L. Ciupitu. 2000, «The static balancing of the industrial robot arms : Part i : Discrete balancing», *Mechanism and Machine Theory*, vol. 35, n° 9, p. 1287 – 1298, ISSN 0094-114X.
- Streit, D. et B. Gilmore. 1989, «‘perfect’spring equilibrators for rotatable bodies», *Journal of Mechanical Design*, vol. 111, n° 4, p. 451–458.
- Streit, D. et E. Shin. 1993, «Equilibrators for planar linkages», *Journal of Mechanical Design*, vol. 115, n° 3, p. 604–611.
- Trout, S. 2001, «Material selection of permanent magnets, considering thermal properties correctly», dans *Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing amp ; Coil Winding Conference, 2001. Proceedings*, ISSN 0362-2479, p. 365–370.
- Wang, J. et C. M. Gosselin. 1999, «Static balancing of spatial three-degree-of-freedom parallel mechanisms», *Mechanism and Machine Theory*, vol. 34, n° 3, doi :[http://dx.doi.org/10.1016/S0094-114X\(98\)00031-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0094-114X(98)00031-7), p. 437 – 452, ISSN 0094-114X.
- Zhu, Z. et D. Howe. 2001, «Halbach permanent magnet machines and applications : a review», *Electric Power Applications, IEE Proceedings -*, vol. 148, n° 4, p. 299–308, ISSN 1350-2352.
- Zhu, Z., Z. Xia, K. Atallah, G. Jewell et D. Howe. 2000, «Powder alignment system for anisotropic bonded NdFeB Halbach cylinders», *Magnetics, IEEE Transactions on*, vol. 36, n° 5, p. 3349–3352, ISSN 0018-9464.