



HAL
open science

COMMANDE ET ASSERVISSEMENT EN LEVITATION D'UN MICRO-ACTIONNEUR MAGNETIQUE BISTABLE

Jiri Stepanek

► **To cite this version:**

Jiri Stepanek. COMMANDE ET ASSERVISSEMENT EN LEVITATION D'UN MICRO-ACTIONNEUR MAGNETIQUE BISTABLE. Energie électrique. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2005. Français. NNT: . tel-00164302

HAL Id: tel-00164302

<https://theses.hal.science/tel-00164302>

Submitted on 20 Jul 2007

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Remerciements

Tout d'abord je voudrais remercier les personnes qui ne lisent pas les remerciements. Merci d'avoir ouvert ma thèse, vous pouvez maintenant passer directement à l'introduction !

A mon avis on ne peut pas découpler un travail et la vie de la personne qui le fait. Car ce travail fait partie de la vie de cette personne. Si ma thèse est maintenant écrite, c'est grâce à beaucoup de gens, qui étaient à mes côtés. Et je voudrais les remercier.

Je commence par mes chefs : Orphée Cugat, Jérôme Delamare et Suzanne Leseq. On ne doute pas qu'ils sont forts au niveau scientifique. Mais en plus ils sont exceptionnellement gentils, on peut toujours rigoler avec eux, et cela aide énormément. Orphée, Jérôme, Suzanne, grâce à vous j'ai progressé scientifiquement et aussi personnellement, merci !

Grand merci à tout le monde de l'équipe μ -systèmes magnétiques du LEG. Mes collègues du labo sont mes amis, n'est-ce pas formidable? Merci Hervé de m'accueillir en France comme si j'étais ton frère, merci Jérôme pour ton esprit toujours de bonne humeur et tes blagues, merci Bruno pour toutes les bêtises qu'on a faites ensemble ! Merci Farid, Thierry, Yéyé, Arnaud, Fermi, Fred, Nico, Hynek, Christophe, Sébastiens (Gu&Gr), Fabien, Alban, Gareth, Manuela, Delphine, Guylaine, Lalao, Yvan, Diana, Sylvie, Delcho, Natalia, Hichem, Carolina, Duc, Bertrand et tous les autres thésards pour l'ambiance qui régnait grâce à vous dans les couloirs du LEG !

Je remercie beaucoup les gens qui ont participé à ce manuscrit. Je vais commencer par le jury qui a pris le soin de me proposer des corrections, j'apprécie beaucoup la rigueur et précision. Grand merci à ceux qui m'ont aidé à mettre mon manuscrit dans la forme ici présente. Je suis fier d'avoir eu droit à la relecture d'un expert pour chaque chapitre (Ch1: Gilbert Reyne, Orphée Cugat, Ch2: Christel Dieppedale, Hervé Rostaing; Ch3: Olivier Chadebec; Ch4: Suzanne Leseq; Ch5: Jérôme Delamare). Merci encore à Jérôme Meunier Carus et mes encadrants pour la relecture de l'ensemble de la thèse. Je remercie Hervé Rostaing, Robert Guiziou, Arnaud Walther, Jean-Paul Yonnet, Patrice Labie, Lalao Harijaona Rakotoarison, Benoît Delinchant, Frédéric Wurtz, Gilles Rostaing, Jean-Luc Amalberti, Gérard Baudoin pour la coopération sur le sujet. Un remerciement spécial est adressé à Djidji, Stéphane Catellani, Jacques Davoine et Jean Barbaroux pour leur énorme contribution en mécanique et électronique. Chacun d'eux est expert dans son domaine, ils sont tous professionnels et un plus super sympathiques.

Je remercie avec très grande reconnaissance tous ceux que j'ai eu l'occasion de rencontrer dans les couloirs du LEG et leur aide n'était pas tellement scientifique mais tout aussi importante : merci Robert Perret, Jacqueline Delaye, Gérard Meunier, Jean-Paul Ferrieux, François Camus, Monique Boizard, Danielle Collin, Elise Riado, Vincent Danguillaume, Patrick Eustache, Corine Marcon et Daniel Tomasik.

Sans oublier Daniel Ogier, Eric Gentil, François Blache, Marie-Thérèse Loubinoux, Afef Lebouc, Yvon Besanger, Yves Lembeye, Marc Brunello, Christian Chillet, Jean-Louis Coulomb, Jean-Christophe Crébier, Jean-Pierre Kéradec, Bertrand Raison, Bruno Mallet, James Roudet, Daniel Roye, Gilles Cauffet pour leur disponibilité et leur esprit ouvert.

Je m'excuse auprès de Schaffou pour les tacles que je lui ai infligés. Merci à tous les joueurs de foot qui ne m'ont pas fait de tacles. Petit merci aussi à ceux qui m'ont fait des petits tacles.

Le moment est venu pour remercier ma famille et mes amis chez moi en République Tchèque. Ils ne comprennent pas le français alors je vais les remercier en tchèque : Děkuju moc mamko, taťko, za to, co jste pro mě udělali, vím že mě máte moc rádi. Já vás mám taky rád. Děkuju Zdeni, Pájo a Alčo, že mi tolik pomáháte tím, že mi fandíte a píšeme si. Jsem fakt rád, že Vás mám. Díky Martine, Míšo, Helčo, Ondro, Dušku, Doktore a Hani, že nám přátelství vydrželo, i když jsem tak daleko.

Voici mes amis tchèques et slovaques que j'ai rencontrés en France : Standa, Karla, David, Michal Šicner, Hynek Procházka, Zuzka Čulka, Michal Mühlbauer, Mako, Jirka, Mírek, Bára, Denisa, Nina, Honza, Pája Fojtík, Radek, Lukáš, Andrej, Gábina, Igor. Nous avons vraiment bien rigolé ensemble, la mafia tchécoslovaque, merci.

Grand merci à mes amis français, c'est surtout grâce à vous que je me sens en France comme à la maison. Merci Sandrine, Sylvain, Sébastien, Pierric, Leticia, Cédric, Nollwen, Amanda, Jérémy, Olivier, Ariadna, Harry, Antoine, Gilles, Semi, Mona. Ça me rappelle, il faudra qu'on fasse une fête ensemble !

Un remerciement spécial pour Orphée. Merci monsieur pour le contact humain que tu as (et aussi pour les voitures que tu m'as fournies et pour le kit voyageur préparé à 2h du matin). Un étranger en France se sent étrangement au début, mais tu sais comment l'aider. Chapeau et merci!

Je remercie également le ministère de l'éducation qui m'a affilié la bourse de thèse. Merci aux douaniers français qui m'ont laissé passer avec 60 bières tchèques, trois lapins et quelques litres de slivovice, ainsi que mes amis douaniers autrichiens avec le pot d'échappement troué. Merci aux français qui m'ont pris quand je faisais de l'autostop. Et pendant que j'y suis je voudrais bien remercier les Neandertal sans qui je ne serais pas là aujourd'hui.

Enfin je voudrais demander pardon à tous ceux que j'ai oublié de citer. Le truc c'est que en écrivant ces remerciements je suis un peu ému et je ne peux pas me concentrer parfaitement. Mais pour vous plaindre, écrivez-moi à jiri.stepanek@email.cz !

Sommaire

<i>Introduction</i>	3
<i>Chapitre 1 : L'état d'art</i>	7
1.1 Le rôle de la miniaturisation	9
1.2 μ-actionneurs magnétiques	11
1.3 État de l'art	13
1.3.1 μ -relais.....	13
1.3.2 μ -pompes, μ -valves.....	15
1.3.3 Exemple de bio-manipulation.....	15
1.3.4 Exemple de μ -positionneur [Bhan00].....	16
1.4 Conclusion	17
<i>Chapitre 2 : μ-actionneur magnétique bistable; application μ-positionneur</i>	21
2.1 Conception: Principe de base	23
2.2 Applications bistables	26
2.2.1 Maquette centimétrique.....	26
2.2.2 μ -relais (RAIMI) au LETI.....	26
2.2.3 Vanne.....	27
2.2.4 μ -actionneur magnétique vertical (MIAM).....	27
2.3 Fabrication du μ-relais (RAIMI) au LETI	28
2.3.1 Conducteur d'actionnement.....	29
2.3.2 Aimants.....	30
2.3.3 Libération de l'aimant mobile.....	30
2.3.4 État actuel du projet.....	31
2.4 μ-positionneur asservi	31
2.4.1 Principe de l'asservissement.....	31
2.4.2 Propriétés de l'asservissement.....	32
2.4.3 Applications.....	33
2.4.4 Analyse de l'asservissement.....	35
2.5 Conclusion	36

Chapitre 3 : Calcul des forces et des couples.....	39
3.1 Présentation du problème	41
3.2 Champ magnétique créé par un courant.....	42
3.3 Champ créé par un aimant	42
3.3.1 Représentation ampérienne du moment magnétique	43
3.3.2 Représentation colombienne du moment magnétique	43
3.4 Equation générale d'un aimant	44
3.5 Méthodes de calcul des forces et couples	45
3.5.1 Méthodes intégrales.....	45
3.5.2 Méthodes plus générales	47
3.6 Première solution : intégration volumique par condensation	48
3.6.1 Principe de calcul de Dipole3D	48
3.6.2 Premier cas : Un aimant agit sur un aimant	49
3.6.3 Deuxième cas : Un aimant agit sur un conducteur	49
3.6.4 Troisième cas : un conducteur agit sur un aimant	50
3.6.5 Quatrième cas : un conducteur agit sur un conducteur.....	50
3.6.6 Force et couple créés sur un aimant non-ponctuel.....	51
3.6.7 Implémentation dans Dipole3D.....	51
3.7 Deuxième méthode envisagée : Méthode des charges équivalentes.....	52
3.7.1 Implémentation de la méthode des charges équivalentes [Step03]	54
3.8 Utilisation d'une méthode des éléments finis (MEF)	55
3.9 Mesure de la force.....	56
3.10 Comparaison des simulations et mesures	56
3.10.1 Sans présence de conducteur	57
3.10.2 Avec le courant dans le conducteur	59
3.11 Vérification dynamique expérimentale.....	60
3.12 Mesure du temps de calcul.....	61
3.13 Conclusion	62

Chapitre 4 : Modélisation dynamique du μ-actionneur, correcteur de l'asservissement de position.....	65
4.1 Remarque sur la magnétostatique	68
4.2 Description simplifiée	68
4.2.1 Décharge de condensateur dans la bobine	69
4.3 Introduction de la description complète	70
4.3.1 Définition de système	70
4.3.2 Choix d'approche.....	71
4.4 Dynamique modélisée avec les quaternions.....	72
4.4.1 Equations de translation	73
4.4.2 Equations de rotation.....	73
4.4.3 Quaternions	74
4.4.4 Système complet	74
4.5 Système en boucle ouverte	75
4.6 Système en boucle fermée	78
4.6.1 Choix de la structure de correcteur.....	79
4.6.2 Capteur de position.....	80
4.7 Synthèse du correcteur à avance de phase	80
4.8 Application du correcteur obtenu sur le modèle complet de l'actionneur	81
4.8.1 Simulation de base.....	81
4.8.2 Effets du frottement de l'air.....	83
4.8.3 Simulation finale	84
4.9 Conclusion	86

Chapitre 5 : Réalisation d'un démonstrateur centimétrique	89
5.1 Choix du capteur de position	91
5.2 Réalisation de la maquette	92
5.3 Table micrométrique de caractérisation du capteur	93
5.4 Électronique associée au capteur de déplacement	94
5.4.1 Méthode "Pont de Sauty".....	94
5.4.2 Méthode "Pompe de charge".....	97
5.5 Asservissement en lévitation	99
5.5.1 Asservissement du courant.....	100
5.5.2 Asservissement de la position de l'aimant mobile.....	102
5.6 Tests de l'asservissement sur la maquette MAMBA	104
5.6.1 Test de l'électronique "Pont de Sauty".....	104
5.6.2 Test de l'électronique "Pompe de charge".....	105
5.7 Conclusions	106
Conclusion et perspectives	109
Conclusion générale	111
Perspectives	113
CP.1 Modélisation	113
CP.2 Réalisation centimétrique	114
CP.3 Réalisation micrométrique	114
CP.3.1 Asservissement du μ -actionneur.....	114
CP.3.2 μ -capteur de position intégré.....	118
Annexe A : Documentation technique	A1

INTRODUCTION

Introduction

La miniaturisation des objets quotidiens progresse tous les jours. L'énorme croissance de la microélectronique a fait naître des microsystèmes ayant une fonctionnalité d'actionneur ou de capteur. Comme la technologie de leur fabrication avance, la complexité de fonctionnement et de fabrication augmente. Les premiers microsystèmes étaient fabriqués en silicium, mais de nouveaux matériaux sont maintenant utilisés. Ainsi nous sommes même capables d'introduire aujourd'hui des matériaux magnétiques et de fabriquer des μ -aimants. Cela nous amène aux nouveaux horizons : on peut fabriquer des microsystèmes magnétiques.

Le Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble (LEG) et le Laboratoire d'Electronique de Technologie de l'Information (LETI) sont en train de mettre en œuvre un μ -actionneur magnétique bistable utilisant un μ -aimant mobile libre. Ce projet devrait bientôt aboutir à un prototype industriel.

Cette thèse va traiter un nouveau défi relevé : **asservir en lévitation la position de l'actionneur bistable autour d'une position instable entre ses deux positions stables.** L'actionneur va donc se retrouver en complète lévitation. L'idée qui peut sembler étrange au début va devenir plus réaliste après une analyse plus détaillée. Le concept permettrait de faire léviter des μ -objets, réaliser des μ -positionnements précis demandés dans le domaine des microsystèmes, réaliser des accéléromètres ou des capteurs de force très précis ou une tête de lecture ultrarapide. Un tel asservissement exige une modélisation de l'actionneur assez sophistiquée.

Le travail présenté ici va donc commencer par montrer la démarche de la modélisation dynamique et cinématique analytique exacte de l'actionneur. Cette modélisation nous permet ensuite de concevoir un asservissement du μ -actionneur et de vérifier par simulation la stabilité du microsystème asservi. Un prototype à l'échelle centimétrique a été réalisé et asservi en lévitation magnétique en utilisant cette démarche.

La connaissance de la dynamique de l'actionneur améliore aussi la modélisation de l'actionneur en mode bistable. La technologie de fabrication est très compliquée et coûteuse donc les modélisations théoriques préliminaires doivent être les plus précises possible. La description à partir des équations de base a été reprise et appliquée sur le μ -relais réalisé au LETI. Ces résultats sont importants pour la validation à l'échelle μ -métrique des calculs effectués, la caractérisation des performances du relais ainsi que pour la compréhension de son comportement.

Cette étude exploite différents domaines du génie électrique (calcul théorique électromagnétique, asservissement, électronique radiofréquences) mais aussi de la mécanique. Les chapitres suivants décrivent les différentes étapes de cette étude.

Le chapitre 1 présente le contexte du projet. Nous allons spécifier les différentes échelles de miniaturisation, introduire les microsystèmes et les microsystèmes magnétiques et en particulier les différents types d'actionneurs magnétiques.

Le chapitre 2 présente le principe de l'actionneur avec les différents modes de fonctionnement. On verra qu'avec un principe relativement simple nous pouvons réaliser des fonctions intéressantes et diverses. La lévitation électromagnétique avec ses principales difficultés sera aussi présentée.

Le chapitre 3 décrit les méthodes de calcul des forces et des couples électromagnétiques exercés sur l'actionneur. Différentes méthodes de calcul seront discutées afin de choisir celle qui est optimale au niveau de la précision, temps de calcul et compatibilité avec des logiciels de simulation dynamique.

A partir des calculs de forces et de couples nous pouvons modéliser le comportement dynamique de l'actionneur en lévitation dans le chapitre 4. L'actionneur possédant 6 degrés de liberté (3 translations, 3 rotations) et pour s'affranchir du phénomène de "gimbal-lock" bien connu lorsqu'on utilise les angles d'Euler, nous utiliserons une modélisation basée sur les "quaternions". Une fois la dynamique de l'actionneur connue, nous pourrons concevoir l'asservissement de position.

Une maquette en échelle centimétrique a été fabriquée pour valider cette approche. Elle contient en outre la réalisation du capteur de position de l'actionneur et une réalisation d'asservissement. Elle sera présentée dans le chapitre 5.

La conclusion de ce travail mettra en évidence les différents points intéressants et se terminera par quelques propositions d'évolutions.

CHAPITRE 1

L'ÉTAT D'ART

L'état d'art

Ce chapitre a pour but de présenter brièvement le contexte de notre étude. Nous allons d'abord introduire l'intérêt de la miniaturisation et définir l'objectif de notre travail sur les microsystèmes. Nous terminerons par quelques exemples de μ -actionneurs électromagnétiques.

1.1 Le rôle de la miniaturisation

Si vous êtes un espion par exemple, votre activité nécessitera un matériel le plus discret et donc le plus petit possible. Un appareil photo caché dans un briquet (figure 1.1a), des microphones implantés dans l'oreille, une seringue avec le poison dans votre bague ou une bombe dans un paquet de cigarettes. Avec un tel équipement vous aurez plus de chance de ne pas vous faire découvrir et ainsi mener à bien votre difficile mission.



Fig. 1.1– Exemples de miniaturisation d'outils d'espionnage :

a) briquet / appareil photo; b) un jouet : appareil photo / pistolet; c) pistolet / briquet

Ceci est un exemple anecdotique qui démontre l'intérêt de la miniaturisation. Mais il existe beaucoup d'autres avantages à la réduction de taille. Ils ont été définis dans [Haud99], entre autres:

- réduction des coûts;
- réduction des risques;
- augmentation des performances;
- intégration d'actionneurs (possibilité de μ -manipulation);
- augmentation de la fiabilité;
- sécurité (capteurs non invasifs, surveillance);
- économie d'énergie.

Il existe plusieurs définitions de microsystèmes (Micro Electro Mechanical Systems). On va citer les deux les plus répandues [Haud99].

La définition française dit que :

le microsystème est un système de petite dimension, fabriqué en quantité, de façon collective et automatique, intégrant au moins deux des fonctions suivantes : capteur et/ou traitement de signal et/ou actionneur et/ou alimentation et/ou transmission. Les cellules sensibles, des capteurs et des actionneurs sont les éléments de base des microsystèmes, fabriqués au moyen des microtechnologies et de procédés d'assemblage spécifiques.

Les microtechnologies sont des procédés de fabrication collective de microcomposants permettant la réalisation de structures 3D de l'ordre du mm^3 ayant des règles de dessin de l'ordre de quelques microns.

La définition européenne précise que :

un microsystème se définit comme un système miniaturisé comprenant un capteur et/ou un actionneur avec des fonctions de traitement de données. Celles-ci doivent normalement combiner deux ou plus des fonctions suivantes : électriques, mécaniques, biologiques, magnétiques ou autres, intégrées sur une seule puce ou de façon hybride.

On voit donc que la définition de taille d'un microsystème est assez vague. On va alors définir l'échelle de dimensions de notre application. La figure 1.2 [Paut02] montre le passage en dimensions décroissantes avec des exemples de micro et nano systèmes.

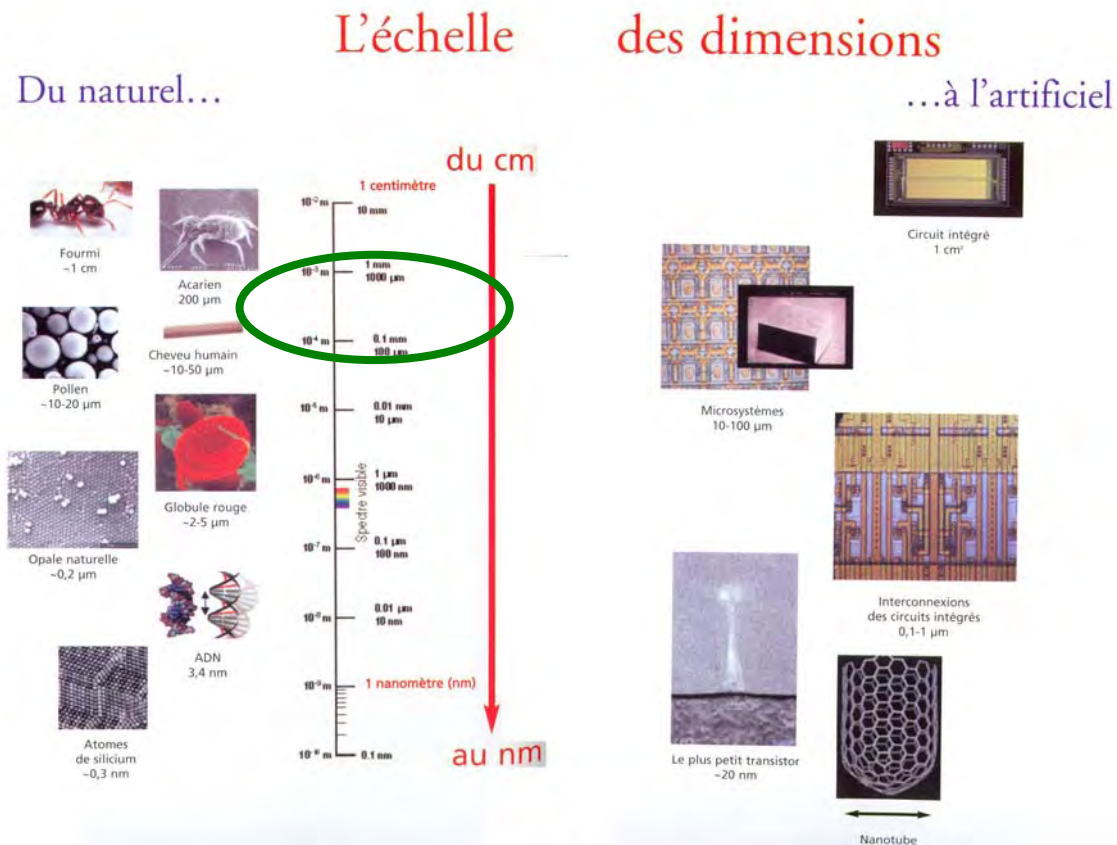


Fig. 1.2– Echelle de dimensions [Paut02]

Comme l'indique la figure 1.2 le μ -actionneur fabriqué au LETI et développé dans ce travail se positionne dans la partie haute de l'échelle.

Les μ -actionneurs sont basés sur différents principes physiques. Les principes les plus répandus sont les suivants:

- électrostatiques;
- thermiques;
- piézoélectrique;
- des alliages à mémoire de forme;
- magnétiques;

L'objectif de cette thèse est de modéliser et asservir la position d'un **μ -actionneur magnétique**.

1.2 μ -actionneurs magnétiques

Les μ -actionneurs basés sur ce principe [Reyn02] sont actuellement technologiquement en retard par rapport à leurs principaux rivaux, les actionneurs électrostatiques. [Rost04] a montré la comparaison des actionneurs basés sur différents principes. On peut retirer les conclusions suivantes de son travail: bien que les électrostatiques offrent des avantages en simplicité technologique et une faible consommation lors de l'actionnement, les actionneurs magnétiques permettent des déplacements plus importants et la bistabilité facile à mettre en œuvre (consommation nulle au repos). Les actionneurs électrostatiques nécessitent en général des tensions élevées alors que les actionneurs magnétiques des courants élevés.

Un critère crucial pour la conception et la réalisation d'un μ -actionneur est le matériau utilisé ainsi que sa compatibilité technologique. Les matériaux suivants sont utilisés dans la fabrication de μ -actionneurs électromagnétiques:

- matériaux ferromagnétiques durs : aimants
- conducteurs : bobines
- matériaux ferromagnétiques doux : fer-nickel, ...

L'intérêt de la réduction d'échelle des dispositifs électromagnétiques [Dela02], [Rost04] est présenté sur la figure 1.3, avec

- k ...facteur de réduction de dimension d'un objet;
- k_i ... facteur d'augmentation de densités de courant (on peut par ailleurs imposer des densités de courant beaucoup plus importantes dans le domaine de microsystèmes...);
- k_f ... facteur d'augmentation de la fréquence d'oscillations (de la même façon, les fréquences d'oscillations atteintes en μ -échelle sont plus importantes).

Si par exemple la taille de deux aimants en interaction et leur distance est réduite homothétiquement de k fois, la force massique (rapport force/masse) dans l'interaction augmente k fois.











Réduction d'échelle $1/k$	aimant	courant	fer	induction
 $\times k$ 	$\times k_i$ 	$\times \frac{1}{k} \cdot k_i^2$ 	$\times \frac{1}{k} \cdot k_i$ 	$\times \frac{1}{k^2} \cdot k_i \cdot k_f$ 
$\times k_i$ 	$\times \frac{1}{k} \cdot k_i^2$ 	$\times \frac{1}{k} \cdot k_i$ 	$\times \frac{1}{k^2} \cdot k_i \cdot k_f$ 	

Fig. 1.3—Intérêt de la réduction d'échelle en électromagnétisme

On voit donc que la réduction d'échelle pour les dispositifs magnétiques est extrêmement intéressante pour les interactions aimant - aimant et aimant - fer. La force massique entre un aimant et un conducteur (Laplace) augmente de facteur d'augmentation de densités de courant. Les interactions avec le smiley neutre ☺ sont moins intéressantes car la force massique diminue avec la réduction d'échelle, mais peut être "rattrapée" par l'augmentation de densité de courant et/ou fréquence d'oscillations. Les interactions type courant/courants induits ne sont à priori pas favorables sauf les cas où nous arrivons aux grandes fréquences d'oscillation.

Alors que les avantages de l'actionnement magnétique ont été démontrés, pourquoi ne sont-ils pas davantage répandus? C'est surtout un problème technologique qui, jusqu'à maintenant ralentissait leur développement. Les matériaux magnétiques sont difficiles à intégrer et il est difficile d'aimer les aimants. Cependant les progrès technologiques actuels permettent de plus en plus de tirer partie des nombreux avantages qu'ils présentent.

Ce retard technologique a pour conséquence une miniaturisation moins avancée pour les μ -actionneurs magnétiques: ils sont actuellement plus grands en dimensions que leur frères électrostatiques. Les μ -moteurs magnétiques ont un diamètre de quelques millimètres, les μ -bobines également, les μ -aimants atteignent des dizaines de μ -mètres, mais l'intégration progresse remarquablement.

Voici une statistique des articles publiés dans les revues. Voyons le nombre d'articles contenant le mot "magnétique" dans la revue "Journal of microelectromechanical systems" (figure 1.4a) et revue "Microsystems technology" (figure 1.4b).

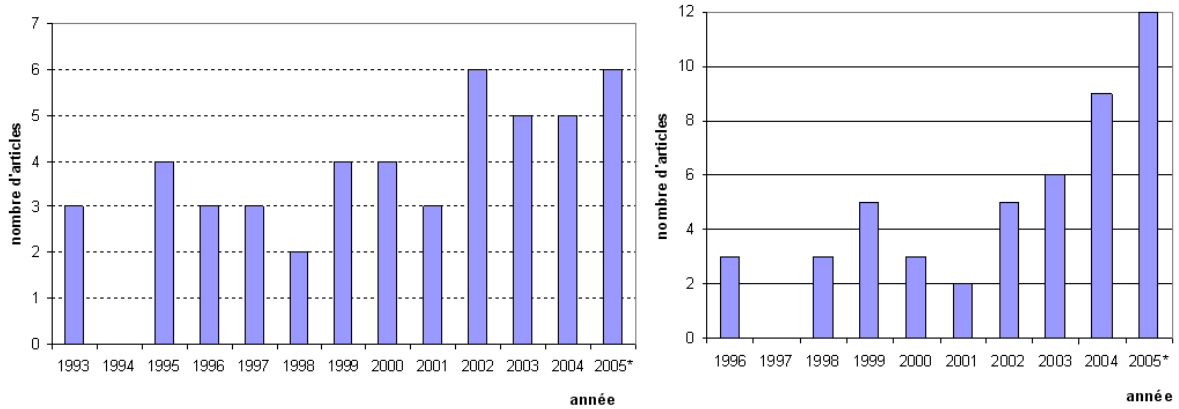


Fig. 1.4– Nombre d'articles contenant le mot clé "magnetic"
a) JMEMS, b) Microsystems technology

La prévision pour l'année 2005 est calculée à partir du nombre d'articles publiés jusqu'en mars 2005. On peut observer la tendance croissante du nombre d'articles publiés, ce qui montre l'intérêt croissant des scientifiques pour les microsystèmes magnétiques.

1.3 État de l'art

Dans ce chapitre, nous essayerons de démontrer la variété des μ -actionneurs magnétiques développés jusqu'à ce jour. Nous donnons une liste non exhaustive des applications les plus répandues :

- μ -relais;
- μ -pompes, μ -valves;
- bio-manipulation;
- μ -positionneurs;

La liste n'inclut pas les machines rotatives telles que les moteurs et générateurs. Leur taille aujourd'hui dépasse deux millimètres et leur fonctionnement est très différent de celui de notre application définie en plus de détails dans le chapitre 2.

1.3.1 μ -relais

μ -relais utilisant des aimants [Ruan01]

Ce paragraphe présente la première réalisation industrielle d'un μ -relais bistable. Le principe est montré sur la figure 1.5a. Le μ -relais est composé d'une poutre flexible de permalloy (*permalloy cantilever*) qui est un matériau magnétique doux, d'un aimant permanent (*permanent magnet*) rapporté dans le substrat, et une bobine planaire (*coil*). Le bras en permalloy est fixé à gauche et il est libre de se déplacer à droite : c'est là que le μ -relais commute.

La poutre en permalloy a une direction de facile aimantation dans le sens de la longueur (direction x); elle va donc naturellement rester dans la position dessinée sur la figure 1.5a et le

contact est fermé. Si on impose un courant électrique dans la bobine, le moment magnétique du permalloy va avoir tendance à s'aligner avec le champ créé par la bobine. Le bras tourne autour du point fixe, il se redresse dans le champ vertical créé par l'aimant et le contact est alors ouvert.

La réalisation du μ -relais est montrée sur la figure 1.5b.

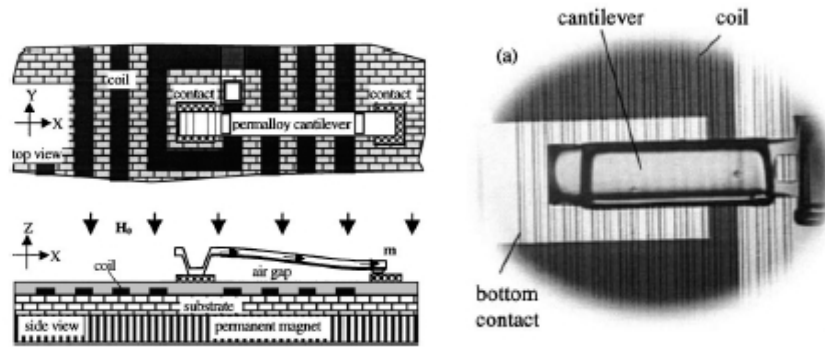


Fig. 1.5– Microlatch a) principe, b) réalisation

μ -relais à base de matériaux ferromagnétiques [Full98], [Tilm99]

Ce μ -relais n'utilise aucun aimant. Le principe est présenté sur la figure 1.6. La partie fixe est constituée d'un électroaimant contenant un noyau en U (*U-core electromagnet*) et une bobine (*coil*). Le circuit magnétique est composé d'un substrat de FeSi, de plots et d'une armature mobile en FeNi. La partie mobile (*moving keeper*) est suspendue au-dessus de l'électroaimant, elle est tenue sur le côté droit (*fix part*) et peut se déplacer verticalement grâce à des poutres (*beams*) flexibles. Lorsque la bobine est activée, la poutre vient se coller au circuit pour fermer l'entrefer.

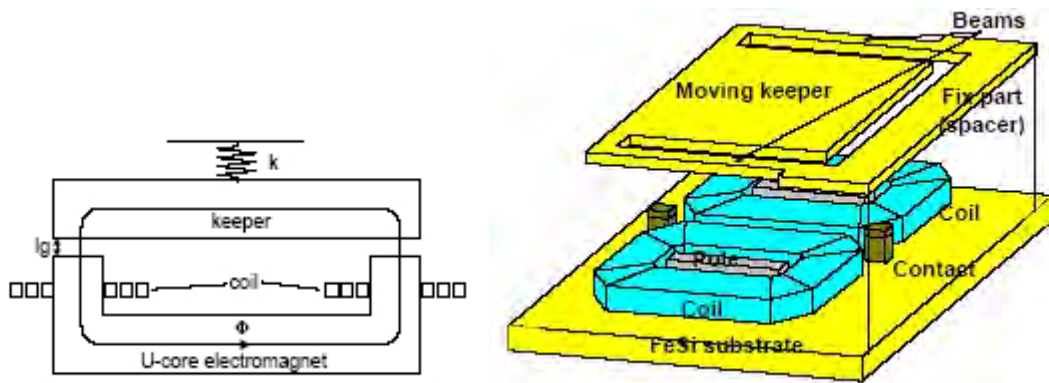
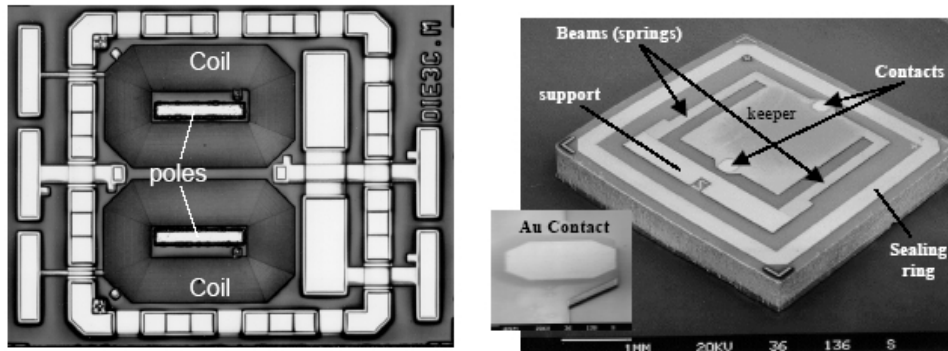


Fig. 1.6– Principe du μ -relais ferromagnétique
a) coupe transversale b) vue 3D

Les deux parties fonctionnelles sont réalisées sur deux substrats différents. Les deux substrats sont ensuite alignés par la technologie flip-chip [Lau95]. La figure 1.7 présente les deux substrats fabriqués mais pas encore assemblés.

Fig. 1.7– Réalisation du μ -relais magnétique

1.3.2 μ -pompes, μ -valves

Les μ -pompes sont principalement constituées d'un ou de plusieurs μ -actionneurs à membrane et μ -valves. Il existe des μ -pompes avec des valves ferrofluidiques [Hatch01], [Yama05] et aussi avec des valves mécaniques [Yoon04], [Kim05]. Cet exemple de pompe est présenté sur la figure 1.8.

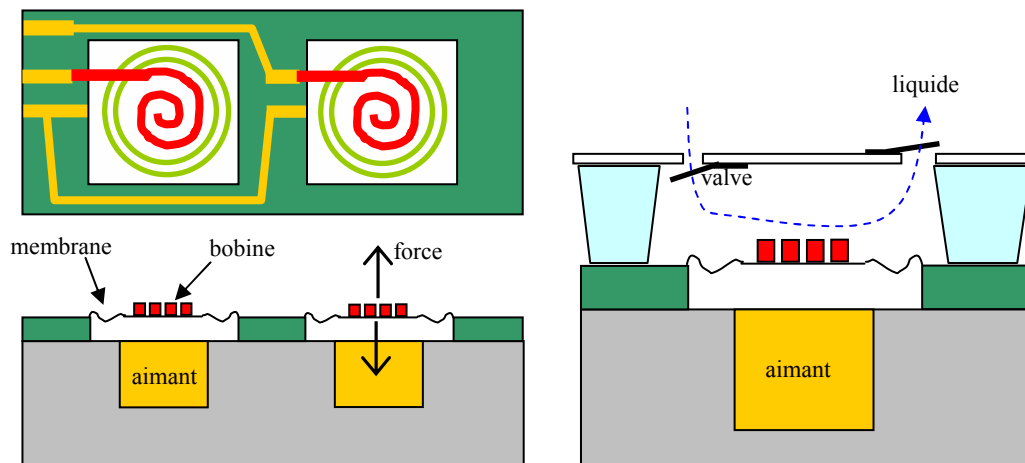


Fig. 1.8– Principe de μ -pompe
a) structure de base b) passage du liquide

La μ -pompe est composée d'un aimant intégré dans le substrat et d'une bobine implantée dans le diaphragme. Si l'on impose le courant électrique dans la bobine, elle va être attirée ou repoussée selon les flèches. La membrane (diaphragme) est fabriquée en parylène, qui est résistante à l'eau. On peut donc utiliser l'actionneur comme dessiné sur la figure 1.8b. Il suffit d'ajouter deux valves unidirectionnelles pour que le liquide soit pompé de gauche à droite.

1.3.3 Exemple de bio-manipulation

Les μ -pompes et les μ -valves jouent un rôle crucial dans les applications de bioMEMS. Un exemple de μ -pompe a déjà été montré ci-dessus. Parmi les autres outils d'analyse de cellules et autres substances biologiques, il y a aussi les mélangeurs et les trieurs.

On profite alors du fait que certaines substances biologiques ont des propriétés magnétiques particulières (par exemple les globules rouges sont ferromagnétiques – elle contiennent du fer à l'intérieur). Il suffit de faire passer le liquide à proximité d'un aimant pour que les particules magnétiques soient filtrées ou leur mouvement soit dévié [Zbor99], [Kell98].

Nous allons présenter ici un dispositif [Suzu04] où les particules sont secouées à l'aide d'un champ magnétique créé par des conducteurs. Il s'agit d'un mixeur. Son fonctionnement peut être vu sur la figure 1.9. Le liquide entre dans un canal (*channel side wall*) dans une zone avec des *obstacles*. De plus, dans cette zone, il y a des conducteurs qui créent un champ magnétique représenté sur la figure 1.9b. Les turbulences causées par les obstacles (fig. 1.9a), combinées à la déviation de trajectoire des particules due au champ magnétique (fig. 1.9b), vont produire un flux chaotique du fluide (fig. 1.9c) et ainsi le brassage souhaité.

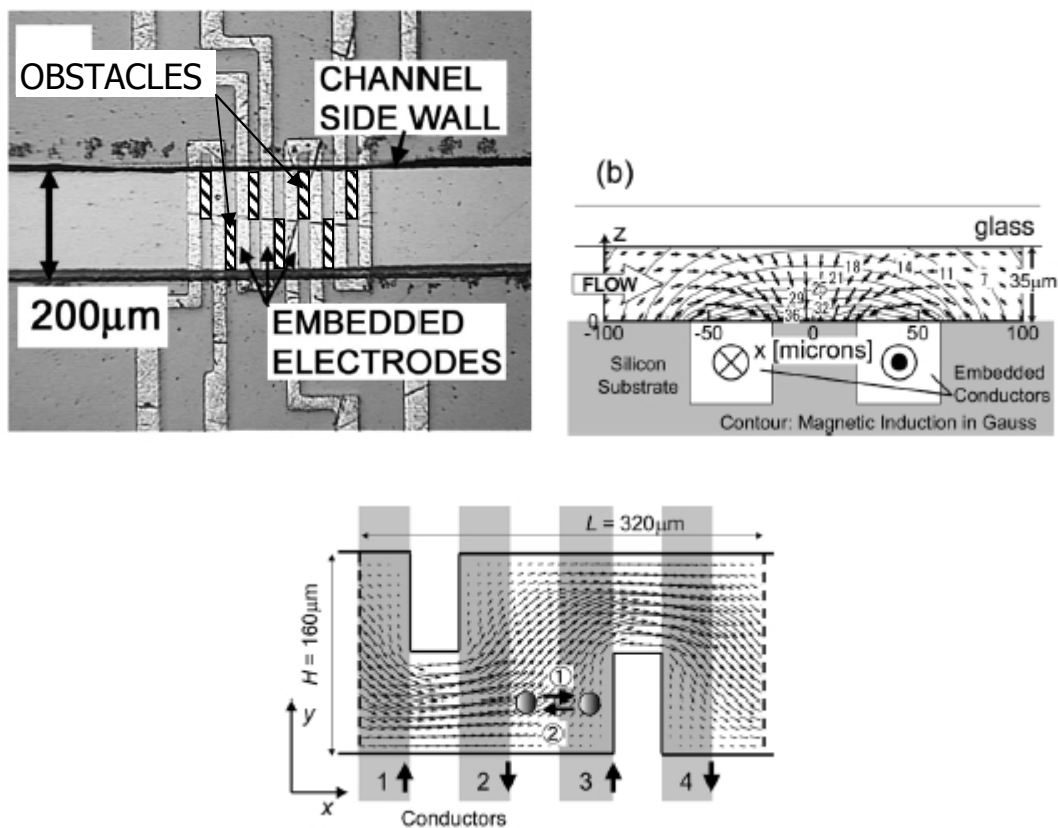


Fig. 1.9– Principe du μ -mélangeur

- a) réalisation du canal avec électrodes et obstacles b) induction magnétique due aux conducteurs
c) brassage de bioparticules

1.3.4 Exemple de μ -positionneur [Bhan00]

Cette application est très intéressante par rapport au sujet de cette thèse (présenté en plus de détails dans le chapitre suivant). Il s'agit d'un μ -positionneur avec un degré de liberté utilisé au départ comme μ -suspension magnétique. La structure est représentée sur la figure 1.10a. Un aimant permanent (*permanent magnet*) est suspendu sur une poutre flexible en

forme de spirale carrée (*beam*, visible sur la figure 1.10b). La bobine d'actionnement (*drive coil*) peut faire monter ou descendre l'aimant. La position de l'aimant est mesurée par un capteur inductif (*sensor coil*). Le même capteur placé à gauche sert de référence (*reference coil*) de mesure pour corriger les perturbations en température.

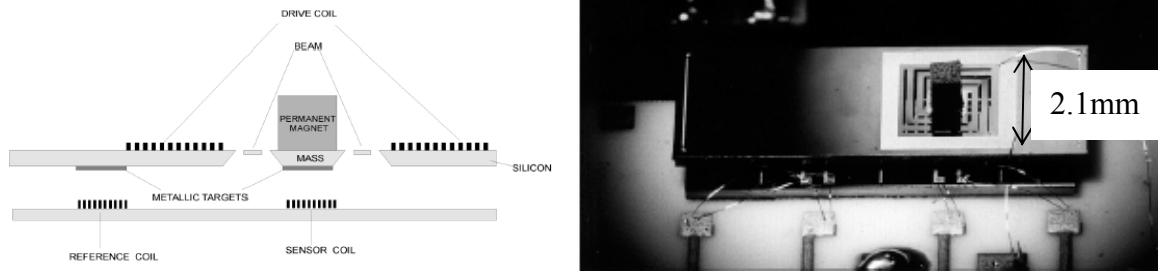


Fig. 1.10– μ -positionneur suspendu, 1 degré de liberté
a) principe b) réalisation

Le système est en "boucle fermée" afin d'asservir la position verticale de l'aimant (figure 1.11). L'asservissement est fait avec un correcteur à avance de phase et permet de réaliser des déplacements de $\pm 20 \mu\text{m}$.

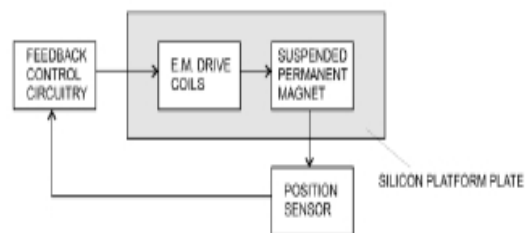


Fig. 1.11– Asservissement du μ -positionneur en boucle fermée

1.4 Conclusion

Nous avons décrit dans ce chapitre le contexte de l'étude à savoir celui des microsystèmes, en particulier les μ -actionneurs magnétiques. L'intérêt de leur miniaturisation a été montré. Nous avons aussi présenté quelques exemples de fabrication de μ -actionneurs magnétiques pour différentes applications. Les réalisations industrielles ne sont pas très nombreuses aujourd'hui, il s'agit surtout de démonstrateur de "laboratoire". Cependant le nombre croissant de publications sur les μ -actionneurs électromagnétiques indique que les verrous technologiques sont progressivement levés, ce qui autorise de nouvelles architectures et des concepts nouveaux.

Références :

- [Bhan00] S. Bhansali, A. L. Zhang, R. B. Zmood, P. E. Jones, D. K. Sood, "Prototype feedback-controlled bidirectional actuation system for MEMS applications", *Journal of microelectromechanical systems*, Vol. 9, no.2, pp. 245-251, 2000
- [Ciud04] D. Ciudad, C. Aroca, M. C. Sanchez, E. Lopez, P. Sanchez, "Modeling and fabrication of a MEMS magnetostatic magnetic sensor", *Sensors and Actuators A Physical*, Vol. 115, pp. 408-416, 2004
- [Cuga02] O. Cugat, *et al.*, "Micro-actionneurs électroactifs", Paris, Lavoisier, Hermès Science Publications, ISBN 2-7462-0364-2, 2002
- [Dela04] J. Delamare, G. Reyne, O. Cugat, "Magnetic down-scaling laws, micro-magnets and applications of magnetic micro-actuators (MAGMAS)", *Proceedings of the 18th International Workshop on High Performance Magnets and their applications (HPMA'04)*, Annecy, France, 2004
- [Full98] E. Fullin, J. Gobet, H.A.C. Tilmans, J. Bergquist, "A new basic technology for magnetic micro-actuators", *MEMS 98 Workshop*, Heidelberg, 1998
- [Hatc01] A. Hatch, A. E. Kamholz, G. Holman, P. Yager, K. F. Böhringer, "A Ferrofluidic magnetic micropump", *Journal of microelectromechanical systems*, Vol. 10, no. 2, 2001
- [Haud99], D. Hauden, M. de Labachellerie *et al.*, "Microsystèmes" , Editeur OFTA (Observatoire Français de Techniques Avancées), ISBN 2/906028-07-X, 1999
- [Kell98] D. R. Kelland, "Magnetic separation of nanoparticles", *IEEE Transactions on magnetics*, Vol. 34, no. 4, pp. 2123 -2125, 1998
- [Kim05] K. H. Kim, H. J. Yoon, O. C. Jeong, S. S. Yang, "Fabrication and test of a micro electromagnetic actuator", *Sensors and Actuators A*, Vol. 117, pp.8-16, 2005
- [Lago99] L.K. Lagorce, O. Brand, M. G. Allen, "Magnetic microactuators based on polymer magnets", *IEEE Journal of microelectromechanical systems*, Vol. 8, no. 1, pp. 2-9, 1999
- [Lau95] J. Lau, "Flip Chip Technologies", New York: McGraw-Hill, 1995
- [Lee02] H.-S. Lee, C.H. Leung, J. Shi, S.-C. Chang, S. Lorincz, I. Nedelescu, "Integrated microrelays: concepts and initial results", *Journal of microelectromechanical systems*, Vol. 11, no. 2, pp. 147-153, 2002
- [Pasq03] M. Pasquale, "Mechanical sensors and actuators", *Sensors and Actuators A Physical*, Vol. 106, pp. 142-148, 2003
- [Paut02] J.-L. Pautrat, "Demain le nanomonde", Fayard, imprimé dans les ateliers de Bussière Camedan Imprimeries, ISBN 2-213-6133-62, 2002
- [Reyn02] "Chapitre 1: De l'actionnement électromagnétique et des microsystèmes", dans "Micro-actionneurs électromagnétiques MAGMAS", Paris, Lavoisier, Hermès Science Publications, ISBN 2-7462-0449-5, 2002

- [Rost04] H. Rostaing, "Conception, modélisation et fabrication d'un micro-actionneur bistable, hors plan et magnétique", thèse de l'Institute Nationale Polytechnique de Grenoble, réalisé au Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble, décembre 2004
- [Ruan01] M. Ruan, J. Shen, C.B. Wheeler, "Latching microelectromagnetic relays", *Sensors and Actuators A*, Vol. 91, pp. 346-350, 2001
- [Suzu04] H. Suzuki, C.-M. Ho, N. Kasagi, "A Chaotic mixer for magnetic bead-based micro-cell sorter", *Journal of microelectromechanical systems*, Vol. 13, no.5, pp. 779-790, 2004
- [Tayl98] W. P. Taylor, O. Brand, M. G. Allen, "Fully integrated magnetically actuated micromachined relays", *Journal of microelectromechanical systems*, Vol. 7, no. 2, pp.181-191, 1998
- [Tilm99] H. A. C. Tilmans, E. Fullin, H. Ziad, M. D. J. Van de Peer, J. Kesters, E. Van Geffen, J. Berquist, M. Pantus, E. Beyne, K. Baert, F. Naso, "A fully-packaged electromagnetic microrelay", *Proceeding on MEMS'99*, Orlando, 1999
- [Will04] J. D. Williams, R. Yang, W. Wang, "Numerical simulation and test of a UV-LIGA-fabricated electromagnetic micro-relay for power applications", *Sensors and Actuators A Physical*, accepté en 2004, à paraître
- [Yama05] C. Yamahata, M. Chastellain, V. K. Parashar, A. Petri, H. Hofmann, M. A. M. Gijs, "Plastic Micropump With Ferrofluidic Actuation", *Journal of microelectromechanical systems*, Vol. 14, no. 1, 2005
- [Yoon04] H. J. Yoon, J. M. Jung, J. S. Jeong, S. S. Yang, "Micro devices for a cerebrospinal fluid (CSF) shunt system", *Sensors and Actuators A*, Vol. 110, pp.68-76, 2004
- [Zbor99] M. Zborowski, L. Sun, L. R. Moore, P. S. Williams, J. J. Chalmers, "Continuous cell separation using novel magnetic quadrupole flow sorter", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 194, pp. 224-230, 1999

CHAPITRE 2

μ -ACTIONNEUR

MAGNÉTIQUE BISTABLE;

APPLICATION

μ -POSITIONNEUR

μ -actionneur magnétique bistable; application μ -positionneur

Ce chapitre a pour but de présenter le μ -actionneur magnétique bistable dont nous concevons l'asservissement en lévitation. Nous verrons dans un premier temps sa structure de base, puis nous introduirons les différentes applications de tels μ -actionneurs : le μ -relais horizontal réalisé par Jérôme Meunier-Carus au LETI, la réalisation du μ -relais vertical de Hervé Rostaing au LETI, une vanne et surtout le sujet principale de cette étude, à savoir, un μ -positionneur.

Les applications importantes seront ensuite exposées plus en détail. Nous étudierons le procédé de fabrication du μ -relais, la conception de la vanne, puis les principales difficultés pour réaliser le μ -positionneur. Cette connaissance va nous permettre de définir les travaux consécutifs pour la modélisation et la réalisation du μ -positionneur asservi, qui seront abordés dans les chapitres suivants 3, 4 et 5.

2.1 Conception: Principe de base

La structure de l'actionneur de base dessinée est brevetée dans un brevet international [Dela01]. Elle est présentée sur la figure 2.1.

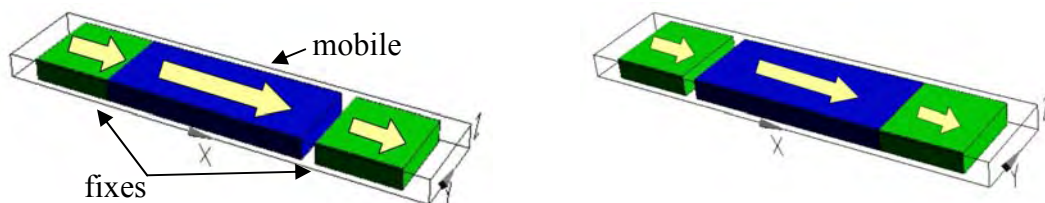


Fig. 2.1– Structure de base de l'actionneur
a) l'aimant mobile à gauche, b) l'aimant mobile à droite

L'actionneur est composé de deux aimants fixes (collés sur un support) et un aimant mobile complètement libre, placé entre les deux aimants fixes. Les aimants sont aimantés selon les flèches. L'aimant mobile a deux positions stables collé contre l'un des deux aimants fixes : une à gauche (figure 2.1a) et l'autre à droite (figure 2.1b).

Le déplacement se fait à l'aide de deux conducteurs. Si l'on fait passer le courant électrique dans un conducteur à proximité d'un aimant, le conducteur subit une force de

Laplace dans le champ de l'aimant; l'aimant subit la force inverse de réaction. Pour déplacer l'aimant dans le bon sens il faut choisir la bonne forme pour le conducteur.

Dans notre cas les conducteurs sont placés dans le plan inférieur (figure 2.2) car l'on utilisera des technologies de μ -fabrication planaire.

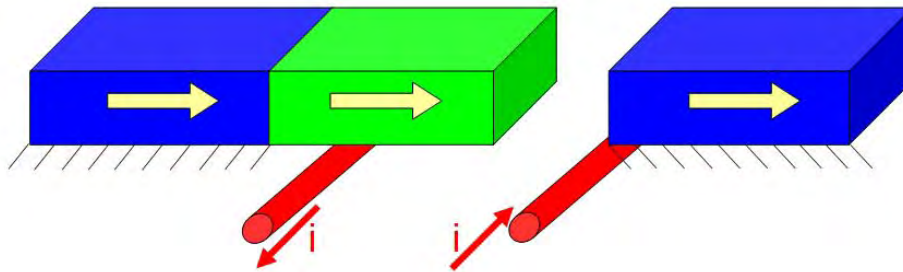


Fig. 2.2– Positions de conducteurs

Pour déterminer la position optimale des conducteurs, analysons l'interaction seulement entre l'aimant mobile et les conducteurs (figure 2.3). La force de Laplace créée par l'aimant mobile sur les conducteurs est déterminée à partir de champ tracé sur la figure 2.3.

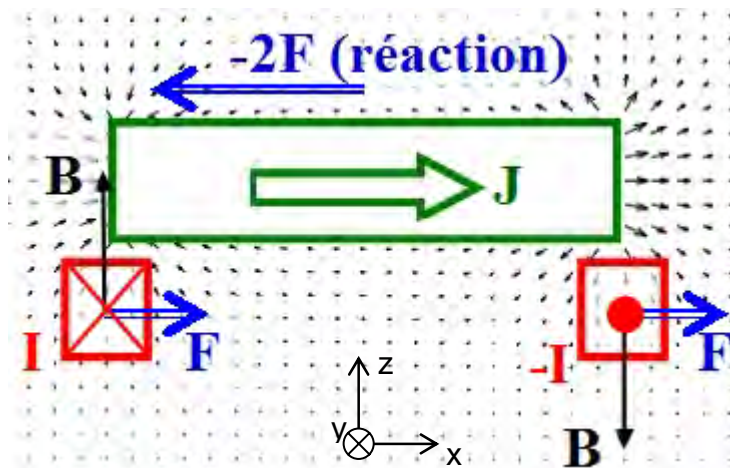


Fig. 2.3– Carte de champ de l'aimant mobile

Si l'on place les conducteurs dans les zones désignées selon la figure 2.3, le champ magnétique où baignent les conducteurs est principalement orienté verticalement suivant l'axe Oz. Si le courant dans le conducteur entre dans la feuille, la force de Laplace créée sur lui sera orientée à droite. Par le principe d'action et de réaction la même force opposée va être exercée sur l'aimant mobile par le conducteur. Comme le conducteur est fixé sur le support, c'est l'aimant mobile qui se déplace.

La figure 2.3 montre que pour créer une force horizontale (axe Ox) avec des courants perpendiculaires au plan du dessin, nous avons besoin d'un champ vertical (axe Oz). Nous avons visualisé la carte du champ vertical sur la figure 2.4. On voit bien que les zones les plus avantageuses sont aux bords de l'aimant mobile.

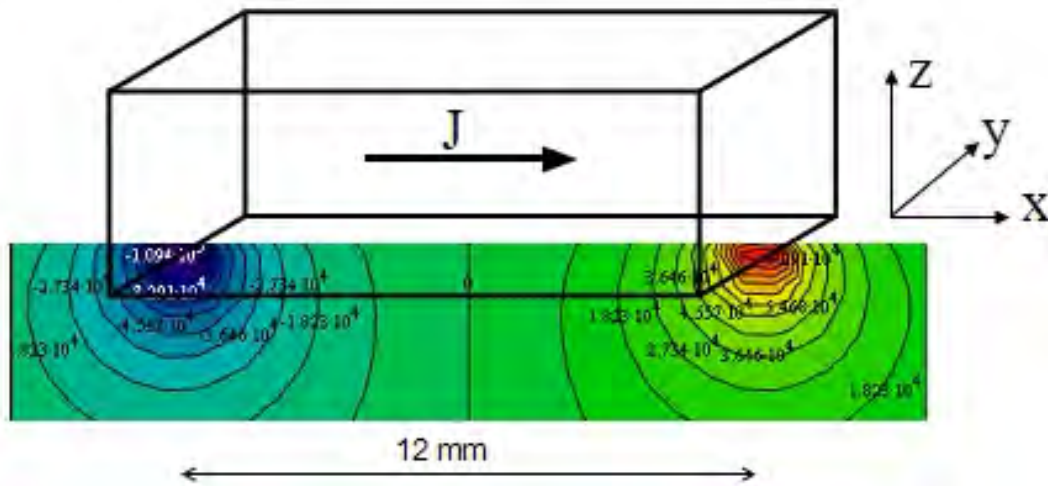


Fig. 2.4– Composante verticale B_z du champ créé autour de l'aimant mobile

On va donc essayer de placer les conducteurs très près des bords. Comme l'aimant mobile doit être en lévitation (sans contact), il faut garder une distance minimale.

Grâce à la démarche exposée précédemment on peut montrer que dans le cas d'un aimant axisymétrique autour de son axe d'aimantation la forme de conducteur la plus efficace pour interagir avec l'aimant mobile est un anneau.

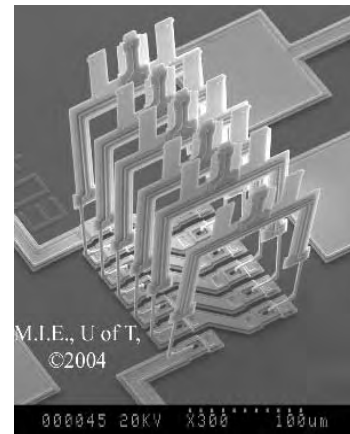
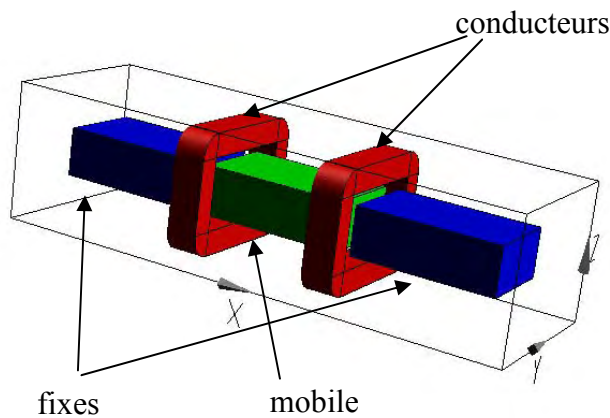


Fig. 2.5 Forme 3D du conducteur

a) forme optimale pour l'actionnement b) principe de réalisation possible [Utmi05@]

La bobine en forme d'anneau entoure l'aimant mobile. Les technologies planaires en microsystemes imposent plutôt la forme plane dessinée sur la figure 2.2. Il existe des techniques pour créer des bobinages 3-D ([figure 2.5b [Utmi05@]; flip chip) mais elles sont beaucoup plus contraignantes et demandent des empilements technologiques complexes. On va donc opter pour la solution planaire dessinée sur la figure 2.2 pour la réalisation des premiers prototypes et donc aussi pour la maquette centimétrique qui doit en être une représentation fidèle.

2.2 Applications bistables

2.2.1 Maquette centimétrique

Dans le travail précédent [Step02] nous avons construit une maquette à l'échelle centimétrique pour démontrer la faisabilité de l'objet envisagé. Voici le prototype (figure 2.6):

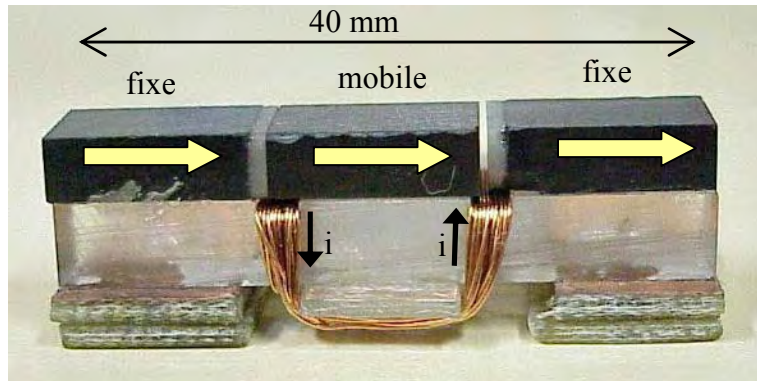


Fig. 2.6– Maquette centimétrique

Cette maquette nous a servi à démontrer le principe de fonctionnement ainsi qu'à caractériser le comportement dynamique. La commutation de l'aimant mobile est obtenue en envoyant un pic de courant grâce à une décharge capacitive aux bornes du conducteur. Les validations de calcul des forces et des couples ainsi que les premiers essais du comportement dynamique de cette maquette seront montrés dans le chapitre 3.

2.2.2 μ -relais (RAIMI) au LETI

Parallèlement à mon travail de DEA [Step02], les premiers prototypes sur silicium ont été μ -fabriqués [Diep04a] en salle blanche au LETI/CEA. En configuration "relais", c'est l'aimant mobile lui-même qui assure le contact électrique en butée sur les aimants fixes (figure 2.7a).

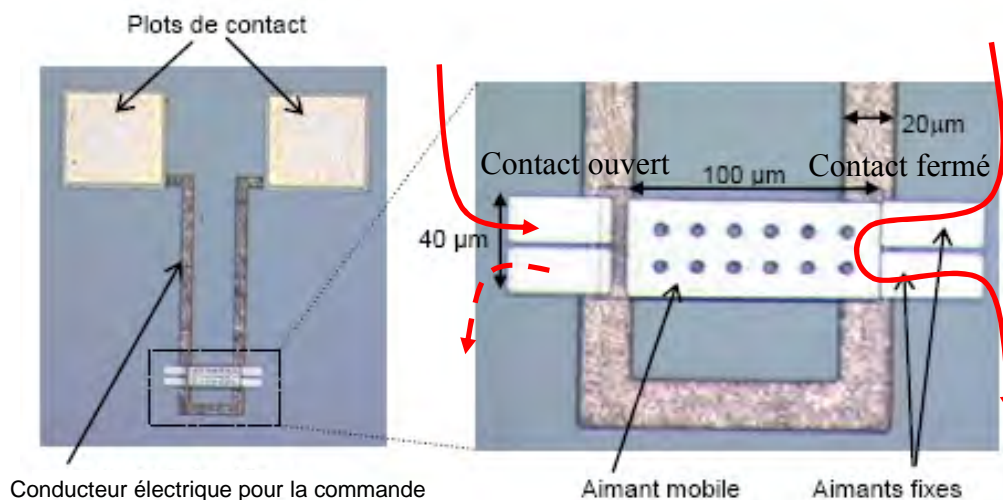


Fig. 2.7– Réalisation du μ -actionneur du LETI [Diep04b] : a) vue globale, b) détail de l'actionneur

Les aimants fixes sont divisés dans le plan Oxz et leurs surfaces recouvertes d'or. L'aimant mobile, qui est aussi enveloppé d'or, court-circuite les deux contacts fixes lorsqu'il vient en contact. Quand l'aimant mobile se déplace, ce contact s'ouvre et le contact de l'autre côté est court-circuité à son tour (figure 2.7b). La description complète de la fabrication du μ -relais est présentée dans le chapitre 2.3.

2.2.3 Vanne

Ce même principe peut aussi servir pour la fabrication d'une vanne. Le principe est présenté sur la figure 2.8.

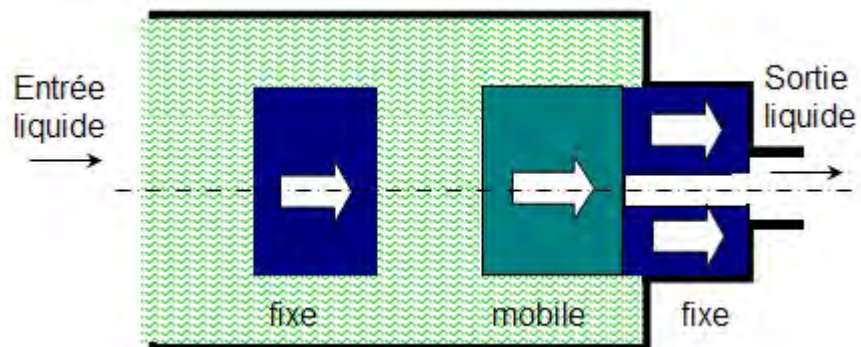


Fig. 2.8– Vanne électromagnétique

La vanne est composée de deux aimants fixes et un aimant mobile. La vanne est dessinée en position fermée : l'aimant mobile obstrue le passage du fluide à travers l'aimant fixe à droite. Les bobines d'actionnement ne sont pas dessinées sur la figure. Dans le cadre d'un contrat industriel j'ai conçu, optimisé et réalisé un prototype millimétrique de cette vanne. Ces résultats sont pour l'instant confidentiels.

2.2.4 μ -actionneur magnétique vertical (MIAM)

Mon collègue Hervé Rostaing a développé pendant sa thèse [Rost04] un μ -actionneur magnétique bistable à grand déplacement ($30 - 120 \mu\text{m}$) dérivé du μ -relais dans le plan. Le principe est donné sur la figure 2.9.

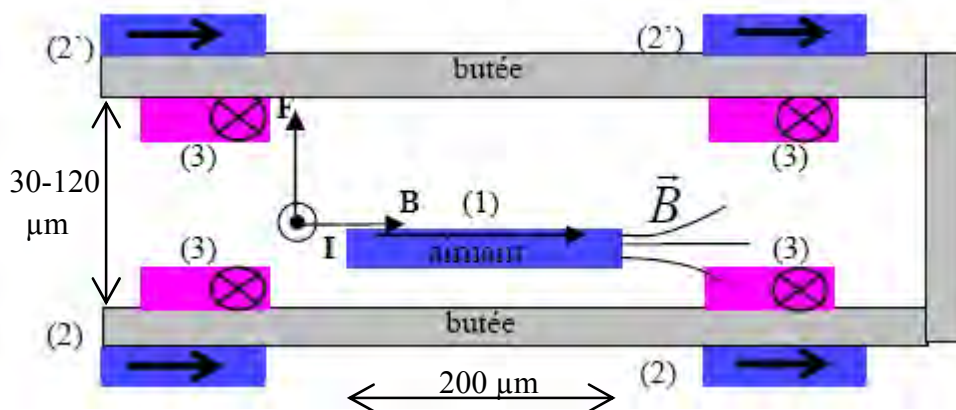


Fig. 2.9– Principe du μ -actionneur magnétique vertical

L'actionneur est vertical, il comporte deux aimants fixes en bas (2), et deux autres en haut (2'). L'aimant mobile (1) a également deux positions stables assurées par des aimants fixes (2, 2'), en bas et en haut. Quatre conducteurs de courant (3) sont utilisés pour déplacer l'aimant mobile avec la force indiquée dans la figure 2.9. Cet actionneur est technologiquement plus compliqué, mais offre l'avantage de déplacements plus importants. Les applications potentielles sont un interrupteur de haute tension ou un interrupteur optique.

Cet actionneur est en phase finale de prototypage. La figure 2.10 montre la réalisation de l'aimant mobile et des conducteurs sur un niveau. Le courant passe dans le conducteur selon les flèches, les ailettes servent comme radiateurs ce qui permet de faire passer des densités de courant pulsé très élevées (jusqu'à 90000 A/mm^2) [Rost05] sans endommager les conducteurs.

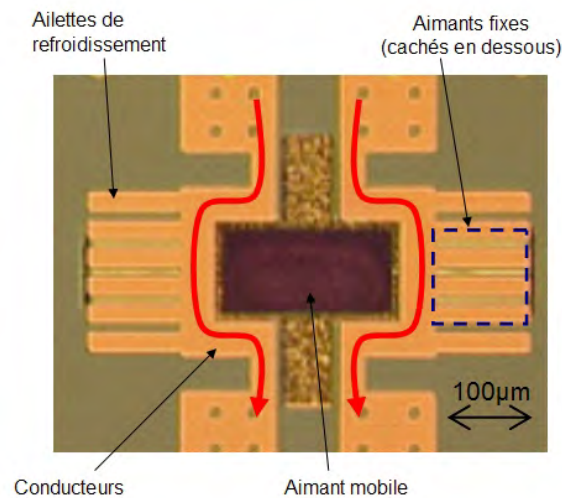


Fig. 2.10– Réalisation du substrat inférieur du μ -actionneur vertical (MIAM) avec les courants d'actionnement

2.3 Fabrication du μ -relais (RAIMI) au LETI

Le projet de fabrication de μ -relais décrit dans le chapitre 2.2.2 a été mené par Jérôme Meunier-Carus sous la direction de Christel Dieppedale [Diep04a]. Arnaud Walther a remplacé Jérôme Meunier-Carus en 2004. Une description plus détaillée de l'avancement des travaux est présentée dans ce paragraphe.

La fabrication de ce μ -relais a l'avantage d'être beaucoup plus simple que le μ -relais se déplaçant verticalement (MIAM) car elle ne nécessite pas de report de substrat. Les principales étapes technologiques sont présentées sur la figure 2.11. Il s'agit de la fabrication des conducteurs, de l'électrolyse des aimants et de la libération de l'aimant mobile

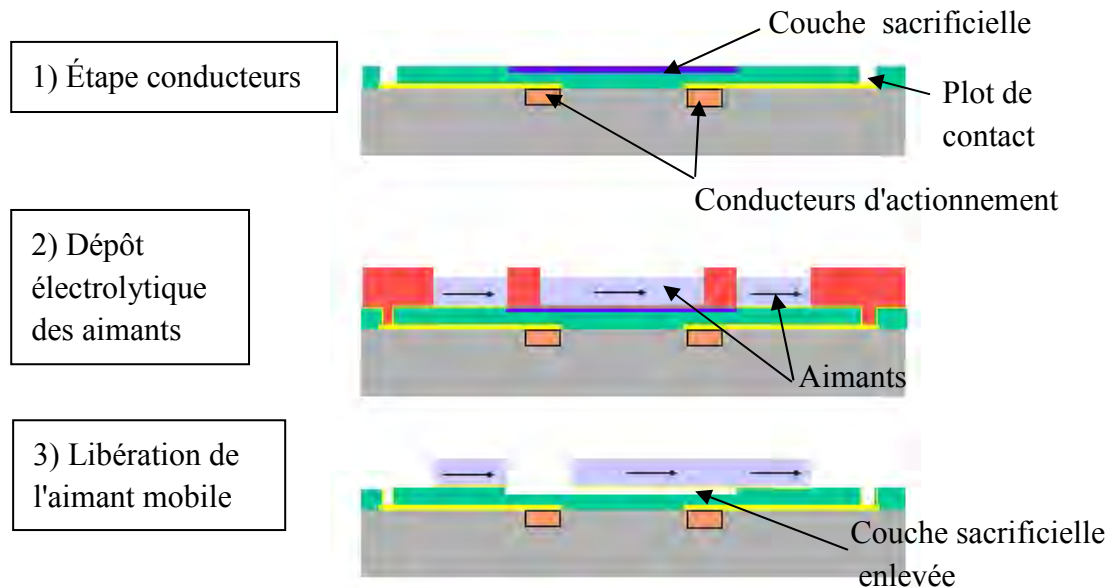


Fig. 2.11– Grandes étapes de fabrication du μ -actionneur RAIMI

2.3.1 Conducteur d'actionnement

La fabrication des conducteurs commence par la gravure des caissons dans le silicium. Les caissons sont remplis de cuivre qui est ensuite planarisé. On procède par le dépôt et la gravure des plots de contact et un dépôt d'oxyde de silicium (SiO_2) pour définir la distance entre les conducteurs et les aimants. La procédure continue par le dépôt d'une couche sacrificielle qui va servir plus tard pour libérer l'aimant mobile. Les plots sont finalement ouverts.

La figure 2.12 illustre la réalisation des conducteurs vue en coupe. La surface des conducteurs est $10 \times 25 \mu\text{m}$ c'est-à-dire $250 \mu\text{m}^2$.

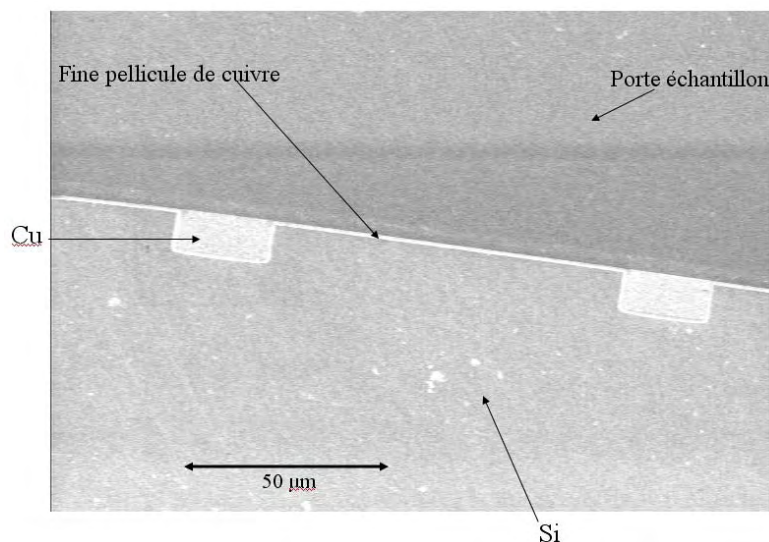


Fig. 2.12– Substrat de conducteurs du μ -actionneur

2.3.2 Aimants

On dépose d'abord une sous-couche d'or qui va servir à l'électrodéposition du matériau ferromagnétique. Puis on fait croître par électrolyse le CoPtP (Cobalt-Platine-Phosphore) sous champ magnétique (1,2 T) afin d'améliorer ses propriétés magnétiques. On crée ensuite la forme des aimants grâce à des caissons de résine épaisse qui débouchent sur la sous-couche d'or. Une réalisation d'aimants est présentée sur la figure 2.13.

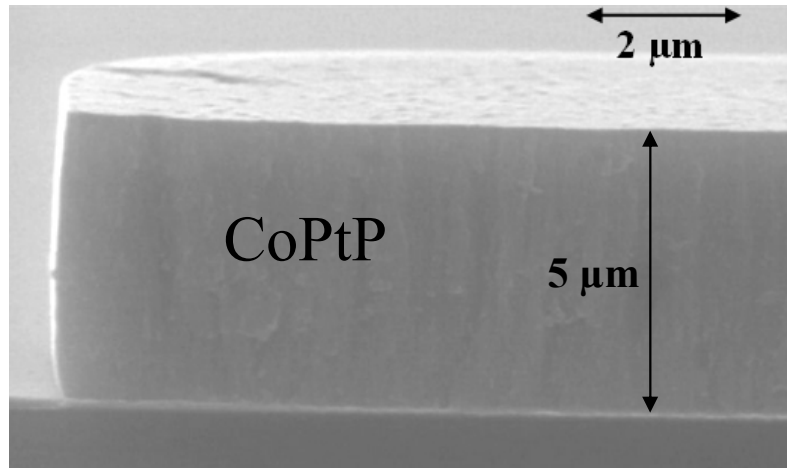


Fig. 2.13– Substrat d'aimants du μ -actionneur en coupe

L'aimant cristallise dans le système hexagonal et apparaît comme une matrice de CoPtP contenant des inclusions d'atomes de platine. La coercitivité de l'aimant est de 0,4T et sa rémanence de 0,21T.

2.3.3 Libération de l'aimant mobile

L'aimant mobile doit commuter entre ses deux positions stables en lévitation. Comme il est collé au substrat lors de sa fabrication, il faut tout d'abord le libérer pour qu'il puisse bouger. Il vient alors se coller dans une de ses deux positions stables. Il faut par cela enlever la résine enveloppant les aimants (voir figure 2.11) et attaquer chimiquement la couche sacrificielle déposée pendant l'étape de fabrication des conducteurs. L'aimant mobile est troué – cette astuce facilite la pénétration de la sauce gravure au-dessous de l'aimant. La figure 2.14 montre l'actionneur avec l'aimant mobile libéré. On voit bien le rectangle en creux au-dessous de l'aimant mobile: l'emplacement d'où a été enlevée la couche sacrificielle.

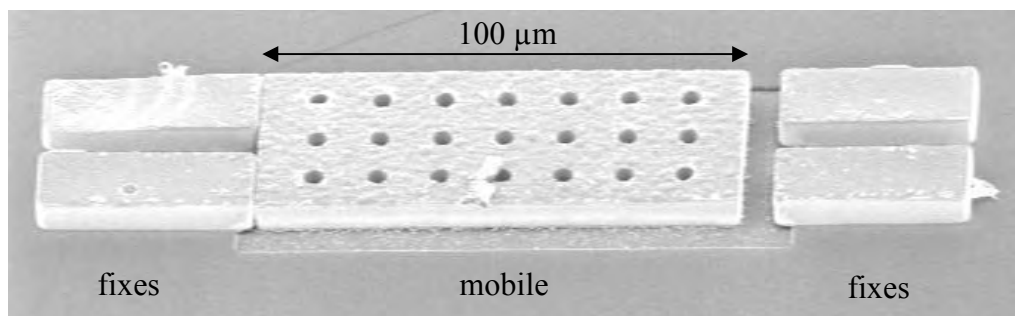


Fig. 2.14– Aimant mobile libéré et collé dans sa position stable gauche

2.3.4 État actuel du projet

Le projet est actuellement en fin de réalisation au LETI. Les étapes délicates d'électrodéposition du matériau magnétique et la libération totale de l'aimant mobile ont été résolues.

Le courant électrique nécessaire pour la commutation du μ -aimant a été calculé dans [Diep04b] et la commutation de l'aimant mobile a été testée. L'actionneur commute exactement avec le courant déterminé par les calculs préalables (3A). La densité de courant est de 12 000 A/mm², l'énergie d'actionnement est de 48 μ J, le temps d'actionnement de 30 μ s.

Le LETI finit la fabrication des contacts électriques pour la fonction relais. A cause des propriétés médiocres du CoPtP et des forts courants, l'aimant mobile se désaimante peu à peu et finit par être éjecté au bout de quelques dizaines de commutations. La future stratégie est de passer à des matériaux plus coercitifs tels que NdFeB.

2.4 μ -positionneur asservi

2.4.1 Principe de l'asservissement

Jusqu'à présent nous avons vu le μ -actionneur sous sa fonction de base bistable. Maintenant on attaque le principal sujet de ce travail: son asservissement en lévitation. Étudions d'abord la position particulière de l'aimant mobile exactement au milieu du dispositif comme dessiné sur la figure 2.15. Il n'y a aucun courant dans les conducteurs. Le dispositif étant symétrique, la force exercée sur l'aimant mobile au centre par un aimant fixe est égale à la force de l'autre aimant.

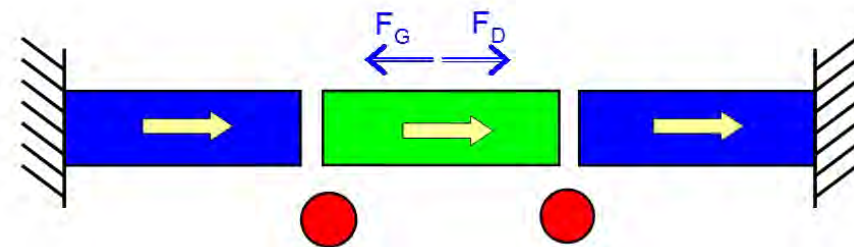


Fig. 2.15– Position particulière de l'aimant mobile en position d'équilibre instable "au milieu du gué"

Il s'agit d'une position d'équilibre instable : la moindre perturbation va faire attirer l'aimant mobile vers l'une des deux positions stables. Mais si l'on est capable de mesurer la position de l'aimant mobile, on peut intervenir contre la perturbation en appliquant courant de compensation dans les conducteurs. On va réaliser ainsi un asservissement selon la figure 2.16.

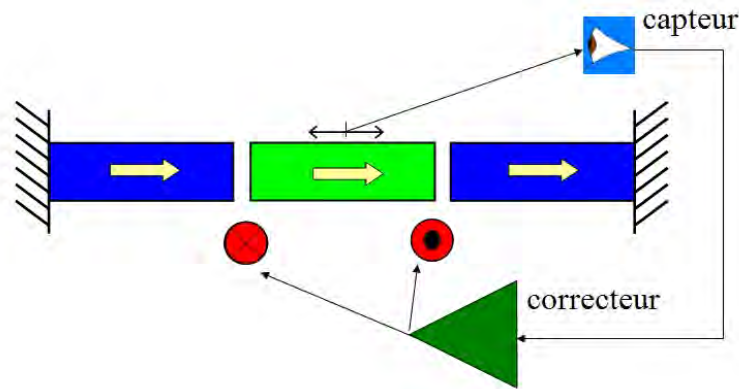


Fig. 2.16– Principe de l'asservissement de position

L'asservissement de l'aimant mobile dans cette position de lévitation instable est l'un des objectifs de cette thèse.

On va baptiser notre μ -actionneur MAMBA par "Micro Actionneur Magnétique Bistable Asservi" (Magnetically Appointed Micronic Bistable Actuator en anglais). Comme le MAMBA pourrait servir aussi pour ajuster la position de têtes de lecture, la figure 2.17 montre le parallèle entre la tête du serpent mamba noir (*Dendroaspis polylepis*) et sa langue qui bouge "très vite" comme dans une tête de lecture dont le μ -actionneur bouge "très vite" aussi (temps de réponse de quelques ms [Chao03]).



Fig. 2.17– Troublante ressemblance entre une tête de mamba et une tête de lecture

2.4.2 Propriétés de l'asservissement

Les propriétés de ce type de l'asservissement sont

- Absence de frottement mécanique : les dispositifs en lévitation ne subissent que le frottement dû à l'air. Pour éviter ce type de frottement nous pouvons envisager l'encapsulation sous vide (NB: pendant son déplacement l'aimant mobile induit des pertes par courants de Foucault dans les conducteurs proches, mais qui restent négligeables à ces tailles).
- Linéarité dans l'axe de l'asservissement : l'actionneur n'est pas tenu par un élément physique qui entraînerait des non-linéarités. Nous démontrons dans le chapitre 3 que la force magnétique exercée sur l'actionneur dans l'axe longitudinal est proportionnelle à la position.

- Le courant d'asservissement dans la bobine est proportionnel à la force exercée sur l'aimant : ce courant est nul au point milieu, et proportionnel à la position autour de ce point. Si nous avons l'information de la position, nous pouvons mesurer la force exercée sur l'aimant mobile en mesurant le courant d'asservissement : on obtient ainsi un retour de force direct.
- Sensibilité aux perturbations : le correcteur régule les différentes perturbations telles que chocs, vibrations ou bruit. Nous pouvons profiter de ce fait pour mesurer les vibrations, mais c'est gênant pour mesurer la force par exemple.
- Sensibilité aux dysfonctionnements : le bon fonctionnement du μ -actionneur dépend de la bonne fonctionnalité du correcteur et du capteur, qui devrait être indépendante de la température, des champs externes, de l'humidité, de la variation de l'alimentation... Une dérive des paramètres du correcteur ou du capteur risque de rendre l'asservissement instable.

2.4.3 Applications

Nous pouvons imaginer différentes applications du μ -actionneur asservi en position. Ces applications peuvent travailler dans les deux directions:

- mode actionneur: μ -positionneur, μ -manipulateur, μ -préhenseur...
- mode capteur : μ -capteur de force, couple, choc, vibrations, mais aussi retour de force

Quelques exemples sont présentés ci-dessous.

μ -positionneur de tête de lecture

Une première application est un positionneur pour une **tête de lecture**. Les têtes de CD (resp. DVD) actuelles doivent "localiser" des bits de 830 nm (400 nm) et ont un temps de réponse de l'ordre de la milliseconde [Chao03], [Ohta01] ; notre dispositif permettrait de descendre autour de la centaine de microsecondes.

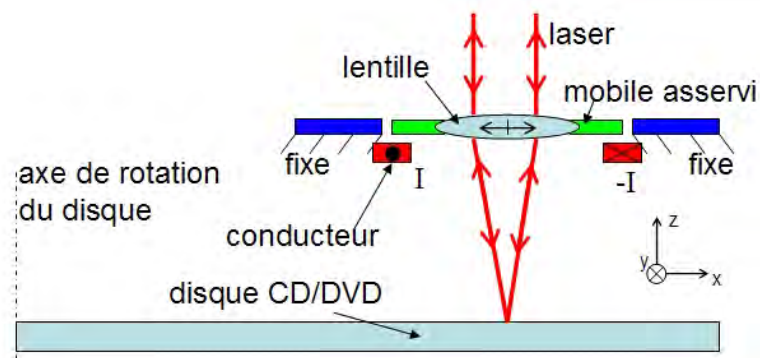


Fig. 2.18– Application : tête de lecture

La figure 2.18 montre le μ -actionneur avec l'aimant mobile qui est troué et contient une lentille dans ce trou. L'actionneur permet l'asservissement de position pour le suivi de piste.

Nano-manipulation

Un exemple extrême d'application serait un nano-manipulateur ayant une précision de l'ordre du nanomètre. Un exemple est montré sur la figure 2.19.

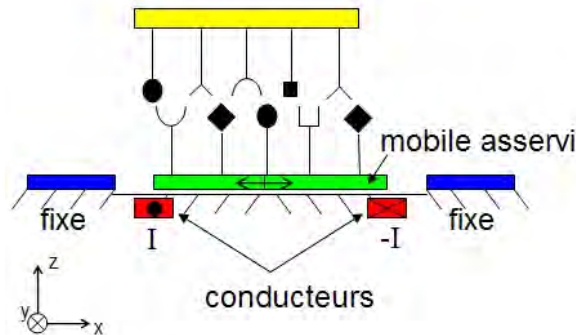


Fig. 2.19– Application : exemple extrême de nano-manipulateur bio

Il s'agit d'un nano-manipulateur de cellules, par exemple l'ADN, les protéines etc. Un tel dispositif permettrait d'accorder les chromosomes correspondants.

μ -accéléromètre

Le troisième type d'applications est un μ -accéléromètre directionnel. Son principe est donné sur la figure 2.20.

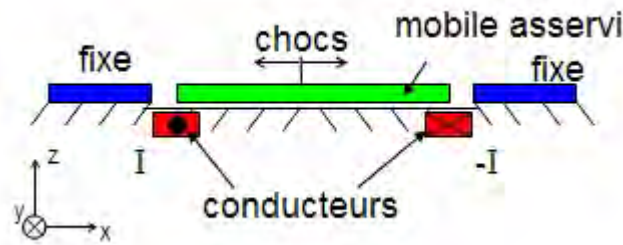


Fig. 2.20– Application : μ -accéléromètre

La position de l'aimant mobile est contrôlée au milieu, le courant dans les conducteurs est nul. Si l'aimant mobile subit un choc selon Ox , le correcteur réagit et le courant résultant passant dans le conducteur correspond à cette perturbation. Ce courant est facile à mesurer. Parmi les applications potentielles nous pouvons imaginer la mesure des vibrations, de tremblements de terre, du rythme cardiaque, du bruit sonore etc. Pour obtenir un accéléromètre 3D il suffit d'ajouter deux μ -systèmes similaires selon les deux axes restants.

À long terme, un unique actionneur pourrait contenir des capteurs capacitifs Oy et Oz autour de l'aimant mobile pour observer les chocs "latéraux". Le système est naturellement stable en Oy et Oz , mais le contrôle des oscillations magnétiques selon ces deux axes serait beaucoup plus délicat (voir chapitres 3 et 4).

Retour de force

Nous pouvons imaginer des μ -manipulateurs et μ -robots avec retour de force permettant de "sentir" la résistance de l'appui ou de la préhension, μ -usinage de pièces, μ -manipulations ou μ -injection précises de cellules en μ -biologie. Voici une application d'un **capteur de force** (ou de couple) très précis (dixièmes, centièmes de μ N), pour l'analyse de propriétés élastiques de membranes par exemple (figure 2.21).

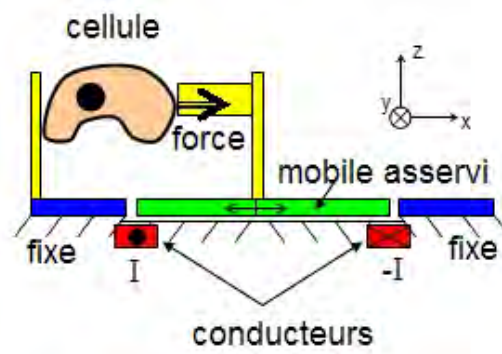


Fig. 2.21– Application : mesure de force

Une cellule est ici capturée entre un point fixe et l'appui de l'aimant mobile. La position de l'aimant mobile est mesurée et donc connue. Le courant passant dans les conducteurs est composé du courant pour l'asservissement dans cette position et du courant correspondant à la force exercée sur la membrane de la cellule. On obtient ainsi une lecture directe et linéaire de l'effort appliqué par l'aimant sur la cellule. Dans ce cas on pourrait donc mesurer et caractériser le comportement statique et/ou dynamique de la déformation d'une cellule ou du perçage de sa membrane par exemple.

2.4.4 Analyse de l'asservissement

Le sujet principal de cette thèse est l'asservissement en lévitation magnétique. Selon la théorie de Earnshaw [Aspd87] la lévitation statique passive d'un aimant est impossible sans un retour actif. Mais même avec retour, des différents problèmes d'instabilité sont observés [Faur03]. La figure 2.22b montre un système macroscopique – l'asservissement d'une bille magnétique avec un électroaimant [Unis05@]. Les figures 2.22b et 2.22c [Unis05@], [Bole02] présentent des réalisations d'asservissement. Les vidéos sur le site web [Unis05@] montre un très bon asservissement en lévitation dans l'axe z mais des oscillations peuvent être observées dans le plan horizontal.

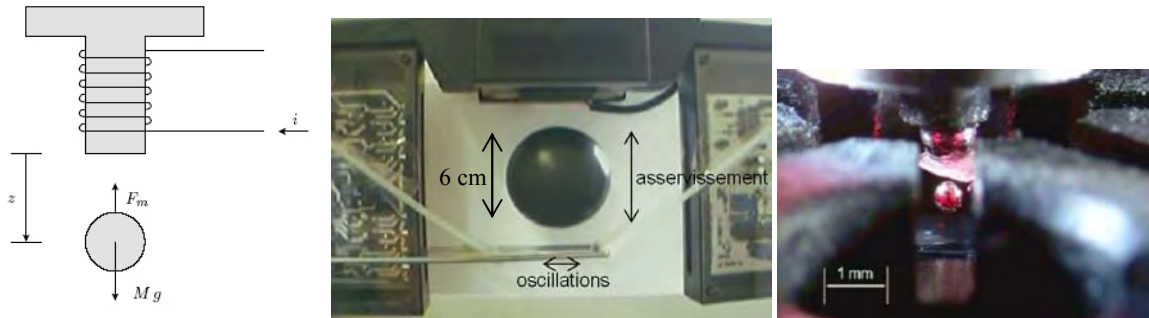


Fig. 2.22– Lévitiation d'une bille

a) le schéma du principe b) bille $\varnothing 6\text{cm}$ [Unis05@] c) bille $\varnothing 0,5\text{ mm}$ [Bole02]

En conséquence il y a un risque pour que notre système va se mettre à osciller de manière non contrôlée hors axe puisque la boucle d'asservissement est contrôlée à l'axe horizontal Ox . On va donc d'abord modéliser la trajectoire 3D de l'aimant mobile asservi pour savoir si des oscillations divergentes apparaissent. Pour cela il nous faut calculer les forces et les couples 3D exercés sur l'aimant mobile. On va ensuite chercher les accélérations et vitesses linéaires et angulaires pour obtenir à la fin le déplacement. Si les résultats de simulation sont satisfaisants, on va ensuite procéder sur la réalisation de l'asservissement.

2.5 Conclusion

Nous avons mis en évidence dans ce chapitre le principe de base pour de nombreuses variations de structures des μ -actionneurs magnétiques. Parmi eux, les plus importantes pour nous sont le μ -relais bistable réalisé actuellement au LETI et le μ -positionneur en lévitation asservi qui fait le sujet de cette thèse.

L'analyse du μ -positionneur avec 6 degrés de liberté impose la nécessité d'une modélisation détaillée du comportement dynamique de l'actionneur en lévitation. Cette modélisation va nous servir dans un premier temps pour concevoir l'asservissement. Nous pourrons appliquer les équations de la dynamique dans deuxième temps pour déterminer le comportement dynamique de toute la famille d'actionneurs présentés dans ce chapitre.

Références :

- [Aspd87] H. Aspden, "Earnshaw's theorem", American Journal of Physics, Volume 55, pp.199-200, Issue 3, 1987
- [Bole02] A. Boletis, L. Sache, S. Menot, H. Bleuler, "Magnetic Levitation and Rotation of sub-millimetric Spherical Rotors", International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drivers (MAGLEV), Lausanne, Switzerland, 2002
- [Chao03] P. C.-P. Chao, C.-L. Lai, J.-S. Huang, "Nonlinear dynamic analysis and actuation strategy for a three-DOF four-wire type optical pickup", Sensors and Actuators A Volume 105, pp. 171–182, 2003
- [Csmv05@]<http://educ.csmv.qc.ca/mgrparent/vieanimale/rep/mamba/mamba.htm>
- [Dela01] J. Delamare, O. Cugat, C. Locatelli, "Micro-actionneur bistable utilisant le guidage magnétique et des aimants" registered 27/07/2001, N° FR 01 10 81, International patent
- [Dela04] J. Delamare, O. Cugat, J. Meunier-Carus, C. Dieppedale, B. Desloges, H. Rostaing, "Magnetic bistable micro-actuator with integrated permanent magnets" ; Conférence IEEE SENSORS novembre 2004
- [Diep04a] C. Dieppedale, B. Desloges, H. Rostaing, J. Delamare, O. Cugat, J. Meunier-Carus, "Magnetic bistable micro-actuator with integrated permanent magnet", Proceedings of IEEE Sensors, Vienne, France, 2004
- [Diep04b] C. Dieppedale, B. Desloges, H. Rostaing, J. Delamare, O. Cugat, J. Meunier-Carus, "Ultra-fast levitating magnetic bistable micro-actuator with integrated permanent magnets" Conférence HPMA septembre 2004
- [Faur03] F. Faure, "Suspension magnétique pour volant d'inertie", thèse de l'Institute Nationale Polytechnique de Grenoble, réalisé au Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble, décembre 2003
- [Kost05@] <http://www.kostich.com/black%20mamba.JPG>
- [Lsro04@] <http://lsro.epfl.ch/cfmd/>
- [Ohta01] T. Ohta, "Phase-change optical memory promotes the DVD optical disk", Journal of Optoelectronics and Advanced Materials Vol. 3, No. 3, September 2001, p. 609 - 626
- [Rost04] H. Rostaing, "Conception, modélisation et fabrication d'un micro-actionneur bistable, hors plan et magnétique", thèse de l'Institute Nationale Polytechnique de Grenoble, réalisé au Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble, décembre 2004
- [Rost05] H. Rostaing, J. Stepanek, B. Delinchant, J. Delamare, O.Cugat, "High Current Densities for Magnetic Micro-Actuators", accepté par la Revue Internationale de Génie Electrique (RIGE)

[Step02] J. Stepanek "Micro-actionneur magnétique", Rapport DEA, Laboratoire d'électrotechnique de Grenoble, 2002

[Unis05@]<http://www.dii.unisi.it/~control/act/experiments.php>

[Utmi05@] <http://www.mie.utoronto.ca/staff/projects/cleghorn/Microassembly/Microassembly-Examples/6-Loop-MicroCoil-Pic1.jpg>

CHAPITRE 3
CALCUL DES FORCES
ET DES COUPLES

Calcul des forces et des couples

Le chapitre 2 a introduit la nécessité d'une modélisation de la dynamique du μ -positionneur avec 6 degrés de liberté. Ce chapitre a pour but de présenter le calcul des forces et des couples exercés sur l'aimant mobile ceci afin de déterminer cette dynamique (abordée dans le chapitre 4).

Nous cherchons une méthode de calcul aussi rapide que possible avec une précision suffisante. Ce chapitre commence par la définition du problème. Les représentations équivalentes d'un moment magnétique nécessaires à une modélisation d'aimant sont ensuite introduites et deux méthodes de calcul de force et couple sont proposées. Les résultats des méthodes sont comparés avec ceux obtenus par une méthode d'éléments finis. Des mesures et validation sur une maquette sont ensuite présentées. Une analyse finale permettra le choix de la méthode optimale pour notre application : le calcul de la dynamique du μ -positionneur.

3.1 Présentation du problème

Le problème à résoudre peut être défini de la façon suivante :

Considérons un aimant parallélépipédique placé dans un champ magnétique externe \vec{B}_e (figure 3.1)

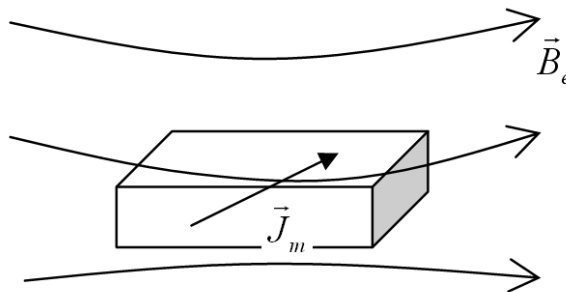


Fig. 3.1– Définition du problème

Nous cherchons à déterminer la force et le couple magnétique subis par l'aimant pour n'importe laquelle de ses positions et ceci le plus rapidement possible.

Les **hypothèses** générales sont les suivantes :

- l'aimant est uniformément aimanté;
- le champ magnétique externe est créé par des bobines et aimants définis dans notre application;
- il n'y a pas de matériau ferromagnétique doux dans le système;
- la distribution de force et de couple à l'intérieur de l'aimant ne nous intéresse pas, nous cherchons uniquement les interactions globales sur l'aimant complet.

Les **qualités** suivantes sont demandées à notre méthode de calcul :

- vitesse – des centaines/milliers d'évaluations sont prévues pour des simulations dynamiques;
- précision – l'erreur de calcul maximale tolérable dans un premier temps est 15%
- possibilité de couplage avec un logiciel capable de résoudre des équations différentielles (par exemple Simulink).

Pour résoudre ce problème il faut résoudre un problème basé sur le calcul des champs créés par des conducteurs et des aimants. Le calcul du champ créé par un conducteur est simple, pour le calcul d'un aimant nous allons exposer différentes représentations de moment magnétique qui constitue un aimant. Ceci va nous donner une base théorique pour introduire des méthodes de calculs de force : nous allons les tester et choisir la plus appropriée pour notre application.

3.2 Champ magnétique créé par un courant

Le champ magnétique \vec{B} créé en un point P par un conducteur de volume V parcouru par une densité de courant \vec{j} (figure 3.2) est donné par la loi de Biot et Savart :

$$\vec{B}(P) = \iiint_V \frac{\mu_0 \cdot v}{4 \cdot \pi \cdot |\vec{r}|^3} \cdot (\vec{j} \times \vec{r}) dv \quad [\text{Equation 3.1}]$$

avec \vec{r} ... vecteur entre le conducteur ponctuel et le point P.

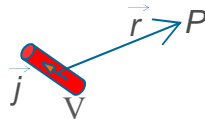


Fig. 3.2– Conducteur comme une source de champ

3.3 Champ créé par un aimant

Un aimant est habituellement représenté par un ensemble de moments magnétiques [Bris97]. Un moment magnétique peut être décrit par différentes représentations.

3.3.1 Représentation ampérienne du moment magnétique

Un moment magnétique peut être représenté par une spire ponctuelle de courant (figure 3.3).



Fig. 3.3– Représentation par une spire

L'équation caractérisant le moment magnétique est :

$$\vec{m} = I \cdot S \cdot \vec{n} \quad [\text{Equation 3.2}]$$

avec

\vec{m} ... moment magnétique

I ... courant électrique dans la spire

S ... surface de la spire

\vec{n} ... vecteur normal à la surface (orienté par rapport à la loi de la main droite)

3.3.2 Représentation colombienne du moment magnétique

Cette représentation est issue d'une équivalence entre l'électrostatique et la magnétostatique. Le moment magnétique est ici représenté par une paire (dipôle) de charges magnétiques ponctuelles (figure 3.4).

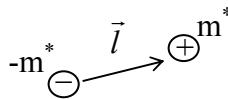


Fig. 3.4– Représentation Colombienne

Le moment magnétique est caractérisé dans ce cas par l'équation

$$\vec{m} = \frac{m^* \cdot \vec{l}}{\mu_0} \quad [\text{Equation 3.3}]$$

avec

\vec{m} ... moment magnétique

$-m^*$, $+m^*$... charges magnétiques

\vec{l} ... distance entre les charges

Il est important de rappeler que la charge magnétique est une grandeur fictive et qu'elle n'a pas de signification physique.

3.4 Equation générale d'un aimant

Un aimant peut être caractérisé par sa polarisation magnétique \vec{J} (figure 3.5).

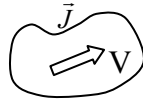


Fig. 3.5– Modélisation volumique de l'aimant

Sa valeur est définie comme la densité volumique de moment magnétique :

$$\vec{J} = \mu_0 \cdot \frac{d\vec{m}}{dv} \quad \text{[Equation 3.4]}$$

avec

\vec{m} ... moment magnétique

\vec{J} ... polarisation de l'aimant

dv ...élément de volume V de l'aimant

μ_0 ... perméabilité magnétique dans le vide

Le potentiel magnétique U en un point P d'un **aimant ponctuel** de polarisation magnétique \vec{j} et volume v (figure 3.6) est donné par l'équation :

$$U(P) = \frac{v}{4 \cdot \pi \cdot \mu_0} \cdot \frac{\vec{j} \cdot \vec{r}}{|\vec{r}|^3} \quad \text{[Equation 3.5]}$$

avec \vec{r} ... vecteur entre l'aimant ponctuel et le point P .

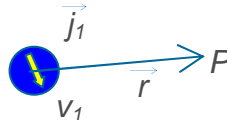


Fig. 3.6 Aimant ponctuel comme une source de champ magnétique

L'induction magnétique \vec{B} dans le point P est définie par :

$$\vec{B}(P) = -\mu_0 \cdot \text{grad} U(P) \quad \text{[Equation 3.6]}$$

Le champ magnétique créé par un aimant de volume V est :

$$\vec{B}(P) = \iiint_V \frac{v}{4 \cdot \pi \cdot |\vec{r}|^3} \cdot \left(3 \cdot \frac{\vec{j} \cdot \vec{r}}{|\vec{r}|^2} \cdot \vec{r} - \vec{j} \right) dv \quad \text{[Equation 3.7]}$$

Connaissant l'induction magnétique nous pouvons calculer la force créée par un aimant sur un autre aimant. Avertissons seulement que le symbole \vec{j} est utilisé à la fois pour la densité de courant et à la fois pour la polarisation magnétique de l'aimant pour des raisons présentées plus tard.

3.5 Méthodes de calcul des forces et couples

Les représentations du moment magnétique introduites plus haut sont la base pour des méthodes de calcul variées. Nous allons montrer diverses méthodes de calcul intéressantes pour notre application.

Dans ce chapitre nous allons utiliser la notation suivante : les grandeurs étant sources d'une interaction recevront l'indice 1, les grandeurs subissant une interaction recevront l'indice 2. Donnons un exemple :

$$\vec{F}_{1 \rightarrow 2} = f(\text{grad}(B_1), j_2) \quad [\text{Equation 3.8}]$$

L'équation 3.8 peut être lue : "La force créée par un élément 1 sur un élément 2 est fonction du gradient de l'induction magnétique créée par l'élément 1 et la polarisation (densité de courant) de l'élément 2."

3.5.1 Méthodes intégrales

La première famille de méthodes de calcul utilise l'intégration analytique de grandeurs. Les méthodes sont simples, rapides, précises mais peu générales. L'autre inconvénient est que elles ont une singularité pour des calculs où les arrêtes d'aimants avoisinants se superposent. Elles sont cependant mieux appropriées pour des applications avec des pertes importantes de flux magnétique dans le vide (elle n'exigent pas la discrétisation de l'air).

Intégration volumique

Le principe de cette méthode consiste à discrétiser le volume d'aimants et à condenser les éléments volumiques en sphères de volumes équivalents. Elle provient de la modélisation volumique décrite dans le chapitre 3.3. Un exemple de la discrétisation est présenté sur la figure 3.7.

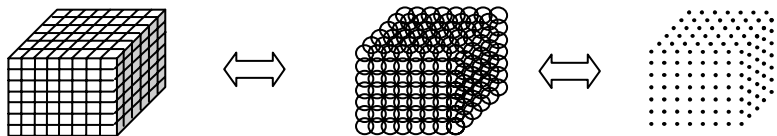


Fig. 3.7– Principe de condensation de volume

La discrétisation nous permet de simplifier considérablement les calculs. Nous calculons les interactions entre tous les segments et ces contributions sont ensuite additionnées. Le calcul de force et de couple exercés sur un aimant est basé sur le calcul des gradients d'énergie d'interaction.

$$\vec{F}_{1 \rightarrow 2} = -\left(\frac{\vec{j}_2}{\mu_0} \cdot \text{grad}\right) \vec{B}_1 \quad [\text{Equation 3.9}]$$

avec \vec{j}_2 ... polarisation magnétique de l'aimant subissant.

\vec{B}_1 ... induction magnétique extérieure provenant de sources de champ (aimants, conducteurs)

Cette méthode est très performante et peut être implémentée pour résoudre le problème. Sa description est introduite en détail dans le chapitre 3.6.

Intégration surfacique de charges magnétiques

Une méthode plus rapide peut être trouvée pour la résolution de tel problème. C'est la méthode basée sur la représentation coulombienne (chapitre 3.3.2). Les moments magnétiques sont modélisés par une charge magnétique surfacique équivalente. Comme les charges ponctuelles m^* , la charge magnétique surfacique est une représentation mathématique.

Le principe de cette méthode consiste en une analogie entre l'approche électrostatique et celle magnétostatique ([Dura68], [Bris97]). Le vecteur de polarisation magnétique \vec{J}_2 est décomposé en trois composantes (longitudinal, latéral et transversal) parallèles aux surfaces. Un pavé magnétique peut être remplacé par six surfaces chargées comme représenté sur la figure 3.8.

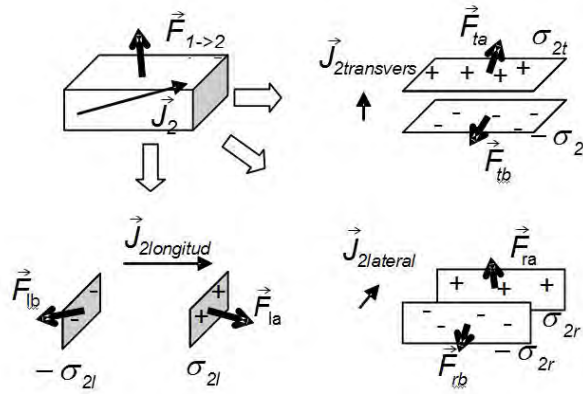


Fig. 3.8– Remplacement d'un aimant par des surfaces chargées

La force et le couple subis par l'aimant dans un champ magnétique peuvent être exprimés par les équations 3.10 et 3.11 ([Trem01], page 220).

$$\vec{F}_{1 \rightarrow 2} = \int_{(V)} \rho_2 \vec{B}_1 dV + \int_{(S)} \sigma_2 \vec{B}_1 dS \quad [\text{Equation 3.10}]$$

$$\vec{\Gamma}_{1 \rightarrow 2} = \int_{(V)} (\rho_2 (\vec{r} - \vec{r}_0) \times \vec{B}_1) dV + \int_{(S)} (\sigma_2 (\vec{r} - \vec{r}_0) \times \vec{B}_1) dS \quad [\text{Equation 3.11}]$$

avec les grandeurs selon les figures 3.17 et 3.18 :

- $\vec{F}_{1 \rightarrow 2}$... force exercée sur l'aimant 2 par des éléments extérieurs 1
- $\vec{\Gamma}_{1 \rightarrow 2}$... couple exercé sur l'aimant 2 par des éléments extérieurs 1
- ρ_2 ... densité volumique de charge magnétique
- σ_2 ... densité surfacique de charge magnétique
- \vec{r} ... vecteur de position (entre un élément de surface et l'origine des coordonnées)
- \vec{r}_0 ... vecteur de position (entre point de référence de couple et l'origine des coordonnées)
- \vec{B}_1 ... induction magnétique créé sur l'élément de surface par les sources extérieures

La densité volumique de charge magnétique est définie par :

$$\rho_2(\vec{r}) = -\text{div} \frac{\vec{J}_2(\vec{r})}{\mu_0} \quad [\text{Equation 3.12}]$$

La densité surfacique de charge magnétique est défini par

$$\sigma_2(\vec{r}) = \frac{\vec{J}_2(\vec{r})}{\mu_0} \cdot \vec{n}_0 \quad [\text{Equation 3.13}]$$

Si l'aimant est aimanté uniformément ($\rho = 0 \text{ T/m}$), cette méthode transforme l'intégrale volumique en intégrale surfacique, ce qui accélère considérablement le calcul. Elle est explicitée pour notre application en plus de détails dans le chapitre 3.7.

Intégration surfacique de courants

Une méthode basée sur la représentation d'un aimant par des spires de courant peut aussi être utilisée (chapitre 3.3.1). Les moments magnétiques sont modélisés par des courants de surface équivalents (figure 3.9). Cette approche ne sera pas présentée dans cette thèse.

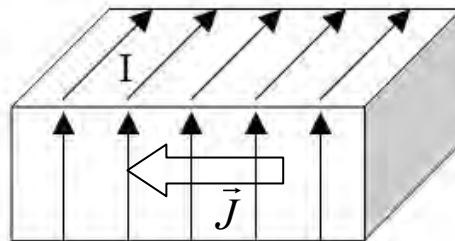


Fig. 3.9– Aimant modélisé par des courants surfaciques

3.5.2 Méthodes plus générales

Des méthodes variées telles que les méthodes des éléments finis (MEF), différences finies ou volumes finis existent dans le monde du calcul électromagnétique. Nous allons présenter les méthodes les plus répandues : les MEF.

Comme notre problème ne peut pas être représenté en deux dimensions, il est nécessaire d'utiliser une approche tridimensionnelle. Ces méthodes sont très performantes et générales, car elles sont adaptées à des équations complexes associées à des géométries complexes également. Néanmoins, quelques inconvénients peuvent être trouvés pour notre application, particulièrement :

- le maillage du vide doit être très fin car le champ rayonné par notre application est très important (utilisation de la boîte infinie obligatoire);
- le changement de position de l'aimant implique le remaillage à chaque nouvelle position (ce qui peut devenir inadmissible en terme de temps de calcul);
- les MEF sont très longue pour l'optimisation.

Les méthodes d'éléments finis seront très intéressantes pour la comparaison des résultats des autres méthodes. Nous allons les utiliser (en commun avec les mesures) comme référence pour notre calcul.

3.6 Première solution : intégration volumique par condensation

Une méthode de calcul analytique basé sur l'intégration volumique a été développée au LEG par Jérôme Delamare [Dela93]. Il s'agit du logiciel Dipole3D. Il est écrit en langage C et il est optimisé du point de vue rapidité. Le logiciel a d'abord été conçu pour calculer les différentes interactions (force, couple, raideur, champ) entre deux aimants de formes arbitraires.

Pierre-Alain Gilles [Gill01] a ensuite repris le logiciel et a ajouté un code traitant partiellement les conducteurs. Cette partie "courants" n'était pas validée. Tous les calculs de force, couple et champ ont été complétés, vérifiés et validés au cours de cette thèse, le principe sera donc présenté.

N.B: Le calcul de raideur n'est pas vérifié par manque de temps. Il n'était pas nécessaire pour cette application. Il peut contenir des erreurs.

3.6.1 Principe de calcul de Dipole3D

Rappelons encore une fois le principe de méthode sur un exemple d'interaction entre deux aimants A et B présentés sur la figure 3.10.



Fig. 3.10– Exemple de discrétisation de deux aimants A, B

Si nous faisons la discrétisation montrée sur la figure 3.10, le champ magnétique créé par le sous-aimant 1 est approximativement constant dans tout le volume du sous-aimant 2. Cette hypothèse va permettre de considérablement simplifier les calculs. La force entre les deux segments sera calculée à partir de ce champ. La force totale est définie comme la somme de toutes les forces exercées par l'aimant créant sur l'aimant subissant.

En règle générale, on considère que la segmentation est suffisante si les deux segments en interaction peuvent être considérés comme ponctuels. Leurs dimensions doivent être petites en comparaison avec la distance à laquelle le calcul se fait.

Quatre combinaisons d'interactions peuvent être trouvées entre un aimant et un conducteur

- Un aimant agit sur un aimant
- Un aimant agit sur un conducteur
- Un conducteur agit sur un aimant
- Un conducteur agit sur un conducteur

A priori seulement les cas où un aimant subit une interaction nous intéressent pour notre application. Nous allons néanmoins développer toutes les formules dans les paragraphes suivants. La méthode sera présentée complètement et les calculs peuvent aussi être vérifiés inversement (en calculant la force créée par l'aimant mobile sur l'ensemble des parties fixes).

3.6.2 Premier cas : Un aimant agit sur un aimant

La première situation est dessinée sur la figure 3.11. Rappelons que les indices 1 indiquent l'aimant créant, les indices 2 signifient l'aimant subissant l'interaction.

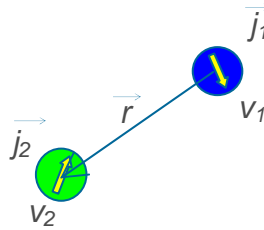


Fig. 3.11– Interaction aimant - aimant

La force est calculée selon la formule 3.9. En dérivant (à la condition que l'induction dans le volume v_2 soit constante) nous obtenons :

$$\vec{F}_{1 \rightarrow 2} = \frac{3}{4 \cdot \pi \cdot \mu_0} \cdot \frac{v_1 \cdot v_2}{|\vec{r}|^5} \cdot \left\{ \left[\vec{j}_1 \cdot \vec{j}_2 - 5 \cdot \frac{(\vec{j}_1 \cdot \vec{r})(\vec{j}_2 \cdot \vec{r})}{|\vec{r}|^2} \right] \cdot \vec{r} + (\vec{j}_2 \cdot \vec{r}) \cdot \vec{j}_1 + (\vec{j}_1 \cdot \vec{r}) \cdot \vec{j}_2 \right\} \quad [\text{Equation 3.14}]$$

le couple exercé sur l'aimant est (à la même condition)

$$\vec{\Gamma}_{1 \rightarrow 2} = \frac{v_1 \cdot v_2}{4\pi\mu_0 |\vec{r}|^3} \cdot \vec{j}_2 \times \left(3 \cdot \frac{\vec{j}_1 \cdot \vec{r}}{|\vec{r}|^2} \cdot \vec{r} - \vec{j}_1 \right) + \vec{r}_1 \times \vec{F}_{1 \rightarrow 2} \quad [\text{Equation 3.15}]$$

Les équations 3.14 et 3.15 font partie des calculs de Dipole3D.

3.6.3 Deuxième cas : Un aimant agit sur un conducteur

Dans cette éventualité l'aimant agit sur un conducteur comme dessiné sur la figure 3.12.

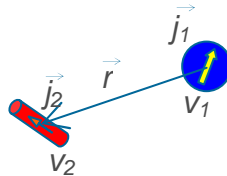


Fig. 3.12– Interaction aimant- conducteur

avec \vec{j}_2 ...densité de courant dans le conducteur

v_2 ...volume élémentaire de conducteur

La force créée sur le conducteur est donnée par la loi de Laplace :

$$\vec{F}_{1 \rightarrow 2} = (\vec{j}_2 \cdot v_2 \times \vec{B}_1) \quad [\text{Equation 3.16}]$$

Ce qui donne après le développement :

$$\vec{F}_{1 \rightarrow 2} = \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{v_1 \cdot v_2}{|\vec{r}|^3} \cdot \vec{j}_2 \times \left(3 \cdot \frac{\vec{j}_1 \cdot \vec{r}}{|\vec{r}|^2} \cdot \vec{r} - \vec{j}_1 \right) \quad [\text{Equation 3.17}]$$

NB: la même expression peut être trouvée à partir du calcul d'énergie d'interaction entre un aimant et un conducteur.

Le couple créé par l'aimant sur le conducteur est défini par

$$\vec{\Gamma}_{1 \rightarrow 2} = \vec{r}_l \times \vec{F}_{1 \rightarrow 2} \quad [\text{Equation 3.18}]$$

3.6.4 Troisième cas : un conducteur agit sur un aimant

Les deux derniers cas décrivent des interactions où le conducteur agit sur un aimant et un conducteur. La situation de ce cas est présentée sur la figure 3.13.

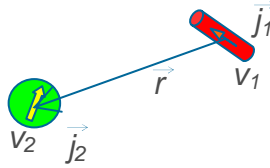


Fig. 3.13– Interaction conducteur-aimant

La force créée sur l'aimant mobile est trouvée à partir de l'énergie d'interaction (équation 3.9). Après la dérivation analytique on obtient pour la force :

$$\vec{F}_{1 \rightarrow 2} = \frac{1}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{v_1 \cdot v_2}{|\vec{r}|^3} \cdot \left\{ \left[3 \cdot \frac{(\vec{j}_2 \cdot \vec{r})}{|\vec{r}|^2} \cdot \vec{r} - \vec{j}_2 \right] \times \vec{j}_1 \right\} \quad [\text{Equation 3.19}]$$

et pour le couple :

$$\vec{\Gamma}_{1 \rightarrow 2} = (\vec{j}_2 \cdot v_2 \times \vec{r}) + \vec{r}_l \times \vec{F}_{1 \rightarrow 2} \quad [\text{Equation 3.20}]$$

3.6.5 Quatrième cas : un conducteur agit sur un conducteur

Le quatrième cas introduit le cas d'interaction entre deux conducteurs dessiné sur la figure 3.14.

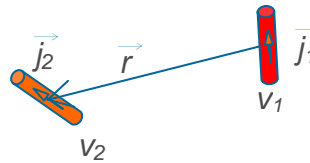


Fig. 3.14– Interaction conducteur-conducteur

La force est calculée avec la loi de Laplace (équation 3.16), qui donne après dérivation :

$$\vec{F}_{1 \rightarrow 2} = \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{v_1 \cdot v_2}{|\vec{r}|^3} \cdot (\vec{j}_2 \times \vec{j}_1 \times \vec{r}) \quad [\text{Equation 3.21}]$$

Le couple créé sur le conducteur :

$$\vec{\Gamma}_{1 \rightarrow 2} = \vec{r}_l \times \vec{F}_{1 \rightarrow 2} \quad [\text{Equation 3.22}]$$

3.6.6 Force et couple créés sur un aimant non-ponctuel

Les sections précédentes ont défini les calculs pour des interactions ponctuelles. Si la segmentation est suffisante, chaque segment peut être considéré comme ponctuel et les équations montrées ci-dessus peuvent être employées. L'interaction résultante peut être exprimée comme la somme de toutes les $m \cdot n$ interactions créées par les n segments créants sur m segments subissants :

$$\vec{F} = \sum_{i=1, j=1}^{m, n} \vec{F}_{i \rightarrow j} \quad [\text{Equation 3.23}]$$

$$\vec{\Gamma} = \sum_{i=1, j=1}^{m, n} \vec{\Gamma}_{i \rightarrow j} \quad [\text{Equation 3.24}]$$

3.6.7 Implémentation dans Dipole3D

Nous pouvons décrire différents types de géométries (parallélépipèdes, cylindres, bagues, ...) avec une segmentation donnée. Il faut aussi entrer les courants dans les conducteurs et les polarisations des aimants. Un algorithme d'intégration volumique évalue les forces et couples créés sur l'objet subissant.

La principale difficulté de l'implémentation sous Dipole3D est la discrétisation des objets. Elle peut être homogène (les objets sont divisés en segments de même taille), mais il est préférable de faire une discrétisation dense des parties qui sont à proximités des interactions fortes, et une discrétisation lâche des parties qui sont éloignées. La figure 3.15 montre une discrétisation simplifiée de l'actionneur (maquette centimétrique) :

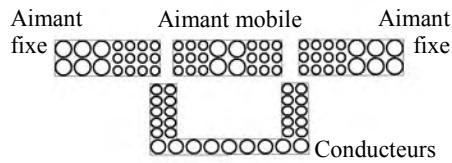


Fig. 3.15– Segmentation simplifiée de l'actionneur

Les parties éloignées des autres objets sont moins discrétisées que les parties en interactions de proximité.

La figure 3.16 montre la segmentation réelle 3D des objets. Les aimants fixes sont divisés en 2*250 segments, la bobine en 400 segments et l'aimant mobile en 600 segments.

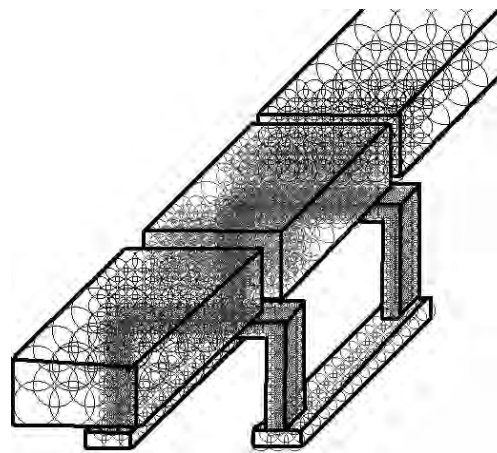


Fig. 3.16– Segmentation adaptée de la maquette centimétrique de l'actionneur dans Dipole3D

Les résultats sont donnés plus bas.

3.7 Deuxième méthode envisagée : Méthode des charges équivalentes

Cette section explicite la démarche pour calculer l'équation de la force et du couple avec la méthode des charges équivalentes. Rappelons que cette méthode transforme le calcul à la base volumique de force et couple en intégration surfacique.

[Akou84] a démontré une solution de calcul de force **entre deux aimants** parallélépipèdes **alignés** parallèlement. Basé sur la représentation coulombienne l'intégrale surfacique est résolu analytiquement donnant une seule grosse équation pour la force. Le calcul de force et couple entre deux aimants est faisable même si les aimants ne sont **pas alignés** parallèlement [Char99]. Le temps de calcul est très court.

Le problème est la résolution analytique générale de la relation aimant - conducteur. La solution purement analytique n'est donc pas convenable pour notre application. Dans ce travail nous allons présenter la solution numérique de l'intégral dans l'équation 3.10.

Simplifions d'abord le calcul. Si un aimant en forme de parallélépipède est aimanté uniformément selon un côté nous pouvons le modéliser seulement par deux surfaces chargées magnétiquement comme représenté sur la figure 3.17.

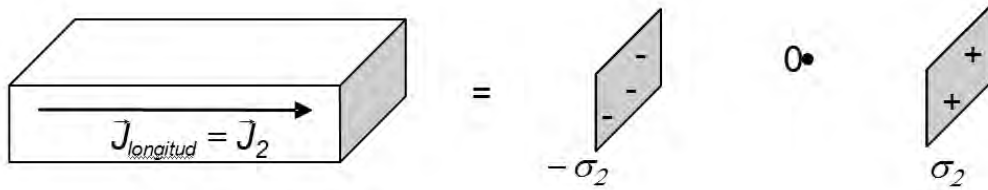


Fig. 3.17– Décomposition d'un aimant sur deux surfaces chargées

Comme l'aimant est aimanté uniformément on peut écrire

$$\rho(\vec{r}) = 0 \quad \text{[Equation 3.25]}$$

La polarisation magnétique est parallèle à la surface, on en déduit que :

$$\sigma(\vec{r}) = \frac{|\vec{J}_2|}{\mu_0} \quad \text{[Equation 3.26]}$$

La définition de grandeurs pour le calcul de force est donné sur la figure suivante :

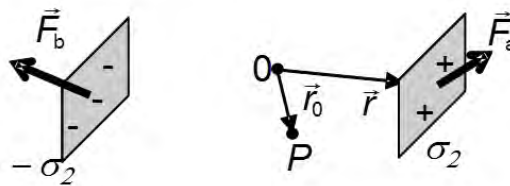


Fig. 3.18– Forces exercées sur les surfaces

La solution consiste à calculer la force et le couple exercés sur chaque surface. Le couple est calculé par rapport au point P.

La force et le couple résultants exercés sur la surface chargée positivement sont alors définis selon les équations 3.27, et 3.28 :

$$\vec{F}_a = \int_{(S)} \frac{|\vec{J}_2|}{\mu_0} \vec{B}_1 dS \quad \text{[Equation 3.27]}$$

$$\vec{\Gamma}_a = \frac{|\vec{J}_2|}{\mu_0} \cdot \int_{(S)} [(\vec{r} - \vec{r}_0) \times \vec{B}_1] dS \quad \text{[Equation 3.28]}$$

Les équations pour les surface chargées négativement sont les mêmes avec un signe négatif dans chaque terme.

3.7.1 Implémentation de la méthode des charges équivalentes [Step03]

Déplacement des surfaces

L'aimant mobile se déplace indépendamment dans l'espace selon six degrés de liberté : il peut exercer trois translations et rotations autour d'axes arbitraires. Pour calculer l'intégrale surfacique (equations 3.27, 3.28) il faut accéder à n'importe quel point sur la surface. La nouvelle position du point sur la surface en fonction des translations et rotations est trouvée avec l'aide des vecteurs v_{31} et v_{21} montrés sur la figure 3.19.

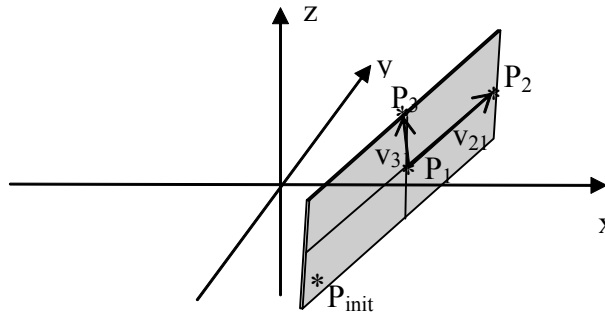


Fig. 3.19– Déplacement de la surface

Nous choisissons sur la surface trois points (P_1, P_2, P_3) montrés sur la figure 3.19. Ces points définissent les deux vecteurs de direction de surface v_{31} et v_{21} . La position de chaque point est définie par l'équation

$$P_{rs} = P_{init} + r \cdot \frac{\vec{v}_{21}}{m/2} + s \cdot \frac{\vec{v}_{31}}{n/2} \quad [\text{Equation 3.29}]$$

avec

- m...nombre de points de subdivision en direction v_{31}
- n... nombre de points de subdivision en direction v_{21}
- r,s... indice de l'élément de surface

L'équation 3.29 est vectorisée et contient seulement des sommes et des multiplications, ce qui accélère considérablement les calculs.

Réalisation de l'intégrale

La solution analytique (l'intégrale dans les équations 3.27, 3.28) sera calculée numériquement. Nous allons subdiviser les surfaces sur des éléments avec la même dimension ΔS .

$$\vec{F} = |\vec{J}| \cdot \sum_{r=0}^m \sum_{s=0}^n \vec{H}_{rs} \Delta S \quad [\text{Equation 3.30}]$$

La valeur de champ sur un élément de surface est multipliée par sa taille et les contributions sont sommées.

Les variables \mathbf{m} , \mathbf{n} sont choisies de telle sorte qu'on obtienne le meilleur rapport (temps de calcul)/précision. On détermine empiriquement que la meilleure subdivision pour la maquette de notre μ -actionneur est $\mathbf{m} = 29$, $\mathbf{n} = 19$ éléments. Chaque surface de l'aimant mobile est donc subdivisée en 600 éléments.

Force totale

L'équation 3.30 donne la force exercée sur une de surfaces. Elle est répétée pour trouver la force exercée sur la deuxième surface. La somme de forces subis par les deux surfaces nous donne la force exercée sur l'aimant mobile.

3.8 Utilisation d'une méthode des éléments finis (MEF)

L'application de l'actionneur en lévitation libre est un problème non-symétrique en général. Il nous faut donc utiliser une méthode des éléments finis (MEF) tri-dimensionnelles. La description d'une MEF ne fait pas partie de cette thèse. Nous utilisons le logiciel Flux3D créé au LEG et développé par Cedrat [Cedr03@] et on compare les résultats avec nos méthodes.

Le maillage de l'aimant mobile est représenté sur la figure 3.20 :

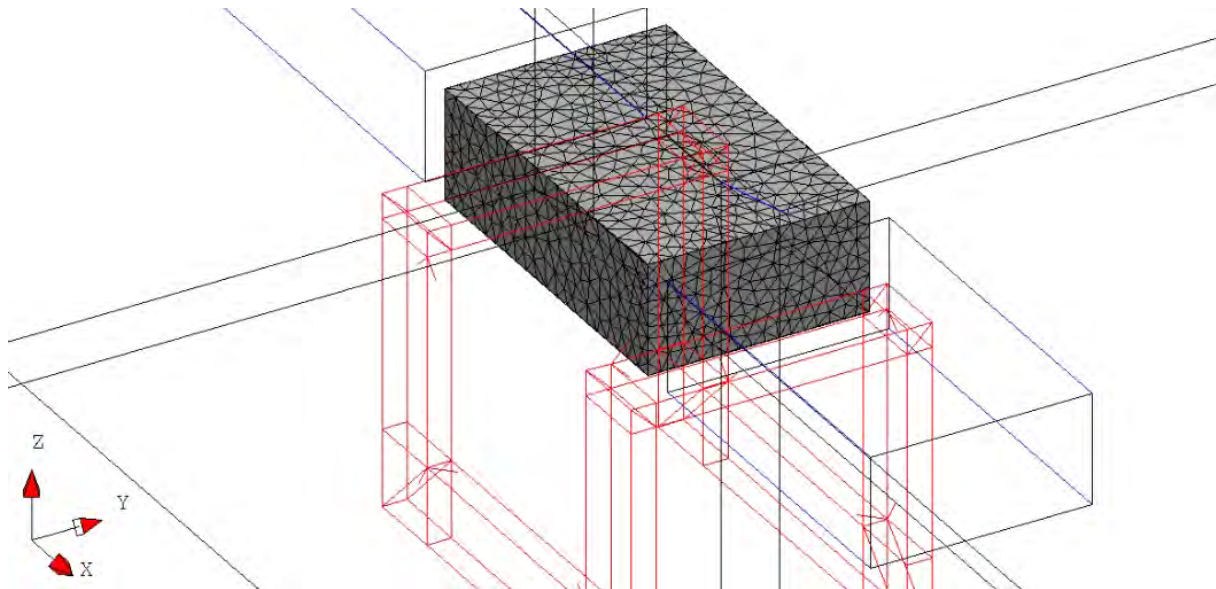


Fig. 3.20–Maillage de l'aimant mobile sous Flux3D

Pour la résolution l'aimant est subdivisé en 5000 éléments. La bobine est modélisée par un inducteur volumique.

3.9 Mesure de la force

Pour la vérification de calculs, nous avons mesuré la force entre deux aimants.

La figure 3.21 montre son principe. Il s'agit d'un bloc cylindrique en plastique dans lequel est serré un aimant avec deux vis en nylon (voir détail b). Sur cet aimant est posé le deuxième aimant, séparé par un nombre défini de cales d'épaisseur de $100\mu\text{m}$.



Fig. 3.21– Mesure de force

a) principe de mesure b) détail de deux aimants et les cales c) appareil sur la balance,

Lorsque l'aimant du haut est soulevé, le poids du dispositif indiqué sur la balance va diminuer. Nous mesurons d'abord le poids du dispositif au repos et ensuite au moment où l'aimant mobile décolle – le poids minimal. La force est calculée directement par :

$$F = \text{poids (rep)} - \text{poids(min)} \quad [\text{Equation 3.31}]$$

3.10 Comparaison des simulations et mesures

Les performances de la méthode de charges équivalentes et de la méthode d'intégration volumique (Dipole3D) ont été d'abord testées pour des aimants et conducteurs très éloignés. Les résultats sont pratiquement identiques avec un calcul analytique [Chub97]. Nous avons donc procédé aux simulations de notre actionneur : maquette centimétrique montrée dans la section 2.2.1.

Toutes les méthodes présentées dans ce chapitre ont été testées dans différents modes (translations, rotations de l'aimant mobile). Le système de coordonnées est toujours le même, celui de la figure 2.4. Les courbes vont nous servir en même temps comme l'identification des propriétés de l'actionneur.

3.10.1 Sans présence de conducteur

Les premières expériences sont fait sans la présence du conducteur (autrement dit le courant dans le conducteur est nul).

Expérience A : bistabilité selon Ox

Il s'agit de l'expérience cruciale pour notre actionneur. L'aimant mobile est centré au niveau de l'axe Oy et Oz et il peut se déplacer dans la direction Ox (longitudinal). On calcule la force exercée sur l'aimant mobile dans la direction x, pour toutes les positions le long de Ox (figure 3.22).

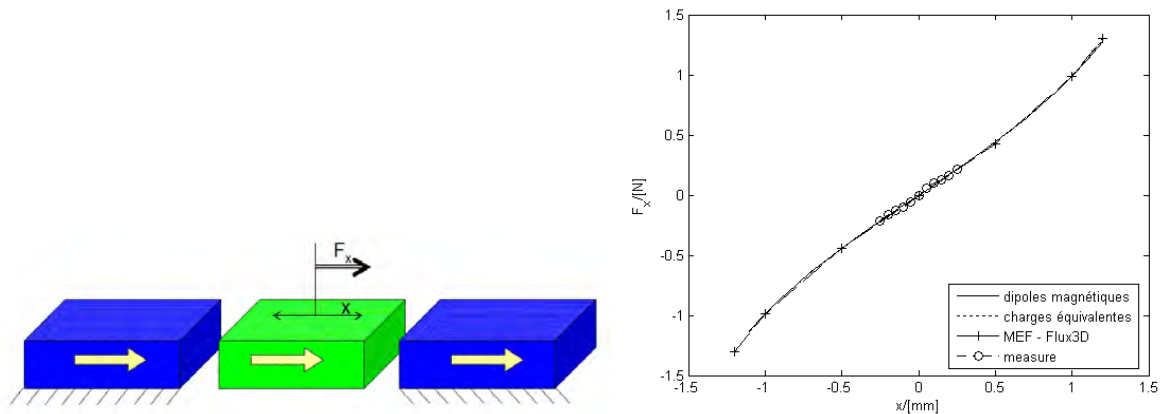


Fig. 3.22–Force F_x exercée par les aimants fixes sur l'aimant mobile, sans courant

On observe que la force est très linéaire dans la zone $\langle -0,5\text{mm}, 0,5\text{mm} \rangle$. Toutes les méthodes donnent pratiquement les mêmes résultats (erreur inférieure à 1%). La mesure a été effectuée seulement dans l'intervalle pratique $\langle -0,25, 0,25\text{mm} \rangle$ car sur les aimants mobiles sont collés des embouts pour baisser les forces de maintien.

Résultats pour l'actionneur : Cette caractéristique prouve la bistabilité de l'aimant mobile. Si nous collons les embouts sur les aimants fixes, la force de maintien et la résistance aux chocs diminue. Quand l'aimant mobile est au milieu, la force est nulle, ce qui confirme notre raisonnement du chapitre 2.4.1.

Expérience B : stabilité dans le plan Oyz

L'aimant mobile est centré dans la direction longitudinale Ox et verticale Oz et il peut se déplacer dans la direction transversale Oy. On calcule la force exercée dans cette direction. Les résultats sont présentés sur la figure 3.23.

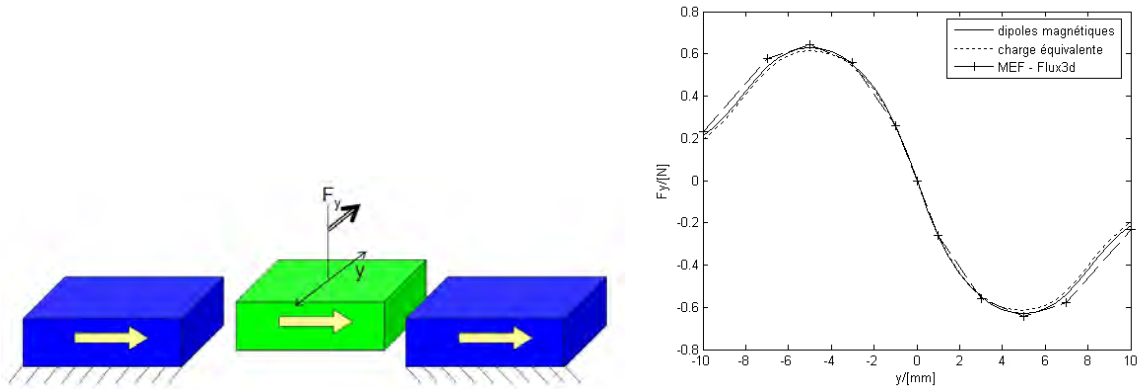


Fig. 3.23-Force F_y exercée par les aimants fixes sur l'aimant mobile, sans courant

L'erreur maximale entre les méthodes est plus élevée, elle atteint 8% par endroits.

Résultats pour l'actionneur : L'aimant mobile est stable autour de sa position zéro, s'il se déplace légèrement dans direction transversale, il se replace en position stable selon Oy . S'il dépasse une certaine distance, la force commence à faiblir, mais il est toujours attiré à l'intérieur de l'actionneur.

La situation est similaire pour les translations selon Oz , mais plus rigide.

Expérience C : stabilité angulaire autour de Oz

La figure suivante montre la situation où l'aimant mobile tourne autour de son axe verticale z . On calcule le couple exercé par rapport à l'axe Oz . Les résultats sont montrés sur la figure 3.24.

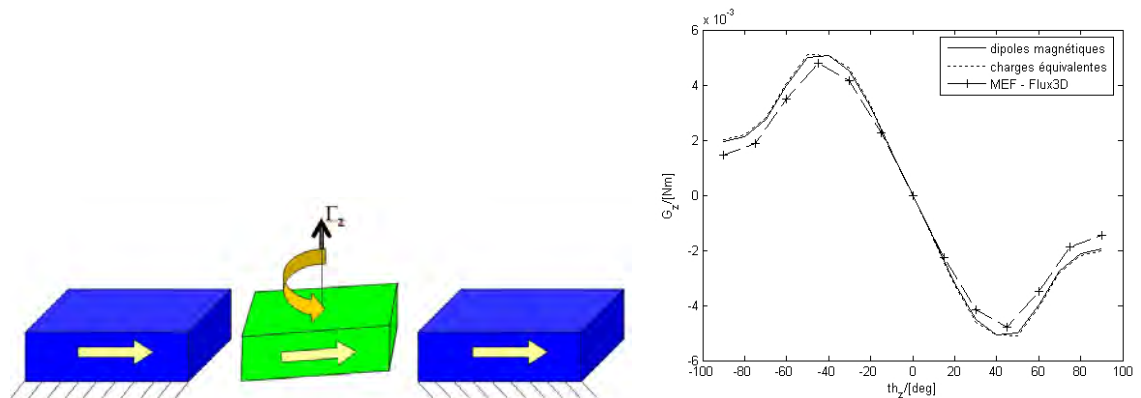


Fig. 3.24– Couple Γ_z exercée par les aimants fixes sur l'aimant mobile pendant sa rotation, sans courant

L'erreur maximale dans cette configuration est de 15%.

Résultats pour l'actionneur : On voit une ressemblance claire avec les courbes obtenues pour l'expérience B. Les conclusions sont identiques : l'aimant est toujours retourné dans sa position initiale, tout d'abord avec un couple qui augmente, puis à partir de 40° avec un couple décroissant.

3.10.2 Avec le courant dans le conducteur

La série d'expériences suivantes va introduire le courant de 10 A dans les conducteurs.

Expérience D : Interaction entre l'aimant mobile et le conducteur

L'aimant mobile peut se déplacer selon Ox , on impose un courant dans les conducteurs. La force créée sur l'aimant mobile est tracée sur la figure 3.25.

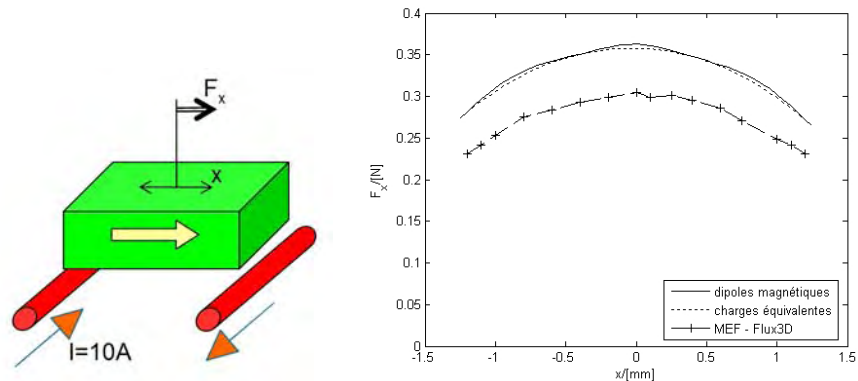


Fig. 3.25– Force exercée sur l'aimant mobile par conducteur sans présence des aimants fixes, courant 10 A

La modélisation présente un écart important entre la méthode Flux3D et Dipole3D. L'erreur maximale est 19 %. Aujourd'hui nous ne sommes pas capables d'expliquer cet écart. Problème de discrétisation ? Erreur numérique ?

Résultats pour l'actionneur : La force pour le courant de 10A n'est pas constante pour des différentes positions de l'aimant mobile dans l'actionneur. Les conducteurs sont moins efficaces au bord.

Expérience E : L'action du conducteur sur l'aimant dans le μ -actionneur

On déplace l'aimant mobile le long de son axe Ox et nous mesurons la force exercée suivant cet axe en présence du courant de 10 A dans le conducteur. Les résultats de comparaison sont sur la figure 3.26.

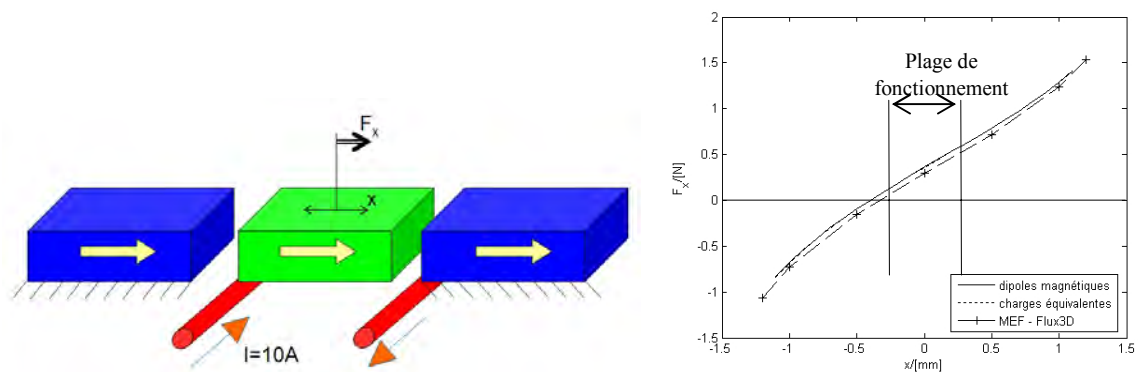


Fig. 3.26– Force F_x exercée sur l'aimant mobile en présence des aimants fixes et du courant 10 A dans les conducteurs

Résultats pour l'actionneur : Il s'agit de la même courbe que celle montrée dans l'expérience A sauf que cette courbe est décalée vers le haut. Cette expérience montre l'importance de conducteurs : il permettent de surmonter la force attractive des aimants fixes et déplacer l'aimant mobile dans le deuxième point stable. Le courant 10 A est déjà suffisant pour le décollage de l'aimant mobile car son déplacement est limité par les entrefers.

Expérience F : Couple parasite pour l'asservissement

Le dernier exemple (figure 3.27) montre une situation où l'actionneur se déplace dans la direction Ox, il y a 10 A dans la bobine et on calcule le couple par rapport à l'axe Oy.

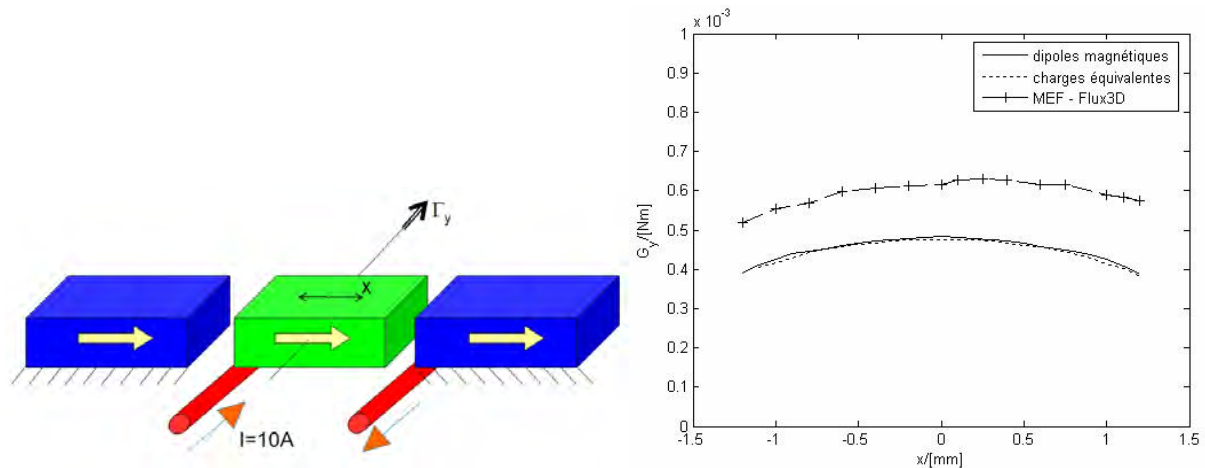


Fig. 3.27– Le couple exercé sur l'aimant mobile, courant 10A dans les conducteurs

Le binôme Dipole3D + Charges équivalentes donne une différence de 30% par rapport à la MEF. Nous ne savons pas encore expliquer cet écart.

Résultats pour l'actionneur : Le courant dans les conducteurs a des effets secondaires sur l'aimant mobile. Le courant d'asservissement en Ox a aussi tendance à faire tourner l'aimant mobile autour l'axe Oy. Cette tendance peut entraîner des oscillations néfastes pouvant aller jusqu'à l'éjection.

3.11 Vérification dynamique expérimentale

La première vérification de calcul dynamique peut être faite sur la maquette centimétrique présentée dans le chapitre 2.2.1. L'expérience consiste à connecter un condensateur chargé aux bornes de la bobine d'actionnement montré sur la figure 3.28a.

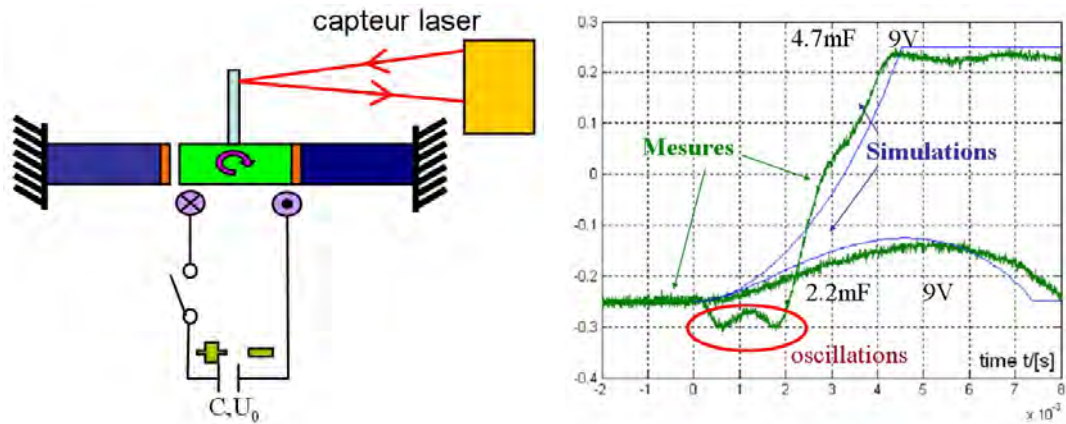


Fig. 3.28- Expérience dynamique – commutation assurée par décharge d'un condensateur
a) schéma du principe b) mesure et simulation de la position

Le pic de courant dans les conducteurs dû au déchargement du condensateur provoque le déplacement de l'actionneur (figure 3.28b). Si la hauteur et la longueur du pic sont suffisantes, l'actionneur commute comme dans le cas de 4.7mF, 9V (courbe du haut). Si le pic n'est pas suffisant, l'aimant décolle un peu mais reste attiré vers la position initiale, comme dans le cas de 2.2mF, 9V (courbe du bas). Remarquons la présence d'oscillations au début du déplacement. L'aimant mobile subit une faible rotation (flèche sur figure 3.28a) et le capteur de position est perturbé par cette rotation ce qui provoque les oscillations de la mesure.

3.12 Mesure du temps de calcul

Les durées de calcul des diverses méthodes ont été évaluées sur un PC avec Pentium III 1133 MHz et 256 Mo de RAM. La précision de méthodes varie en fonction de la segmentation ou du maillage des objets. L'application sous la méthode d'éléments finis a été maillée aussi finement possible, sans imposer de contrainte sur le temps de calcul. La segmentation des objets sous la méthode volumique (Dipole3d) et la division de surfaces sous la méthode de charges équivalentes ont été choisies empiriquement de telle sorte que l'écart obtenu soit inférieur à 15% par rapport à la solution analytique. Ce choix a été fait afin d'atteindre un compromis entre le temps de calcul et la précision.

Un calcul d'un vecteur de force et d'un vecteur de couple par la **méthode des éléments finis** exige plusieurs étapes et peut prendre beaucoup de temps, parfois cette méthode ne converge pas. Une résolution moyenne prend entre **18 et 30 secondes** pour différentes positions d'aimant.

Les méthodes développées pendant cette étude donnent le résultat en même temps pour différentes positions d'aimant.

La méthode **Dipole3D** est la plus rapide. Le résultat est calculé en **1,1 secondes**. Celle des **charges équivalentes** donne le résultat en **1,5 secondes**. Il n'est pas très significatif de comparer ce temps d'évaluation avec Dipole3D car elle est écrite en M-file, facilement compatible avec le Simulink. Si elle était écrite en C, le calcul serait plus rapide.

3.13 Conclusion

Différentes méthodes ont été testées pour calculer la force et le couple exercés sur un aimant parallélépipédique dans un champ magnétique. Des mesures expérimentales ont été faites pour la vérification.

La méthode des éléments finis Flux3D nous a servi pour la vérification de nos calculs. Son utilisation pour notre application est exclue car elle est lourde et il y a un grand problème du maillage : il faut le vérifier et éventuellement modifier pour chaque position de l'aimant mobile.

La méthode de charges équivalentes et Dipole3D (méthode de l'intégration volumique) donnent pratiquement les mêmes résultats. Elles sont assez rapides, la précision (15%) est suffisante et nous avons un code facilement implantable en Simulink. La méthode de charges équivalentes peut être mieux optimisée (calcul de l'intégrale de Gauss, codage en C). Les deux méthodes peuvent être utilisées pour le calcul de la dynamique.

[Chad04] a récemment présenté un calcul de force et de couple utilisable pour la résolution de μ -actionneurs magnétiques. Le logiciel s'appelle Locapi, son principe est le même que celui de la méthode de charges équivalentes présentée dans cette thèse. L'utilisation de Locapi est prévue pour des futures applications de microsystèmes magnétiques.

Références :

- [Akou84] Gilles Akoun, Jean-Paul Yonnet "3D analytical calculation of the forces exerted between two cuboidal magnets" IEEE 1Transaction on magnetics, 1984, Vol MAG-20, pp. 1962-1964
- [Bris97] P. Brissonneau "Magnetisme et materiaux magnetiques" Hermes, 1997
- [Cedr03@] <http://www.cedrat.com/software/Flux/pdf/flux.pdf>
- [Chad01] O. Chadebec, "Modélisation du champ magnétique induit par des tôles, identification de l'aimantation, application à l'immunisation en boucle fermée d'une coque ferromagnétique", thèse INPG, 2001
- [Char99] Jean-Frederic Charpentier, Guy Lemarquand "Study of permanent magnet couplings with progressive magnetization using an analytical formulation" IEEE Transactions on magnetics, 1999, Vol 35, pp.4206-4217
- [Chub97] O. Chubar, P. Elleaume, J. Chavanne, "A three-dimensional magnetostatic computer code for insertion devices", proc. of the PAC97 Conference, 1997
- [Dela93] J. Delamare, "Suspensions magnétiques superficiellement passives", thèse de l'Institute Nationale Polytechnique de Grenoble, réalisé au Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble, décembre 2004
- [Dela93] Jerome Delamare, Elisabeth Olivier Rulliere, Jean-Paul Yonnet, Jean Bigeon "3D calculation of permanent magnet interactions" IMACS TC'1 Canada Juillet 93, pp 289,292
- [Dura68] E. Durand "Magnetostatique" Masson et Cie, 1968
- [Elle88] P. Elleaume, O. Chubar, J. Chavanne, "Computing 3D magnetic field from insertion devices", Journal of synchrotron Radiation, ISSN 0909-0495, pp. 481-484, 1998
- [Gill01] P.A. Gilles, "Conception développement de micromoteurs synchrones planaires à aimants", Thèse de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, préparée au Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble, septembre 2001
- [Jane03] F. Janet, "Modélisation de dispositifs électromagnétiques hautement saturables par la méthode des moments magnétiques, application aux capteurs de courant des disjoncteurs basse tension", thèse INPG, 2003
- [Step03] J. Stepanek, H. Rostaing, J. Delamare, O. Cugat, "Fast dynamic modeling of magnetic micro-actuator", Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol. no. 272-276P1, pp 669-671, 2003
- [Trem01] E. du Tremolet de Lacheisserie *et al* "Magnetisme & magnetostatique" Barneod, 2001

CHAPITRE 4
MODÉLISATION
DYNAMIQUE
DU μ -ACTIONNEUR,
CORRECTEUR
DE L'ASSERVISSEMENT
DE POSITION

Modélisation dynamique

du μ -actionneur, correcteur

de l'asservissement de position

Le déplacement avec un degré de liberté a été exposé dans le paragraphe 3.11. La modélisation est introduite dans ce chapitre. L'aimant mobile se déplace suivant l'axe longitudinal de l'actionneur grâce au courant dans les conducteurs. Ce cas est très intéressant pour les premières analyses.

Néanmoins le modèle simplifié n'est pas suffisant. L'aimant mobile se trouve en lévitation magnétique lors de son déplacement – il a six degrés de liberté. Nous pouvons donner un modèle plus complet de son comportement et l'utiliser pour toutes les simulations du système.

Le modèle complet de la dynamique du système avec six degrés de liberté est fortement non-linéaire. La synthèse d'un correcteur pour l'asservissement devrait être réalisé en utilisant des techniques spécifiques de l'automatique non-linéaire. Par exemple, il faudrait linéariser le modèle autour de ses différents points de fonctionnement ce qui conduirait à la synthèse de différents correcteurs (un par modèle linéaire). Cette technique n'est pas envisagée ici. Un correcteur pour l'asservissement de l'actionneur peut néanmoins être trouvé pour le modèle simplifié.

Ce chapitre va introduire les deux modélisations de la dynamique d'actionneur. La modélisation simplifiée avec un degré de liberté va nous permettre de faire des études rapides du fonctionnement de l'actionneur et de concevoir un correcteur pour l'asservissement. La description complète avec six degrés de liberté va nous permettre d'étudier des déplacements complexes des μ -actionneurs bistables et de valider le bon fonctionnement du correcteur obtenu à partir du modèle simplifié. Nous testons à chaque fois le correcteur obtenu sur le système complet et nous vérifions la stabilité en boucle fermée.

4.1 Remarque sur la magnétostatique

Les calculs utilisés dans le chapitre 3 sont des calculs en magnétostatique. L'aimant mobile induit pendant son déplacement une tension dans les conducteurs. Cette tension va créer un courant qui va tendre à freiner l'aimant mobile (créer une force opposée). Nous devrions donc utiliser l'approche magnétodynamique et inclure dans nos simulations cet effet, mais nous pouvons démontrer que la tension induite par un aimant qui se déplace à 0.6 m/s (vitesse maximale atteinte pendant les simulations) et crée 10mT (voir figure 2.4) dans les 30 spires de conducteur de 2x9 mm de longueur est de **3mV**. Cette valeur est donc négligeable devant la tension d'alimentation. Nous pouvons donc rester sur l'approche magnétostatique, mais il faudra vérifier cette hypothèse pour chaque nouvel actionneur.

NB. Pour asservir la position de l'aimant mobile nous allons imposer le courant dans les bobines. Le problème n'aura donc aucune influence dans ce cas. La remarque est mentionnée pour le cas où une source de tension est connectée sur la bobine.

4.2 Description simplifiée

La première modélisation contenant seulement le déplacement suivant l'axe x va être étudié dans ce paragraphe. Les autres grandeurs (2 translations, 3 rotations) sont fixées à zéro.

Les travaux précédents [Diep04] ainsi que les figures 3.22, 3.25 et 3.26 montrent que la force totale exercée sur l'aimant mobile peut être approximée par :

$$F_x = k_1x + k_2I \quad \text{[Equation 4.1]}$$

avec

x... position longitudinale de l'aimant mobile;

I... courant dans la bobine;

k_1, k_2 ... constantes électromagnétiques (raideurs).

L'expression 4.1 est composée de deux termes. Le premier terme exprime la force créée par les aimant fixes (proportionnelle au déplacement du mobile), et le deuxième, la force créée par les conducteurs (proportionnelle au courant).

Une équation différentielle du mouvement pour le modèle simplifié peut être directement déduite de :

$$m\ddot{x} = k_1x + k_2I \quad \text{[Equation 4.2]}$$

avec

m... poids d'aimant mobile.

La fonction de transfert résultante du système est la suivante :

$$T.F.M.S. = \frac{x}{I} = \frac{\frac{k_2}{k_1}}{\frac{m}{k_1} p^2 - 1} = \frac{k_2}{k_1} \cdot \frac{1}{(\tau^2 p^2 - 1)} \quad [\text{Equation 4.3}]$$

avec τ ... constante de temps mécanique du système.

La fonction de transfert dans l'équation 4.3 correspond à un système instable du deuxième ordre. La phase est de 180° pour toutes les fréquences.

4.2.1 Décharge de condensateur dans la bobine

Le paragraphe 3.10 a montré une évaluation dynamique du calcul de la force statique présenté dans le chapitre 3. Ce paragraphe va introduire la base de calcul pour cette simulation.

Le problème peut être schématisé selon la figure 4.1.

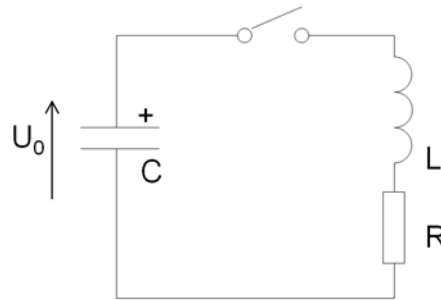


Fig. 4.1– Schéma de principe de la décharge du condensateur

Le bobinage de l'actionneur a une inductance L et une résistance R. Un condensateur C est chargé sous la tension initiale U_0 . A un instant donné, le condensateur est connecté à la bobine. Le condensateur va se décharger selon l'équation :

$$u_c = \int \left(-\frac{1}{C} \right) i dt + u_{c0} \quad [\text{Equation 4.4}]$$

L'équation différentielle caractérisant la charge est :

$$u_c = L \cdot \frac{di}{dt} + R \cdot i \quad [\text{Equation 4.5}]$$

avec

L... induction de la bobine (conducteurs);

C...capacitance du condensateur générant le pic de courant;

u_{c0} ... tension initial de condensateur;

u_c ... tension aux bornes du condensateur et de la bobine;

i ... courant dans le circuit;

Ces équations conduisent au schéma Simulink de la figure 4.2.

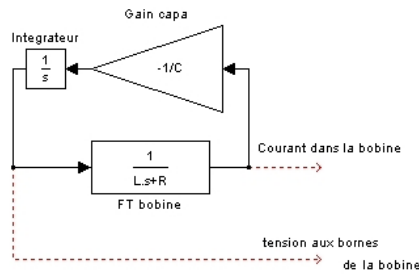


Fig. 4.2– Schéma Simulink : modèle du déchargement de condensateur

Le schéma Simulink résultat des équations 4.2, 4.4, et 4.5 est donné sur la figure 4.3.

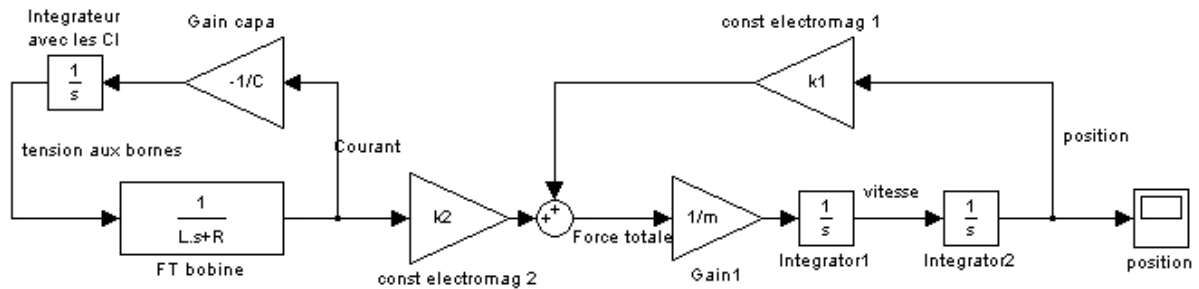


Fig. 4.3– Schéma Simulink : modèle dynamique simplifié pour le déplacement de l'aimant mobile dû au déchargement de condensateur

4.3 Introduction de la description complète

La deuxième approche décrit la dynamique de l'actionneur avec six degrés de liberté (3 rotations, 3 translations). Rappelons que les résultats vont nous permettre de savoir si l'aimant mobile ne sort pas complètement en dehors de l'actionneur dans le cas du μ -relais et si le système asservi n'oscille pas en divergence. Ce modèle sera également utilisé pour les études détaillées des autres types des actionneurs [Rost04].

4.3.1 Définition de système

Définissons tout d'abord un système de coordonnées de référence (x_s, y_s, z_s) appelé R0 et un système de coordonnées mobile (x_i, y_i, z_i) appelé Ri comme dessiné dans la figure 4.4.

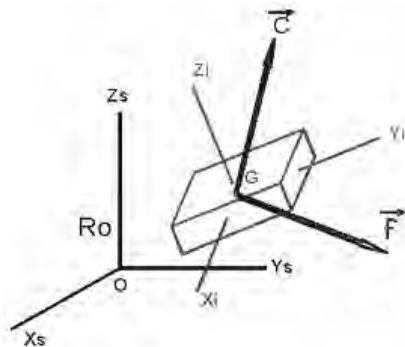


Fig. 4.4– Définition des systèmes de coordonnées

L'aimant est fabriqué dans un matériau homogène. Il a la forme d'un parallélépipède. Le tenseur du moment d'inertie dans les coordonnées du repère mobile calculé par rapport à son centre d'inertie (point G dans la figure 4.4) est :

$$I_i = \begin{pmatrix} I_1 & 0 & 0 \\ 0 & I_2 & 0 \\ 0 & 0 & I_3 \end{pmatrix} = \frac{1}{m} \begin{pmatrix} b^2 + c^2 & 0 & 0 \\ 0 & c^2 + a^2 & 0 \\ 0 & 0 & a^2 + b^2 \end{pmatrix} \quad [\text{Equation 4.6}]$$

avec

m... poids de l'aimant mobile;

a... longueur de l'aimant;

b... largeur de l'aimant;

c... hauteur de l'aimant.

4.3.2 Choix d'approche

Deux types de mouvement suivant les axes sont à considérer, à savoir les translations et les rotations. La description de translations est relativement simple, il s'agit de la deuxième loi de Newton. Parmi les différentes possibilités de modélisation pour exprimer les rotations, on trouve principalement :

- les rotations successives par rapport au repère fixe;
- les angles d'Euler;
- les quaternions.

Les rotations successives sont pratiques pour modéliser de très petites rotations. Le principal inconvénient de cette approche est que les rotations ne sont pas commutatives : l'objet ne se retrouve pas dans la même position si l'on fait des rotations par exemple par rapport à (x_s, y_s, z_s) ou par rapport à (y_s, x_s, z_s) .

L'approche "angles d'Euler" est très répandue (par exemple en mécanique ou dans le domaine aérospatial). Elle utilise trois rotations successives (lacet, tangage, roulis) dans différents repères. Outre la non commutativité des rotations, son inconvénient est qu'elle nécessite le calcul de sinus et cosinus. Elle présente en outre une singularité (Gimbal lock effect) [Jone02@], [Duva02@], donné sur figure 4.5.

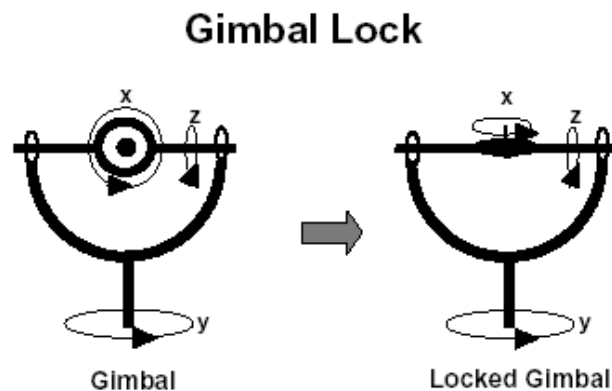


Fig. 4.5– Démonstration de la singularité "Gimbal lock"

Dans le cas du "Gimbal lock" une infinité de rotation autour des axes Ox et Oy conduisent à la même position (voir le schéma de droite sur la figure 4.5).

La troisième approche exploite l'outil mathématique "quaternions" qui peut être vu comme une généralisation des nombres complexes [Hami853, Guiz02@, Chou92]. Pour exprimer une rotation arbitraire, il nous faut un vecteur autour duquel on effectue la rotation (3 composants du quaternion) et un angle de rotation (1 composant du quaternion). Une condition algébrique relie les quatre composantes du vecteur quaternion pour pouvoir assurer que ce dernier représente bien une rotation.

Cette approche ne présente pas de singularité. Les calculs sont de simples multiplications et additions sans calcul de sinus et cosinus.

Le choix de la modélisation à base de quaternions permet donc de s'affranchir du phénomène de Gimbal lock et de simplifier les calculs, même si une équation supplémentaire (contrainte algébrique sur la normalité du quaternion est ajoutée).

4.4 Dynamique modélisée avec les quaternions

Le système dynamique comprend quatre vecteurs inconnus :

- le vecteur de position (translation) $\vec{R} \in \mathfrak{R}^3$;
- le vecteur de vitesse (translation) $\vec{V} \in \mathfrak{R}^3$;
- le quaternion $\vec{Q} \in \mathfrak{R}^4$;
- la vitesse angulaire $\vec{\Omega} \in \mathfrak{R}^3$.

Les composantes sont définies par :

$$\vec{R} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad \vec{V} = \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{pmatrix} \quad \vec{Q} = \begin{pmatrix} q0 \\ q1 \\ q2 \\ q3 \end{pmatrix} \quad \vec{\Omega} = \begin{pmatrix} p \\ q \\ r \end{pmatrix} \quad \text{[Equation 4.7]}$$

Notons que

$$q0 = \cos \frac{\theta}{2} \quad \text{[Equation 4.8]}$$

$$\begin{pmatrix} q1 \\ q2 \\ q3 \end{pmatrix} = \sin \frac{\theta}{2} \begin{pmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{pmatrix} \quad \text{[Equation 4.9]}$$

avec

θ ... l'angle de rotation du solide autour de l'axe de rotation $\vec{u} (u_x, u_y, u_z)$ tel que

$$\|\vec{u}\|_2 = 1 \quad \text{[Equation 4.10]}$$

La force et le couple sont supposés connus pour n'importe quelle position de l'aimant et n'importe quel courant dans les conducteurs. Le calcul est décrit dans le chapitre 3, le couple

exercé sur un parallélépipède en lévitation est toujours calculé par rapport à son centre de gravité. On obtient donc respectivement :

$$\vec{F} = \vec{F}(R, Q, I) = \begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{pmatrix} \quad \vec{f} = \frac{\vec{F}}{m} = \begin{pmatrix} \frac{F_1}{m} \\ \frac{F_2}{m} \\ \frac{F_3}{m} \end{pmatrix} \quad [\text{Equation 4.11}]$$

$$\vec{\Gamma} = \vec{\Gamma}(R, Q, I) = \begin{pmatrix} \Gamma_1 \\ \Gamma_2 \\ \Gamma_3 \end{pmatrix} \quad \vec{C} = \begin{pmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\Gamma_1}{I_1} \\ \frac{\Gamma_2}{I_2} \\ \frac{\Gamma_3}{I_3} \\ I \end{pmatrix} \quad [\text{Equation 4.12}]$$

Les vecteurs \vec{f} et \vec{C} sont normalisés afin de simplifier la mise en équation ultérieure.

4.4.1 Equations de translation

Les équations (4.13) et (4.14) sont aisément déduites des lois de Newton. Elles représentent les six premières équations différentielles décrivant la dynamique du système.

$$\frac{d\vec{R}}{dt} = \vec{v} \quad [\text{Equation 4.13}]$$

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{f} \quad [\text{Equation 4.14}]$$

Il faut en outre tenir compte des conditions initiales (4.15) et (4.16)

$$\vec{R}_0 = \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{pmatrix} \quad [\text{Equation 4.15}]$$

$$\vec{v}_0 = \begin{pmatrix} v_{x0} \\ v_{y0} \\ v_{z0} \end{pmatrix} \quad [\text{Equation 4.16}]$$

4.4.2 Equations de rotation

L'équation caractérisant la relation entre le couple exercé sur l'aimant mobile (exprimé dans le repère mobile par rapport au centre de gravité) et la vitesse angulaire de l'aimant (exprimé aussi dans le repère mobile) est définie par la relation suivante [Guiz02@] :

$$\vec{\Gamma} = I_i \cdot \frac{d\vec{\Omega}}{dt} + \vec{\Omega} \times I_i \cdot \vec{\Omega} \quad [\text{Equation 4.17}]$$

Quelques manipulations de 4.17 conduisent à l'équation 4.18 :

$$\frac{d\bar{\Omega}}{dt} = \bar{C} - \begin{pmatrix} \frac{I_3 - I_2}{I_1} qr \\ \frac{I_1 - I_3}{I_2} pr \\ \frac{I_2 - I_1}{I_3} pq \end{pmatrix} \quad [\text{Equation 4.18}]$$

où les conditions initiales sont données par :

$$\bar{\Omega}_0 = \begin{pmatrix} p_0 \\ q_0 \\ r_0 \end{pmatrix} \quad [\text{Equation 4.19}]$$

L'équation 4.18 donne trois équations supplémentaires pour la décrire le système.

4.4.3 Quaternions

Un quaternion unitaire \bar{Q} représente une rotation transformant le repère R_0 en repère R_i (figure 4.4). L'évolution du quaternion doit être calculé en utilisant la vitesse angulaire instantanée [Guiz02@]. Cette évolution avec les conditions initiales donne :

$$\frac{d\bar{Q}}{dt} = \frac{1}{2} \cdot \begin{pmatrix} 0 & -p & -q & -r \\ p & 0 & r & -q \\ q & -r & 0 & p \\ r & q & -p & 0 \end{pmatrix} \cdot \bar{Q} \quad [\text{Equation 4.20}]$$

$$\bar{Q}_0 = \begin{pmatrix} q0_0 \\ q1_0 \\ q2_0 \\ q3_0 \end{pmatrix} \quad [\text{Equation 4.21}]$$

Notons que le quaternion doit être unitaire afin de représenter une rotation ce qui signifie qu'à tout instant, il doit satisfaire :

$$\sqrt{q0^2 + q1^2 + q2^2 + q3^2} = 1 \quad [\text{Equation 4.22}]$$

L'équation 4.20 fournit les quatre dernières équations différentielles permettant de modéliser le système. Il faut remarquer que cette modélisation doit (en théorie) tenir compte de la contrainte de normalité 4.22.

4.4.4 Système complet

Le couple exercé sur l'aimant mobile dépend de la translation et de la rotation d'aimant mobile dans le champ magnétique. Aucune équation ne peut être découplée, le problème contient donc 13 équations différentielles (4.13, 4.14, 4.18, 4.20) avec 13 inconnues :

$$(x, y, z, v_x, v_y, v_z, p, q, r, q0, q1, q2, q3)$$

La contrainte (equation 4.22) doit être satisfaite à tout instant. Le système est simulé sous Matlab-Simulink. Plusieurs techniques d'intégration numérique ont été testées :

- une méthode de Runge-Kutta (4,5) appelée Ode45 dans Matlab. C'est une méthode d'intégration dite à "pas variable," applicable à des systèmes d'équations différentielles "non-raides" (ce qui signifie que les dynamiques sont approximativement du même ordre de grandeur);
- une méthode à pas fixe pour laquelle le pas a été soigneusement fixé en comparant les résultats obtenus avec ceux fournis par le solveur Ode45. Sans indication explicite on utilisera pour la simulation la méthode d'intégration à pas variable.

Il faut souligner que la contrainte exprimée par l'équation 4.22 n'est pas intégrée à la simulation mais qu'elle est vérifiée *à posteriori*.

4.5 Système en boucle ouverte

Le système complet décrit dans le paragraphe précédent (4.4.4) est utilisé dans ce paragraphe pour des simulations de **l'actionneur magnétique en μ -dimensions**. Les calculs avec les simulations faites sur la maquette centimétrique ont été transmis à Arnaud Walter, doctorant du LEG/LETI qui a repris les travaux réalisés avant 2004 au LETI. Il a simulé le comportement dynamique de l'aimant mobile dans le mode bistable pour déterminer le temps de commutation du μ -relais et aussi pour vérifier la stabilité angulaire de l'aimant mobile. Nous montrons deux exemples de problèmes possibles sur la figure 4.6.

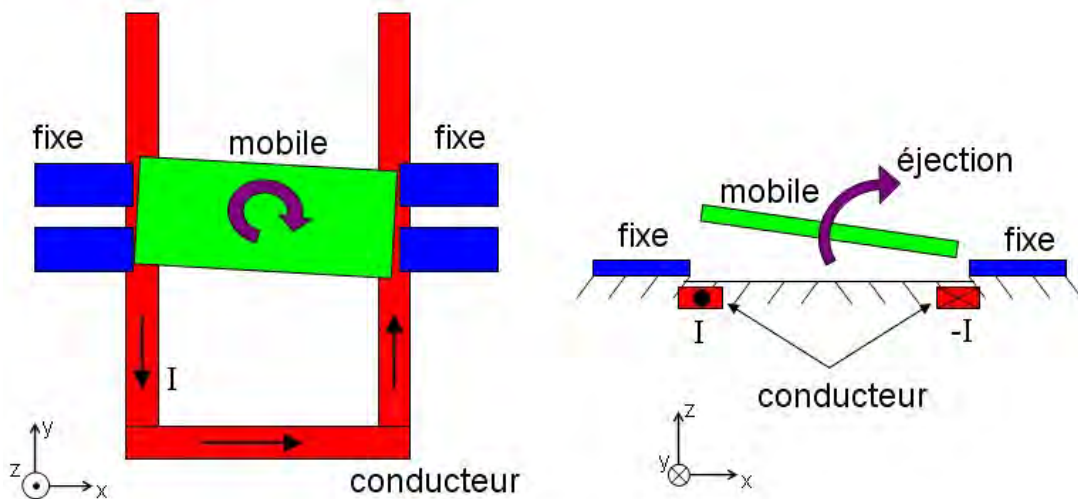


Fig. 4.6– Problèmes sur la stabilité angulaire

a) coincement de l'aimant mobile (vue dessus) b) éjection de l'aimant mobile (vue de coupe)

La figure 4.6a montre le cas où l'aimant mobile a tourné par rapport à l'axe Oz. Il se retrouve dans une position stable non souhaitée : il est collé au deux côtés du relais par deux coins opposés.

La figure 4.6b montre un autre type de danger : la force subie suivant Oz conjuguée au couple subi suivant Oy pourrait provoquer l'éjection totale de l'aimant hors du dispositif.

Des simulations du comportement ont été réalisées avec la configuration de la figure 4.7.

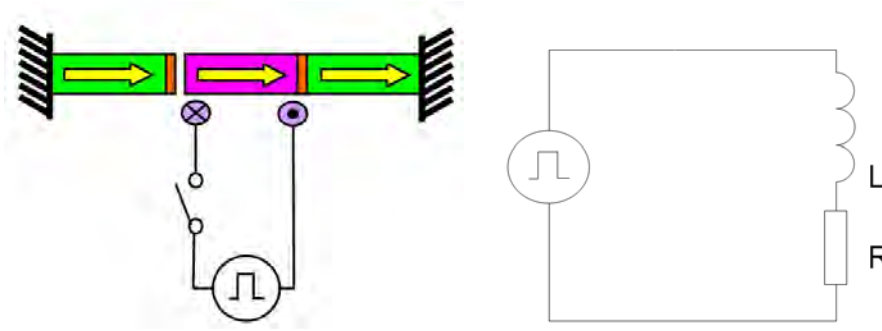


Fig. 4.7– Pilotage du μ -actionneur avec une source de courant pulsé

La position de l'aimant mobile est commutée à l'aide d'une source de courant.

Le système d'équations différentielles est intégré sous Simulink. Le modèle est présenté sur la figure 4.8.

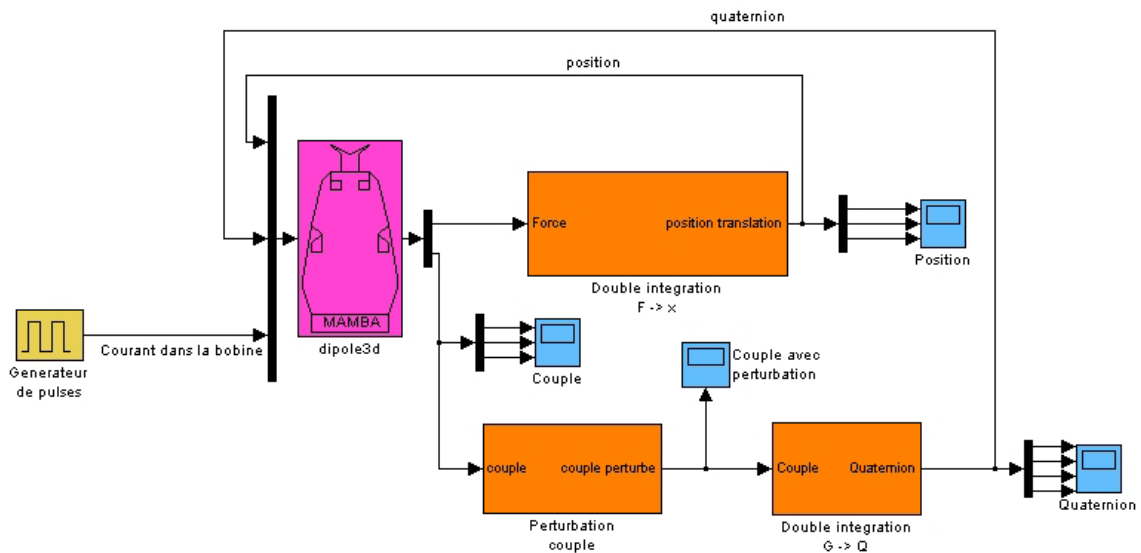
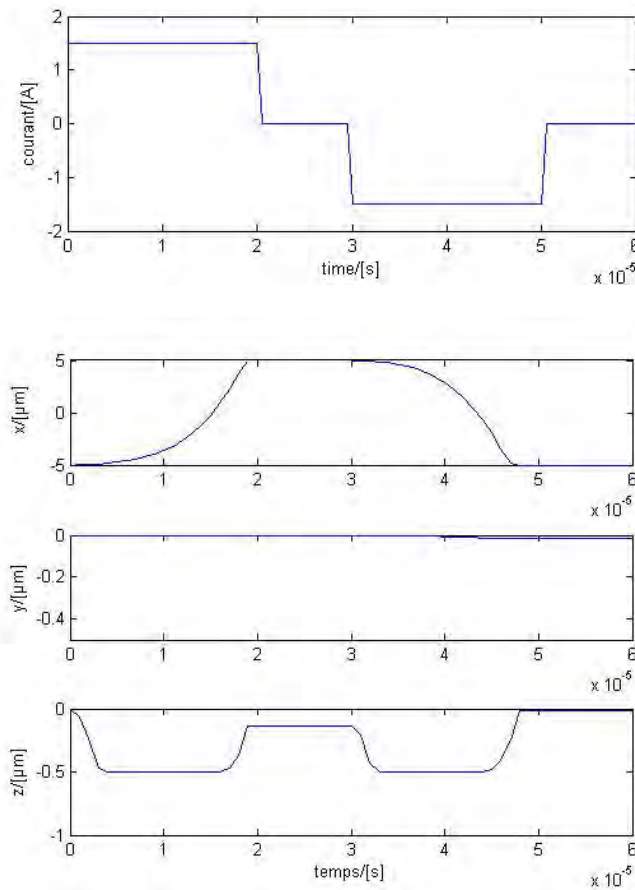


Fig. 4.8– Schéma Simulink avec le modèle complet : simulation de la commutation du μ -actionneur à l'aide d'une source d'impulsions de courant

Le schéma montre deux boucles principales. On calcule le vecteur de la position (x,y,z) en translation dans la première boucle, et le vecteur de la position angulaire (quaternions (q_0,q_1,q_2,q_3)) dans la deuxième boucle. La position et les quaternions sont entrés dans le bloc mamba. Avec l'information additionnelle de courant, on calcule la force (exprimée dans le repère fixe) et le couple (exprimé dans le repère mobile) exercés sur l'aimant mobile.

Un résultat de simulation de la translation est donné sur la figure 4.9.



**Fig. 4.9– Haut : courant dans le conducteur
Bas : translation du μ -actionneur RAIMI lors de la commutation**

On voit bien une commutation complète de l'aimant mobile : il passe de la position $x = -5 \mu\text{m}$ à la position $x = 5 \mu\text{m}$, puis revient en position initiale. Le temps de passage d'une position à l'autre est de $20 \mu\text{s}$. On observe également un autre phénomène parasite : l'aimant mobile est attiré vers le bas pendant le premier passage, il glisse sur le substrat, mais il est légèrement soulevé avant la fin de ce passage. Cet événement se répète pendant le deuxième passage.

La figure 4.10 montre l'évolution des quaternions pour les mêmes conditions de simulation.

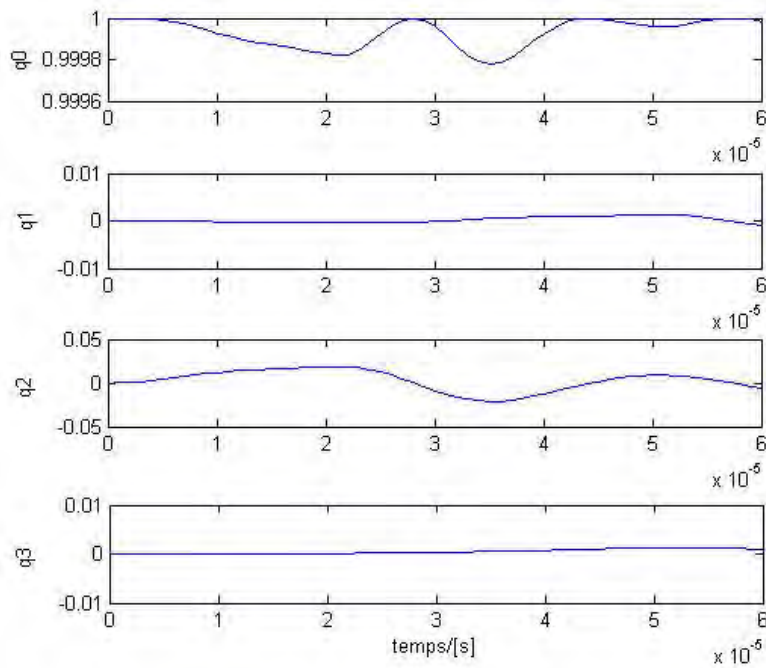


Fig. 4.10– Rotation du μ -actionneur RAIMI lors de commutation

L'analyse de courbes de la figure 4.10 montre que l'aimant mobile oscille très peu. Pour faciliter l'interprétation de cette figure, une visualisation du mouvement réel de l'aimant mobile a été réalisée. Trois positions extraites de cette vidéo sont données sur la figure 4.11.

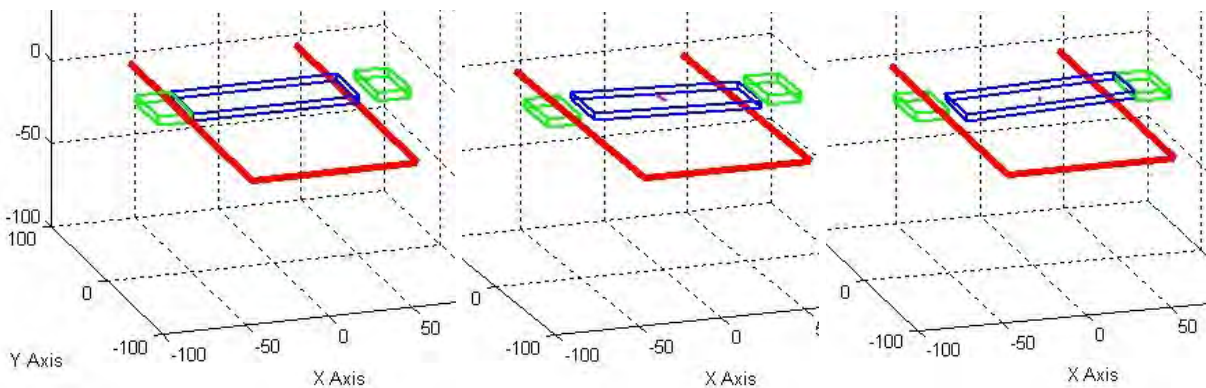


Fig. 4.11– Visualisation du mouvement de l'aimant mobile

L'étude de cette vidéo permet de conclure que l'aimant mobile subit une faible rotation autour de l'axe Oy . Ce résultat a été attendu car l'aimant mobile subit pendant son déplacement un couple selon l'axe Oy (voir paragraphe 3.10.2, Expérience F)

4.6 Système en boucle fermée

Ce paragraphe introduit la synthèse d'un correcteur pour l'asservissement de l'actionneur en lévitation.

Différents travaux sur les systèmes bistables en lévitation et leur asservissement existent. Un exemple de ce type d'asservissement a déjà été donné dans le paragraphe 2.4.2 [Unis05@],

on trouve différents correcteur sur le site web. [Faur99] a donné la synthèse d'un correcteur pour un palier magnétique en lévitation : les pôles et zéros du correcteur sont choisis à partir des pôles du système à asservir.

Dans ce travail on va faire la synthèse d'un correcteur avec une méthode de placement de pôles robuste [DeLa02]. Dans cette approche, on fixe les pôles de la fonction de transfert en boucle fermée permettant de garantir les performances souhaitées pour l'asservissement. On en déduit la fonction de transfert du correcteur et par là même, le correcteur lui-même.

Le système en boucle fermée montré sur la figure 4.12 va être utilisé pour la synthèse de correcteur. Il intègre également le modèle du capteur de position.

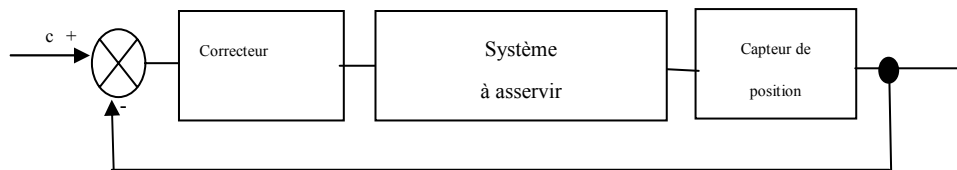


Fig. 4.12– Système en boucle fermée

Le modèle du système à asservir utilisé pour la synthèse est celui décrit dans le paragraphe 4.2 (système avec un degré de liberté, fonction de transfert : équation 4.3). La vérification de la stabilité sera faite sur le système complet décrit dans le paragraphe 4.4.4.

4.6.1 Choix de la structure de correcteur

Le rôle du correcteur est de contrôler la position de l'aimant mobile au milieu du dispositif. Il doit aussi pouvoir compenser des perturbations exercées sur l'aimant mobile. Il servira à stabiliser l'aimant mobile dans n'importe quelle position sur l'axe Ox. Les autres axes ne seront pas asservis dans cette configuration.

Pour cette application, un correcteur à avance de phase peut satisfaire nos contraintes. Il permet de réduire la phase du système en boucle fermée. La sortie du correcteur est le courant dans la bobine. Pour garantir le gain et la bande passante du courant, la boucle de l'asservissement de la position contient une boucle interne d'asservissement de courant plus rapide. La fonction de transfert du correcteur de position est donnée par :

$$F.T._{COR} = \frac{k_0 \cdot (1 + \tau_1 p)}{(1 + \tau_2 p)} \cdot \frac{k_c}{1 + \tau_c p} \quad [\text{Equation 4.23}]$$

Notons que cette fonction de transfert est composée de deux termes : le premier est le correcteur à avance de phase, et le deuxième est un filtre du premier ordre qui représente la boucle interne fermée de l'asservissement du courant. On a alors $\tau_c \ll \tau_2$.

Le choix de cette structure de correcteur a été guidé par le fait qu'il permet de garantir les performances souhaitées et que sa réalisation analogique est extrêmement simple.

4.6.2 Capteur de position

La figure 4.12 fait apparaître un capteur de position, qui sera exposé dans le chapitre 5. Sa fonction de transfert est nécessaire pour la synthèse du correcteur. Elle est donnée par :

$$F.T._{CP} = \frac{k_f}{(1 + \tau_f p)^2} \quad [\text{Equation 4.24}]$$

Le capteur de position est modélisé par un système du deuxième ordre satisfaisant la condition $\tau_f \ll \tau_2$.

4.7 Synthèse du correcteur à avance de phase

La fonction de transfert du système en boucle fermée (figure 4.12) est calculée en utilisant la fonction de transfert du correcteur (équation 4.23), la fonction de transfert du système à asservir (équation 4.3), la fonction de transfert du capteur de position (équation 4.24). Le dénominateur de la fonction de transfert en boucle fermée est un polynôme du sixième degré :

$$Den_{B.F} = K_{Den} \cdot \{a_0 + a_1 p + a_2 p^2 + a_3 p^3 + a_4 p^4 + a_5 p^5 + a_6 p^6\} \quad [\text{Equation 4.25}]$$

avec

$$\begin{aligned} K_{Den} &= \frac{1}{k_0 k_c k_2 k_f - k_1} \\ a_0 &= k_0 k_c k_2 k_f - k_1 \\ a_1 &= -2k_1 \tau_f - \tau_c k_1 - \tau_2 k_1 + k_0 k_c k_2 k_f \tau_1 \\ a_2 &= \tau^2 k_1 - k_1 \tau_f^2 - 2\tau_c k_1 \tau_f - \tau_2 \tau_c k_1 \\ a_3 &= 2\tau^2 k_1 \tau_f + \tau_c \tau^2 k_1 - \tau_c k_1 \tau_f^2 + \tau_2 \tau^2 k_1 - \tau_2 k_1 \tau_f^2 - 2\tau_2 \tau_c k_1 \tau_f \\ a_4 &= \tau^2 k_1 \tau_f^2 + 2\tau_c \tau^2 k_1 \tau_f + 2\tau_2 \tau^2 k_1 \tau_f + \tau_2 \tau_c \tau^2 k_1 - \tau_2 \tau_c k_1 \tau_f^2 \\ a_5 &= \tau_c \tau^2 k_1 \tau_f^2 + \tau_2 \tau^2 k_1 \tau_f^2 + 2k_1 \tau^2 \tau_2 \tau_f \tau_c \\ a_6 &= \tau_2 \tau_c \tau^2 k_1 \tau_f^2 \end{aligned} \quad [\text{Equation 4.26}]$$

Pour réaliser la synthèse du correcteur on va supposer que les termes de degré 4 à 6 sont négligeables (i.e. ils n'interviennent pas dans la plage de fréquence qui nous intéresse pour le système à asservir). Cette hypothèse devra être vérifiée *a posteriori* – le dénominateur $Den_{B.F}$ peut donc être approximé par un polynôme du 3^{ème} degré. On choisit la forme particulière (qui correspond au "placement de pôles") :

$$Den_{B.F.bis} = \{a_0 + a_1 p + a_2 p^2 + a_3 p^3\} \quad [\text{Equation 4.25bis}]$$

La forme de dénominateur désirée permettant de garantir qu'il n'y aura pas de dépassement de position est donnée par :

$$Den_{p.p.} = (\alpha p + 1)^3 \quad [\text{Equation 4.27}]$$

Le temps de réponse du système est une caractéristique moins fondamentale ici.

Les coefficients k_0 , τ_1 and τ_2 sont déterminés par l'utilisations d'un "solver" (Matlab fonction *fsolve*) par identification de 4.27 et du polynôme tronqué 4.25bis. On peut ainsi trouver un correcteur pour n'importe quel α . En réalité la validité de hypothèse de simplification (équation 4.25bis) dépend de la valeur numérique de α . Par conséquent, après la synthèse du correcteur, la validité de l'hypothèse 4.27 doit être vérifiée. En raison de l'amplification du bruit dans la boucle, le correcteur calculé par cette méthode peut ne pas fonctionner. La deuxième condition à vérifier et donc alors que son gain $k_0 k_c$ ne soit pas trop grand par rapport à $\frac{k_1}{k_2 k_f}$ (gain du système aux petites fréquences).

4.8 Application du correcteur obtenu sur le modèle complet de l'actionneur

Le correcteur obtenu dans le paragraphe 4.7 avec les constantes données par la réalisation **de la maquette centimétrique** (chapitre 5) est maintenant testé sur le modèle complet afin de valider son comportement dynamique sur le système entier. Si la position est correctement asservie, nous pourrions passer à la réalisation de l'asservissement en lévitation.

4.8.1 Simulation de base

Nous utiliserons le schéma d'asservissement de la figure 4.12. La description du système à asservir a été présentée au paragraphe 4.4. Le système ne contient ni saturation (courant, position) ni frottement. En début de simulation l'aimant mobile est dans sa position stable ($x = 0,25$ mm) et l'asservissement est mis en marche. Nous envoyons une perturbation à $t = 8$ ms (impulsion de couple). Les résultats obtenus par la simulation sont sur la figure 4.13.

Nous voyons que la position en Ox (axe longitudinal) est correctement asservie. En revanche le courant est trop élevé (250 A, figure 4.14). D'après la figure 4.15 on constate une légère rotation de l'aimant mobile autour son centre d'inertie et une très faible oscillation suivant l'axe Oy (axe transversal). Ce résultat était attendu car l'aimant mobile subit un couple par rapport à cet axe. L'aimant mobile commence à osciller aussi par rapport à l'axe Oz (vertical) à partir de 8 ms à cause de la perturbation du couple.

Un problème potentiel apparaît pour les translations (figure 4.13) dans l'axe Oz (axe vertical) : pour cet axe, les oscillations ne sont pas amorties. Il est normal que le système, une fois excité, reste ensuite en oscillation puisqu'il n'y a pas de source d'amortissement, ni passif (frottement) ni actif (contrôle). Seul l'axe Ox bénéficie d'un amortissement actif par le contrôle de position ; l'axe de rotation Oy pourrait théoriquement être amorti par un correcteur plus sophistiqué.

Toutes les fréquences en jeu sont les fréquences de résonance naturelle, qui peuvent être excitées par divers couplages à partir des mouvements dans les autres axes. Le système peut se mettre à diverger car le courant dans la bobine fournit l'énergie qui peut aussi amplifier les oscillations. Une simulation sur un intervalle de 3 secondes confirme ce problème, et l'on constate même que ces oscillations divergent.

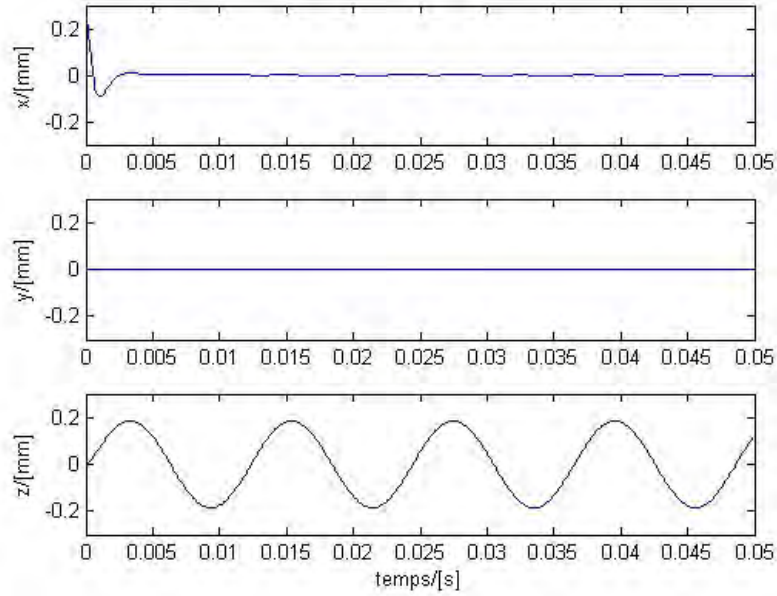


Fig. 4.13– Résultats de la simulation de la dynamique de base sans frottement : position en translation

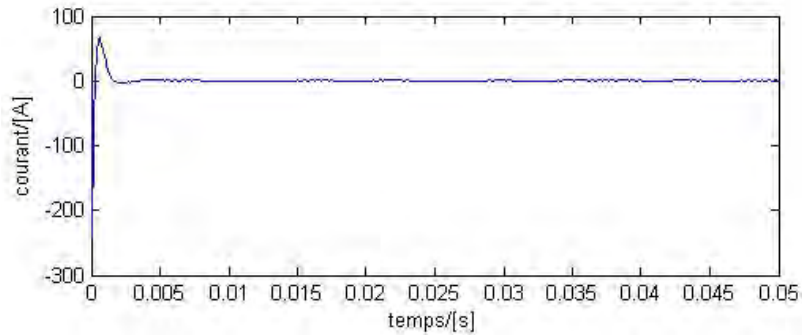


Fig. 4.14– Résultats de la simulation de la dynamique de base sans frottement : courant dans la bobine

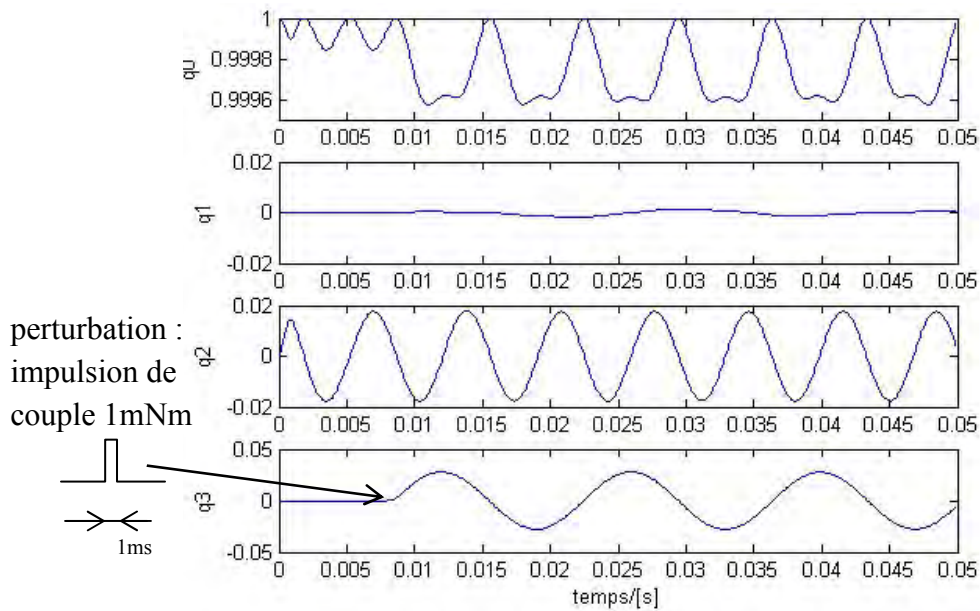


Fig. 4.15– Résultats de la simulation de la dynamique de base sans frottement : quaternion

4.8.2 Effets du frottement de l'air

Le modèle précédent est maintenant enrichi par le frottement dû à l'air. La force due au frottement est proportionnelle à la vitesse du déplacement de l'aimant mobile, le coefficient pour une sphère de 12 mm de diamètre est $2 \cdot 10^{-6}$ N/m*s. Comme il est difficile de déterminer la constante pour le bloc parallélépipède environné par des autres objets, nous allons employer cette constante sur les translations dans notre simulation et analyser son effet même si l'aimant mobile n'est pas sphérique. Ce coefficient est très certainement sous-estimé et en pratique la constante sera supérieure à cette valeur. La figure 4.16 montre que l'aimant mobile a toujours une tendance à entrer en forte oscillation suivant l'axe vertical Oz.

La situation est analogue (figures 4.16, 4.17 et 4.18) à la simulation sans frottement sauf que cette fois, l'oscillation de la translation en axe z ne diverge pas car elle est amortie par le frottement de l'air (confirmé par une simulation sur 3 secondes). Il reste à vérifier le bon fonctionnement sur la maquette centimétrique.

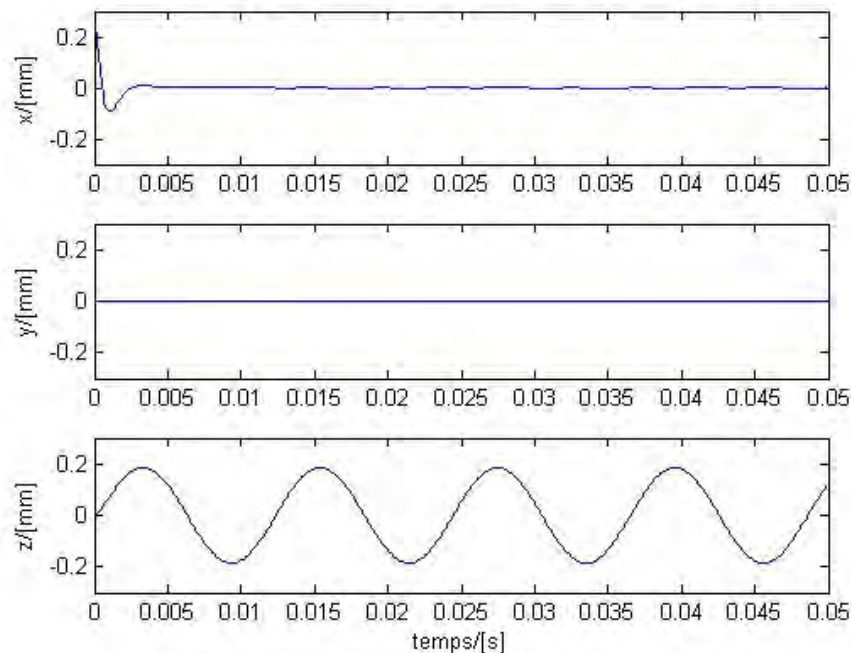


Fig. 4.16– Résultats de la simulation de la dynamique avec le frottement : position en translation

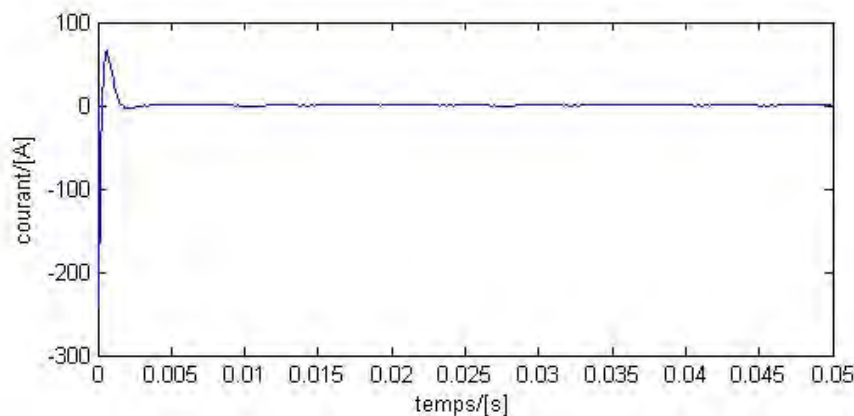


Fig. 4.17– Résultats de la simulation de la dynamique avec le frottement : courant

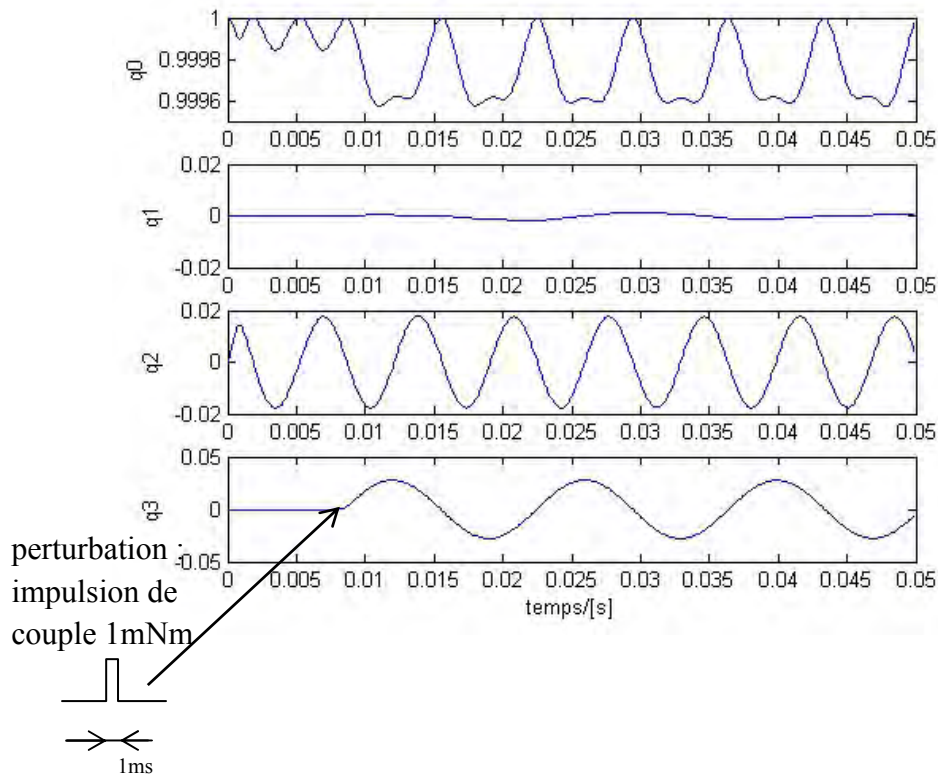


Fig. 4.18– Résultats de la simulation de la dynamique avec le frottement : quaternion

4.8.3 Simulation finale

Le modèle final contient le frottement d'air dans les trois axes, et de plus le courant est saturé à 14 A. Les résultats obtenus pour l'asservissement en utilisant le modèle complet sont montrés sur la figure 4.19.

La consigne $x = 0$ mm est appliquée à l'instant $t = 0$. La position sur l'axe x est asservie avec succès malgré la saturation du courant. Le temps de réponse sur la position est considérablement prolongé (2,5 ms \rightarrow 5 ms).

A l'instant $t = 50$ ms, un échelon est appliqué sur la consigne de position. Le système se stabilise sur cette valeur sans dépassement (figure 4.19 en haut), ce qui correspond au cahier des charges imposé.

Le courant généré (figure 4.20) à l'instant $t = 50$ ms a un effet secondaire : il met l'aimant mobile en oscillation en translation selon l'axe Oy . Le courant reste constant et non - nul comme c'était déterminé dans les hypothèses du chapitre 2. La simulation sur un intervalle de 3 s montre que même avec le courant constant dans la bobine l'oscillation ne diverge pas.

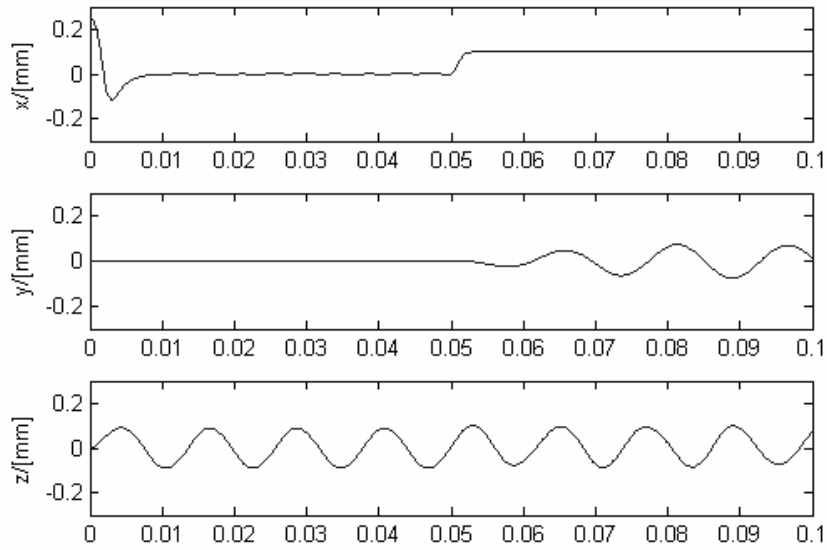


Fig. 4.19– Simulation finale avec le frottement et la saturation du courant : position en translation

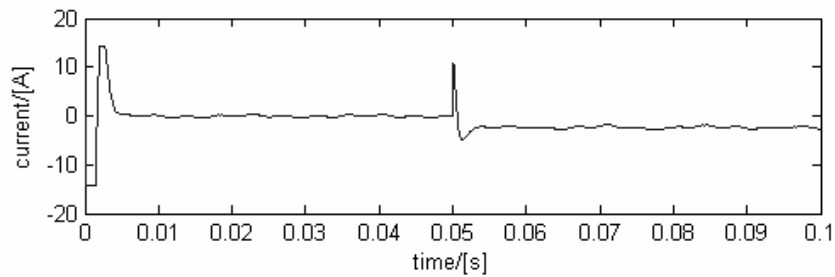


Fig. 4.20– Simulation finale avec le frottement et la saturation du courant : courant

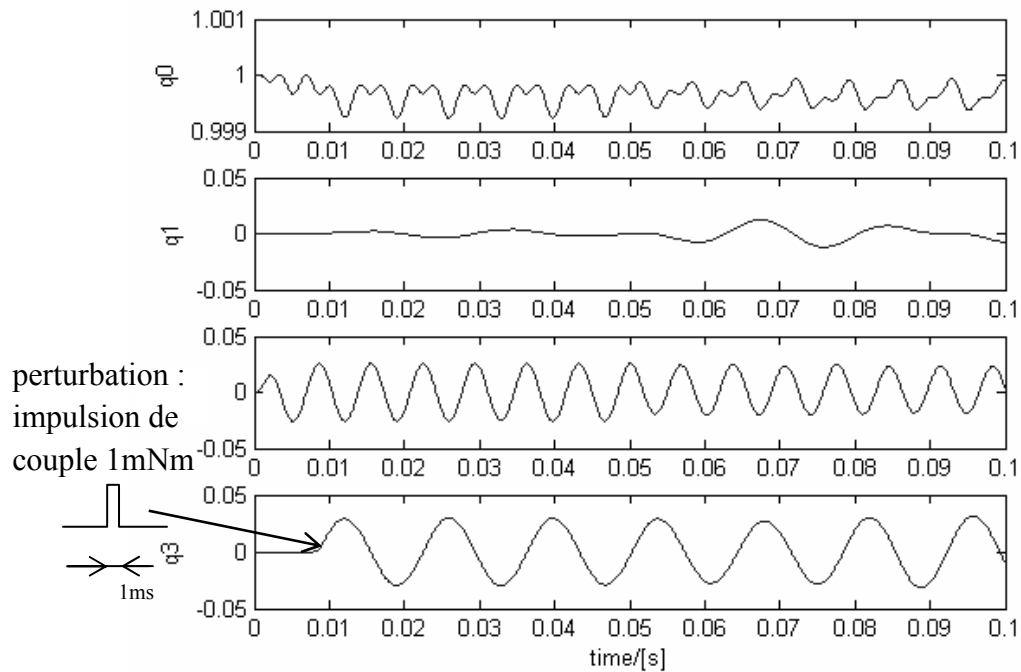


Fig. 4.21– Simulation finale avec le frottement et la saturation du courant : quaternion

Le mouvement de rotation est représenté sur la figure 4.21. Il est difficile d'imaginer le comportement de l'actionneur à partir de cette figure – mais il est visible sur les animations. L'actionneur subit une rotation "compliquée" périodique de type "Lissajous" autour son centre d'inertie.

Le courant dans le conducteur crée des forces et des couples qui provoquent ensuite des oscillations en translation et rotation. Le frottement de l'air n'est pas suffisant pour les atténuer complètement, mais le système ne diverge pas. Ceci nous encourage pour passer à la réalisation de l'asservissement en lévitation de la maquette centimétrique.

4.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné les descriptions simplifiée et complète de la dynamique et cinématique pour modéliser le comportement de la maquette centimétrique et du μ -relais en mode bistable et asservi.

Un correcteur à avance de phase a été synthétisé pour l'asservissement de la position horizontale de l'actionneur en utilisant le modèle simplifié. Les performances de ce correcteur ont été ensuite testées sur le modèle complet.

Une modélisation complète du μ -relais magnétique dans le mode bistable a été effectuée en coopération avec Arnaud Walther. Elle nous permet de déterminer le temps de commutation du relais ainsi que les effets secondaires tels que la rotation transversale ou la translation verticale.

Un logiciel permettant la visualisation du déplacement de l'actionneur a également été programmé. Son utilisation est simple et permet aux utilisateurs moins familiers avec les quaternions de comprendre le comportement dynamique.

Les résultats obtenus en simulation sont prometteurs, la position de l'aimant mobile est asservie avec succès. L'utilisation de la modélisation 3D a permis d'identifier les effets secondaires du courant dans la bobine. Il s'agit surtout de la translation verticale et de la rotation transversale (suivant Oy) de l'aimant mobile. Cette oscillation n'est pas amortie et la simulation montre qu'elle peut diverger dans le cas de manque de frottement d'air. La modélisation du frottement de l'air est simplifiée car l'aimant mobile est considéré comme une sphère et la présence des objets avoisinants n'est pas prise en compte. Le frottement est appliqué seulement aux translations. L'effet du frottement modélisé est donc plus faible et il sera plus fort en réalité, mais même avec ce type de modélisation les oscillations sont déjà amorties. L'objectif est donc maintenant de mettre en œuvre l'asservissement sur la maquette centimétrique. Ce travail est présenté dans le chapitre suivant.

Références :

- [Chou92] J. C. K. Chou, "Quaternion Kinematic and Dynamic Differential Equations", IEEE Transactions on robotics and automation, Vol. no. 8, 1992
- [Cuga03] O. Cugat, J. Delamare, G. Reyne, "MAGnetic Micro-Actuators & Systems MAGMAS", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. no. 39-6, pp 3608-3612, 2003
- [DeLa02] P. DeLarminat, "Commande des systèmes linéaires" Hermès, Lavoisier, ISBN 2-7462-0492-4, 2002
- [Diep04] C. Dieppedale, B. Desloges, H. Rostaing, J. Delamare, O. Cugat, J. Meunier-Carus, "Magnetic bistable micro-actuator with integrated permanent magnet", Proceedings of IEEE Sensors 2004, Vienne, France, 2004
- [Duva02@] R.C. Duvall, M. Fashing, T. Brenner
http://www.cs.duke.edu/courses/fall02/cps124/notes/07_rotations/
- [Faur99] F. Faure, J. Delamare, "Low cost magnetic bearings" Proceedings of ISEM 1999
- [Guiz02@] <http://artemmis.univ-mrs.fr/cybermecca/Formcont/mecaspa/SCAO/QUATERN/QUATERN0.HTM>
- [Jone02@] E.M. Jones, P.Fjeld, <http://www.hq.nasa.gov/office/pao/History/alsj/gimbals.html>
- [Hami853] W. R. Hamilton, "Lectures on Quaternion", Dublin: Hodges and Smith, 1853
- [Rost04] H. Rostaing, J. Stepanek, B. Delinchant, J. Delamare, O. Cugat, "Magnetic, out-of-plane bistable μ -actuator", Proceedings of the international workshop on High Performance Magnets and their Applications, Vol. no. 2, pp. 929-935, Annecy, France, 2004
- [Step03] J. Stepanek, H. Rostaing, J. Delamare, O. Cugat (2003) "Fast dynamic modeling of magnetic micro-actuator", Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Proceedings of the International Conference on Magnetism, 2003, Vol. no. 272-276P1, pp 669-671
- [Unis05@]<http://www.dii.unisi.it/~control/act/experiments.php>

CHAPITRE 5
REALISATION
D'UN DEMONSTRATEUR
CENTIMETRIQUE

Réalisation d'un démonstrateur centimétrique

Les chapitres précédents ont traité de la conception d'un μ -actionneur magnétique avec notamment la synthèse du correcteur nécessaire à l'asservissement de position. Ce chapitre présente la réalisation d'un démonstrateur centimétrique.

Il est capital de bien repérer la position de l'aimant mobile par rapport aux deux aimants fixes pour pouvoir l'asservir. La première partie de ce chapitre est consacrée à la conception de ce capteur. Nous avons travaillé sur deux principes de capteur capacitif. Nous discuterons des deux méthodes par rapport à notre application.

La deuxième partie montre la réalisation de l'asservissement. Deux correcteurs ont été mis en œuvre: un correcteur PI (proportionnel intégral) pour l'asservissement du courant dans la bobine d'actionnement et un correcteur à avance de phase pour l'asservissement de la position de l'actionneur dont la synthèse a été montrée au chapitre 4.

Enfin, nous concluons ce chapitre par une analyse des résultats expérimentalement obtenus.

5.1 Choix du capteur de position

Le capteur de position doit être opérationnel dans le système micrométrique. Le choix du principe de mesure de position dans le démonstrateur centimétrique est limité par ce fait. Parmi les différents principes physiques permettant une mesure de position, nous avons choisi la mesure capacitive. Les électrodes initialement prévues pour le fonctionnement en mode μ -relais peuvent nous servir pour mesurer la capacité d'entrefer comme c'est dessiné sur la figure 5.1.

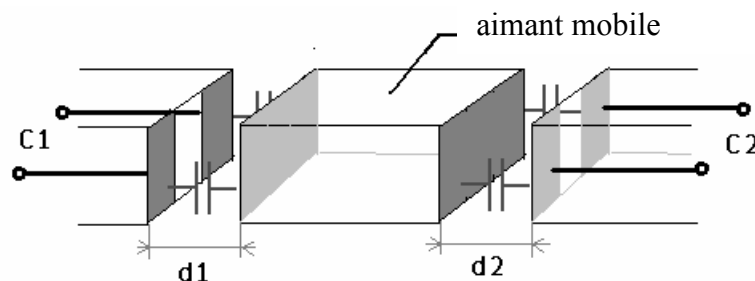


Fig. 5.1– Les capacités C_1 , C_2 varient en fonction de la position de l'aimant mobile

Sur la figure 5.1, les faces grisées représentent les plaques de cuivre qui peuvent être associées aux faces des aimants pour mesurer les capacités d'entrefer. Nous avons testé deux méthodes permettant de mesurer les capacités $C1$ et $C2$:

- le pont de Sauty
- la pompe de charge

Ces deux méthodes seront discutées dans la suite de ce chapitre.

5.2 Réalisation de la maquette

La plupart du travail de réalisation technologique (figure 5.2) a été assuré par monsieur Claude Brun du service mécanique du LEG. Les opérations les plus délicates pour la fabrication sont les électrodes. Elles ont été découpées dans un bloc de cuivre massif, l'ensemble est monté sur un substrat de circuit imprimé. Un soin particulier a été porté sur le parallélisme des électrodes pour assurer la conformité avec nos calculs préalables. Puis une faible couche d'isolation électrique (kapton 50 μm) a été collée sur les électrodes. La bobine d'actionnement comporte 30 spires sur trois couches, sa résistance et son inductance valent respectivement 0,9 Ω et 22 μH .

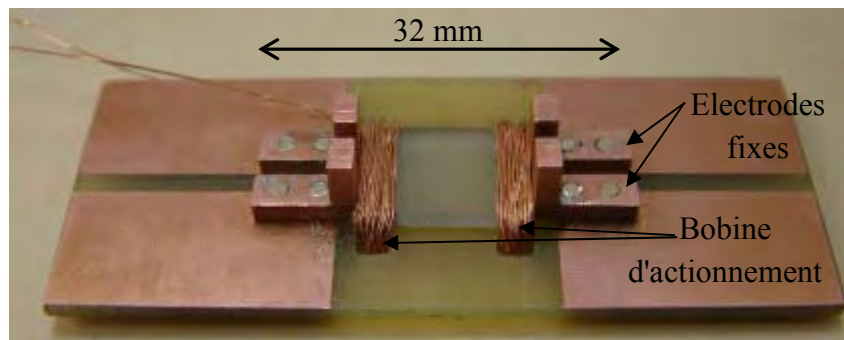


Fig. 5.2– Vue des électrodes du capteur de position et de la bobine d'actionnement

Les deux aimants fixes (ferrite avec une polarisation magnétique égale à 0,4T) ont été isolés électriquement (leur impédance étant loin d'être négligeable devant celle des capacités mesurées), puis collés sur le support (figure 5.3).

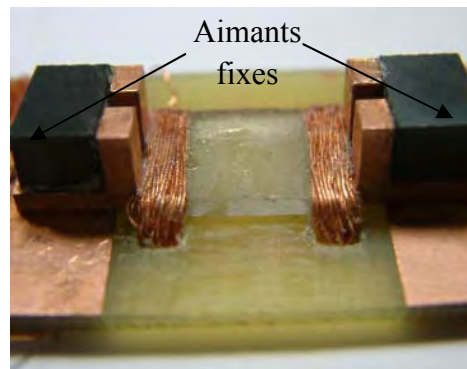


Fig. 5.3– Vue du collage des aimants fixes sur les électrodes de mesure

Pour finir, nous avons recouvert l'aimant mobile de deux électrodes (cuivre autocollant d'épaisseur 50 μm).

On peut observer sur la figure 5.4 la qualité du parallélisme inter électrodes.

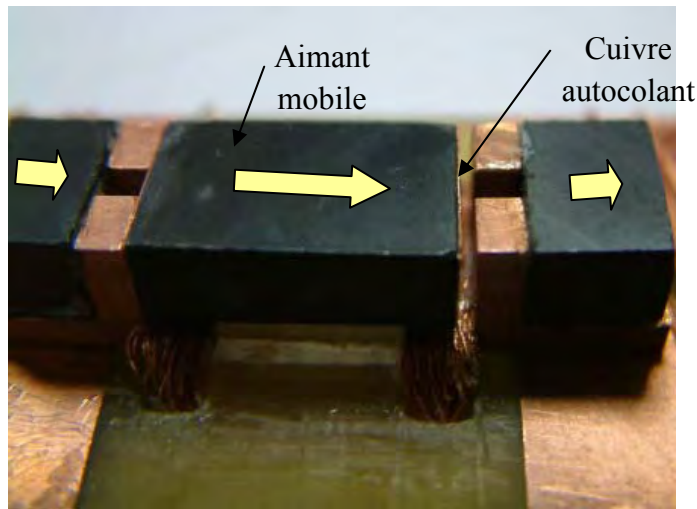


Fig. 5.4– Dispositif final de mesure de position

5.3 Table micrométrique de caractérisation du capteur

L'étalonnage du capteur a été réalisé en déplaçant l'aimant mobile à l'aide d'une table micrométrique montée sur un support en marbre (figure 5.5).

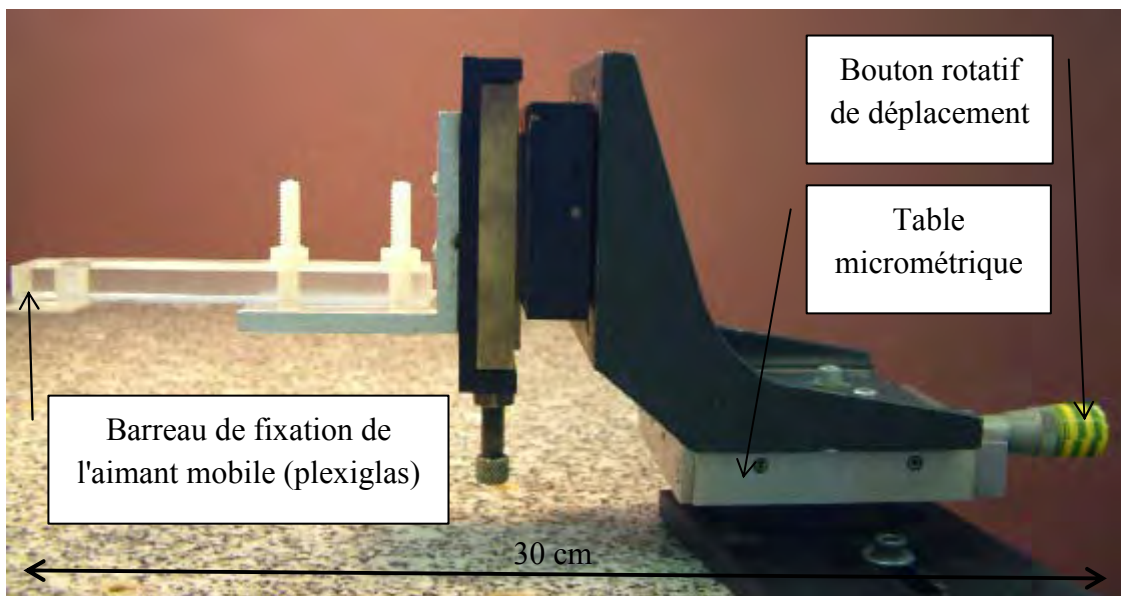


Fig. 5.5– Système pour l'étalonnage du capteur

La table supporte un barreau sur lequel est fixé l'aimant mobile du MAMBA. La figure 5.6 montre une vue de l'ensemble du système de mesure avec les aimants.

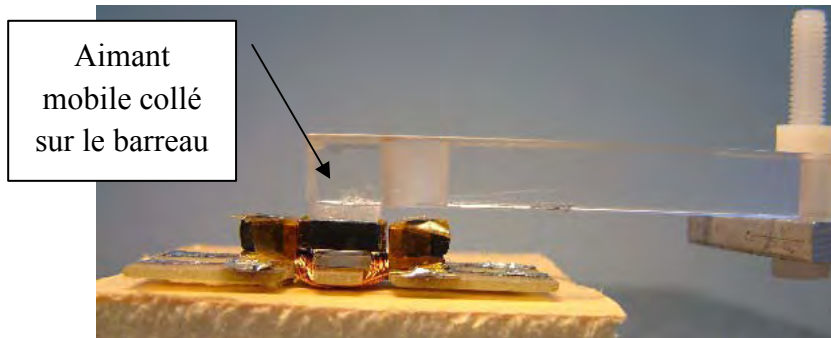


Fig. 5.6– Vue de détail de l'aimant mobile collé sur le dispositif de déplacement

5.4 Électronique associée au capteur de déplacement

La mesure de la capacité entre électrodes fournit une valeur de 3,2 pF pour l'aimant dans une position stable et 5,5 pF pour l'aimant dans l'autre position stable. Ces valeurs sont très faibles et un dispositif très sensible doit être mis en place. Nous présentons deux solutions pour mesurer la variation de la capacité associée au déplacement de l'aimant mobile.

Nous devons faire très attention aux capacités parasites. Il faut donc penser à les minimiser lors de la réalisation des cartes électroniques. Le plus important est que ces capacités parasites ne varient pas, il faudra donc éviter toute les connections avec des "fils volants". La solution pour une plage de masse est présentée plus tard.

5.4.1 Méthode "Pont de Sauty"

Cette solution utilise un pont de Sauty alimenté par une source de tension alternative.

Principe

Hynek Raisigel [Rais02] a démontré que dans le montage de la figure 5.7 :

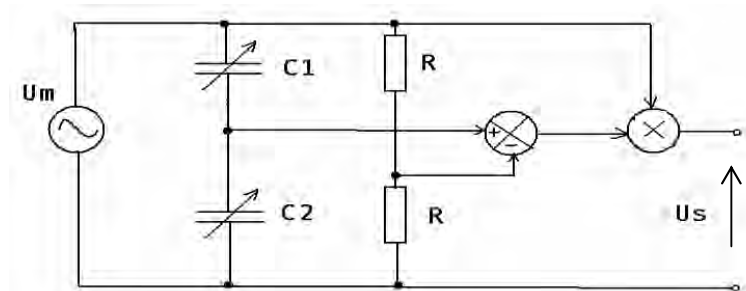


Fig. 5.7– Schéma de principe de mesure en pont de Sauty

avec

$U_m = A \cdot \sin \omega t$...tension de l'entrée;

$C1, C2, d_1, d_2$...grandeurs spécifiées selon la figure 5.1,

x ... position de l'aimant mobile, $x = d_1 - d_2$

la tension de sortie est égale à

$$U_s = -\frac{x}{(d_1 + d_2)} \cdot A^2 \cdot \sin^2 \omega t = -\frac{x}{2 \cdot (d_1 + d_2)} \cdot A^2 \cdot (1 - \cos 2\omega t) \quad [\text{Equation 5.1}]$$

La source de tension alternative U_s de pulsation ω est connectée au pont via les capacités $C1$ et $C2$ de l'actionneur. L'amplitude de U_m à la sortie du multiplicateur est proportionnelle à la position x et la pulsation à la sortie est de 2ω . Si la pulsation porteuse finale 2ω est assez grande par rapport à la variation de position, il nous suffit de la filtrer et nous obtenons un signal proportionnel à la position.

Réalisation

Une première réalisation [Chabe04] a mis en valeur la nécessité d'avoir une fréquence porteuse ω supérieure à 300 kHz pour obtenir une amplitude de mesure exploitable (capacités de mesure très faibles).

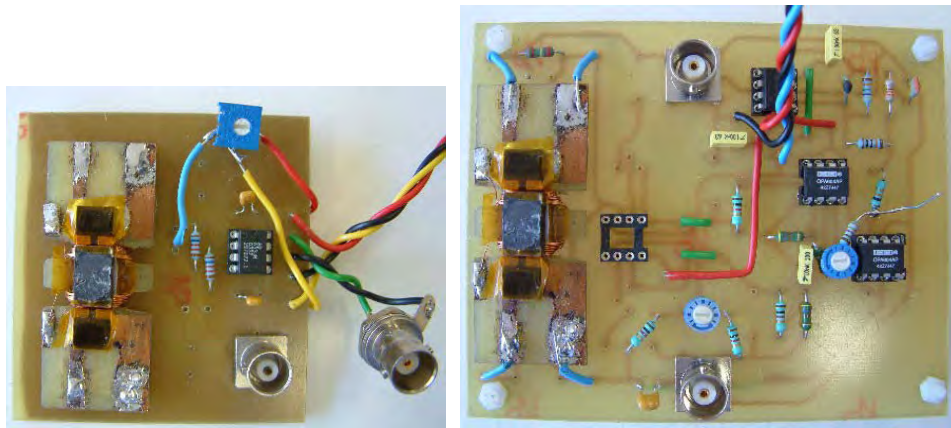


Fig. 5.8– Différentes réalisations de cartes électroniques pour le capteur

Nous avons ensuite testé différentes configurations de cartes électroniques (figure 5.8) et le schéma final optimisé est dessiné sur la figure 5.9.

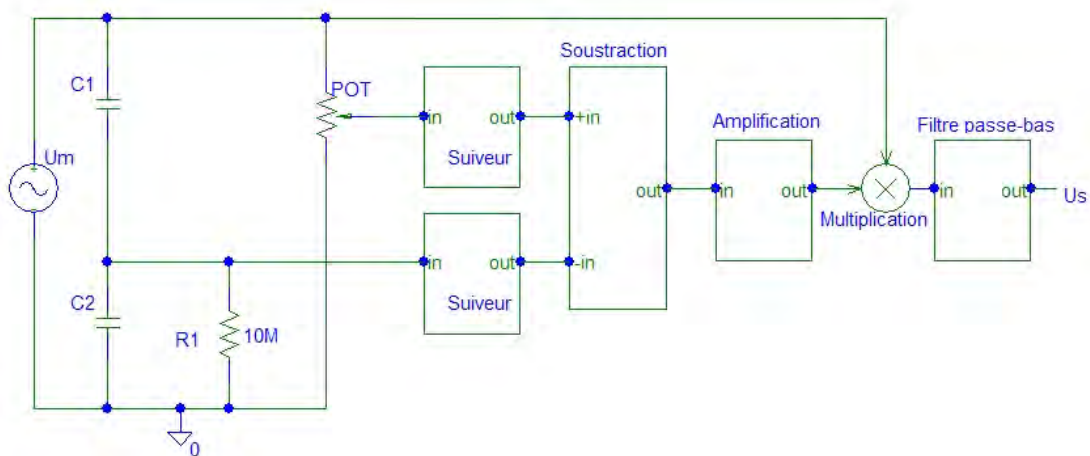


Fig. 5.9– Schéma bloc optimisé pour la solution "pont de Sauty"

Les électrodes C1, C2 sont montées en pont avec le potentiomètre POT. Le pont n'est pas fixe parce que les capacités ne sont pas tout à fait symétriques. La résistance R1 de 10 M Ω empêche la dérive de la tension continue des capacités C1 et C2 dû au courant de fuite du suiveur.

Le pont est alimenté par une tension sinusoïdal U_m . Ce générateur est externe et la fréquence de fonctionnement est de 500 kHz.

Deux suiveurs sont ensuite intercalés pour ne pas charger le pont et pour garder la symétrie des deux signaux sortant du pont. Les deux signaux sont ensuite soustraits (voir aussi la figure 5.7) et la différence est amplifiée pour obtenir un signal selon l'équation 5.1.

La partie finale du circuit est composée d'un filtre. Il s'agit d'un circuit résonant à 1MHz, qui supprime la fréquence porteuse. Un filtre passe-bas avec un pôle double à 20 kHz est connecté à sa sortie. La fréquence choisie est suffisamment élevée pour asservir le système mécanique dont constante de temps est 2,5 ms (voir paragraphe 5.5.2).

Réalisation d'une électronique sur circuit imprimé

Le circuit a été réalisé sur un circuit imprimé. Le schéma complet fait partie de l'annexe A, la photographie du circuit est présentée sur la figure 5.10.

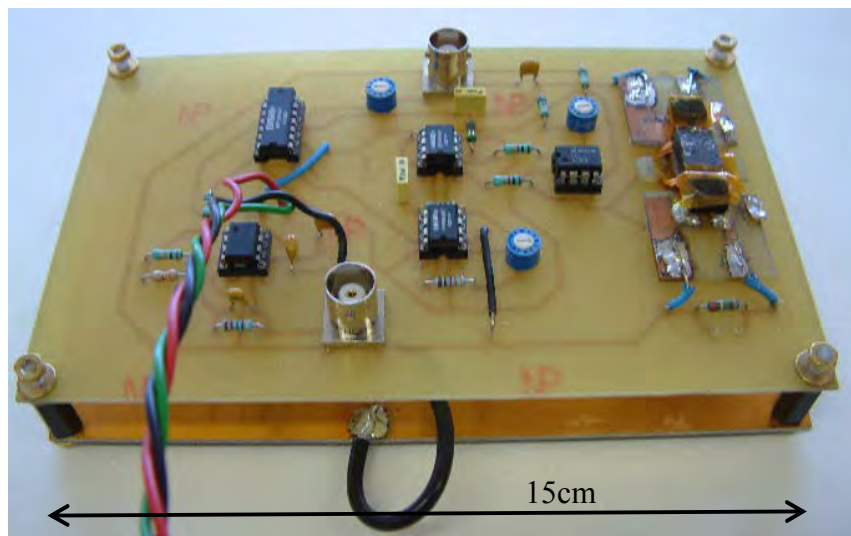


Fig. 5.10– Circuit imprimé final de l'électronique "pont de Sauty" de la mesure de position

Le circuit contient l'ensemble des modules (amplification, soustraction, multiplication, filtrage) présentés dans le chapitre précédent, à l'exception de la source de tension alternative (GBF externe).

Caractéristique tension de sortie /position de l'aimant

La figure 5.11 montre la caractéristique de notre capteur. En théorie, cette caractéristique devrait être linéaire et passer par zéro.

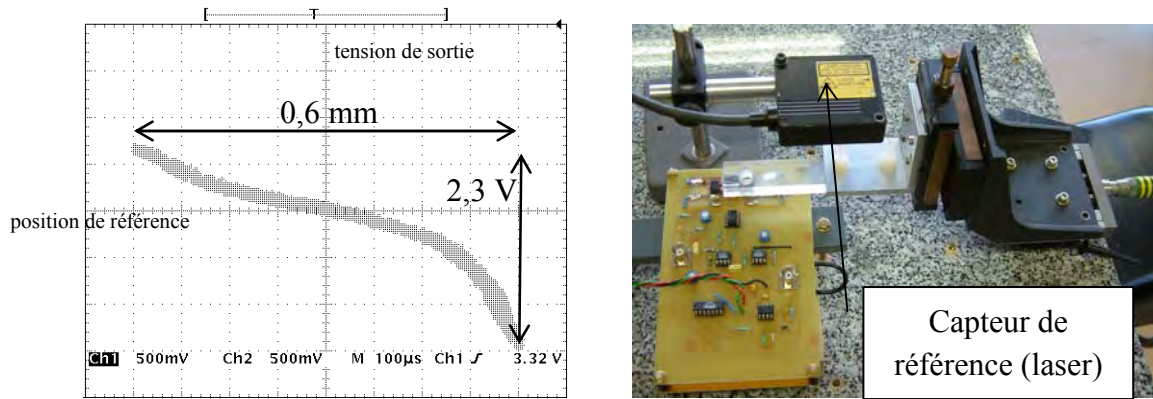


Fig. 5.11– Caractérisation du capteur
a) caractéristique finale b) dispositif de caractérisation

On remarque que la tension à la sortie n'est pas linéaire mais ceci n'empêche pas l'asservissement. La non linéarité du signal est due à la différence physique des électrodes du capteur ce qui provoque l'asymétrie des capacités parasites. De plus, la présence d'une boucle de masse perturbe la mesure, entraînant la présence d'un bruit (amplitude 120 mV) visible sur la figure 5.11.

Les résultats de l'asservissement avec ce type d'électronique (pont de Sauty) seront montrés par la suite.

5.4.2 Méthode "Pompe de charge"

Principe

Du fait de la présence de bruit sur la mesure et d'un manque de sensibilité, nous avons réalisé un capteur basé sur la méthode dite "pompe de charge."

Le schéma de principe de ce capteur est représenté sur la figure 5.12.

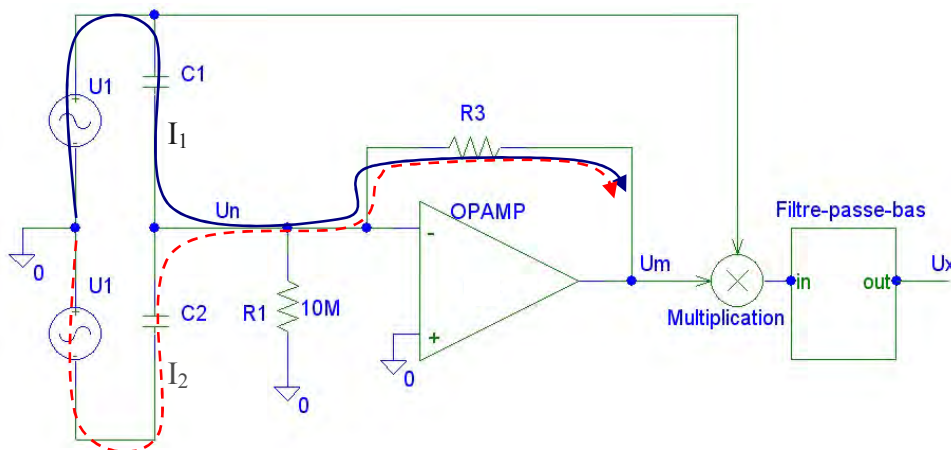


Fig. 5.12– Schéma de principe de la solution "pompe de charge"

Deux sources de tensions sinusoïdales complémentaires (déphasées de 180°) sont utilisées dans ce montage.

La tension à la sortie est donnée par:

$$U_m = \frac{R_3 U_1}{j\omega} \cdot \left(\frac{1}{C_1} - \frac{1}{C_2} \right) \quad [\text{Equation 5.2}]$$

En développant l'équation 5.2 selon les grandeurs définis dans le paragraphe 5.1, nous obtenons finalement :

$$U_m = \frac{U_1 \cdot R_3 \cdot x}{j\omega \epsilon S} \quad [\text{Equation 5.3}]$$

L'amplitude de la tension de sortie est proportionnelle à la position de l'aimant mobile mais nous n'avons pas l'information sur le signe. Afin d'obtenir un signal proportionnel à la position (avec le signe) et avoir un bon rapport signal/bruit, nous réalisons par la suite une détection synchrone.

Réalisation

Une maquette utilisant la méthode "pompe de charge" a été réalisée [Amal05], (voir figure 5.13).

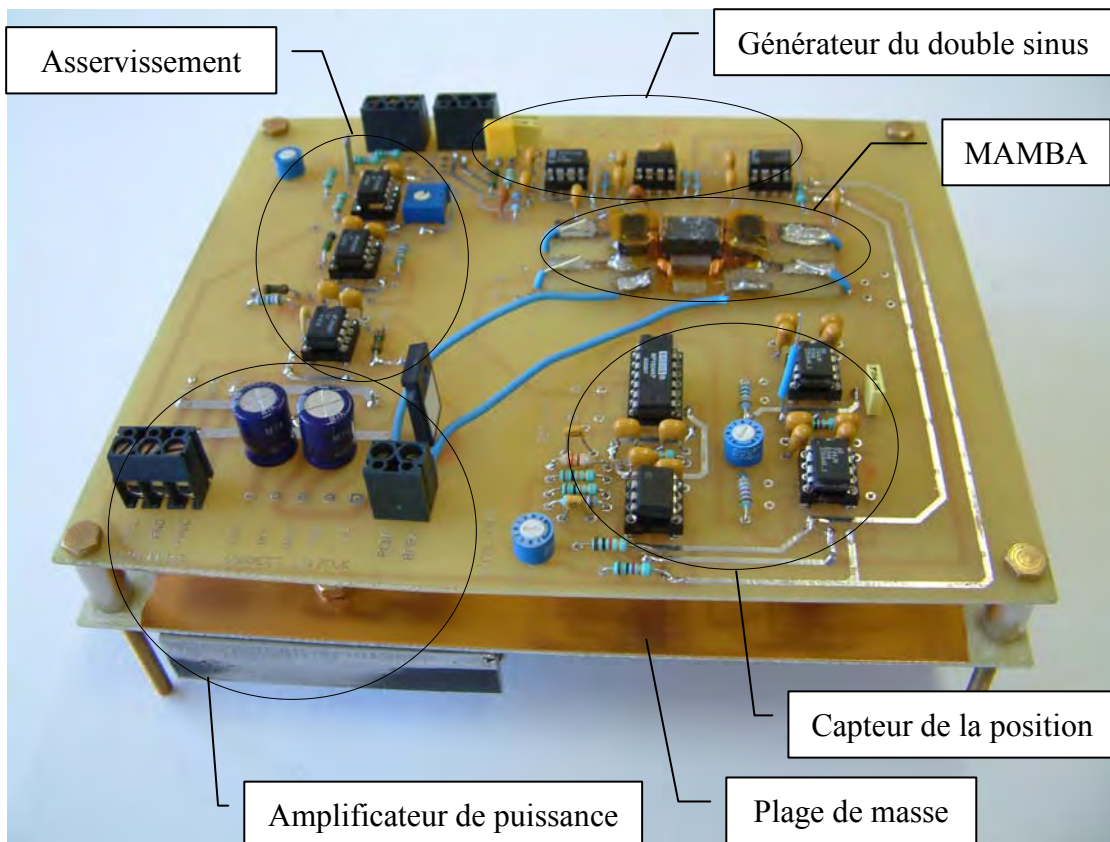


Fig. 5.13– Vue de la carte comportant les différents modules nécessaires à l'asservissement du MAMBA

Nous avons effectué quelques améliorations par rapport à la solution "pont de Sauty".

Les deux sources de tension complémentaires de fréquence égale à 500 kHz (basés sur un résonateur) ont été intégrées sur la carte. Leurs amplitudes sont fixes et égales à 10 V. La stabilité de ce type d'oscillateur est excellente.

L'amplificateur opérationnel OPAMP utilisé est un produit basé sur la technologie BiFET avec un très grand "Slew-rate" (75 V/ μ s) et une impédance d'entrée très élevée (3 T Ω).

Une plage de masse directement située en face arrière de la carte n'est pas souhaitable à cause des capacités parasites engendrées. La plage de masse est donc déplacée à 16 mm en dessous de cette carte. Ceci permet de réduire et fixer les capacités parasites.

Remarquons que la carte contient également l'électronique pour l'asservissement. Nous allons en parler dans la partie suivante.

Caractéristique tension de sortie / position de l'aimant

La figure 5.14 montre la caractéristique du capteur "pompe de charge".

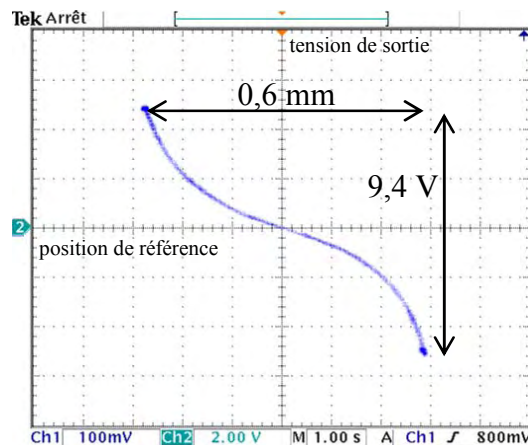


Fig. 5.14– Caractéristique finale du capteur "pompe de charge"

On remarque que la caractéristique est symétrique et passe par zéro. Elle est bien linéaire autour de son point de fonctionnement. Le capteur est plus sensible au changement de position de l'aimant mobile (9,4 V crête à crête pour 0,6 mm de déplacement). L'amplitude du bruit est beaucoup plus faible - elle ne dépasse pas 20 mV.

Les résultats de l'asservissement avec ce type de capteur seront montrés par la suite.

5.5 Asservissement en lévitation

Nous avons présenté la synthèse d'un correcteur à avance de phase dans le chapitre 4.7. Le correcteur a pour entrée la position de l'aimant mobile et pour sortie le courant dans la bobine. Nous allons donc d'abord asservir le courant dans la bobine avec un correcteur PI et puis la position dans la boucle externe (correcteur à avance de phase) comme indiqué sur la figure 5.15.

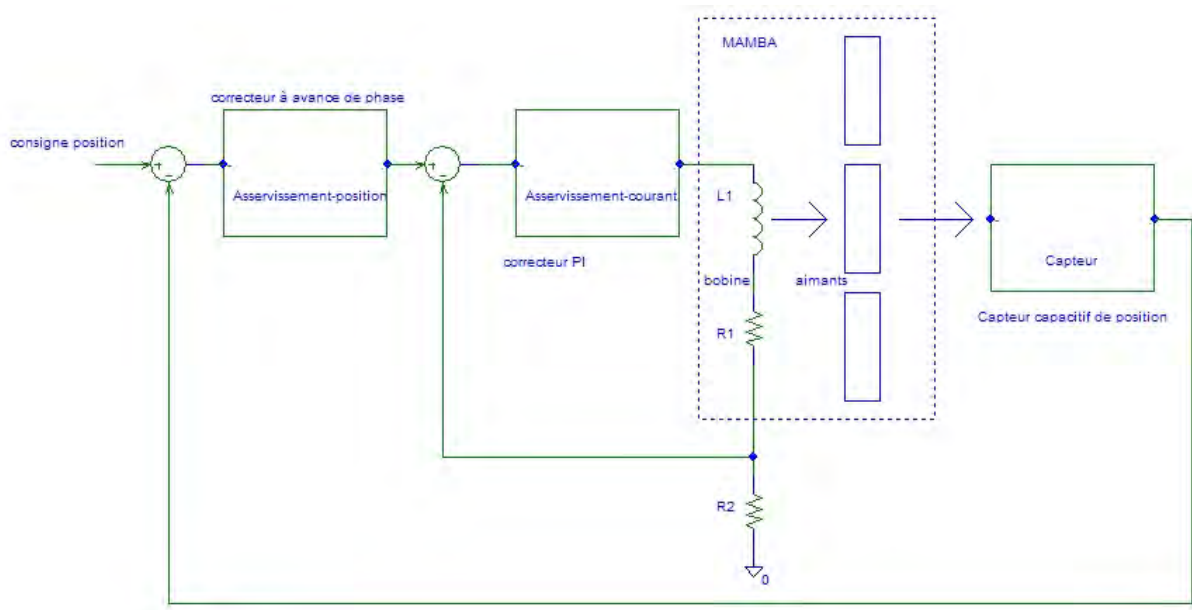


Fig. 5.15– Schéma bloc de l'asservissement complet

La bobine d'actionnement du MAMBA est modélisée par une résistance et une inductance. Rappelons que l'interaction entre la bobine et les aimants est basée sur la force de Laplace, la mesure de la position est basée sur une de deux méthodes présentées précédemment (pont de Sauty, pompe de charge).

5.5.1 Asservissement du courant

La fréquence de coupure de la bobine ($L = 22 \mu\text{H}$, $R = 0,9 \Omega$) est égale à 8,2kHz. Un correcteur PI pour l'asservissement du courant permet de stabiliser le gain (même si nous re-bobinons de manière non reproductible les conducteurs d'actionnement) et il permet de décaler la fréquence de coupure.

Le correcteur PI a la fonction de transfert suivante:

$$FT_{PI} = k_{pi} \cdot \left(1 + \frac{1}{\tau_{pi} P}\right) = k_{pi} \cdot \frac{\tau_{pi} + 1}{\tau_{pi} P} \quad [\text{Equation 5.4}]$$

Pour obtenir une fréquence de la coupure égale à 20kHz et un gain unitaire en boucle fermée, les constantes du correcteur PI recherchées sont :

$$\tau_{pi} = 1,94 \cdot 10^{-5} \text{ s}$$

$$k_{pi} = 2,6 \text{ s}$$

Le schéma du correcteur PI est montré sur la figure 5.16 :

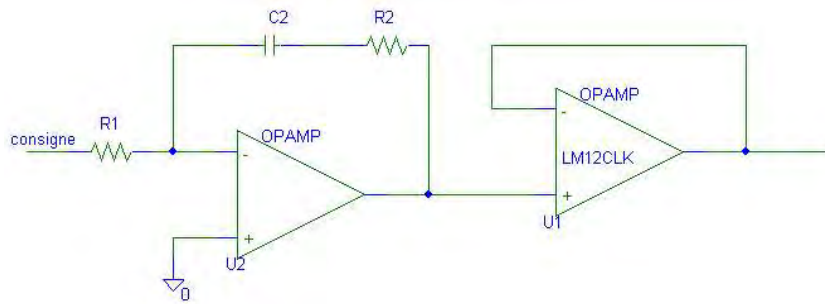


Fig. 5.16– Schéma du correcteur PI

Le schéma précédent contient un correcteur PI et un amplificateur de puissance en mode suiveur afin de fournir un courant maximal de 12A.

La fonction de transfert du correcteur PI devient alors:

$$FT_{PIr} = -\frac{R_2}{R_1} \cdot \left(\frac{R_2 C_2 p + 1}{R_2 C_2 p} \right) \quad \text{[Equation 5.5]}$$

Avec : $R_1=15 \text{ k}\Omega$ $R_2 = 41 \text{ k}\Omega$ $C_2 = 470 \text{ pF}$.

Caractérisation du correcteur

Le correcteur a été caractérisé dans le domaine fréquentiel en boucle fermée et en boucle ouverte (BO). La caractéristique de Bode du correcteur en BO est donnée sur la figure 5.17.

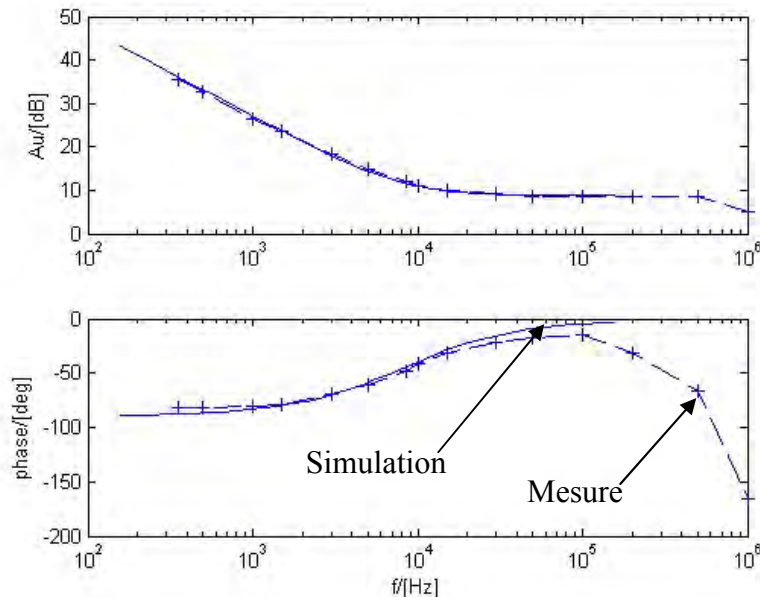


Fig. 5.17– Diagramme du Bode du correcteur PI en boucle ouverte

On remarque un bon accord entre les caractéristiques simulées et mesurées. En revanche, un écart notable dû aux limites des amplificateurs opérationnels se produit à partir de 100kHz. Ces fréquences élevées ne sont cependant pas utiles à notre asservissement.

La caractéristique du système en boucle fermée est donnée sur la figure 5.18.

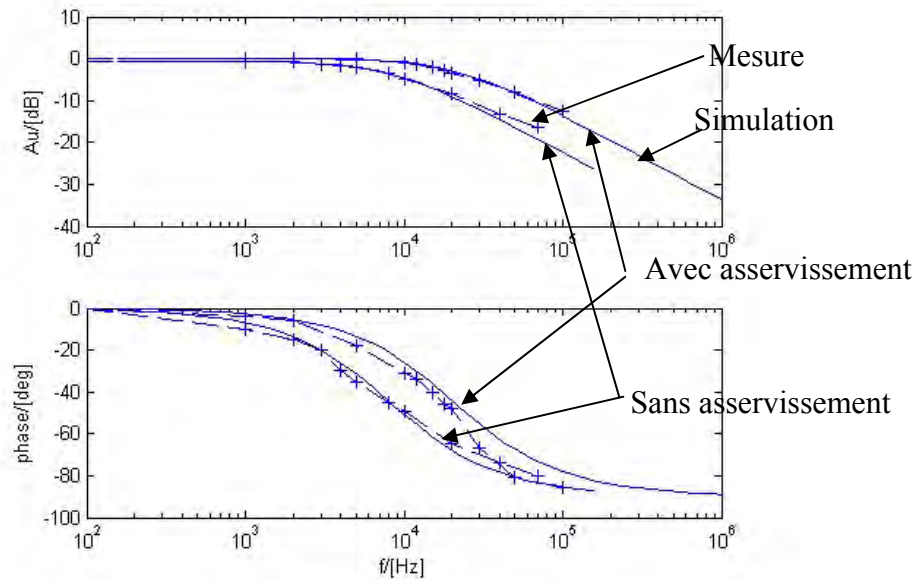


Fig. 5.18– Asservissement du courant en boucle fermée

La figure 5.18 montre deux paires de caractéristiques: le système LR sans asservissement et le système avec asservissement en boucle fermée.

Comme attendu, le système asservi possède une fréquence de coupure élevée (18 kHz) et un gain unitaire. Il correspond bien au model proposé.

5.5.2 Asservissement de la position de l'aimant mobile

La synthèse de l'asservissement a été réalisée dans le chapitre 4.7. Nous effectuons ici les rappels nécessaires à l'application numérique, puis le schéma pour réaliser ce correcteur et sa caractérisation.

Le système MAMBA possède les constantes mécaniques suivantes :

$k_1 = 340 \text{ N/m}$, $k_2 = 0,0396 \text{ N/A}$, le poids m de l'aimant mobile est 2,21g, la constante de temps

du système est donc $\tau = \sqrt{\frac{m}{k_1}} = 2,5 \text{ ms}$

Les deux capteurs de position ont des sensibilités différentes, il faut donc concevoir deux correcteurs. Comme la dynamique ne change pas, les deux correcteurs ne différeront que par leur gain. Dans la partie suivante, nous allons présenter le calcul numérique du correcteur pour le capteur "pont de Sauty". Le correcteur pour le capteur "pompe de charge" peut être trouvé avec la même démarche.

Le capteur "pont de Sauty" possède un gain de 2500 V/m autour de son point de fonctionnement et une fréquence de coupure égale à 20 kHz. Les constantes du correcteur seront donc après résolution du système donnée dans le chapitre 4.7:

$$k_0 = 9,1$$

$$\tau_1 = 5 \cdot 10^{-3} \text{ s}$$

$$\tau_2 = 1,7 \cdot 10^{-3} \text{ s}$$

La figure 5.19 montre le schéma du correcteur à avance de phase correspondant.

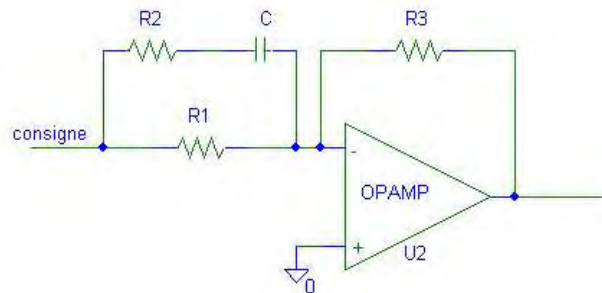


Fig. 5.19– Schéma du correcteur à avance de phase

La fonction de transfert du correcteur de la figure 5.19 est la suivante:

$$FT_{APr} = -\frac{R_3}{R_1} \cdot \frac{1 + (R_1 + R_2)Cp}{1 + R_2Cp} \quad \text{[Equation 5.6]}$$

Avec: $C = 0,33 \mu\text{F}$, $R_2 = 5 \text{ k}\Omega$, $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$, $R_3 = 91 \text{ k}\Omega$.

Caractérisation du correcteur

La caractéristique du correcteur en boucle ouverte est représentée sur la figure 5.20.

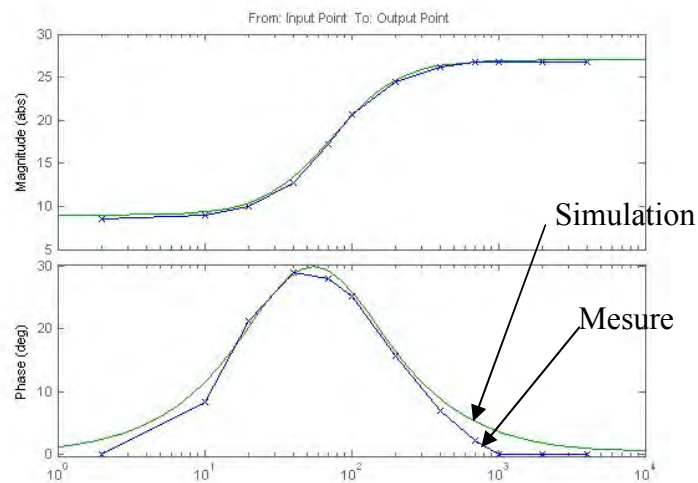


Fig. 5.20– Diagramme de Bode du correcteur à avance de phase

On remarque d'après la figure 5.20 un très bon accord entre le modèle et la mesure faite sur la carte électronique.

5.6 Tests de l'asservissement sur la maquette MAMBA

5.6.1 Test de l'électronique "Pont de Sauty"

Cette partie présente les tests effectués sur la maquette avec le premier type de capteur ("pont de Sauty"). Le modèle de l'asservissement présenté ci-dessus a été réalisé sur une "plaque à trou" (figure 5.21).

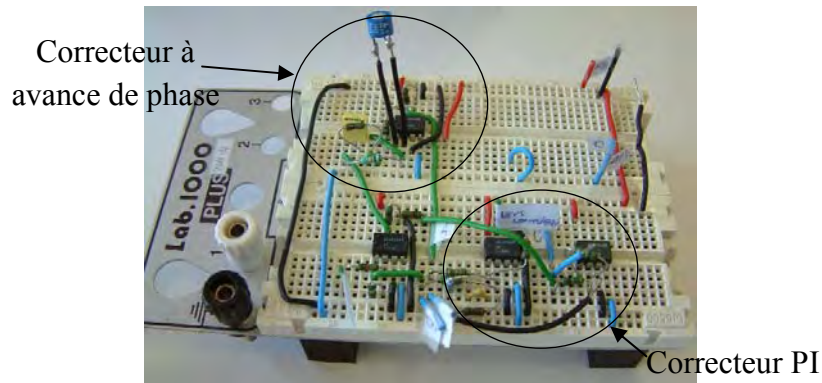


Fig. 5.21– Module d'asservissement utilisé pour les tests

L'utilisation de la plaque à trou n'est pas gênante dans la gamme de fréquences utilisées ($f_{max} = 20\text{kHz}$), mais elle peut occasionner des problèmes au niveau de la gestion des masses (risques de créer des boucles de masse). De plus, par rapport à une réalisation sur circuit imprimé, elle est plus sensible au bruit. Ce module est relié au capteur de position, le résultat du test est donné sur la figure 5.22.

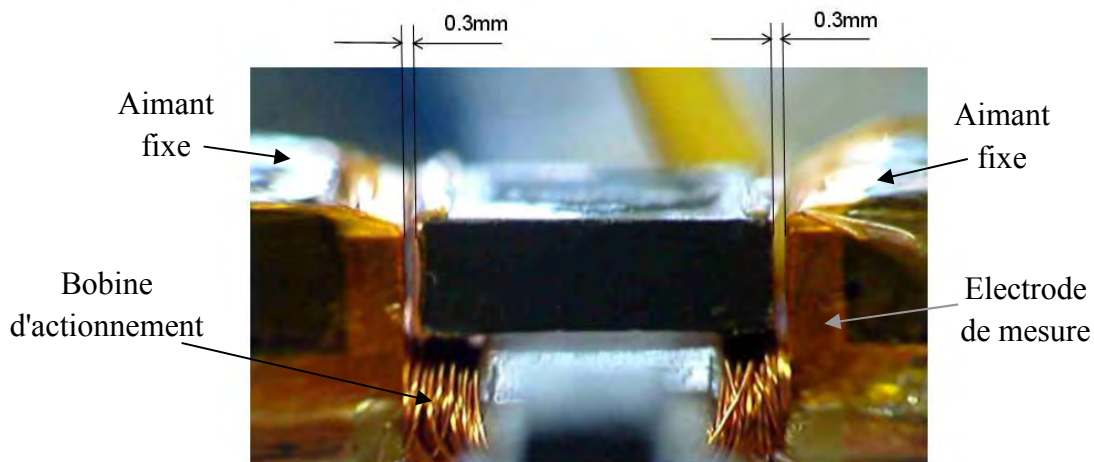


Fig. 5.22– Résultats de l'asservissement : MAMBA en lévitation

On remarque que l'aimant mobile lévite en position stable au centre des deux aimants fixes. Cette lévitation est stable, mais à cause de valeurs de gain élevés dans la boucle, le bruit dans le système est amplifié et la valeur efficace du courant passant dans les conducteurs atteint 1,1 A. La densité de courant est alors égale à 43 A/mm^2 . L'aimant reste en lévitation pendant 15 secondes et la bobine est détruite à cause de l'élévation de température. Ce test démontre néanmoins que l'asservissement est possible.

5.6.2 Test de l'électronique "Pompe de charge"

La deuxième carte avec la méthode "pompe de charge" devrait satisfaire nos exigences. Elle comporte sur une même carte un générateur de tension sinusoïdale, la mesure de position, l'asservissement et l'étage d'amplification de puissance (voir figure 5.13). L'étage de puissance comprend un amplificateur opérationnel LM12CLK avec son radiateur. En effet des impulsions de 12 A sont nécessaires en début d'asservissement afin de décoller l'aimant mobile de sa position stable. Les impulsions sont courtes, leur durée maximale est de 50 ms, la taille du radiateur reste donc raisonnable.

De plus les problèmes de masse devraient être atténués, voire résolus grâce à la plage de masse. Le résultat du test est donné sur la figure 5.23.

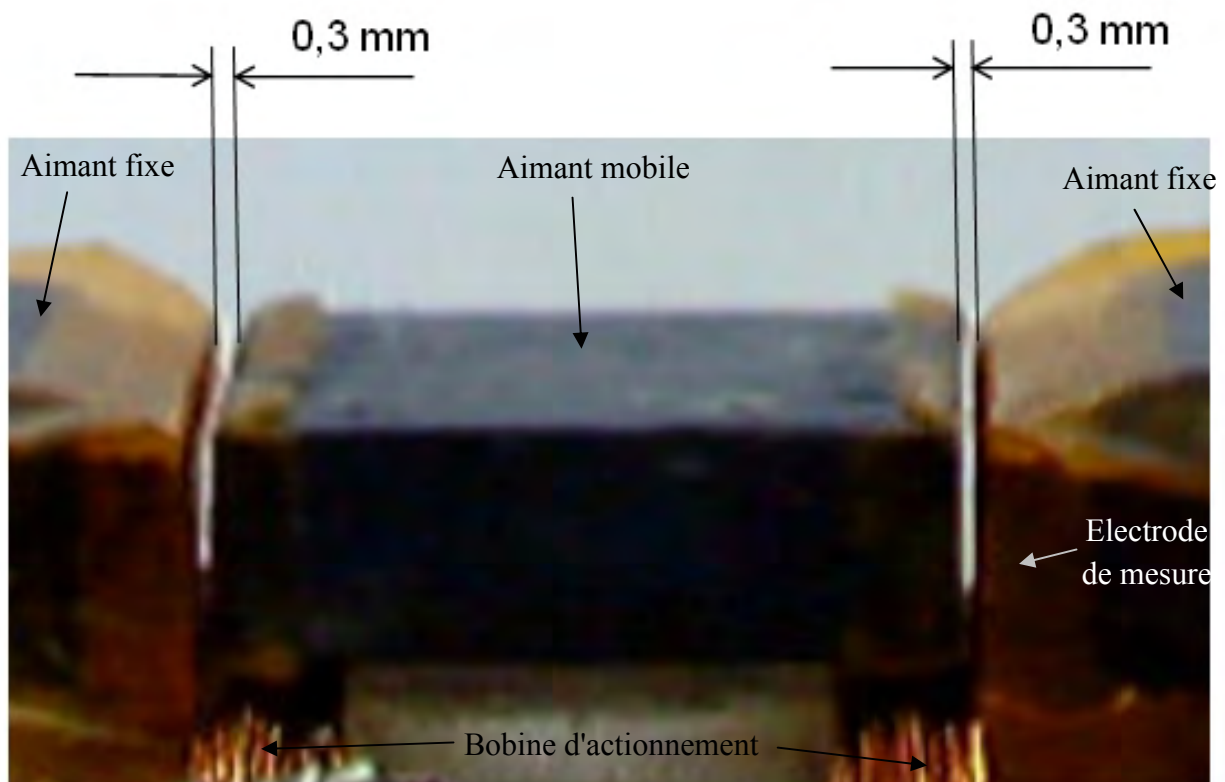


Fig. 5.23– Résultats de l'asservissement : MAMBA en lévitation

La position de l'aimant mobile est contrôlée au milieu du dispositif. La valeur efficace du courant est de 0,3 A. Le bruit étant beaucoup plus faible, la température de la bobine se stabilise et l'aimant mobile reste en lévitation stable indéfiniment.

Nous avons également essayé avec succès de changer la consigne et stabiliser temporairement l'aimant mobile dans une position décentrée. Cette manœuvre augmente proportionnellement les valeurs du courant moyen et efficace dans la bobine ce qui démontre les hypothèses de l'asservissement présentées dans le chapitre 2.

5.7 Conclusions

Ce chapitre a montré la faisabilité de l'asservissement d'un actionneur magnétique en mode μ -positionneur. Pour cela un démonstrateur millimétrique (32 mm) a été réalisé. Après une délicate phase de fabrication, deux méthodes de mesure de déplacement de l'aimant mobile ont été proposées et testées expérimentalement. La méthode "pont de Sauty" occasionne un bruit important ; ce bruit est fortement réduit avec la méthode "pompe de charge".

Nous avons aussi proposé un correcteur PI pour asservir le courant dans la bobine, puis vérifié son bon fonctionnement. Le correcteur principal à avance de phase -qui permet l'asservissement de la position- a également été réalisé, et son fonctionnement a été testé sur le capteur. Ces asservissements fonctionnent et l'aimant mobile reste en lévitation stable au centre du dispositif. Le bruit important du capteur "pont de Sauty" engendre une consommation et un échauffement excessifs : la bobine est brûlée au bout de 15 secondes.

La carte contenant le capteur "pompe de charge" a été réalisée, elle contient aussi un GBF intégré, l'asservissement et l'étage de puissance. La grande sensibilité, la meilleure linéarité et le bruit réduit du capteur assurent la lévitation stable de l'aimant mobile sans brûler la bobine. Cette carte permettra d'effectuer des caractérisations plus sophistiquées de l'actionneur en lévitation dans les travaux futurs.

Références :

[Amal05] Grand merci à Jean-Luc Amalberti de l'IUT Grenoble pour la finition rapide et parfaite du circuit imprimé.

[Chabe04] S. Chabenat, M. Pacot, "Réalisation d'un capteur de position pour micro-actionneur magnétique en vue d'une régulation en position", Rapport de projet de troisième année, École polytechnique de l'université de Nantes, février 2004

[Dela93] J. Delamare, "Suspensions magnétiques superficiellement passives", thèse de l'Institute Nationale Polytechnique de Grenoble, réalisé au Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble, décembre 2004

[Faur03] F. Faure, "Suspension magnetique pour volant d'inertie", thèse de l'Institute Nationale Polytechnique de Grenoble, réalisé au Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble, décembre 2003

[Levi05@] <http://www.chez.com/lalevitationmagnetique/video.htm>

[Rais01] Hynek Raisigel, "Development of a control model for a magnetic micro-actuator", rapport de stage Laboratoire d'électrotechnique de Grenoble, France 2001

[Prot05@] <http://www.planete-sciences.org/robot/ressources/logiciel/Protel/protel.html>

CONCLUSION
ET
PERSPECTIVES

Conclusion générale

Les travaux qui ont été présentés dans ce manuscrit font partie de recherches dans un domaine en pleine expansion: les microsystèmes magnétiques. Plus précisément, ce travail explore une structure de μ -actionneur magnétique comportant un aimant mobile libre. Il s'avère que cette structure peut fonctionner dans différents modes : soit bistable simple, soit asservi en lévitation. Une application potentielle est un μ -positionneur, c'est à dire un dispositif dont la position est asservie. Cette thèse concerne la modélisation du comportement dynamique de tels μ -actionneurs ainsi que leur asservissement en lévitation. Les résultats sont validés sur une maquette centimétrique.

Le premier chapitre met en évidence le contexte de l'étude: les microsystèmes, en particulier les μ -actionneurs magnétiques. Nous avons montré quelques exemples de fabrication de μ -actionneurs magnétiques dans différentes applications. Les réalisations industrielles ne sont pas encore très nombreuses, cependant le nombre croissant de travaux de laboratoires au niveau mondial sur les μ -actionneurs magnétiques indique que les divers verrous technologiques sont progressivement levés, ce qui autorise de nouvelles architectures et des concepts innovants.

Le deuxième chapitre présente les principes de base pour de nombreuses variations de structures de μ -actionneurs magnétiques. Parmi celles-ci, nous avons porté notre attention sur une famille de μ -relais réalisés actuellement au LETI, et plus particulièrement sur le μ -positionneur en lévitation magnétique qui en est dérivé et qui fait le sujet de cette thèse. Une modélisation détaillée du comportement dynamique du μ -positionneur avec 6 degrés de liberté est nécessaire pour la conception de l'asservissement.

Le troisième chapitre introduit donc d'abord deux méthodes rapides pour déterminer la force et le couple subis par l'aimant mobile. Il s'agit d'une méthode de charges magnétiques équivalentes et d'une méthode d'intégration volumique par condensation. Ces calculs sont validés par une modélisation utilisant une méthode d'éléments finis, ainsi que par des mesures expérimentales. Les deux méthodes donnent pratiquement les mêmes résultats. Elles sont assez rapides (temps de calcul 1,5 s), la précision (15%) est suffisante et nous avons un code facilement implantable sous Simulink.

Le chapitre 4 reprend ensuite les méthodes de calcul de force et de couple et les utilise pour déterminer le comportement dynamique de l'aimant mobile et sa trajectoire pendant les déplacements libres. Nous avons montré la description simplifiée et la description complète (avec 6 degrés de liberté) de la dynamique et de la cinématique de l'actionneur. La description complète utilise une approche mathématique spéciale: les quaternions. Elle est appliquée sur une maquette centimétrique ainsi que sur le système micrométrique.

Nous avons effectué une modélisation complète du μ -relais magnétique dans le mode bistable. Elle nous permet de déterminer le temps de commutation du relais ainsi que les effets secondaires tels que les rotations ou translations hors-plan.

Un logiciel permettant la visualisation du déplacement de l'actionneur a été programmé. Il est conçu de manière générique et permet de déterminer le comportement dynamique de toute la famille d'actionneurs présentés dans ce manuscrit. Son utilisation est relativement simple et permet aux utilisateurs moins familiers avec les quaternions et leur interprétation de comprendre le comportement dynamique des actionneurs.

Un correcteur à avance de phase a été déterminé pour l'asservissement de la position horizontale de l'actionneur avec le modèle simplifié utilisé pour la synthèse. La performance de ce correcteur a ensuite été testée sur le modèle complet, avec les quaternions. Le déplacement de l'aimant asservi en position a été modélisé, simulé et visualisé avec cet outil. Il s'avère que l'aimant mobile peut être stabilisé au milieu du dispositif, mais l'asservissement est accompagné par l'apparition d'oscillations. Cependant, la modélisation montre que ces oscillations sont amorties, malgré la sous-estimation des frottements dans le système. Pour une modélisation plus poussée des frottements il faudra une coopération avec des experts en aérodynamique.

Le chapitre 5 est consacré à la démonstration expérimentale de l'asservissement de l'actionneur en mode μ -positionneur, sur une maquette centimétrique. Nous décrivons la conception et la fabrication de la maquette. Nous proposons deux approches au traitement électronique de la mesure de la position de l'aimant mobile en lévitation par des capteurs capacitifs différentiels. Le premier circuit (pont de Sauty) a été mis en oeuvre et il est très bruyé; le second (pompe de charge) donne des résultats plus sensibles et bien moins bruyés.

Nous avons proposé un correcteur à avance de phase pour asservir le courant dans la bobine et nous avons vérifié son bon fonctionnement. Le correcteur principal pour asservir la position a été réalisé et testé avec les deux capteurs de position. L'asservissement fonctionne et l'aimant mobile est maintenu stablement entre les deux positions. Cependant le bruit provenant du circuit avec le capteur "pont de Sauty" est trop important : les courants de compensation sont élevés et la bobine brûle au bout de 15 secondes environ. Le circuit à pompe de charge présente moins de bruit et l'asservissement n'exige pas de courants excessifs – l'aimant mobile lévite parfaitement sans brûler la bobine.

Ces premiers résultats sont très encourageants. Les limitations montrent la faisabilité d'un tel système et les perspectives d'évolution nous laissent espérer l'intégration totale du μ -positionneur asservi.

Perspectives

Les perspectives de ce travail peuvent être divisées en trois parties: les perspectives pour les travaux de modélisation, la réalisation centimétrique, et la réalisation micrométrique.

CP.1 Modélisation

Les simulations légères de l'actionneur (une commutation de μ -relais) prennent actuellement 20 minutes sur un PC standard 2004 spécifiée dans le chapitre 3, les simulations lourdes (asservissement de position) prennent 14 – 20 heures. Ce temps de calcul augmente avec la complexité de la géométrie. Le calcul peut néanmoins être accéléré: soit par le choix d'un ordinateur plus rapide, soit par une amélioration du calcul. La méthode de l'intégration volumique par condensation est très bien optimisée mais la méthode de charge équivalente pourrait utiliser l'approximation de Gauss pour le calcul de l'intégrale surfacique. Elle pourrait aussi être réécrite en C. Nous estimons qu'un gain de 50% serait ainsi possible.

Un autre point intéressant est de mettre dans nos simulations les différentes non-linéarités qui interviennent dans l'actionneur telles que le frottement, la saturation de position angulaire et des coefficients de rebondissements. La modélisation de frottement devrait contenir la modélisation aérodynamique des effets des objets avoisinant l'aimant mobile parallélépipédique. Ce frottement implique des forces et couples exercés sur l'aimant mobile et influe donc la translation et aussi la rotation.

Cependant ces grandeurs sont très difficiles à déterminer surtout dans le domaine des microsystèmes, et il faut les analyser au cas par cas pour des différentes applications.

Enfin notre rêve serait d'avoir un logiciel complet avec modélisation complète des actionneurs magnétiques, visualisation 3D du déplacement, et optimisation statique mais aussi dynamique. Ce projet représente un volume énorme de travail mais le premier pas est déjà fait.

CP.2 Réalisation centimétrique

Le projet de la réalisation centimétrique a été fait dans la dernière phase des travaux et il reste encore quelques points intéressants à réaliser.

La réalisation avec le capteur "pompe de charge" permettra la validation de la modélisation dynamique avec le calcul de quaternions. Il est difficile de mesurer la position angulaire de l'aimant mobile mais nous pouvons déjà mesurer la position en z (axe vertical) et observer les oscillations. Dans le deuxième temps une mesure de position absolue d'un point quelconque sur l'aimant mobile pourrait être effectuée et comparée avec le calcul correspondant avec les quaternions. Néanmoins la principale difficulté de cette mesure est l'intervention de perturbations qui sont pratiquement impossibles à mesurer.

Si l'aimant mobile est asservi avec succès, le courant d'actionnement peut être mesuré précisément et utilisé pour la détermination de ces perturbations. Avec ce procédé nous pourrions mesurer des forces minuscules ainsi que des accélérations: on aura ainsi réalisé un accéléromètre ou un capteur de retour de force linéaires.

Le système asservi et stable pourra également être identifié avec les algorithmes classiques de l'identification. Ceci permettra de connaître exactement les propriétés physiques du système et les défauts de fabrication, et prévoir ainsi les difficultés pour la réalisation micrométrique.

Le dernier défi présenté est une synthèse d'un observateur de notre système. Un tel observateur nous permettrait de concevoir un correcteur qui prendrait en compte toutes les grandeurs du système (13 variables d'état) et amortir les oscillations du système. Un problème probable serait la rapidité du système : la constante de temps du système est petite (5 ms) et l'observateur doit pouvoir être calculé très vite.

CP.3 Réalisation micrométrique

La perspective finale de ces travaux est la réalisation du positionneur asservi à l'échelle micrométrique. Le grand avantage de ce projet est que la structure intégrée sur Si sera bientôt mise au point en mode de μ -relais bistable. Il suffira alors de la reprendre, concevoir un capteur de position, et enfin déterminer un correcteur adéquat. Ces deux problèmes seront abordés dans les deux derniers paragraphes.

CP.3.1 Asservissement du μ -actionneur

Pour l'asservissement du système micrométrique, nous avons utilisé le procédé décrit au chapitre 4.7. Le système présente les constantes suivantes:

$$k_1 = 4,36 \text{ N/m}, k_2 = 12,86 \text{ } \mu\text{N/A}, \text{ le poids de l'aimant mobile est } 0,17 \text{ } \mu\text{g}$$

L'algorithme du chapitre 4.7 nous donne finalement un correcteur suivant:

$$k_0 = 614 \text{ } 000, \tau_1 = 4,64 \text{ } \mu\text{s}, \tau_2 = 1,33 \text{ } \mu\text{s}$$

Les figures, CP.1, CP.2 montrent les performances du microsysteme en régulation autour de sa position d'équilibre instable au milieu, à partir d'une position stable sur un côté ($3 \mu\text{m}$).

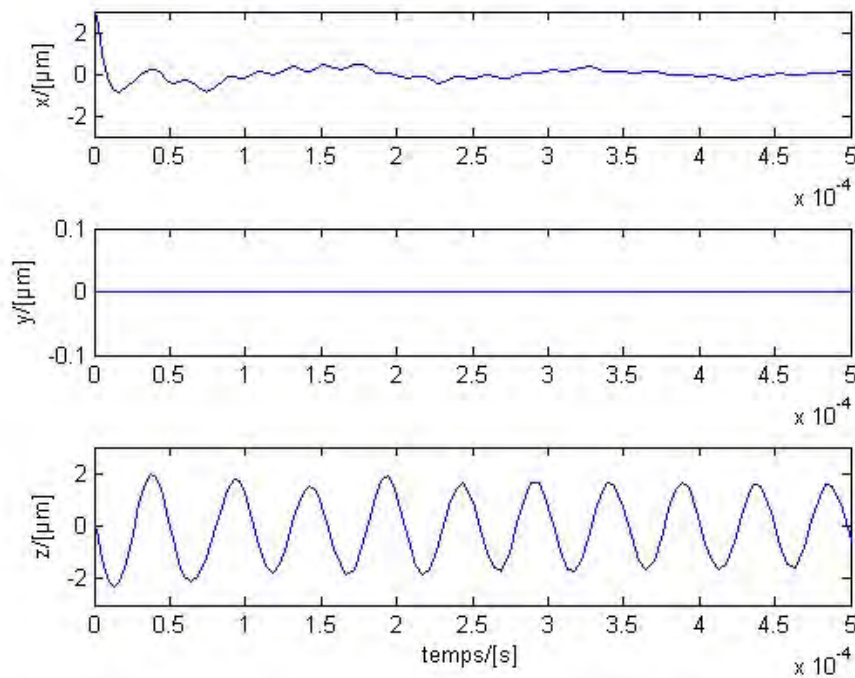


Fig. CP.1– Les translations du μ -aimant mobile pendant la régulation au milieu

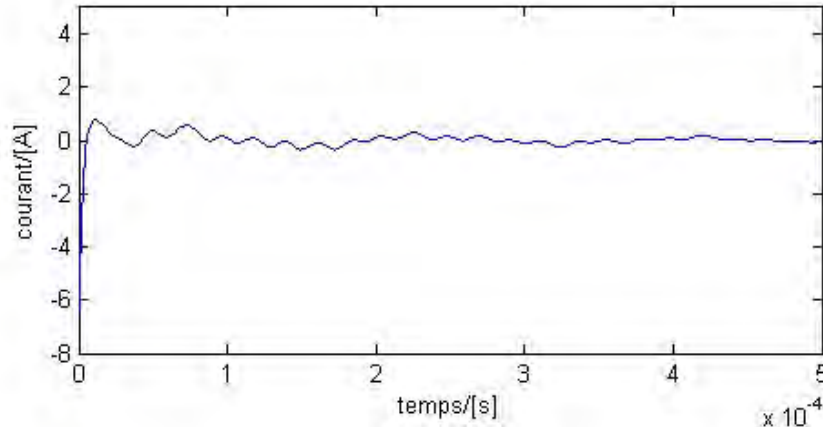


Fig. CP.2– Le courant pour la régulation de position du mobile au milieu

Dans cette simulation, l'aimant mobile part d'une position stable à $3 \mu\text{m}$ du centre ; la position centrale est asservie en $20 \mu\text{s}$ et le système est stable. Le courant nécessaire pour le décollage de l'aimant mobile est 6 A ; il entraîne une oscillation dans l'axe Oz qui s'amortit progressivement.

Il nous reste à vérifier les rotations. Les quaternions utilisés pour la simulation sont montrés sur la figure CP. 3.

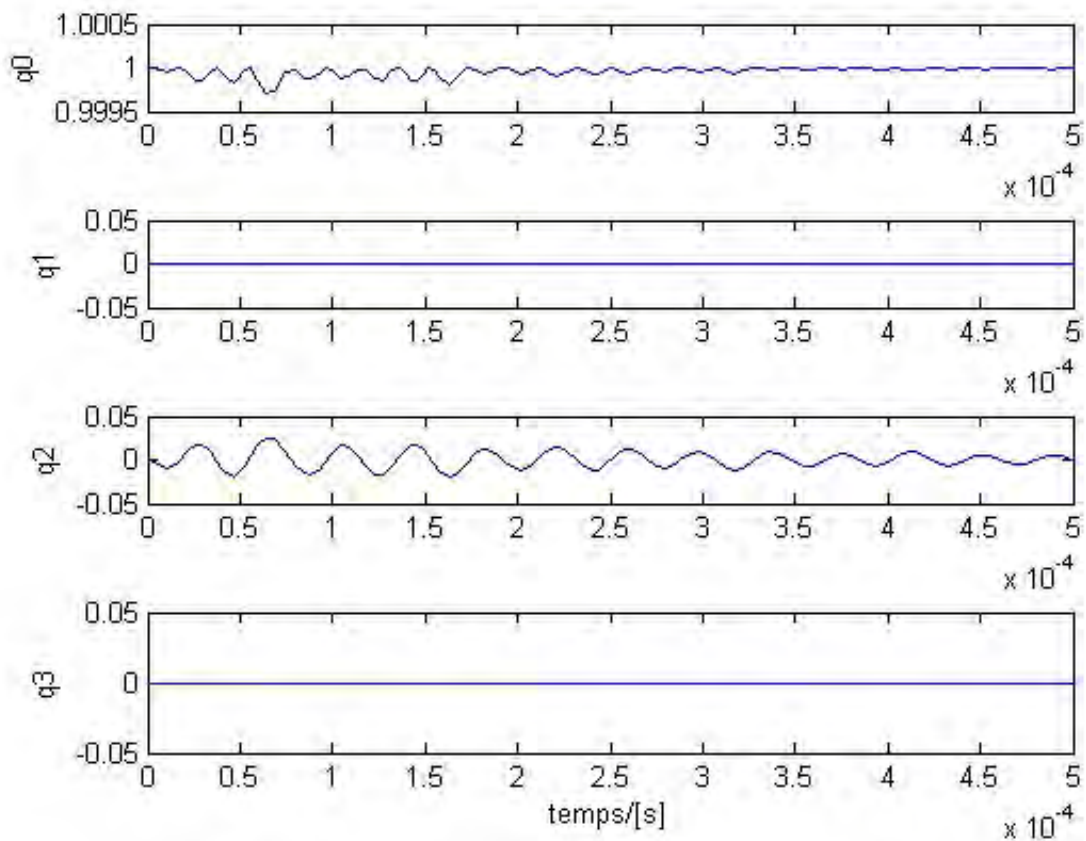


Fig. CP.3– Les quaternions pendant la régulation de la position du mobile

Les rotations de l'aimant mobile sont amorties : une régulation de sa position autour du point d'équilibre instable au milieu est donc possible.

Cependant, parmi les applications possibles du MAMBA, on envisage un μ -positionneur dont la position en lévitation doit pouvoir évoluer librement entre les deux positions stables de contact (voir paragraphe 2.4.3), et pas seulement au point milieu. Nous allons tester le dispositif dans ce mode de fonctionnement. L'aimant mobile part de la position stabilisée au milieu, puis une consigne (échelon 50 nm) est appliquée à l'instant $t = 1,5$ ms. La figure CP.4 montre la position et le courant dans le microsystème en asservissement.

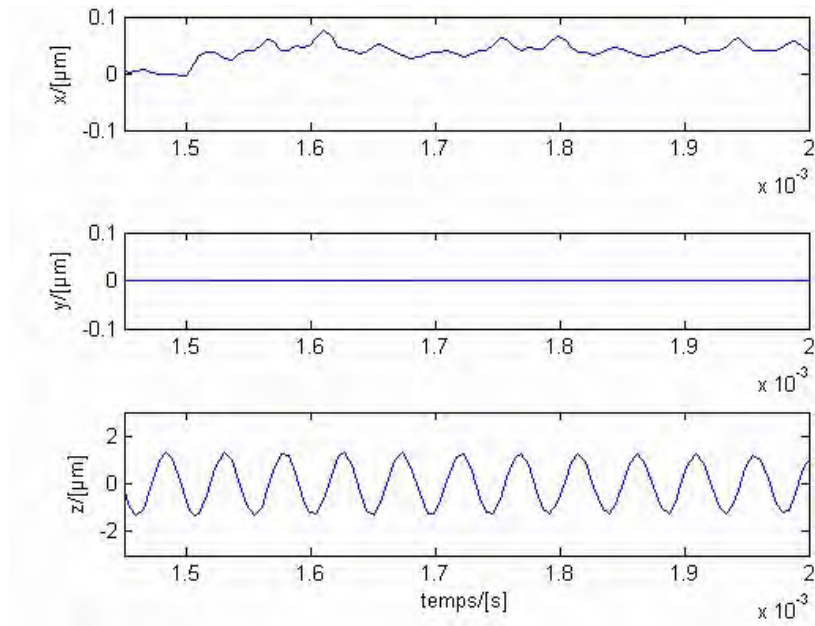


Fig. CP.4–Translations selon Ox Oy et Oz pour l’asservissement en position Ox décentrée

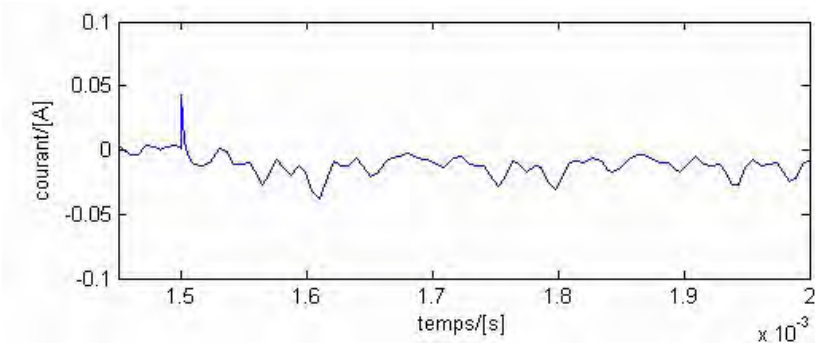


Fig. CP.5– Courant d’asservissement : position Ox décentrée

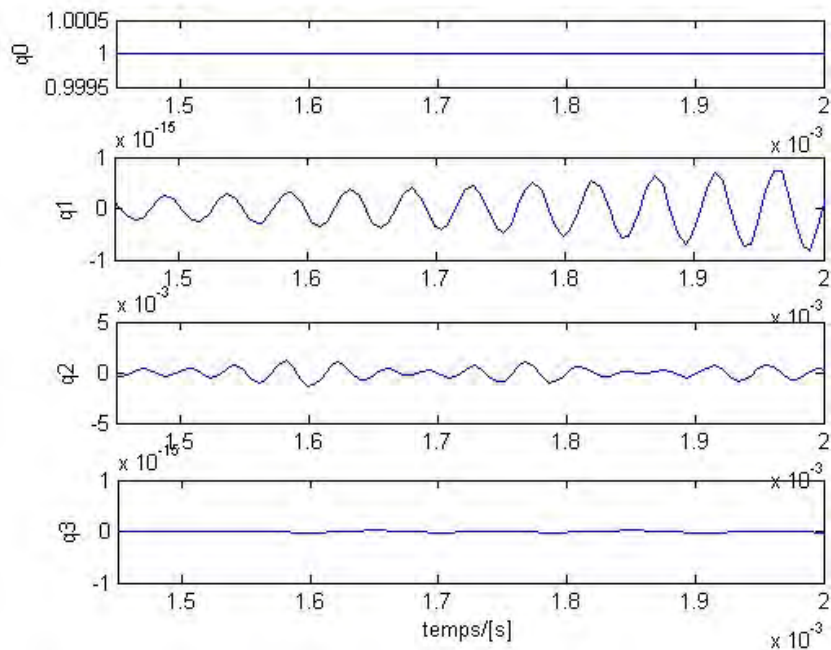


Fig. CP.6– Les quaternions pendant l’asservissement en position Ox décentrée

Les résultats de simulation montrent un asservissement de position "réussi". L'aimant mobile arrive à la position souhaitée mais n'est pas bien stabilisé selon O_x et oscille également selon O_z (figure CP. 4). Le courant d'asservissement (figure CP. 5) n'est pas excessif, il ne dépasse pas 50 mA.

La figure CP. 6 montre les quaternions pendant l'asservissement. L'aimant mobile oscille en rotation autour de O_y , mais un nouveau phénomène s'occasionne : une très petite rotation autour de O_x apparaît et elle s'amplifie. Une simulation plus longue confirme que cette oscillation rend l'aimant mobile instable, et l'asservissement diverge.

Rappelons que nous avons modélisé le frottement de l'air lors des translations mais pas lors des rotations. Il est possible que la rotation soit amortie par ce frottement. Pour résoudre ce problème il faudra faire une étude aérodynamique approfondie.

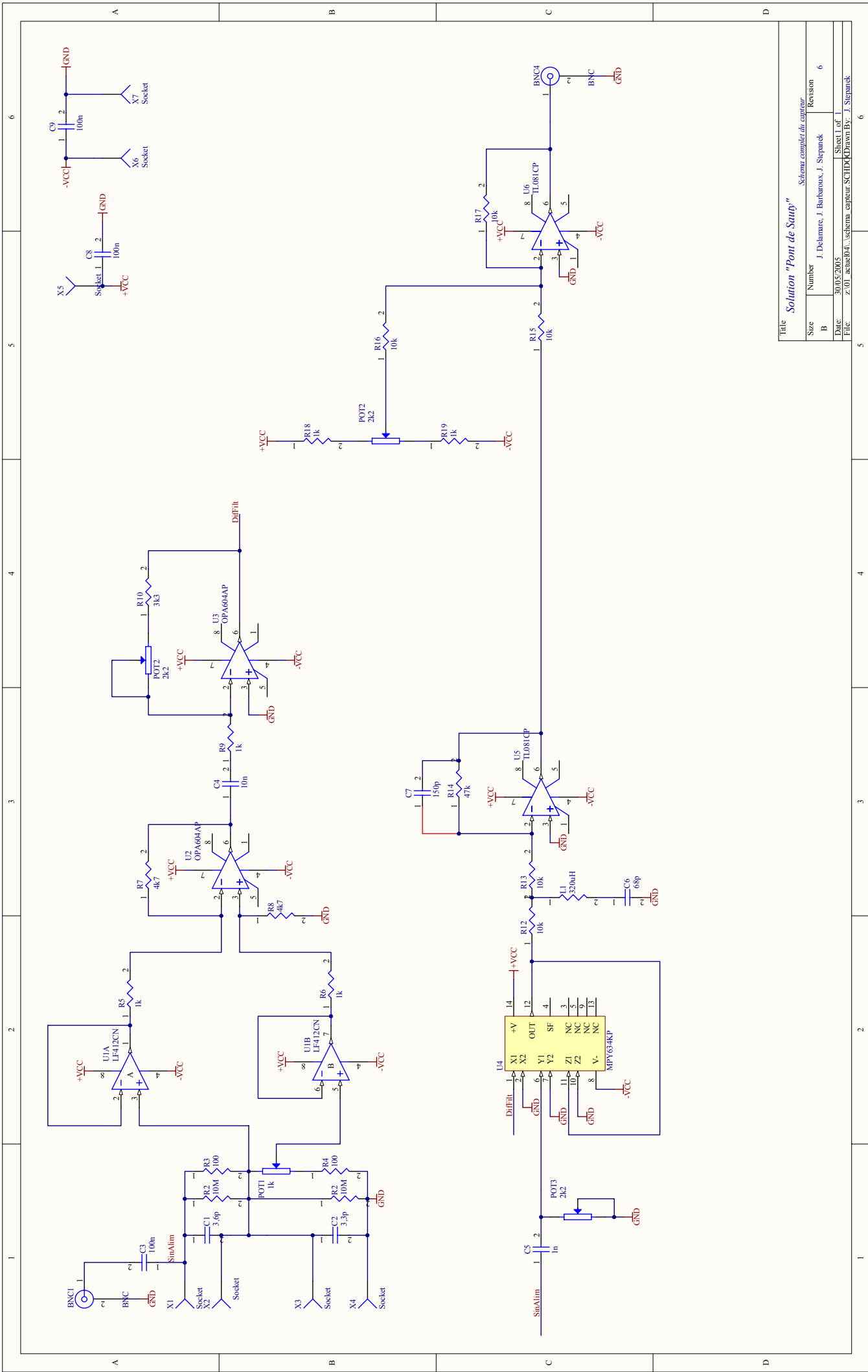
Au cas où le système diverge même avec le frottement de l'air, nous pouvons concevoir un type de correcteur différent, proposé dans le paragraphe CP.1. Ce correcteur prend en compte l'information sur la position x mais aussi l'information sur l'axe qui diverge. Pour cela il faudra avoir un capteur de cette grandeur ou bien il faudra concevoir un observateur.

CP.3.2 μ -capteur de position intégré

Un problème difficile à résoudre sera aussi la réalisation du capteur de position. Le système électrostatique intégré sera plus précis en terme de parallélisme de surfaces, mais il sera très sensible aux champs électriques et aux changements de diélectrique. Il sera probablement encore plus sensible aux perturbations et aux bruits : il va falloir prévoir un blindage électrique (cage de Faraday).

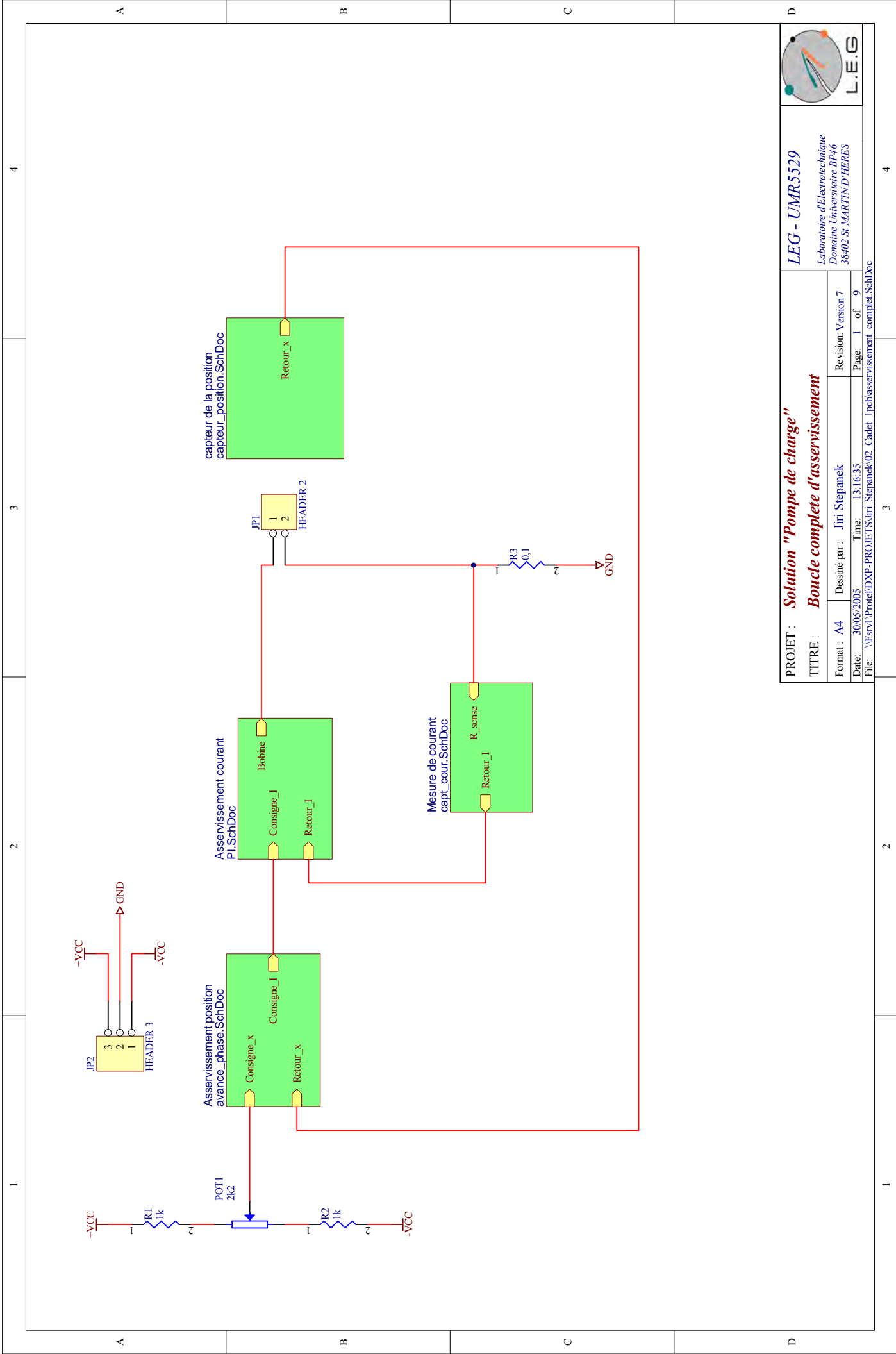
La capacité théorique entre les électrodes est de l'ordre du fF, mais avec les capacités parasites il faudra certainement compter plutôt autour de quelques dixièmes de fF. Cette valeur estimée implique une fréquence porteuse de quelques GHz. Cette valeur étant très grande, nous pouvons déposer sur les électrodes une couche de diélectrique avec une permittivité relative élevée. La capacité augmente et la fréquence baisse par le facteur de la permittivité relative. Le projet exigera probablement l'utilisation d'une électronique ultra-rapide (déjà employée dans le domaine des hyperfréquences en télécommunications), intégrée directement sur le même wafer.

ANNEXE A
DOCUMENTATION
TECHNIQUE



Title: **Solution "Pont de Sauty"**

Schema complet du capteur	
Size	Revision
B	J. Delamarre, J. Barbaroux, J. Stepanek
Date:	30/05/2005
File:	z:\01_actuel\04_...schem_ capteur.SCHDOC\Drawn By: J. Stepanek



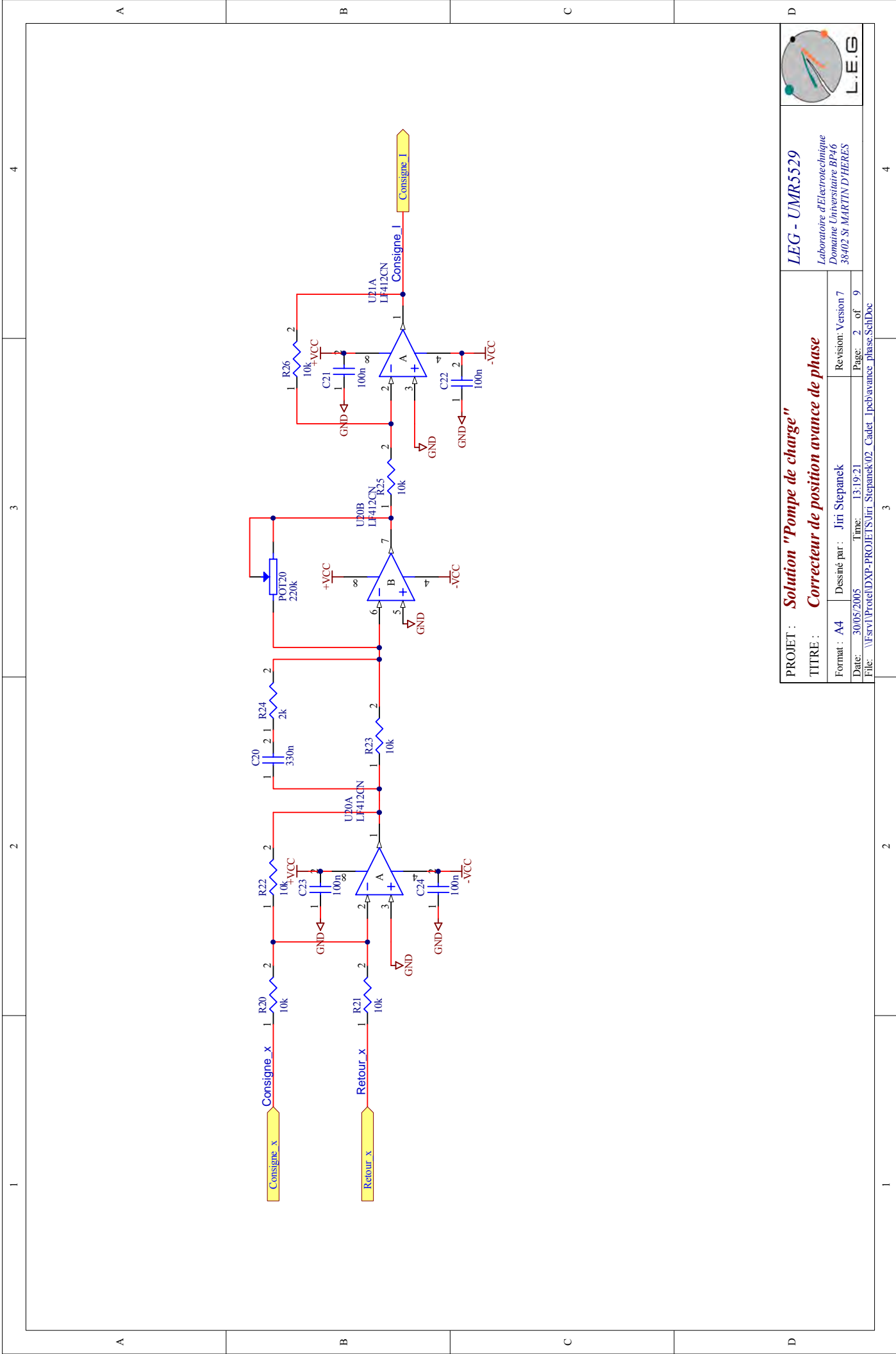
PROJET : **Solution "Pompe de charge"**

TITRE : **Boucle complete d'asservissement**

Format : A4	Dessiné par : Jiri Stepanek	Revision: Version 7
Date: 30/05/2005	Time: 13:16:35	Page: 1 of 9
File: \\Fsrv1\Protel\DXP-PROJET\TS\Jiri Stepanek\02_Cadet_ipc\asservissement_complet.SchDoc		



LEG - UMR5529
 Laboratoire d'Electrotechnique
 Domaine Universitaire BP46
 38402 St MARTIN D'HERES



PROJET : **Solution "Pompe de charge"**
 TITRE : **Correcteur de position avance de phase**

Format : A4	Dessiné par : Jiri Stepanek	Revision: Version 7
Date: 30/05/2005	Time: 13:19:21	Page: 2 of 9
File: \\Fsrv1\Protel\DXP-PROJET\Jiri Stepanek\02_Cadet_1\pbeavance phase.SchDoc		

LEG - UMR5529
 Laboratoire d'Electrotechnique
 Domaine Universitaire BP46
 38402 St MARTIN D'HERES

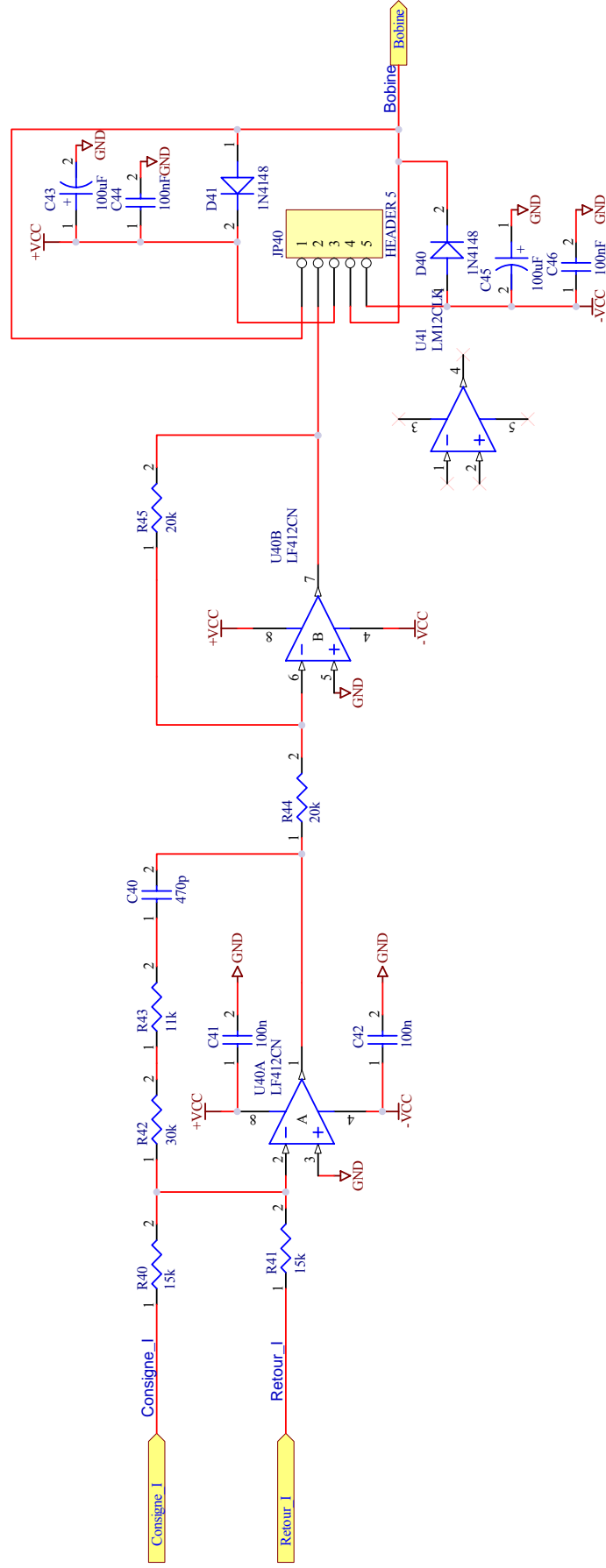


A

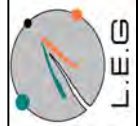
B

C

D



PROJET : **Solution "Pompe de charge"**
 TITRE : **PI correcteur de courant**



LEG - UMR5529
 Laboratoire d'Electrotechnique
 Domaine Universitaire BP416
 38402 St. MARTIN D'HERES

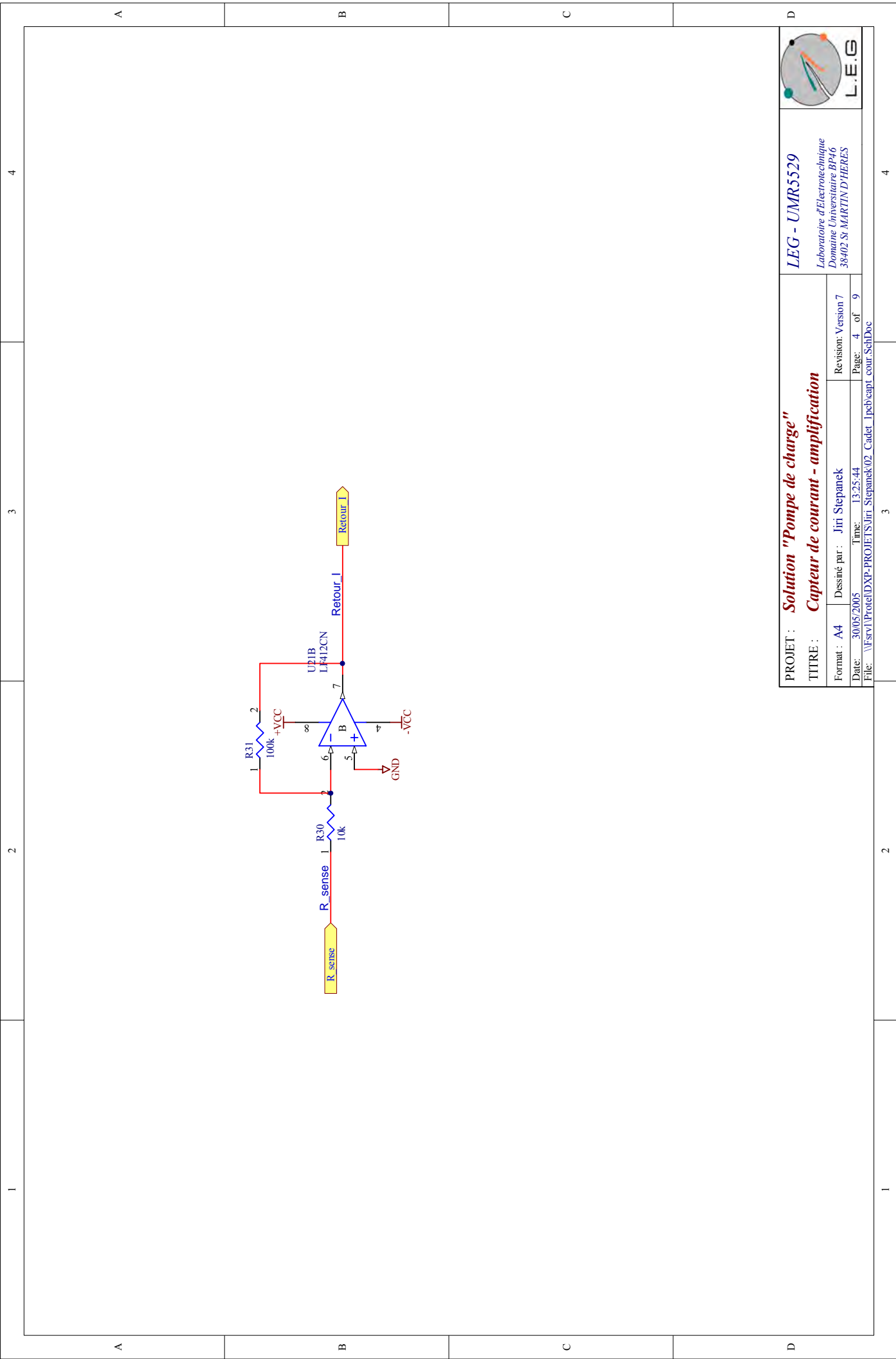
Format : A4	Dessiné par : Jiri Stepanek	Revision: Version 7
Date: 30/05/2005	Time: 13:25:00	Page: 3 of 9
File: \\Fsrv1\Protel\DXP-PROJETS\Jiri_Stepanek\02_Cadet_lpob\PI_SchDoc		

A

B

C

D



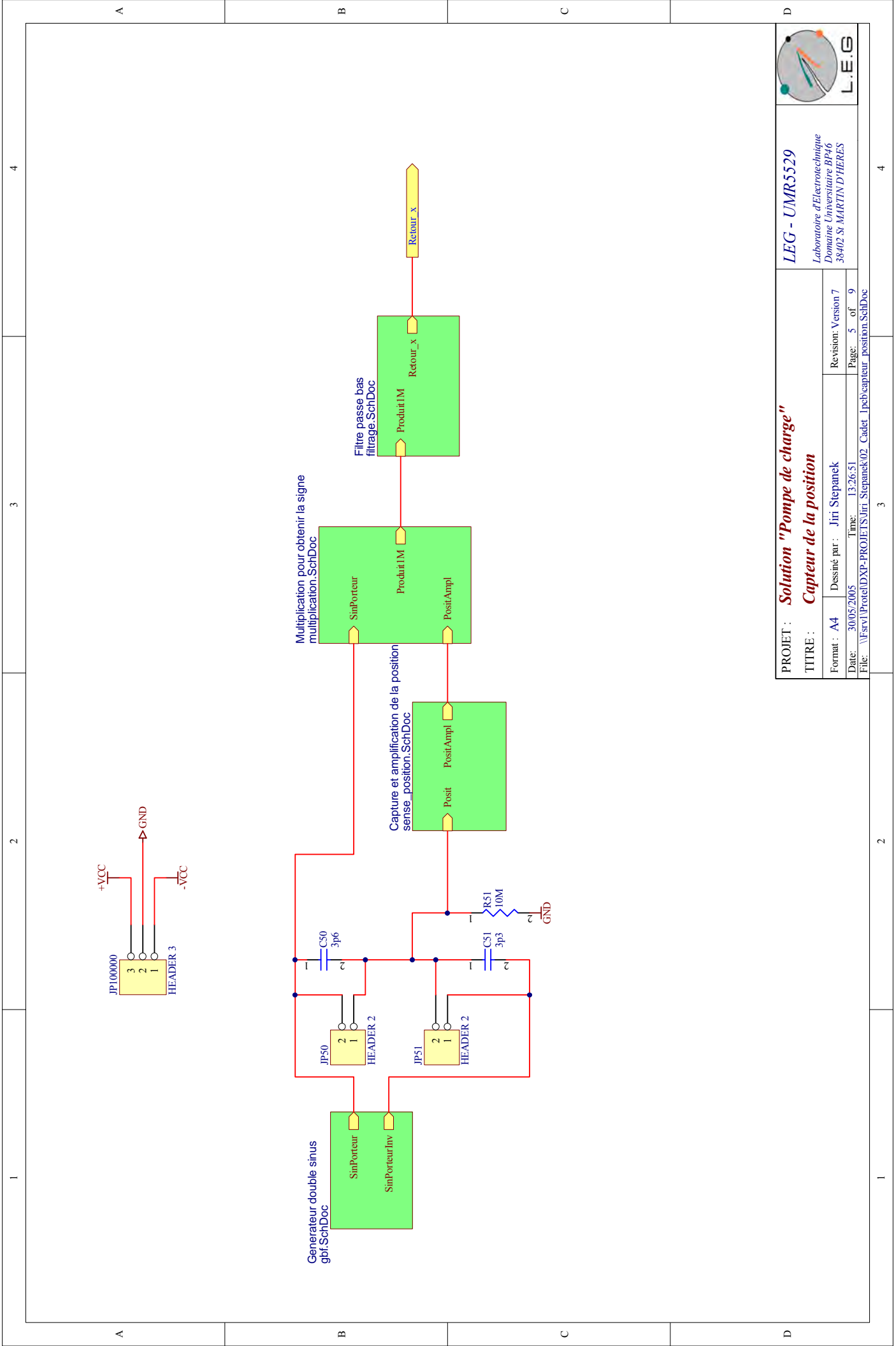
PROJET : **Solution "Pompe de charge"**

TITRE : **Capteur de courant - amplification**

Format : A4	Dessiné par : Jiri Stepanek	Revision: Version 7
Date: 30/05/2005	Time: 13:25:44	Page: 4 of 9
File: \\Fsrv1\Protel\DXP-PROJET\Jiri Stepanek\02_Cadet_ipcbeapt_cour_SchDoc		



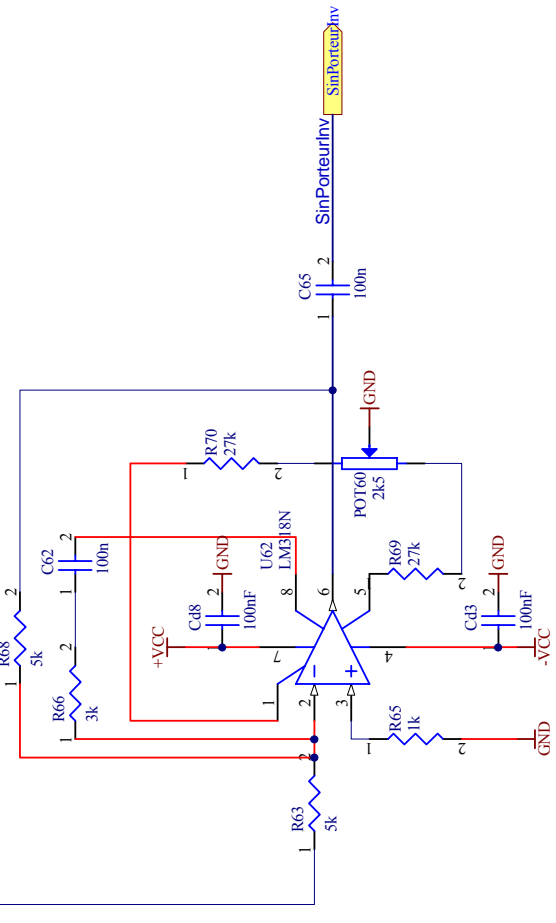
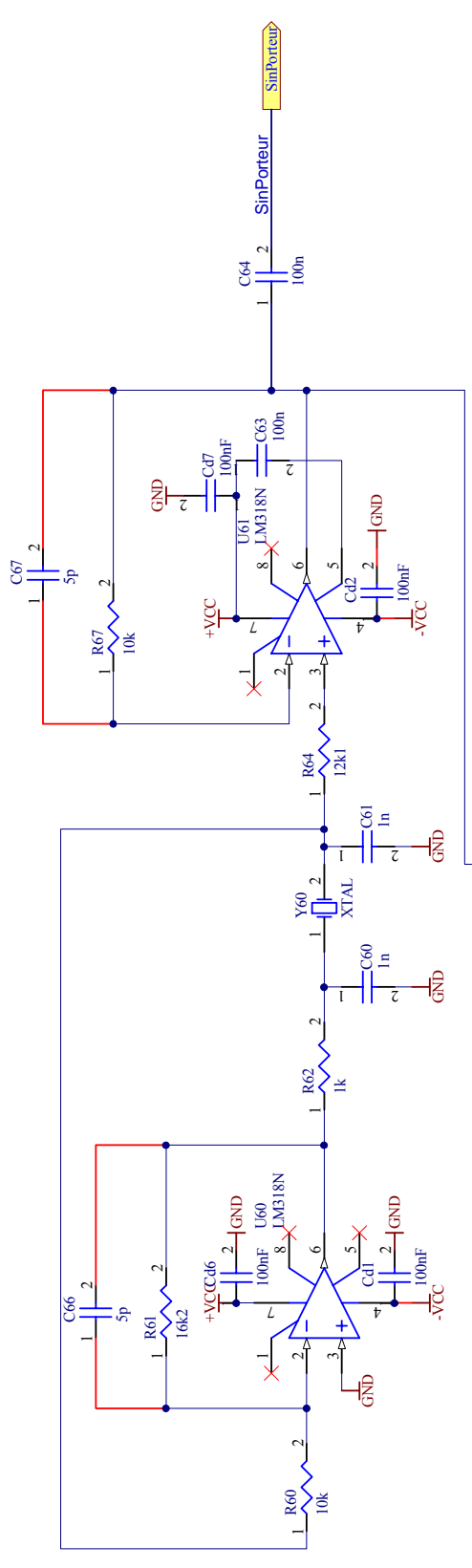
LEG - UMR5529
 Laboratoire d'Electrotechnique
 Domaine Universitaire BP46
 38402 St MARTIN D'HERES



PROJET : **Solution "Pompe de charge"**
 TITRE : **Capteur de la position**

Format : A4	Dessiné par : Jiri Stepanek	Revision: Version 7
Date: 30/05/2005	Time: 13:26:51	Page: 5 of 9
File: \\Fsrv1\Protel\DXP-PROJET\TS\Jiri Stepanek\02_Cadet_ipc\capteur_position.SchDoc		



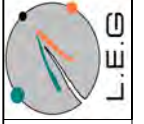
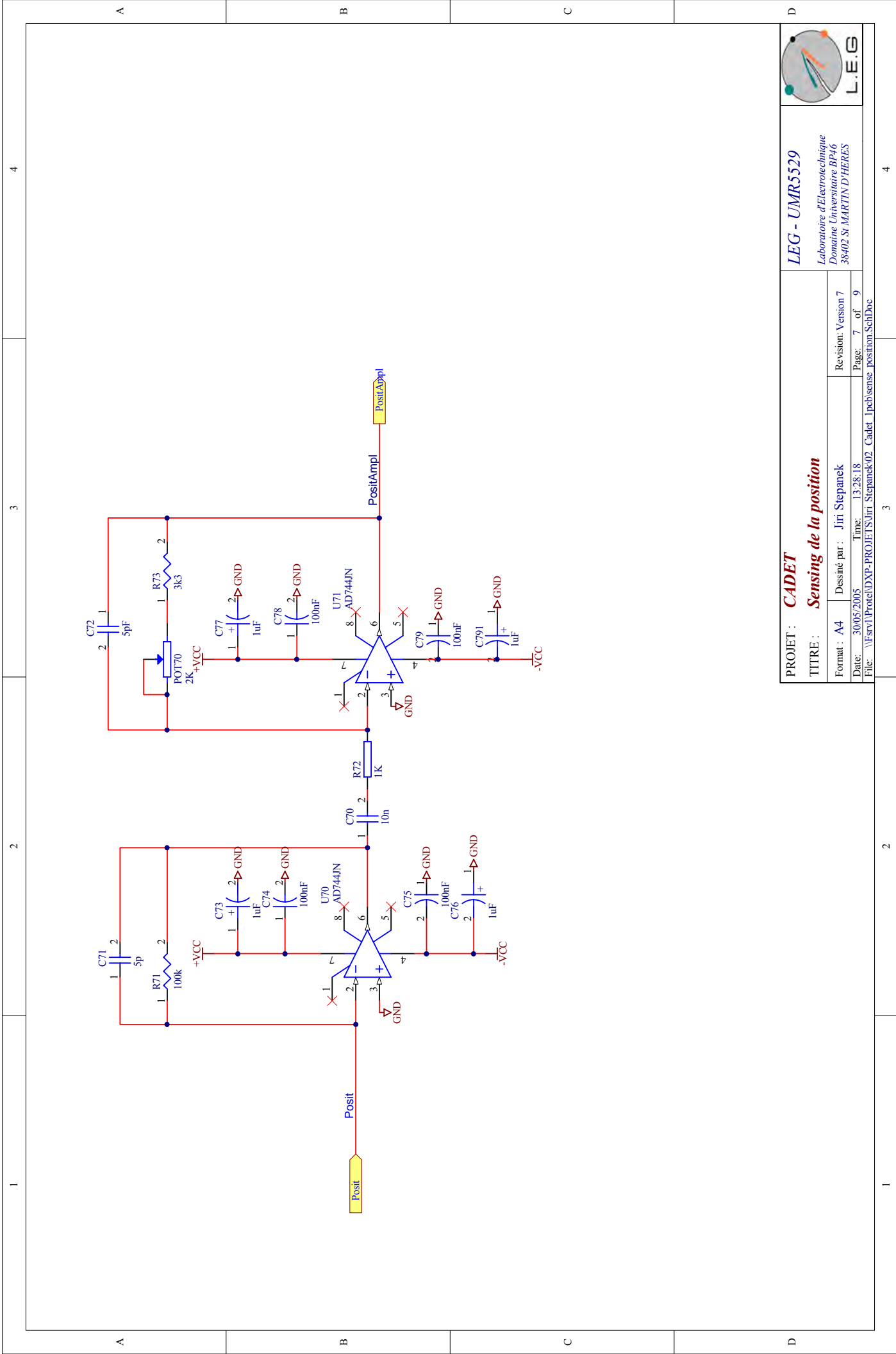


PROJET : **Solution "Pompe de charge"**
 TITRE : **Generateur 2x sinus**

Format : A4	Dessiné par : Jiri Stepanek	Revision: Version 7
Date: 30/05/2005	Time: 13:27:27	Page: 6 of 9
File: \\Fsrv1\Protel\DXP-PROJET\Jiri Stepanek\02_Cadet_1pcb\gbl_SchDoc		

LEG - UMR5529
 Laboratoire d'Electrotechnique
 Domaine Universitaire BP46
 38402 St MARTIN D'HERES





LEG - UMR5529
 Laboratoire d'Electrotechnique
 Domaine Universitaire BP46
 38402 St MARTIN D'HERES

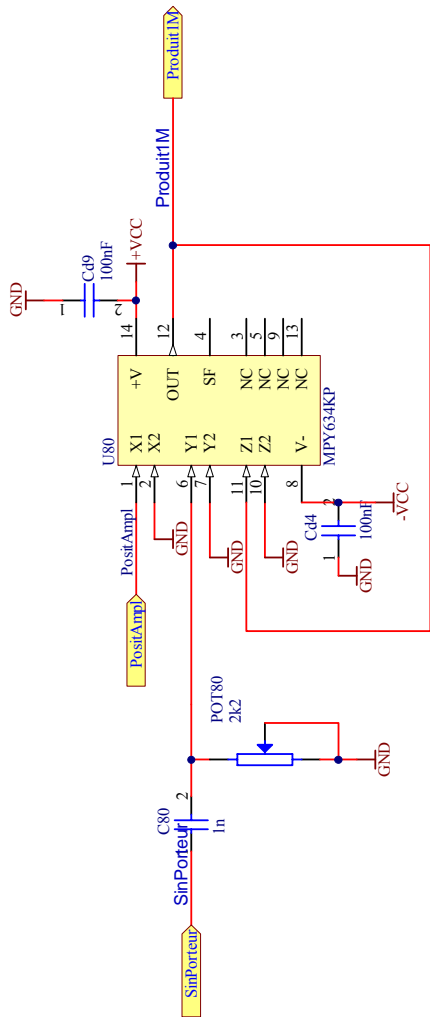
PROJET : CADET	
TITRE : Sensing de la position	
Format : A4	Dessiné par : Jiri Stepanek
Date: 30/05/2005	Time: 13:28:18
File: \\fsrv1\Protel\DXP-PROJET\Jiri Stepanek\02_Cadet_1pcb\sense_position.SchDoc	Revision: Version 7
	Page: 7 of 9

A

B

C

D



LEG - UMR5529

Laboratoire d'Electrotechnique
 Domaine Universitaire BP46
 38402 St MARTIN D'HERES



PROJET : **Solution "Pompe de charge"**
 TITRE : **Multiplication pour obtenir la signe**

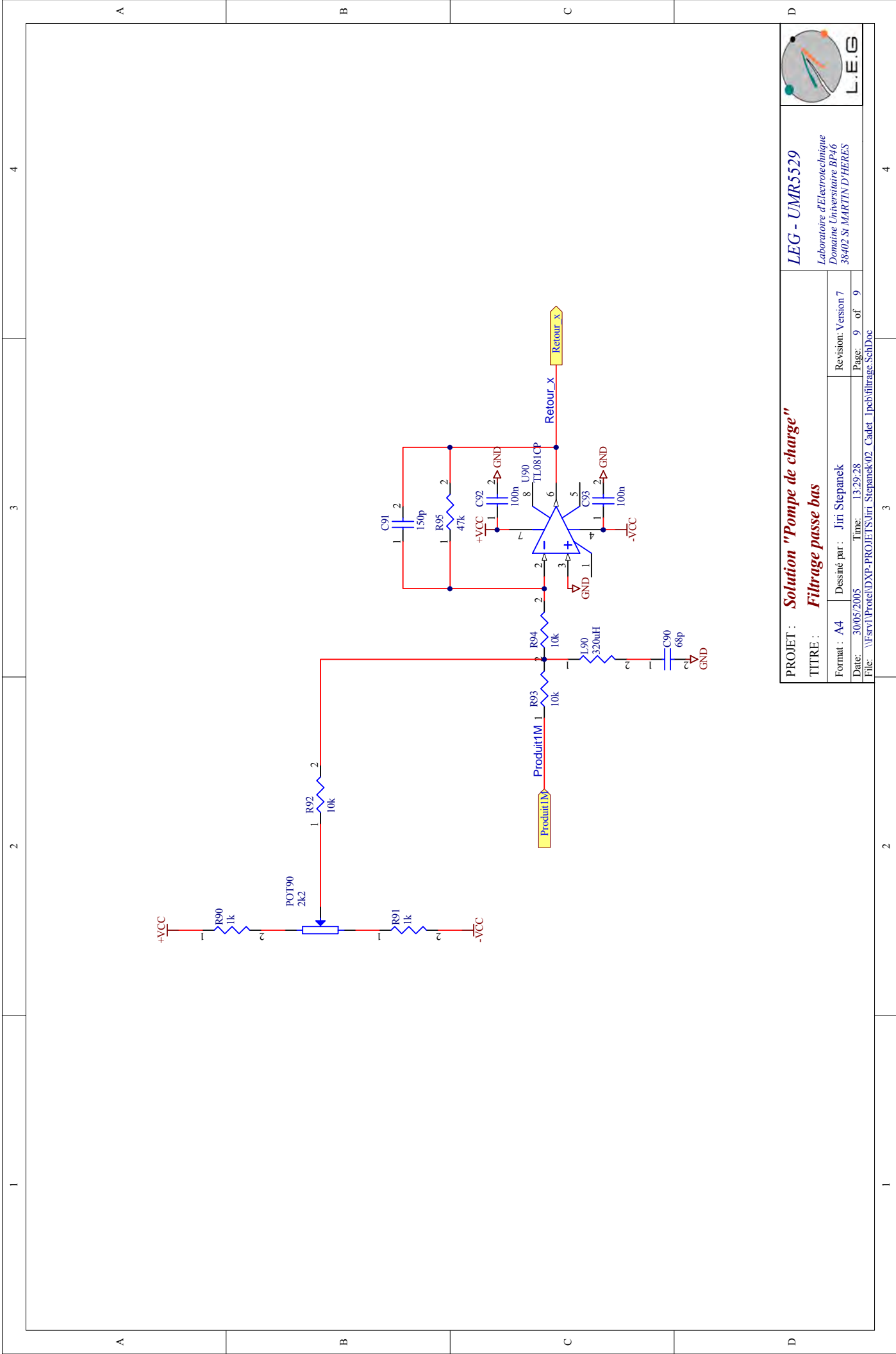
Format : A4	Dessiné par : Jiri Stepanek	Revision: Version 7
Date: 30/05/2005	Time: 13:28:56	Page: 8 of 9
File: \\fsrv1\Protel\DXP-PROJET\Jiri Stepanek\02_Cadet_ipc\multiplication_SchDoc		

A

B

C

D



PROJET : **Solution "Pompe de charge"**
 TITRE : **Filtrage passe bas**

Format : A4	Dessiné par : Jiri Stepanek	Revision: Version 7
Date: 30/05/2005	Time: 13:29:28	Page: 9 of 9
File: \\fsrv1\Protel\DXP-PROJET\Jiri Stepanek\02_Cadet_1pcb\filtrage.SchDoc		

LEG - UMR5529
 Laboratoire d'Electrotechnique
 Domaine Universitaire BP46
 38402 St MARTIN D'HERES



Commande et asservissement en lévitation d'un microactionneur magnétique bistable

Cette thèse concerne l'étude d'une famille de μ -actionneurs magnétiques en lévitation asservie. Le principe est celui d'un aimant mobile ayant deux positions stables et une position instable. Parmi les différentes applications de cette structure, un μ -positionneur est étudié plus en détails, avec la conception, la modélisation et la réalisation d'une maquette centimétrique de ce μ -positionneur asservi. La conception de μ -positionneur comprend l'étude du capteur capacitif de position et une synthèse du correcteur pour l'asservissement. La modélisation introduit deux méthodes de calcul de la force et du couple magnéostatiques exercés sur l'aimant mobile: méthode de charge équivalente et méthode d'intégration volumique. Les deux méthodes sont validées et puis utilisées pour déterminer la trajectoire de l'aimant mobile comportant 6 degrés de liberté. Une méthode mathématique utilisant les quaternions est mise en œuvre. La modélisation permet l'analyse du comportement de différents μ -actionneurs magnétiques ainsi que la vérification de la stabilité de l'asservissement. La réalisation de la maquette centimétrique décrit la fabrication d'un prototype ainsi que la réalisation de l'électronique pour capter la position de l'aimant mobile. L'aimant mobile sur la maquette est finalement asservi en lévitation.

Command and control in levitation of a bistable magnetic micro-actuator

The Ph.D work concerns the study of a family of magnetic micro-actuators in levitation. It deals with a principle of a mobile magnet with two stable positions and one unstable position. The work consists principally in the conception, modeling and realization of the device with a mobile magnet controlled in the unstable position (μ -positioner). The conception of the μ -positioner includes position sensing and a synthesis of a controller for position control. The modeling presents two methods of calculus of the magnetostatic force and torque affecting the mobile magnet. Both methods (equivalent magnetic charge method and the method of the condensed volume integration) are validated. Then used for trajectory with 6 degrees of freedom estimation of the mobile magnet. A quaternion approach for modeling is used. The modeling allows the analysis of the behavior of different magnetic μ -actuators and verification of the position control stability. A cm-scale prototype realization demonstrates the principle. A capacitance position sensor with measuring electronics is also presented. The mobile magnet on the prototype is finally successfully controlled in the levitation.

Mots clés

Magnéstatique, microactionneur magnétique, lévitation, bistabilité, microsystemes, quaternions, MAGMAS

Laboratoire d'électrotechnique de Grenoble
BP 46
38402 Saint Martin d'Hères