



HAL
open science

SOURCE DE CHAMP INTENSE 4 Tesla À AIMANTS PERMANENTS

Frédéric Bloch

► **To cite this version:**

Frédéric Bloch. SOURCE DE CHAMP INTENSE 4 Tesla À AIMANTS PERMANENTS. Energie électrique. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 1999. Français. NNT: . tel-00763901

HAL Id: tel-00763901

<https://theses.hal.science/tel-00763901>

Submitted on 11 Dec 2012

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.

**THESE**

présentée par

Frédéric BLOCH

Pour obtenir le grade de **DOCTEUR**
de l'**INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE**

(Arrêté ministériel du 30 mars 1992)

(Spécialité : Génie Electrique)

SOURCE DE CHAMP INTENSE 4 Tesla
À AIMANTS PERMANENTS

Date de soutenance : **12 juillet 1999**

Composition du jury :

Messieurs

Michael COEY

Rapporteur

Marc DRILLON

Rapporteur

Guy AUBERT

Examineur

Fernand VIAL

Examineur

Gérard MEUNIER

Examineur

Orphée CUGAT

Examineur

J.C. TOUSSAINT

Examineur

THESE

présentée par

Frédéric BLOCH

Pour obtenir le grade de **DOCTEUR**
de l'**INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE**

(Arrêté ministériel du 30 mars 1992)

(Spécialité : Génie Electrique)

SOURCE DE CHAMP INTENSE 4 Tesla À AIMANTS PERMANENTS

Date de soutenance : **12 juillet 1999**

Composition du jury :

Messieurs	Michael COEY	Rapporteur
	Marc DRILLON	Rapporteur
	Guy AUBERT	Examineur
	Fernand VIAL	Examineur
	Gérard MEUNIER	Examineur
	Orphée CUGAT	Examineur
	J.C. TOUSSAINT	Examineur

THÈSE

présentée

pour l'obtention

du grade de DOCTEUR

à l'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRIGNAN

(anciennement Institut National Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace)

(Spécialité : Chimie Industrielle)

présentée

pour l'obtention du D.I.P. (Diplôme Interdisciplinaire de Polytechnicien)

par M. J. L. TOUSSAINT

né le 10/05/1964

à Paris (France)

Composition du Jury

M. J. L. TOUSSAINT
M. J. L. TOUSSAINT

M. J. L. TOUSSAINT
M. J. L. TOUSSAINT
M. J. L. TOUSSAINT
M. J. L. TOUSSAINT
M. J. L. TOUSSAINT
M. J. L. TOUSSAINT
M. J. L. TOUSSAINT

M. J. L. TOUSSAINT

Président du Jury : M. J. L. TOUSSAINT
Rapporteur : M. J. L. TOUSSAINT
Examinateur : M. J. L. TOUSSAINT
Examinateur : M. J. L. TOUSSAINT
Examinateur : M. J. L. TOUSSAINT

REMERCIEMENTS

Je tiens tout particulièrement à remercier :

Monsieur Guy Aubert, Conseiller d'état en service extraordinaire, de m'avoir fait l'honneur de présider le jury de cette thèse.

Monsieur Michael Coey, Professeur au Trinity college de Dublin, department of pure and applied physics pour avoir accepté d'être le rapporteur de cette thèse.

Monsieur Marc Drillon, Directeur adjoint de l'institut de Physico-Chimie des matériaux de Strasbourg pour avoir accepté d'être le rapporteur de cette thèse.

Monsieur Vial Fernand pour avoir accepté d'être membre du jury, avoir représenté notre partenaire industriel Péchiney CRV-Ugimag Inc. et pour son aide sur les aimants tout au long de cette thèse.

Monsieur Jean-Claude Sabonnadière, Professeur à l'Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs Electriciens de Grenoble pour m'avoir accueilli dans son laboratoire.

Monsieur Meunier Gérard, Directeur de recherche au CNRS pour son encadrement efficace, sa disponibilité et ses encouragements et aussi pour m'avoir accueilli dans son équipe.

Messieurs Orphée Cugat et Jean-Christophe Toussaint pour m'avoir supporté pendant plus de quatre ans, de m'avoir guidé efficacement, de m'accorder autant d'attention dès que le besoin s'en faisait sentir, de m'avoir fait confiance. Je les remercie aussi de m'avoir appris un peu de leur savoir. Je les remercie surtout pour m'avoir donné un sujet avec lequel je me suis vraiment fait plaisir. Merci...

Je tiens aussi à remercier tous ceux qui m'ont apporté une aide très précieuse pendant cette thèse : toutes les personnes des nombreux laboratoires que j'ai eu le plaisir de croiser. Je ne citerais que le nom des laboratoires, les personnes se reconnaîtront : le SERAS, le laboratoire MATFORMAG, le LCMI, le CRTBT

Je tiens à remercier spécialement deux personnes sans qui ma thèse ne se serait pas aussi bien passée.

M. Bruno Mallet, pour toutes ses approches réalistes qui ont calmé nos âmes de constructeurs du dimanche, toute sa patience, sa technique et donc toutes ses pièces réalisées avec une précision démoniaque.

M. Patrice Labie pour toutes les améliorations au niveau des logiciels, sa compréhension des phénomènes physiques ou numériques. Je tiens à le remercier d'être aussi facilement corrompible (sponsor officiel : café)...

Merci à tous deux...

Enfin, je tiens à remercier tous les membres du laboratoire pour leur accueil, et pour les trois inoubliables années qu'ils m'ont permis de passer, et particulièrement Etiennette Callegher. Je remercie les anciens thésards, les thésards actuels, et les futurs docteurs en herbe, et plus spécialement : Aaron Snyder, Ma Singva, Victor Fernandez, Claire Divoux, Anthony Erraud, plus ceux que j'oublie

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier mes parents pour leur soutien indéfectible et leur confiance en moi. C'est grâce à eux que j'ai pu accomplir ce projet.

Un grand merci à mes professeurs, en particulier à Monsieur le Directeur de l'École, pour leur accueil et leur confiance. Je suis fier d'être membre de votre établissement.

Je n'oublie pas mes amis pour leur présence et leur soutien moral tout au long de ce parcours. C'est avec eux que j'ai passé les meilleurs moments de ces années.

Enfin, un immense merci à Dieu pour sa bonté et sa miséricorde. C'est Lui qui m'a donné la vie et la force de poursuivre jusqu'au bout.

TABLE DES MATIÈRES

Chapitre I INTRODUCTION

Chapitre II RAPPELS DE MAGNÉTOSTATIQUE

<i>II.1 Introduction.</i>	<i>Page 17</i>
<i>II.2 Qu'est-ce qu'un dipôle magnétique ?</i>	<i>Page 17</i>
<i>II.3 Champ créé par un moment magnétique.</i>	<i>Page 18</i>
<i>II.4 Champ magnétique dans la matière aimantée.</i>	<i>Page 20</i>
<i>II.5 Définition des matériaux ferromagnétiques.</i>	<i>Page 21</i>

Chapitre III ÉTUDE THÉORIQUE

<i>III.1 Introduction.</i>	<i>Page 29</i>
<i>III.2 Structure à aimants permanents.</i>	<i>Page 29</i>
<i>III.3 Cylindre et sphère de Halbach/Leupold (1987).</i>	<i>Page 32</i>
<i>III.4 Champ optimal créé par un dipôle.</i>	<i>Page 35</i>
<i>III.5 Champ d'une couronne aimantée.</i>	<i>Page 37</i>
<i>III.6 Champ d'une sphère aimantée.</i>	<i>Page 37</i>
<i>III.7 Optimisation géométrique : Champ d'un ovoïde aimanté.</i>	<i>Page 38</i>
<i>III.8 Comparaison de structures à aimants permanents.</i>	<i>Page 39</i>
<i>III.9 Conclusion.</i>	<i>Page 41</i>

Chapitre IV SIMULATIONS NUMÉRIQUES

<i>IV.1 Introduction.</i>	<i>Page 45</i>
<i>IV.2 Présentation des logiciels.</i>	<i>Page 45</i>
<i>IV.3 Vérification des résultats obtenus.</i>	<i>Page 46</i>
<i>IV.4 Problèmes liés à la structure.</i>	<i>Page 48</i>
IV.4.1 Renversement d'aimantation.	Page 48
IV.4.2 Renforcement d'aimantation.	Page 50
<i>IV.5 Discrétisation de la structure.</i>	<i>Page 51</i>
IV.5.1 Discrétisation de la section de l'ovoïde.	Page 51
IV.5.2 Discrétisation des bagues obtenues.	Page 53
IV.5.3 Optimisation de l'angle d'aimantation des couronnes aimantées.	Page 54

IV.5.4	Affectation de matériaux magnétiques réels.	Page 55
IV.5.5	Optimisation des pièces polaires : Design et matériaux.	Page 57
IV.5.6	Conception des accès dans le plan xy.	Page 59
IV.5.7	Conception de l'accès suivant l'axe z.	Page 63
IV.6	Résultats et caractéristiques de la structure.	Page 67
IV.7	Simulations du montage de la structure.	Page 69
IV.7.1	Interactions entre aimants.	Page 69
IV.7.2	Étude des séquences de montages possibles.	Page 70
IV.7.3	Montage d'une tranche.	Page 71
IV.7.4	Approche des tranches.	Page 80
IV.7.5	Approche des pièces polaires.	Page 82
IV.8	Conclusion des simulations.	Page 83

Chapitre V RÉALISATION DU PROTOTYPE

V.1	Introduction.	Page 87
V.2	Fourniture d'aimants.	Page 88
V.3	Découpe des blocs d'aimants.	Page 89
V.3.1	Moyens de découpe.	Page 89
V.3.2	Principe de l'électroérosion.	Page 89
V.3.3	Présentation de la machine à l'électroérosion.	Page 90
V.3.4	Découpe des aimants.	Page 94
V.4	Vérification des blocs d'aimants.	Page 98
V.4.1	Moyens de contrôle des côtes.	Page 98
V.4.2	Moyens de contrôle des angles.	Page 98
V.4.3	Contrôle de la platitude.	Page 100
V.5	Conclusion sur la découpe des blocs d'aimants.	Page 101
V.6	Coques de maintien.	Page 102
V.6.1	Présentation des coques de maintien mécanique.	Page 102
V.6.2	Vérification de la compatibilité coque-aimants.	Page 104
V.6.3	Vérification de la compatibilité entre les tranches.	Page 104
V.7	Aimantation.	Page 105
V.7.1	Présentation de l'aimantation : principes et moyens	Page 105
V.7.2	Système de maintien des aimants lors de l'aimantation.	Page 105
V.7.3	Méthodologie pour aimanter les pavés.	Page 106
V.8	Vérification de l'aimantation.	Page 107
V.9	Montage individuel d'une tranche de la structure.	Page 109
V.9.1	Assemblage de l'ensemble 1 et montage dans la coque.	Page 109
V.9.2	Assemblage d'une partie de l'ensemble 2.	Page 110
V.9.3	Montage de l'accès blindé.	Page 111
V.9.4	Fin de l'assemblage de l'ensemble 2 dans la coque.	Page 111
V.9.5	Assemblage des sous-ensembles 3.	Page 112
V.9.6	Montage des sous-ensembles 3 dans la coque.	Page 113
V.9.7	Montage des aimants centraux.	Page 114
V.9.8	Serrage des aimants dans la coque.	Page 114
V.9.9	Présentation d'une tranche.	Page 115
V.9.10	Protection d'une tranche.	Page 115

V.10	<i>Approche des tranches de la structure.</i>	Page 116
V.10.1	Présentation du système d'approche des douze tranches.	Page 116
V.10.2	Mise en place de l'ensemble aimants-coque-chape.	Page 117
V.10.3	Approche des tranches.	Page 119
V.10.4	Mise en place des bagues de maintien.	Page 121
V.10.5	Système de maintien des pièces polaires.	Page 122
V.11	<i>Conclusion sur le montage de la structure.</i>	Page 123
V.12	<i>Montage de nouveaux aimants.</i>	Page 123

Chapitre VI MESURES

VI.1	<i>Introduction.</i>	Page 127
VI.2	<i>Mesures de champ : type de sonde, calibrage.</i>	Page 127
VI.3	<i>Mesures de champ sur l'accès.</i>	Page 128
VI.3.1	Mesures de champ avec les pièces polaires longues.	Page 129
VI.3.2	Mesures de champ avec les pièces polaires courtes.	Page 131
VI.3.3	Mesures de champ avec les pièces polaires tubulaires.	Page 132
VI.3.4	Conclusion sur les mesures de champ sur l'accès.	Page 134
VI.4	<i>Mesures de champ au centre : variation de l'entrefer.</i>	Page 135
VI.4.1	Mesures de champ avec les pièces polaires courtes.	Page 135
VI.4.2	Mesures de champ avec les pièces polaires tubulaires.	Page 136
VI.5	<i>Conclusion.</i>	Page 138

Chapitre VII EXPLICATIONS DES DIFFÉRENCES MESURES-SIMULATIONS

VII.1	<i>Introduction.</i>	Page 141
VII.2	<i>Erreurs de mesure.</i>	Page 141
VII.2.1	Mauvais positionnement latéral de la sonde dans l'accès.	Page 141
VII.2.2	Mauvais positionnement vertical de la sonde dans l'accès.	Page 142
VII.3	<i>Erreurs dues à la faisabilité.</i>	Page 143
VII.3.1	Entrefer latéral entre les aimants et les pièces polaires.	Page 143
VII.3.2	Entrefer entre les tranches.	Page 144
VII.4	<i>Erreurs dues aux imperfections des matériaux.</i>	Page 145
VII.4.1	Influence de la saturation du matériau doux.	Page 145
VII.4.2	Variation angulaire des aimants centraux.	Page 147
VII.5	<i>Conclusion : présentation des résultats finaux.</i>	Page 152

Chapitre VIII CONCLUSION

BIBLIOGRAPHIE et PUBLICATIONS

Page 116
Page 117
Page 118
Page 119
Page 120

V.10 - Introduction aux principes de la structure
V.11 - Les principes de la structure
V.12 - Les principes de la structure
V.13 - Les principes de la structure
V.14 - Les principes de la structure

Page 121
Page 122

V.15 - Les principes de la structure
V.16 - Les principes de la structure

Chapitre VI : MESURES

Page 127
Page 128
Page 129
Page 130
Page 131
Page 132

VI.1 - Introduction
VI.2 - Les principes de la mesure
VI.3 - Les principes de la mesure
VI.4 - Les principes de la mesure
VI.5 - Les principes de la mesure
VI.6 - Les principes de la mesure
VI.7 - Les principes de la mesure
VI.8 - Les principes de la mesure
VI.9 - Les principes de la mesure
VI.10 - Les principes de la mesure

Page 133
Page 134
Page 135
Page 136

VI.11 - Les principes de la mesure
VI.12 - Les principes de la mesure
VI.13 - Les principes de la mesure
VI.14 - Les principes de la mesure
VI.15 - Les principes de la mesure
VI.16 - Les principes de la mesure
VI.17 - Les principes de la mesure
VI.18 - Les principes de la mesure
VI.19 - Les principes de la mesure
VI.20 - Les principes de la mesure

Chapitre VII : EXPLICATIONS DES DIFFERENCES MESUREES

Page 137
Page 138
Page 139
Page 140
Page 141
Page 142
Page 143
Page 144
Page 145
Page 146
Page 147
Page 148
Page 149
Page 150

VII.1 - Introduction
VII.2 - Les principes de la mesure
VII.3 - Les principes de la mesure
VII.4 - Les principes de la mesure
VII.5 - Les principes de la mesure
VII.6 - Les principes de la mesure
VII.7 - Les principes de la mesure
VII.8 - Les principes de la mesure
VII.9 - Les principes de la mesure
VII.10 - Les principes de la mesure
VII.11 - Les principes de la mesure
VII.12 - Les principes de la mesure
VII.13 - Les principes de la mesure
VII.14 - Les principes de la mesure
VII.15 - Les principes de la mesure
VII.16 - Les principes de la mesure
VII.17 - Les principes de la mesure
VII.18 - Les principes de la mesure
VII.19 - Les principes de la mesure
VII.20 - Les principes de la mesure

Chapitre VIII : CONCLUSIONS BIBLIOGRAPHIE

Chapitre I
INTRODUCTION

I Introduction.

Depuis de nombreuses années, des champs magnétiques intenses (de l'ordre de 2 Teslas) sont utilisés aussi bien dans des applications industrielles comme le contrôle de plasma, la croissance de silicium etc., que pour des expériences de la Physique fondamentale.

Dans le cadre du projet 'Approches novatrices à la génération de champ magnétiques intenses', financée par la région Rhône-Alpes, en partenariat avec le laboratoire de magnétisme Louis Néel du C.N.R.S. et le fabricant d'aimants Péchiney-Ugimag, nous voulons créer le champ magnétique le plus intense à partir d'aimants permanents. L'utilisation d'aimant élimine les problèmes rencontrés lors de l'utilisation d'une bobine supraconductrice, de consommation d'énergie, refroidissement, cryogénie.

Les travaux réalisés par Halbach et Leupold dans les années 80 ont montré qu'il est théoriquement possible d'atteindre de tels champs avec des configurations d'aimantation non colinéaires. Ce concept a permis depuis une dizaine d'années de développer des sources de champ très homogènes dont l'amplitude reste inférieure à 2 Tesla. L'accent est souvent porté sur l'homogénéité du champ qui peut approcher quelques 10^{-4} dans un volume de quelques cm^3 . L'homogénéité dans ces structures de grands volumes est requise pour des utilisations en imagerie médicale.

Notre but est différent : il consiste à réaliser une source de flux statique à base de matériaux magnétiques pour générer une induction de l'ordre de 4 à 5 Tesla dans un volume de quelques mm^3 sans contraintes d'homogénéité. Il fait appel aux progrès importants réalisés lors de ces dernières années dans les matériaux ferromagnétiques durs qui ont ouvert de nouvelles possibilités dans le domaine de la production de champ intense. L'aspect novateur de ce projet est l'utilisation combinée de matériaux magnétiques à base de terres rares à très fortes aimantation et coercitivité, avec des matériaux doux à très haute induction à saturation.

Nous voulons réaliser une structure compacte et technologiquement réalisable atteignant le champ le plus élevé possible. Notre dispositif est destiné à long terme à l'instrumentation scientifique, ce qui impose une étude d'adaptation de la source pour certaines applications spécifiques.

Des rappels de la théorie du magnétisme, nécessaire à l'étude de tous les systèmes à aimants, seront présentés dans le second chapitre. Cette approche est orientée de manière à bien comprendre le fonctionnement macroscopique des matériaux magnétiques.

Dans le troisième chapitre, nous calculerons le champ d'un dipôle magnétique. Nous verrons les paramètres importants du dipôle pour obtenir le champ le plus intense possible en un point. Nous optimiserons le positionnement spatial des moments pour obtenir une structure théorique. Ensuite, nous comparerons les performances de cette structure avec les sources de flux classiques les plus performantes actuellement.

Le quatrième chapitre est dédié aux simulations numériques. Dans un premier temps, nous allons examiner notre structure théorique, pour prévoir ses défauts et ses limitations. Dans un second temps, nous modifierons cette structure théorique pour la rendre réalisable. Nous verrons alors diverses modifications générales et locales, pour la réalisation mais aussi en vue d'une application scientifique. Une partie importante des simulations a été la caractérisation des forces mises et champs démagnétisants en jeu lors du montage de la structure.

La réalisation du prototype est décrite dans le cinquième chapitre. Nous avons commencé par la découpe des aimants, en expliquant précisément la méthodologie suivie. Les simulations du montage de la structure nous ont permis d'évaluer les limites d'un montage manuel. Nous avons dû concevoir et réaliser diverses pièces mécaniques, non seulement pour maintenir les aimants (coques de maintien), mais aussi pour monter la structure en toute sécurité.

Le sixième chapitre est consacré aux mesures de calibrage du prototype et décrit la méthodologie utilisée.

Les différences entre mesures et simulations sont présentées dans le septième chapitre. Nous essaierons de prendre en compte, au niveau des simulations, les erreurs possibles lors des mesures. Ensuite, nous examinerons les effets des imperfections des matériaux magnétiques utilisés.

Nous finirons ce rapport par un huitième chapitre servant de conclusion, et en proposant des compléments de réalisation et des perspectives d'études.

Chapitre II

RAPPELS DE MAGNÉTOSTATIQUE

II Rappels de magnétostatique.

II.1 Introduction.

Dans cette partie, nous nous attacherons à rappeler les bases de la magnétostatique. Il est très important pour nous, non seulement d'assimiler les principes mathématiques, mais aussi de comprendre les phénomènes physiques.

Dans une première approche, nous définirons le dipôle magnétique et étudierons le champ créé par ce dipôle.

Ensuite, nous verrons comment le champ magnétique créé par un dipôle se propage dans le vide et dans la matière aimantée. Pour finir, nous verrons le comportement macroscopique des matières ferromagnétiques.

II.2 Qu'est-ce qu'un dipôle magnétique ?

Dans un premier temps, nous allons considérer des particules analogues aux charges électriques ponctuelles. Nous supposons qu'elles sont de nature différente et qu'elles sont caractérisées par une 'charge magnétique'. Ces charges, appelées aussi 'masses magnétiques' peuvent prendre des valeurs positives et négatives.

Grâce à ces 'masses magnétiques', on peut définir un dipôle analogue au dipôle électrostatique dans le cadre d'une approche coulombienne (fig II.1a). Une autre façon de représenter ce dipôle consiste en une boucle parcourue par un courant. C'est une approche ampérienne (Fig II.1b).

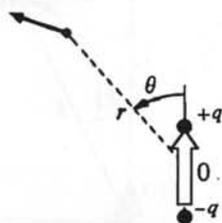


Fig II.1a : Modèle coulombien

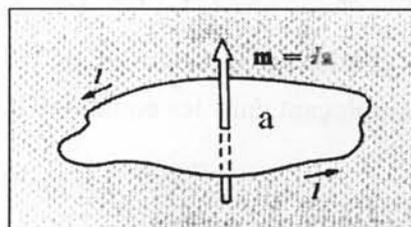


Fig II.1b : Modèle ampérien

Nous allons calculer l'induction créée par cette boucle de courant, qui a pour moment magnétique :

(eq II.1)

$$m = I \cdot a$$

I : Courant dans la boucle.

a : Aire de la boucle.

II.3 Champ créé par un moment magnétique.

Tout le calcul du champ se base sur le potentiel vecteur A . On va considérer un dipôle magnétique de moment m , placé en O et orienté suivant z . Calculons le champ créé par ce moment magnétique au point P de l'espace. À ce point, le potentiel vecteur A répond à :

$$(eq II.2) \quad \vec{A} = \frac{1}{4\pi} \cdot \mu_0 \cdot \frac{\vec{m} \wedge \vec{r}}{r^2}$$

\hat{r} représente un vecteur unitaire qui va du dipôle vers le point P .

Le potentiel vecteur A et l'induction B sont reliés par l'équation aux dérivées partielles suivante:

$$(eq II.3) \quad \vec{B} = \text{rot } \vec{A}$$

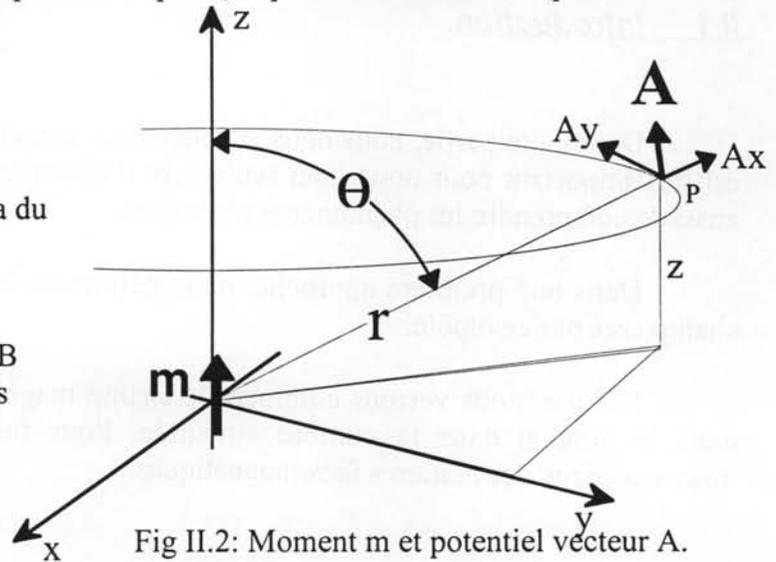


Fig II.2: Moment m et potentiel vecteur A .

Nous pouvons en tirer les composantes du champ dans un repère cartésien:

$$(eqs II.4) \quad \begin{aligned} B_x &= \frac{\partial A_z}{\partial y} - \frac{\partial A_y}{\partial z} = \frac{3 \cdot \mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot m \cdot \frac{x \cdot z}{r^5} \\ B_y &= \frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x} = \frac{3 \cdot \mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot m \cdot \frac{y \cdot z}{r^5} \\ B_z &= \frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y} = \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot m \cdot \frac{(3 \cdot z^2 - r^2)}{r^5} \end{aligned}$$

D'après la figure II.2, le problème est à symétrie de révolution autour de z . On peut aussi simplifier les équations en se plaçant dans le plan xz , $y=0$.

Dans ce plan on a: $\frac{x}{r} = \sin \theta$ $\frac{z}{r} = \cos \theta$

En remplaçant dans les équations II.4, on obtient:

$$(eqs II.5) \quad \begin{aligned} B_x &= \frac{3 \cdot \mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot m \cdot \frac{\sin \theta \cdot \cos \theta}{r^3} \\ B_y &= 0 \\ B_z &= \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot m \cdot \frac{(3 \cdot \cos^2 \theta - 1)}{r^3} \end{aligned}$$

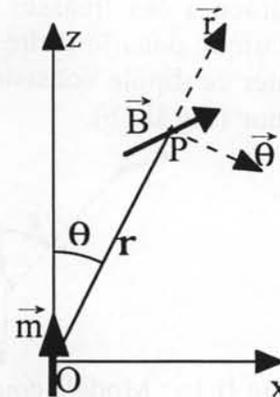


Fig II.3 : Moment m et induction B .

Soit dans un repère sphérique:

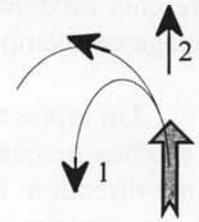
$$(eqs II.6) \quad B_\theta = \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot m \cdot \frac{1}{r^3} \cdot \sin(\theta) \quad B_r = \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot m \cdot \frac{1}{r^3} \cdot 2 \cdot \cos(\theta)$$

$$(eq II.7) \quad B = \sqrt{B_r^2 + B_\theta^2} = \frac{1}{4\pi} \cdot \mu_0 \cdot m \cdot \frac{1}{r^3} \cdot \sqrt{1 + \cos^2\theta}$$

On remarque tout de suite que le module de l'induction créé à distance égale est en fonction de l'angle θ . Il varie du simple au double en fonction de sa position spatiale :

$$(eq II.8) \quad |\vec{B}|_{\theta=0} = \left(\frac{1}{4\pi} \cdot \mu_0 \cdot m \cdot \frac{1}{r^3}\right) \cdot 2$$

$$|\vec{B}|_{\theta=\pi/2} = \left(\frac{1}{4\pi} \cdot \mu_0 \cdot m \cdot \frac{1}{r^3}\right) \cdot 1$$



Pour comparer l'approche ampérienne et l'approche coulombienne, on trace les lignes de champs.

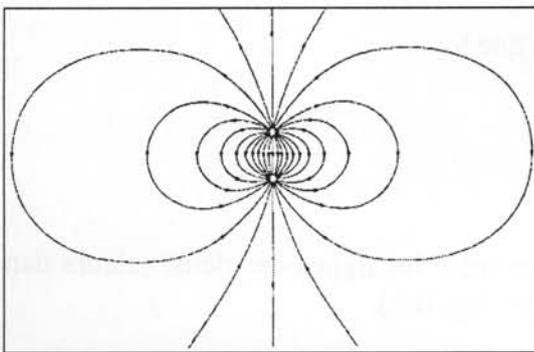


Fig II.4a: Champ dipôle charges.

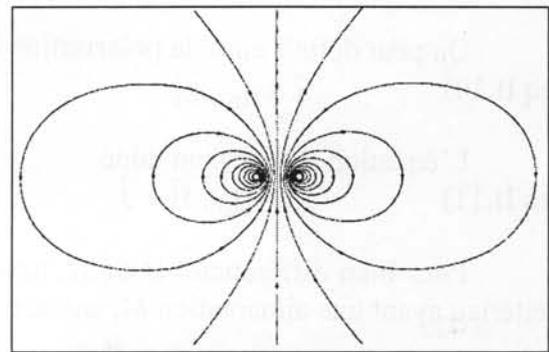


Fig II.4b: Champ dipôle boucle.

Loin du dipole, le champ magnétique d'une petite boucle de courant a la même forme que le champ créé par deux charges séparées. Pour considérer que les deux modèles sont équivalents, il faut calculer le champ pour une distance r très supérieure à la distance a .

La figure II.5 nous montre quelques lignes de champ dans l'espace. On constate bien la symétrie de révolution autour de l'axe z . La zone centrale a été volontairement laissée vierge.

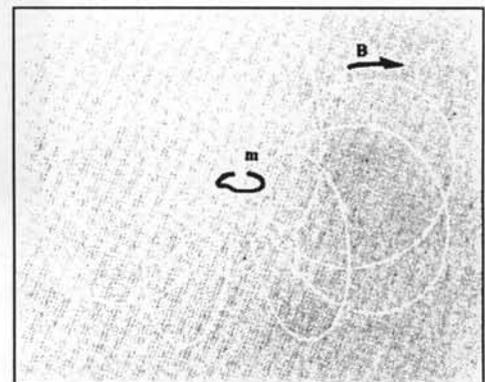


Fig II.5: Ligne de champ 3D.

II.4 Champ magnétique dans la matière aimantée.

Dans cette partie, on a introduit la notion de dipôle magnétique. On a comparé différents modèles et calculé le champ créé par un dipôle. Nous allons voir comment se propage ce champ magnétique dans des milieux magnétiques différents.

Un morceau de matière est 'uniformément aimanté' quand il contient un grand nombre de dipôles magnétiques, distribués uniformément dans le volume et pointant tous dans la même direction. Le vecteur aimantation \vec{M} est le produit du nombre de dipôle par unité de volume par le moment magnétique m de chaque dipôle. Dans un tel milieu, l'équation reliant B à H change car ces deux dernières grandeurs sont toutes deux issues de la distribution d'aimantation. On obtient :

$$(eq II.9) \quad \vec{B} = \mu_0 \cdot (\vec{H} + \vec{M})$$

On peut définir aussi la polarisation \vec{J} telle que :

$$(eq II.10) \quad \vec{J} = \mu_0 \cdot \vec{M}$$

L'équation II.9 devient donc :

$$(eq II.11) \quad \vec{B} = \mu_0 \cdot \vec{H} + \vec{J}$$

Pour bien différencier B de H , nous avons tracé les lignes des deux valeurs dans un matériau ayant une aimantation M , entouré de vide (Fig. II.6).

Ceci est un exemple instructif car on voit tout de suite apparaître l'aimantation M , qui différencie le champ et l'induction dans le matériau. Dans le vide, B et H concordent.

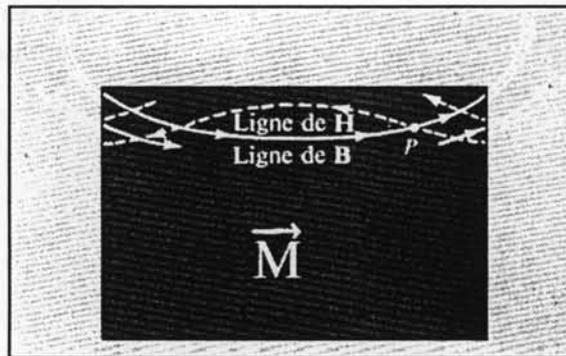


Fig. II.6 : Induction et Champ.

Pour obtenir H en un certain point à l'intérieur de la matière aimantée, on doit ajouter vectoriellement le vecteur M au champ magnétique B/μ_0 . On remarque que le champ s'oppose à l'aimantation qui l'a créé.

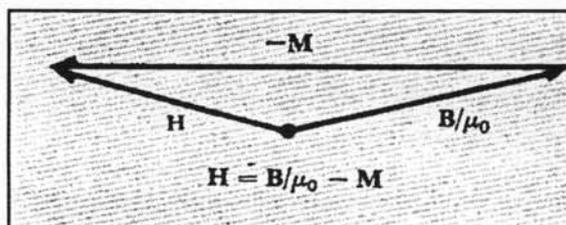


Fig II.7 : Addition vectorielle.

Pour bien comparer les grandeurs, on va tracer dans un cylindre ayant une aimantation M uniforme: - les lignes du champ H .
- les lignes d'induction B .

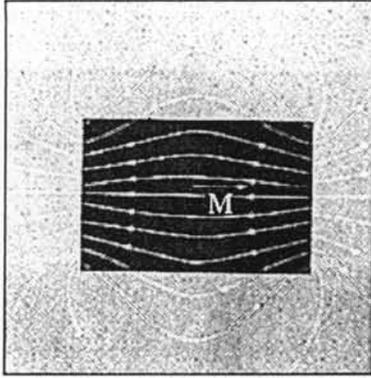


Fig II.8a : Champ magnétique.

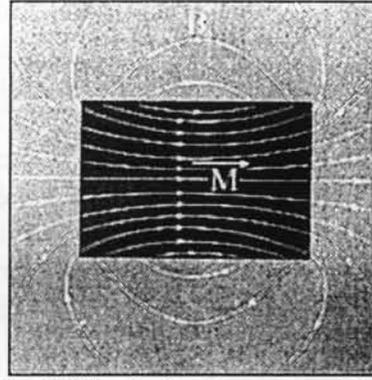


Fig II.8b : Induction magnétique.

À l'extérieur, les lignes de champs se confondent. À l'intérieur, l'induction B est la même que celle d'une couche cylindrique de courant (modèle ampérien). Par contre, le champ électrique magnétique H répond au modèle constitué de deux disques uniformément chargés à chaque bout du cylindre.

La comparaison des deux modèles (coulombien et ampérien) nous a permis de bien différencier B de H . Les équations de la magnétostatique, sous leurs formes locales sont données par :

$$(eqs II.18) \quad \left\{ \begin{array}{l} \operatorname{div} \vec{B} = 0 \\ \operatorname{rot} \vec{H} = \vec{0} \end{array} \right. \quad \text{d'où} \quad \left\{ \begin{array}{l} \vec{B} = \operatorname{rot} \vec{A} \\ \vec{H} = -\nabla \phi \end{array} \right.$$

Le calcul de B et H s'effectue par intégration de ces équations aux dérivées partielles, compte tenu des conditions aux limites. On peut donc en conclure que le potentiel scalaire est lié à une représentation des matériaux magnétiques sous formes de 'masses magnétiques'. Le potentiel vecteur est quand à lui associé à la représentation sous forme de courants ampériens.

II.5 Définition des matériaux ferromagnétiques.

Dans cette partie, nous caractérisons les propriétés intrinsèques de différents types de matériaux ferromagnétiques. Quelques notions essentielles sur les courbes d'aimantation sont d'abord définies.

On a représenté cette courbe dans la figure ci-contre. On l'appelle courbe de première aimantation.

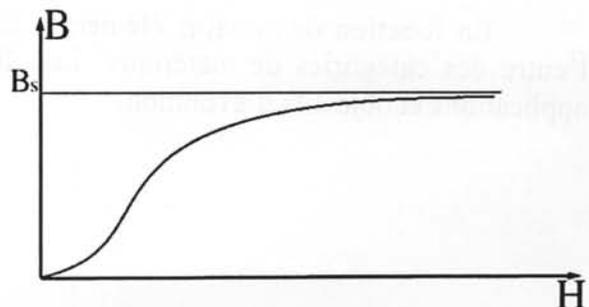


Fig II.9 : Courbe de 1°aimantation.

Si le champ est baissé depuis l'état de saturation ($B=B_s$), l'induction décroît graduellement et pour $H=0$ elle atteint une valeur finie non nulle appelée induction résiduelle B_r . Une remontée de l'aimantation dans le sens négatif aboutit à une saturation négative, après être passé par le point où $B=0$ pour un champ non nul appelé champ coercitif H_c . Ce fonctionnement est représenté sur la figure II.10. Lors des calculs en magnétostatique, on dit pour un matériau que l'on travaille sur un point du cycle hystérésis.

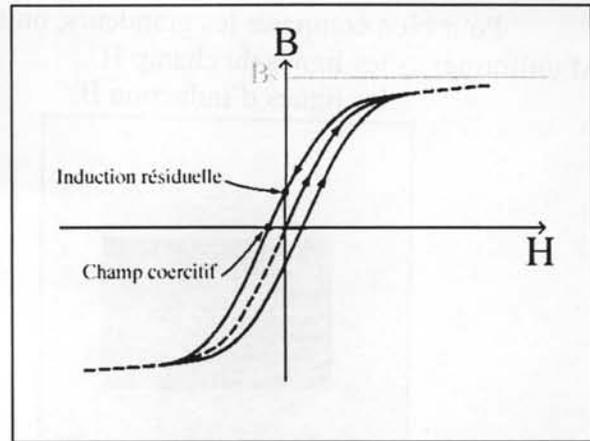


Fig II.10 : Cycle hystérésis.

Mais pour un même matériau, il existe différents cycles. Ceux-ci dépendent de la valeur maximale du champ imposé lors de la première aimantation. Les deux figures ci-dessous nous montrent différents cycles. La première représente schématiquement ce principe, alors que la seconde est une courbe réelle. On appelle cycle majeur le plus grand cycle possible, cycles mineurs les autres.

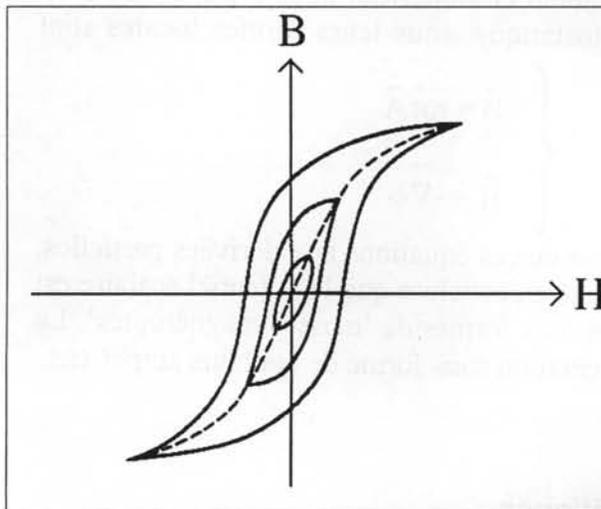


Fig II.11a : Courbe schématique.

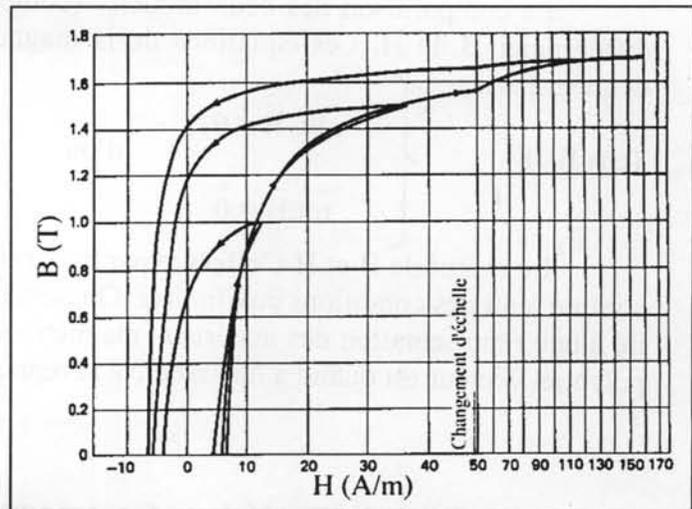


Fig II.11b : Courbe réelle.

On distingue deux sortes de matériaux ferromagnétiques :

- Matériaux doux, H_c faible (<100 A/m), B_s élevé ($>1,7$ T).
- Matériaux durs, H_c élevé (>10 kA/m), B_s faible ($<1,4$ T).

En fonction de certains éléments chimiques ajoutés au fer, on va obtenir l'une ou l'autre des catégories de matériaux. Les différents types de matériaux ont leurs propres applications et objectifs d'évolution.

Intéressons nous d'abord à la classe des **matériaux doux**. Certains matériaux dits ferromagnétiques ont une aimantation permanente en l'absence de champ magnétique extérieur. On va considérer que ces matériaux sont constitués de régions uniformément aimantées plus petites appelées domaines, séparés par des parois.

Par exemple, un morceau de fer non aimanté est en réalité constitué de domaines dans lesquels les moments magnétiques sont tous alignés. D'un domaine à l'autre, les directions d'aimantations sont différentes. En moyenne, le morceau de fer qui est globalement 'non aimanté', ne génère aucun champ magnétique extérieur.

S'il n'y avait aucun domaine, tous les moments seraient orientés de la même manière : on obtiendrait un matériau avec un champ intense s'étendant autour de lui (Fig. II.12a). L'énergie emmagasinée dans ce champ est supérieure à celle nécessaire pour tourner l'alignement des moments voisins. La structure en domaine est donc le résultat d'une minimisation énergétique (Fig.II.12b et II.12c).

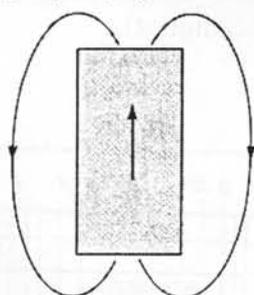


Fig II.12a

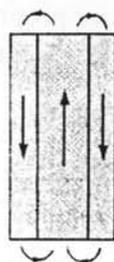


Fig II.12b

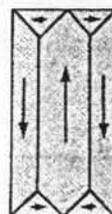


Fig II.12c

Lorsque l'on impose un champ magnétique extérieur à ce morceau de fer, les domaines ayant une aimantation de même orientation sont favorisés énergétiquement par rapport aux autres. Donc un champ appliqué provoque un grand accroissement des domaines privilégiés, d'où une variation totale de l'aimantation, par déplacement de parois.

Pour de faible champ, le déplacement de parois est réversible. Pour des champs plus forts, les parois rencontrent des obstacles (impuretés etc) sur lesquels elles se piègent momentanément (Fig. II.13b). On obtient donc un déplacement irréversible des parois si le champ s'annule alors, le matériau ne retrouvera pas son état initial.

En augmentant le champ, le nombre de domaine se réduit jusqu'à la disparition des parois (Fig. II.13d).

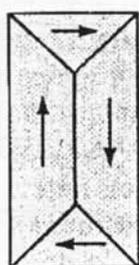


Fig II.13a

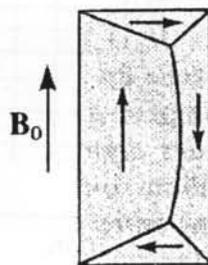


Fig II.13b



Fig II.13c



Fig II.13d

On arrive facilement à prouver que l'aimantation varie en fonction du champ. Ces matériaux n'ont pas une relation $B(H)$ linéaire. Partant du point $B=0, H=0$, si on augmente le champ, on obtient trois phases de variation de l'aimantation dans un matériau doux :

- une croissance lente au début avec réorientation du sens des domaines, l'axe des moments reste encore différent de celui du champ imposé.
- puis une croissance rapide avec déplacements des parois.
- puis une croissance très lente, finissant par plafonner atteignant une valeur B_s (induction à saturation) seul un domaine subsiste.

Les matériaux doux sont couramment utilisés pour transmettre de l'énergie en régime alternatif. Dans ce cas, la largeur du cycle d'hystérésis correspond à des pertes. On cherche donc à réduire la valeur du champ coercitif (H_c). Pour une induction donnée, il faut avoir le champ magnétique le plus petit possible.

Dans cette catégorie, comme matériaux, il existe par exemple :

- Les aciers forgés (proche du fer, bonnes propriétés mécaniques).
- Le Fer-Silicium (H_c plus petit que celui du fer).
- Le Fer-Cobalt ($B_s > 2,3T$).

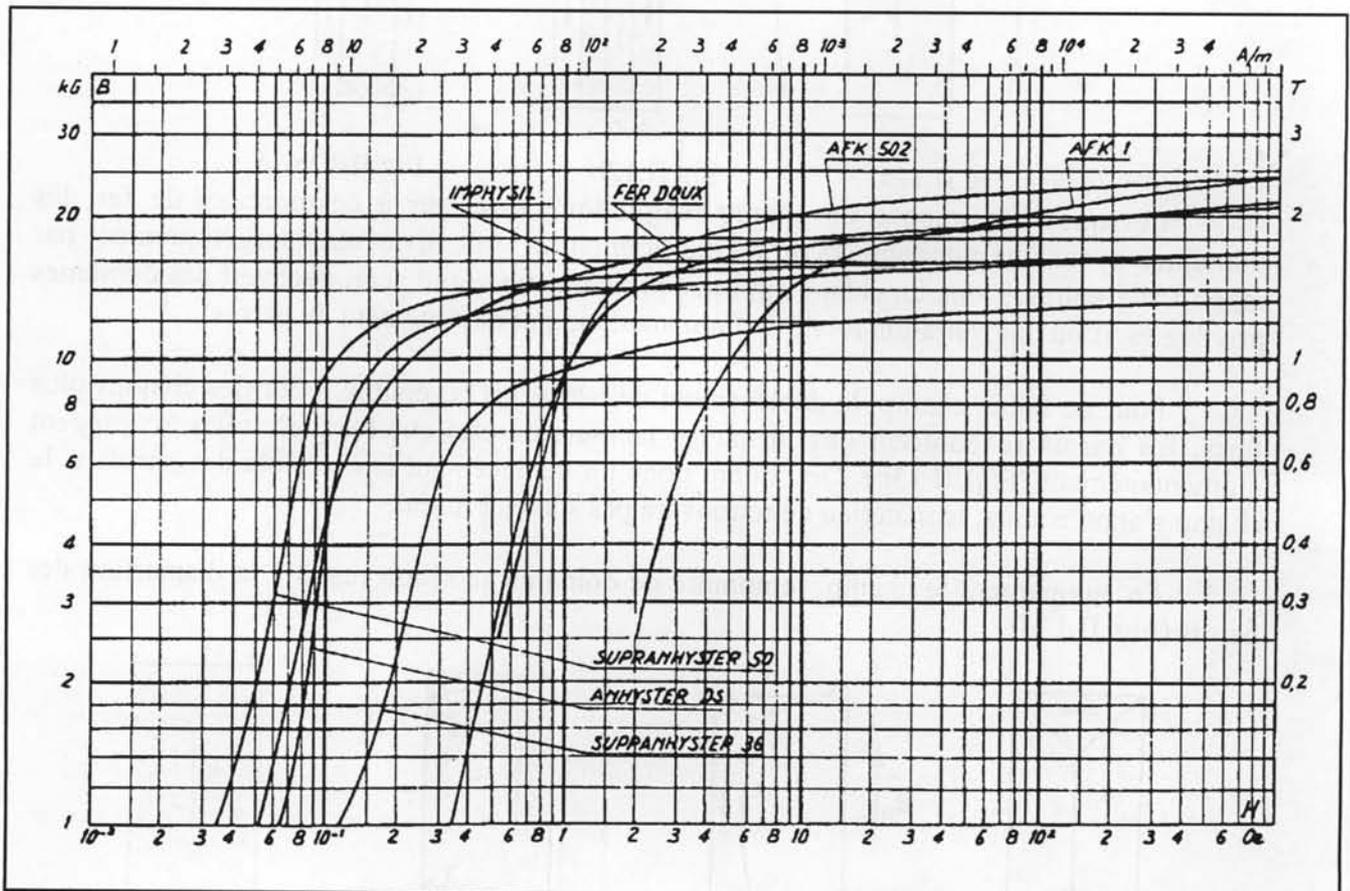


Fig II.14 : Courbe de 1^oaimantation.

Dans la figure II.14, on représente la courbe de première aimantation de différents matériaux doux. Les matériaux AFK502 et AFK1 sont des alliages FeCo à très forte aimantation à saturation.

Dans un **matériau dur**, les énergies prépondérantes sont l'énergie d'échange et l'anisotropie. Dans un état démagnétisé, l'aimantation locale tend à s'aligner avec l'axe d'anisotropie local des grains. L'application d'un champ selon une direction fixe tend à faire tourner l'aimantation selon ce champ. L'allure de la courbe de première aimantation est semblable à celle présentée dans la figure II.9 . Par contre, à la différence des matériaux doux, la croissance vers la saturation n'est pas due aux déplacements s de parois mais provoquée par la réorientation de l'aimantation dans chaque grain.

Les matériaux durs sont couramment appelés aimants permanents. L'aimant permanent est un composant qui, à partir de son énergie potentielle magnétique, acquise une fois pour toutes au moment de son aimantation, fournit un champ magnétique. L'aimant idéal doit subir une aimantation à saturation aussi grande que possible, de manière à obtenir une aimantation rémanente élevée (pour travailler sur son cycle majeur). Mais contrairement au matériau doux qui est facile à aimanter (H_c faible), l'aimant idéal doit être difficile ou même impossible à désaimanter (H_c le plus grand possible). Si le champ imposé est supérieur à H_c , l'aimant commence par se désaimanter, puis s'aimante dans le sens inverse.

On a vu précédemment dans les milieux aimantés qu'il existe un champ démagnétisant. La composante du champ parallèle à l'aimantation J s'oppose à cette même aimantation. Ainsi chaque point représentatif d'un bon fonctionnement du matériau se situe dans le second quadrant du diagramme $J(H)$ (Fig.II.15).

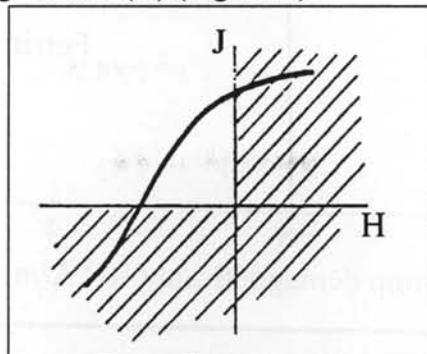


Fig II.15 : Quadrant de travail.

Comme on l'a vu précédemment, les propriétés du fer (ou du cobalt) varient en fonction des métaux qu'on lui associe. Il existe plusieurs composés qui offrent des caractéristiques d'aimants :

- Ferrites ($J_r < 0,4T$, $H_c < 3.10^5 A/m$)
- Alnico ($1T < J_r < 1,3T$, $H_c < 1,2.10^5 A/m$)
- Alliages à base de Terres-rares :
 - Samarium-Cobalt ($J_r < 1T$, $H_c < 1,7.10^6 A/m$)
 - Néodyme-Fer-Bore ($J_r > 1,2T$, $H_c < 2.10^6 A/m$)

La figure ci-contre représente schématiquement les caractéristiques $J(H)$ des familles d'aimants.

Le produit $B.H$ représente l'énergie emmagasinée dans l'aimant. Ceci est une des grandeurs principale lors de la sélection d'un aimant. Généralement, cette valeur est obtenue au coude de la caractéristique, juste avant que l'aimant se désaimante.

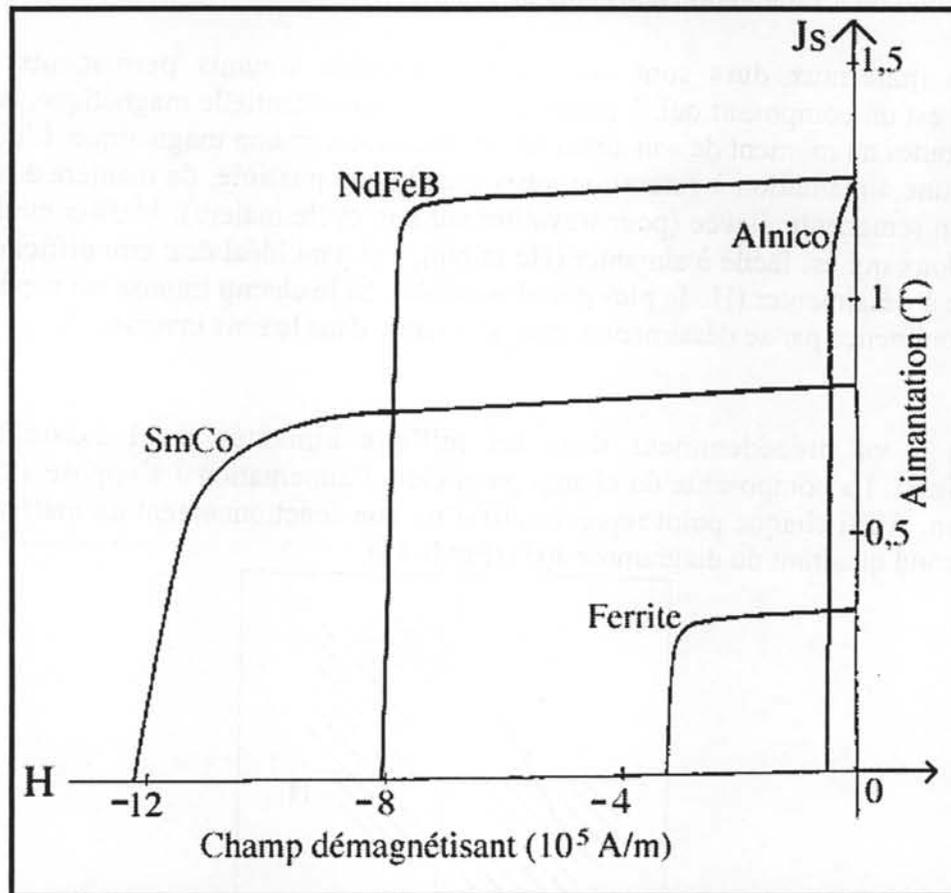


Fig II.16 : Caractéristiques $J(H)$.

Chapitre III
ÉTUDE THÉORIQUE

III Etude théorique.

III.1 Introduction.

Ce chapitre est consacré à la présentation des sources de flux à aimants permanents publiées dans la littérature. Nous détaillerons plus précisément les structures de Leupold/Halbach.

Ensuite, nous présenterons les conditions nécessaires pour obtenir un champ optimal à partir d'une distribution de moments magnétiques. Nous cherchons à placer et à orienter un ensemble de moments de manière à avoir le maximum de contribution au champ magnétique en un point. Cette démarche nous donnera un remplissage spatial théorique optimal qui définira notre structure. On la comparera avec d'autres structures.

III.2 Structure à aimants permanents.

La plupart des structures existantes ont pour but de créer un champ magnétique homogène (Application RMN) [1,11,14].

Aimant Watson (Richmond 1967).

Le principe de cette source de flux est simple : les flux des deux aimants sont canalisés par un matériau doux de perméabilité μ élevée. Cette source de flux est très intéressante car elle produit un champ homogène mais faible dans un espace central important. L'homogénéité de cette source dépend de la perméabilité du matériau doux.

Le plus gros inconvénient, en dehors du faible champ créé, est l'existence de champs de fuite. Dans notre exemple ci-dessous, le champ a une homogénéité de 0,15% et une amplitude de 0,66T, avec des aimants Néodyme-Fer-Bore de 1,35T de rémanence, soit environ $B_r/2$.

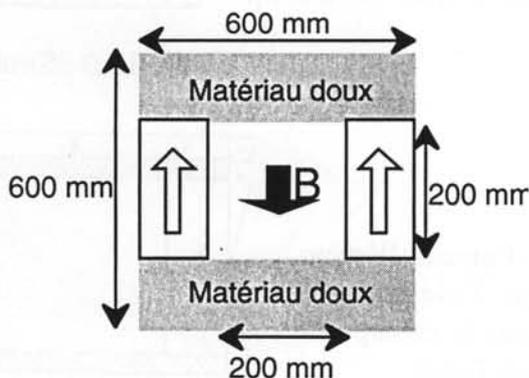


Fig III.1a : Structure.

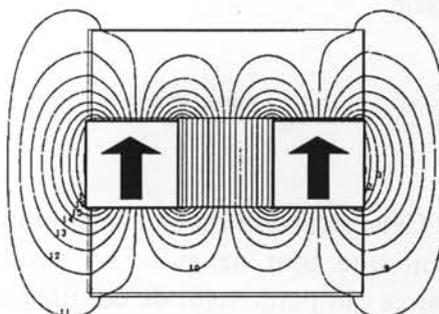


Fig III.1b : Equiflux.

Une variante de cette structure est de donner aux culasses la forme de pièces polaires

afin de concentrer le flux, jusqu'à la saturation du matériau. On obtient donc des champs plus élevés, mais dans un plus petit volume. Cependant, il est impossible d'obtenir des champs très supérieurs à la saturation du matériau doux (2,3 Tesla pour le Fer-Cobalt) car il faut un volume d'aimant important pour créer le champ. Nous ne nous intéresserons donc pas à cette structure d'aimant.

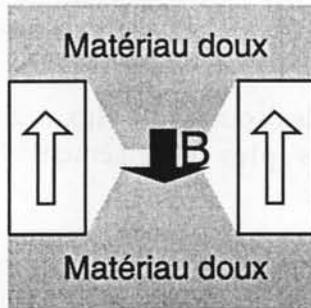


Fig III.2a : Structure.

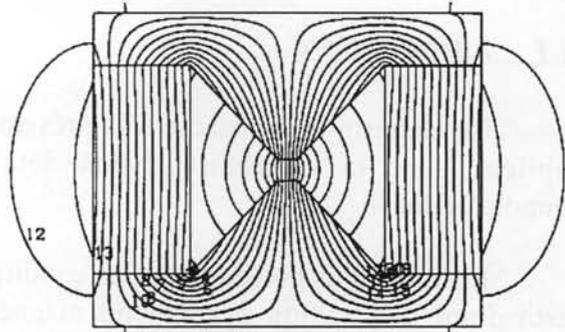


Fig III.2b : Equiflux.

Une troisième variante suivant la même conception consiste à rapprocher les aimants près de la zone centrale. Cette structure théoriquement permet d'atteindre un champ central de près de 4 T, mais en imposant un très fort champ démagnétisant dans les aimants.

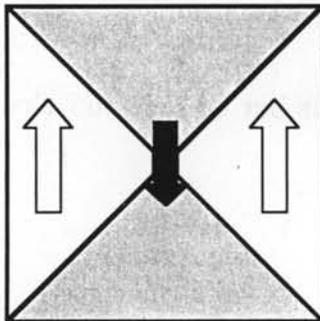


Fig III.2c : Structure.

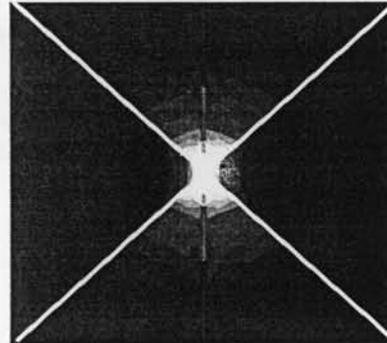


Fig III.2d : champ.

Aimant Molfino (1988) [11].

Il s'agit d'une structure dont le principe est très proche de l'aimant Watson. Mais cette structure corrige un des inconvénients car le flux est presque entièrement confiné en utilisant un matériau doux de forte perméabilité. Par contre, il est nécessaire d'ajuster les pièces polaires pour obtenir un champ homogène.

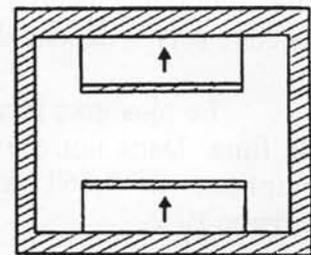


Fig III.3 : Structure

Aimant Potenziani (1986) [12].

Cette structure est une amélioration de l'aimant Watson. On remarque tout de suite un assemblage d'aimants non colinéaires qui permettent de confiner au mieux le champ. Par contre le champ central bien qu'homogène reste faible.

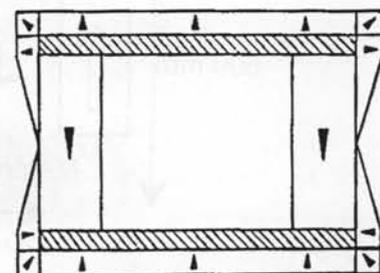


Fig III.4 : Structure.

Aimant annulaire (Marinescu 1983) [9,10].

Il s'agit d'une structure sans pièce polaire. On comprend mieux le principe de cet anneau en représentant les charges magnétiques. Sur la figure III.5a, les charges positives sont en haut, et les charges négatives en bas de l'espace central, d'où un champ central orienté de haut en bas. Le champ magnétique est confiné dans l'espace cylindrique par une culasse en matériau doux.

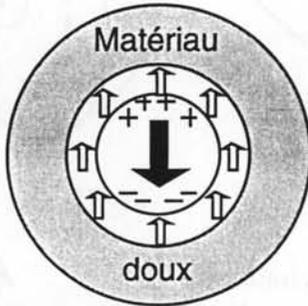


Fig III.5a : Structure.

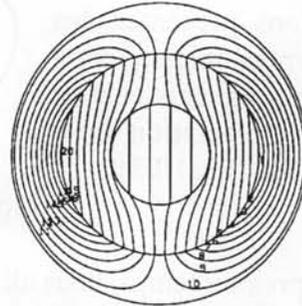


Fig III.5b : Equiflux.

Ce type de source est prévu pour créer un champ homogène plutôt qu'intense. L'homogénéité du champ de cette structure n'est pas influencée par la perméabilité finie du matériau doux car il n'est pas en contact avec la zone centrale. Le champ est relativement faible, car il est limité à la valeur de l'aimantation à saturation de l'aimant.

Aimants prismatiques (Zjilstra 1985) [15].

Cette structure est différente de l'aimant annulaire car elle est réalisée à partir d'aimants à orientation différente. Le champ central est plus élevé mais subit de fortes inhomogénéités aux interfaces air-aimants. Par contre, elle conserve le principe de confinement des flux de fuites.

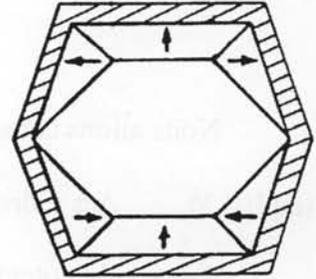


Fig III.6 : Structure.

Aimant Zhou (1986).

Cette structure est très proche de la précédente. La grosse différence est qu'elle présente des pièces polaires, comme dans la structure Molfino. Elle obtient donc une meilleure homogénéité.

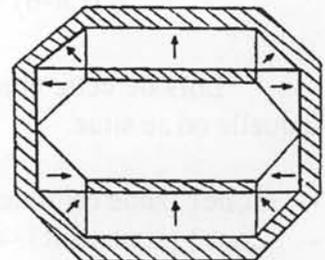


Fig III.7 : Structure.

III.3 Cylindre et sphère de Halbach/Leupold (1987) [2-8].

Les structures que nous venons de présenter sont réalisables technologiquement et reposent sur l'utilisation conjointe de matériaux magnétiquement durs et doux.

Nous allons présenter des structures théoriques uniquement à base d'aimants permanents et dont la distribution d'aimantation varie de manière continue (Fig III.8).

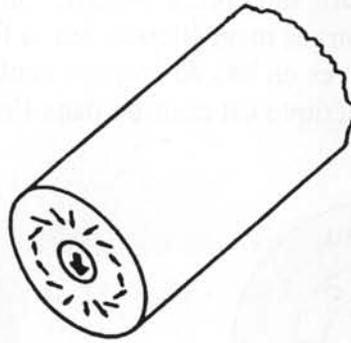


Fig III.8a : Cylindre.

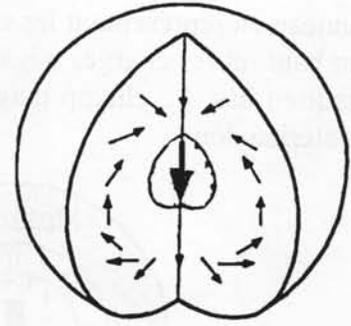


Fig III.8b : Sphère.

Dans un premier temps, nous allons étudier un cylindre de rayon interne $R1$ et de rayon externe $R2$ (Fig III.9). Nous allons voir quel type d'aimantation a cette structure, ainsi que ses propriétés. Sa distribution d'aimantation suit la loi :

$$(eq\ III.1) \quad \vec{M} = M \cdot (\cos\theta \cdot \vec{u}_r + \sin\theta \cdot \vec{u}_\theta)$$

Cette distribution crée une distribution volumique de charge magnétique :

$$(eq\ III.2) \quad \rho = -\text{div } \vec{M} = -2 \cdot M \cdot \frac{\cos\theta}{r}$$

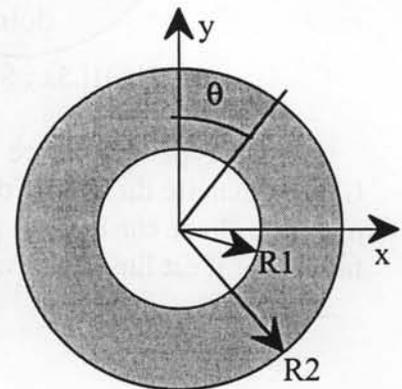


Fig III.9

Nous allons considérer le pseudo potentiel ϕ qui est la solution de :

$$(eq\ III.3) \quad \Delta \phi = \text{div } \vec{M}$$

Ce pseudo potentiel doit respecter les symétries liées à la structure :

$$(eqs\ III.4) \quad \begin{aligned} \phi(r, -\theta) &= \phi(r, \theta) \\ \phi(r, \pi - \theta) &= -\phi(r, \theta) \end{aligned}$$

Lors de cette étude, nous avons trois solutions à trouver en fonction de la zone dans laquelle on se situe.

- Zone1 (zone centrale $r < R1$) : $\phi_1(r, \theta) = a1 \cdot M \cdot r \cdot \cos\theta$
- Zone2 (aimants $R1 < r < R2$) : $\phi_2(r, \theta) = a2 \cdot M \cdot r \cdot \log\left(\frac{r}{a}\right) \cdot \cos\theta + b2 \cdot M \cdot r \cdot \cos\theta$ avec $a > 0$
- Zone3 (zone extérieure $r > R2$) : $\phi_3(r, \theta) = b3 \cdot M \cdot \frac{1}{r} \cdot \cos\theta$

On remarque que la solution du noyau de l'équation III.3 en $\log(r)$ a été éliminée car elle ne respecte pas les propriétés de symétrie que l'on a définies précédemment.

La solution respecte les relations de continuité aux interfaces suivantes:

- en $r=R1$ (Interface zone centrale-aimant) :

Continuité du pseudo-potential : $\phi_1 (R1,\theta) = \phi_2 (R2,\theta)$

Continuité de la composante normale de l'induction d'un milieu à l'autre : $\vec{n} \cdot \vec{B}_1(R1,\theta) = \vec{n} \cdot \vec{B}_2(R1,\theta)$

$$a1.R1.\cos\theta = a2.R1 \log\left(\frac{R1}{a}\right) + b2.R1.\cos\theta$$

et

$$-a1.\cos\theta + a2\left(1 + \log\left(\frac{R1}{a}\right)\right).\cos\theta + b2.\cos\theta = \cos\theta$$

D'où

$$a2 = 1 \quad \text{et} \quad a1-b2 = \log\left(\frac{R1}{a}\right)$$

- en $r=R2$ (Interface aimant-zone extérieure)

Suivant le même raisonnement, on obtient :

$$\frac{b3}{R2} \cdot \cos\theta = R2 \cdot \log\left(\frac{R2}{a}\right) \cdot \cos\theta + b2.R2.\cos\theta$$

et

$$b2 \cdot \cos\theta \left(1 + \log\left(\frac{R2}{a}\right)\right) \cdot \cos\theta + \frac{b3}{R2^2} \cdot \cos\theta = \cos\theta$$

D'où $b3 = 0$ et $b2 = -\log\left(\frac{R2}{a}\right)$ donc $a1 = -\log\left(\frac{R1}{R2}\right)$

En remplaçant les coefficients, on obtient :

- Dans la zone 1 (zone centrale $r < R1$) : $\phi_1 (r,\theta) = M \cdot \log\left(\frac{R1}{R2}\right) \cdot r.\cos\theta = M \cdot \log\left(\frac{R1}{R2}\right) \cdot x$

D'où

(eq III.5) $H_x^1 = -\partial_x \cdot \phi_1 = M \cdot \log\left(\frac{R2}{R1}\right)$

On obtient donc un champ homogène dans toute la cavité centrale. De plus ce champ est variable et est fonction du rapport des rayons.

- Dans la zone 2 (aimants $R1 < r < R2$) : $\phi_2 (r,\theta) = M.r.\log\left(\frac{r}{a}\right) \cdot \cos\theta - M.r.\log\left(\frac{R2}{a}\right) \cdot \cos\theta$

D'où $\phi_2 (r,\theta) = M.r.\log\left(\frac{r}{R2}\right) \cdot \cos\theta$

(eqs III.6)

$$H_r^2 = -\frac{\partial\phi_2}{\partial r} = -M \cdot \left(1 + \log\left(\frac{r}{R2}\right)\right) \cdot \cos\theta$$

$$H_\theta^2 = -\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial\phi_2}{\partial\theta} = -M \cdot \log\left(\frac{r}{R2}\right) \cdot \sin\theta$$

- Dans la zone 3 (zone extérieure $r > R_2$) : $\phi_3(r, \theta) = 0$ d'où $H^3 = 0$

Le champ à l'extérieur de la structure est nul. Il n'y a donc pas de flux de fuite.

En conclusion cette structure génère un champ homogène au centre de la structure et son amplitude dépend du rapport des rayons. De plus, le cylindre ne produit pas de flux de fuite.

Pour la sphère de Halbach, la distribution d'aimantation dans un plan de coupe vertical est la même que celle du cylindre. Les caractéristiques des deux structures sont résumées ci-dessous :

	Cylindre	Sphère
Distribution volumique	$\text{div } \vec{M} = 2.M \cdot \frac{\cos\theta}{r}$	$\text{div } \vec{M} = 4.M \cdot \frac{\cos\theta}{r}$
$\Delta\phi = \text{div } \vec{M}$	$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot \frac{\partial\phi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2\phi}{\partial\theta^2} = 2.M \cdot \frac{\cos\theta}{r}$	$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \cdot \frac{\partial\phi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \cdot \sin\theta} \cdot \frac{\partial}{\partial\theta} \left(\sin\theta \cdot \frac{\partial\phi}{\partial\theta} \right) = 4.M \cdot \frac{\cos\theta}{r}$
Solution particulière respectant les symétries	$\phi(r, \theta) = M \cdot r \cdot \log(r) \cdot \cos\theta$	$\phi(r, \theta) = \frac{4}{3} \cdot M \cdot r \cdot \log(r) \cdot \cos\theta$

On remarque que les deux solutions sont identiques à un facteur 4/3 près. Pour obtenir la distribution du champ H dans la sphère, il suffit de reprendre les solutions obtenues précédemment dans le cylindre et de les multiplier par le facteur 4/3.

Le champ central dans la cavité vaut donc :

(eq III.7)
$$\frac{4}{3} \cdot M \cdot \log\left(\frac{R_2}{R_1}\right)$$

Ce principe permet d'obtenir des champs très grands, car il n'est limité théoriquement que par le rapport des rayons externe et interne. Si on a $R_2 > 2,8.R_1$ alors le champ créé dans la cavité est supérieur à l'aimantation rémanente de l'aimant: $B > B_r$!!

Ces deux structures sont les plus intéressantes au niveau de la valeur du champ obtenu au centre de la structure.

La sphère semble plus favorable que le cylindre pour produire un champ important. Toutefois il subsiste deux inconvénients :

- Réalisation plus difficile.
- Accès à la cavité impossible.

III.4 Champ optimal créé par un dipôle.

Notre approche est différente de celle de Halbach car nous cherchons à maximiser le champ créé par un dipôle magnétique en un point. Dans le chapitre II, nous avons calculé le champ créé par un dipôle placé en O.

Maintenant, calculons le champ au point O créé par un moment magnétique situé en un point P en utilisant les relations réciproques des équations II.12 . On en déduit les expressions du champ suivantes :

$$B_{-r} = -\frac{\mu_0}{4.\pi} . m . \frac{1}{r^3} . 2.\cos(\varphi)$$

(eq III.8)

$$B_{-\theta} = \frac{\mu_0}{4.\pi} . m . \frac{1}{r^3} . \sin(\varphi)$$

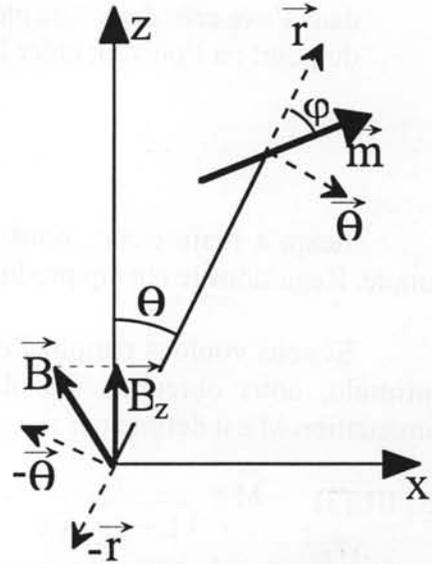


Fig III.10 Champ d'un dipôle.

Cette expression est valable dans un repère sphérique. Dans un repère cartésien, on a :

$$B_x = \frac{\mu_0}{4.\pi} . m . \frac{1}{r^3} . (2.\cos\theta.\sin\varphi + \sin\theta.\cos\varphi)$$

(eq III.9)

$$B_z = \frac{\mu_0}{4.\pi} . m . \frac{1}{r^3} . (2.\cos\theta.\cos\varphi + \sin\theta.\sin\varphi)$$

Pour obtenir la contribution maximale, au point O, du dipôle placé au point P en fonction de son orientation φ , il faut résoudre : $\frac{d B_z}{d \varphi} = 0$

$$(eq III.10) \quad \frac{d B_z}{d \varphi} = \frac{\mu_0}{4.\pi} . m . \frac{1}{r^3} . (\cos\varphi.\sin\theta - 2.\sin\varphi.\cos\theta)$$

En définitif, l'orientation optimale φ du moment dépend uniquement de sa position spatiale angulaire θ , mais pas de la distance :

$$(eq III.11) \quad \tan \varphi = \frac{1}{2} . \tan \theta$$

L'expression du champ suivant z devient donc dans ce cas :

$$(eq III.12) \quad (B_z)_{\max} = \frac{\mu_0}{4.\pi} . m . \frac{1}{r^3} . \sqrt{(1 + 3.\cos^2\theta)}$$

Examinons plus en détail l'influence des paramètres intervenant dans l'expression précédente :

- m : L'amplitude du champ est d'autant plus importante que le moment est grand.
- r : Plus le moment est près du point O, plus sa contribution est grande.
(Un moment placé trois fois plus loin n'aura qu'une influence d'environ $3\% = 1/3^3$).
- θ : θ et φ sont liés. A distance et aimantation égales, un moment situé dans l'axe crée deux fois plus de champ qu'un moment situé à côté du point où l'on veut créer le champ (fig III.11).

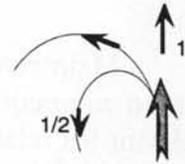


Fig III.11

Jusqu'à maintenant, nous avons traité le champ magnétique créé par un moment unique. Regardons le champ produit par une distribution volumique de moments.

Si nous voulons remplir l'espace de moments magnétiques orientés et placés de façon optimale, nous obtenons une distribution dont l'orientation varie continûment. Cette aimantation M est définie par :

$$(eq\ III.13) \quad \vec{M} = \frac{m}{\sqrt{1 + 3 \cdot \cos^2 \theta}} \cdot (2 \cdot \cos \theta \cdot \vec{u}_r + \sin \theta \cdot \vec{u}_\theta)$$

Le facteur $\frac{1}{\sqrt{1 + 3 \cdot \cos^2 \theta}}$ sert à normaliser l'aimantation.

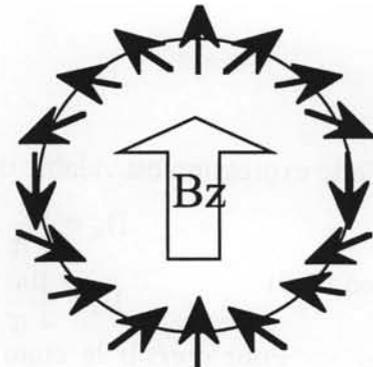


Fig III.12 : Dipôles optimaux.

Contrairement à ce que l'on pourrait croire, l'orientation du moment pour laquelle B_z est maximal produit également un champ selon Ox . L'annulation de la composante B_x , impliquerait: $2 \cdot \cos \theta \cdot \sin \varphi + \sin \theta \cdot \cos \varphi = 0$

$$\tan \varphi = -\frac{1}{2} \cdot \tan \theta$$

Grâce à la symétrie plane par rapport à l'axe z , nous pouvons placer deux moments magnétiques (M_1 et M_2) pour que la composante B_x totale s'annule. De cette manière, seule subsiste la composante B_z .

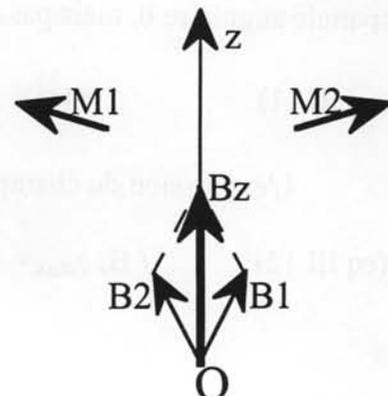


Fig III.13 : Somme de dipôles.

III.5 Champ d'une couronne aimantée.

Dans cette section, nous examinons le champ créé par une couronne d'aimantation M optimale (eq III.6).

Le champ élémentaire créé par un élément de volume $d\tau$ s'écrit :

$$(eq III.14) \quad \frac{dB_z}{d\tau} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot m \cdot \frac{1}{r^3} \cdot \sqrt{3 \cdot \cos^2\theta + 1}$$

ou encore:

$$(eq III.15) \quad d^2B_z = \frac{\mu_0 \cdot M}{2\pi} \cdot \frac{dr}{r} \cdot \sin\theta \cdot \sqrt{3 \cdot \cos^2\theta + 1} d\theta$$

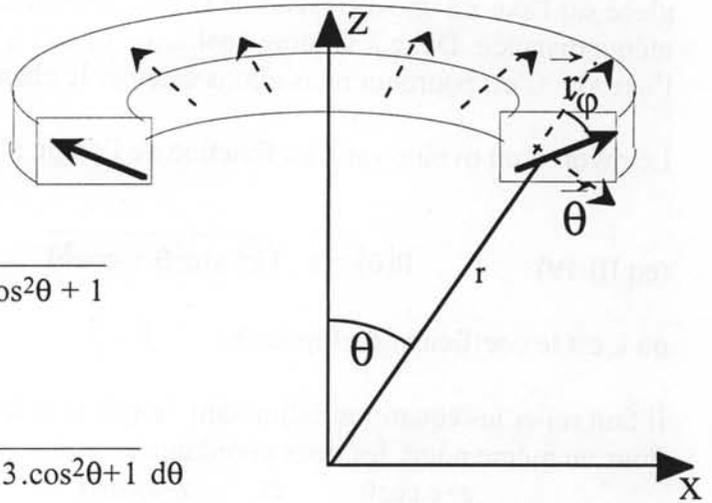


Fig III.14 : Couronne aimantée.

III.6 Champ d'une sphère aimantée.

À l'aide du calcul précédent, et avec une double intégration, nous pouvons calculer le champ créé cette fois-ci par une sphère de rayon externe R_{ext} et de rayon interne R_{int} . Dans cette sphère, l'aimantation M varie en :

$$(eq III.16) \quad \vec{M} = \frac{m}{\sqrt{1 + 3 \cdot \cos^2\theta}} \cdot (2 \cdot \cos\theta \cdot \vec{u}_r + \sin\theta \cdot \vec{u}_\theta)$$

On pose : $u = \cos\theta$ donc l'équation III. 8 devient :

$$(eq III.17) \quad B_z = \frac{\mu_0}{2} \cdot m \cdot \log\left(\frac{R_2}{R_1}\right) \cdot \int_{-1}^1 \sqrt{3 \cdot u^2 + 1} du$$

d'où

$$(eq III.18) \quad B_z = 1,38 \cdot \mu_0 \cdot M \cdot \log\left(\frac{R_2}{R_1}\right)$$

On constate donc que le champ créé par une sphère à aimantation optimisée créé un champ légèrement plus intense que la sphère de Leupold/Halbach ($1,38 > 4/3$), ce qui représente une augmentation de 4% de l'induction centrale.

III.7 Optimisation géométrique : Champ d'un ovoïde aimanté.

Le remplissage de l'espace en forme de sphère n'est pas le meilleur. En effet, un dipôle placé sur l'axe z à une distance r de O produit plus de champ qu'un dipôle placé sur l'axe x à la même distance. Donc à volume égal, on a intérêt à rassembler la matière aimantée autour de l'axe Oz. C'est pourquoi nous allons calculer le champ créé par un ovoïde.

Le rayon d'un ovoïde varie en fonction de l'angle :

$$(eq III.19) \quad R(\theta) = c \cdot \sqrt{k^2 \cdot \sin^2 \theta + \cos^2 \theta}$$

où k est le coefficient d'ellipticité : $k = \frac{a}{c}$

Il faut relier les équations définissant l'angle α et le paramètre θ .

Pour un même point, les deux coordonnées sont :

$$\begin{aligned} z &= c \cdot \cos \theta & \text{et} & & z &= r \cdot \cos \alpha \\ \rho &= a \cdot \sin \theta & \text{et} & & \rho &= r \cdot \sin \alpha \end{aligned} \quad \text{donc} \quad \text{tg} \theta = 1/k \cdot \text{tg} \alpha$$

Dans ce cas, le rayon devient : $R(\alpha) = \frac{c}{\sqrt{1 + \frac{1}{k^2} \cdot \text{tg}^2 \alpha}} \cdot \sqrt{1 + \text{tg}^2 \alpha}$

Pour pouvoir comparer les deux modèles sphère et ovoïde, nous imposons un rayon C_0 de manière à avoir le même volume de matériau magnétique mis en œuvre.

$$(eqs III.20) \quad \frac{4}{3} \cdot c_0^3 = \frac{4}{3} \cdot a^2 c \quad \text{donc} \quad c_0^3 = k^2 \cdot c^3$$

De même que pour la sphère, nous intégrons la formule de la couronne aimantée pour en déduire le champ créé. En utilisant une première intégration, nous obtenons :

$$(eq III.21) \quad B_z = \frac{\mu_0 \cdot m}{2} \cdot \int_0^\pi \sin \alpha \cdot \sqrt{3 \cdot \cos^2 \alpha + 1} \cdot \log \left(\frac{R(\alpha)}{R_1} \right) d\alpha$$

En posant $u = \cos \alpha$, nous obtenons :

$$(eq III.22) \quad B_z = \frac{\mu_0 \cdot m}{2} \cdot \int_{-1}^1 \sqrt{3 \cdot u^2 + 1} \cdot \left[\log \left(\frac{c_0}{R_{int}} \right) + \frac{1}{3} \cdot \log(k) - \frac{1}{2} \cdot \log(1 + (k^2 - 1) \cdot u^2) \right] du$$

Nous voulons calculer le gain de l'ovoïde par rapport à une sphère de rayon extérieur C_0 .

$$(eq III.23) \quad \Delta_{B_z} = B_z^k - B_z^{k=1} = \frac{\mu_0 \cdot m}{2} \cdot \int_{-1}^1 \sqrt{3 \cdot u^2 + 1} \cdot \left[\frac{1}{3} \cdot \log(k) - \frac{1}{2} \cdot \log(1 + (k^2 - 1) \cdot u^2) \right] du$$

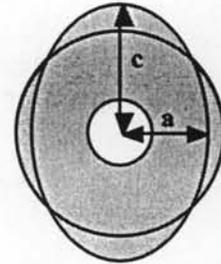


Fig III.15 : Ovoïde.

Par intégration numérique, nous obtenons la courbe suivante :

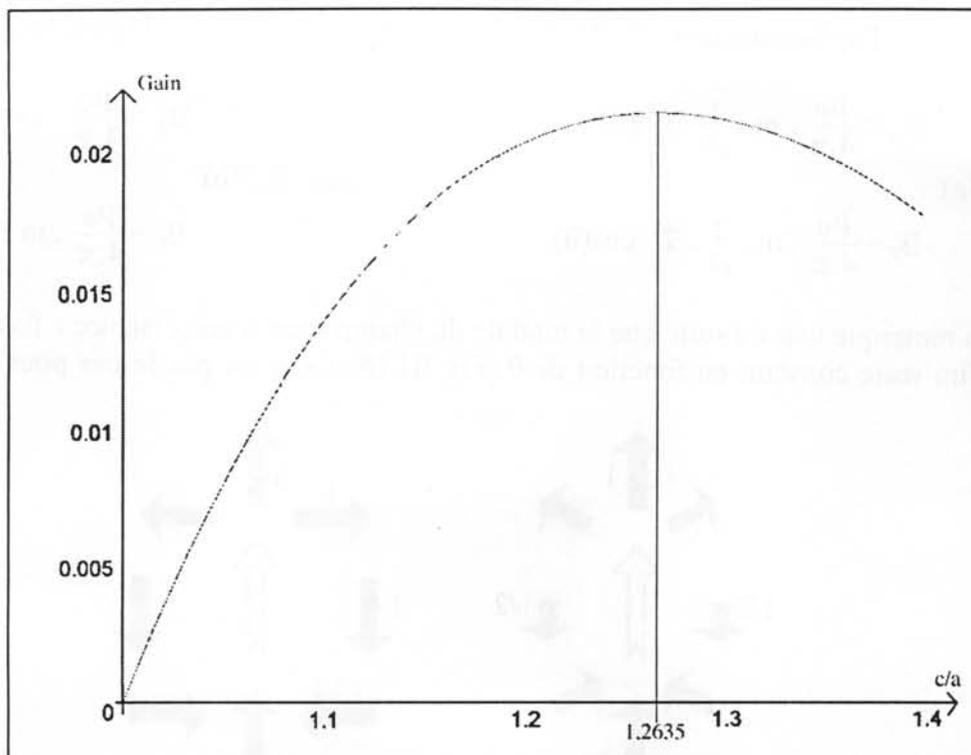


Fig III.16 : Rapport c/a optimal.

Grâce à cette courbe, nous pouvons définir tout de suite le rapport k optimal définissant un ovoïde ayant une configuration d'aimantation optimale. Le champ central augmente de 2%.

Nous allons comparer les performances de notre structure avec celles obtenues par la sphère de Leupold/Halbach. Une approche complémentaire de M. Guy Aubert est proposée en annexe 1.

III.8 Comparaison de structures à aimants permanents.

En résumé, notre approche repose sur la notion de dipôle ponctuel (fig III.17a) tandis que celle de Halbach s'appuie sur la notion du dipôle infini (fig III.17b). On peut définir un dipôle infini par une distribution linéique de moments suivant l'axe de la profondeur (Oy sur la fig III.17b).

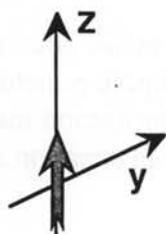


Fig III.17a : Dipôle ponctuel.

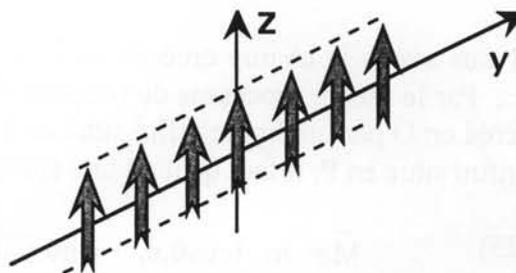


Fig III.17b : Dipôle infini.

Champ créé :

Dipôle ponctuel :

$$B_{\theta} = \frac{\mu_0}{4.\pi} . m . \frac{1}{r^3} . \sin(\theta)$$

(eqs III.24a)

$$B_r = \frac{\mu_0}{4.\pi} . m . \frac{1}{r^3} . 2 . \cos(\theta)$$

Dipôle infini

$$B_{\theta} = \frac{\mu_0}{4.\pi} . m . \frac{1}{r^3} . \sin(\theta)$$

(eqs III.24b)

$$B_r = \frac{\mu_0}{4.\pi} . m . \frac{1}{r^3} . \cos(\theta)$$

On remarque tout de suite que le module du champ créé, à une distance r fixée, par un dipôle infini reste constant en fonction de θ (Fig III.18) Ce n'est pas le cas pour le dipôle ponctuel.

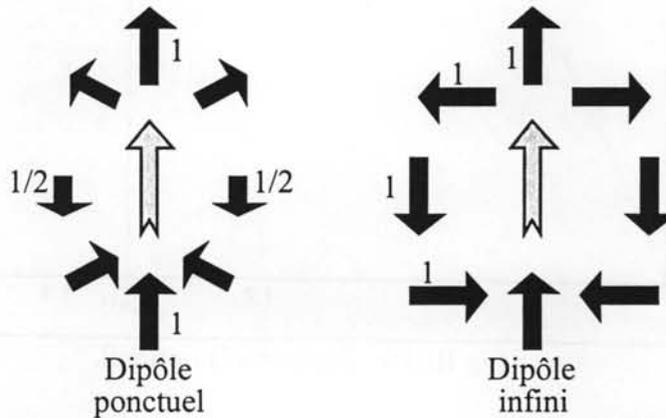


Fig III.18 : Variation de l'induction autour d'un dipôle ponctuel et d'un dipôle infini.

Pour le dipôle infini, le champ varie en θ^{-2} . Son orientation tourne deux fois plus vite que l'angle polaire θ . Autrement dit, en un point (r, θ) , le champ est incliné de 2θ par rapport à Oz (Fig III.19b). Pour le dipôle ponctuel, les angles θ et φ sont différents (Fig III.19a).

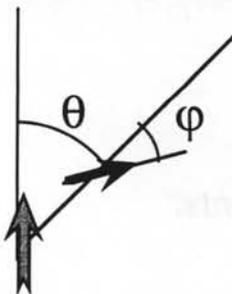


Fig III.19a : Dipôle ponctuel.

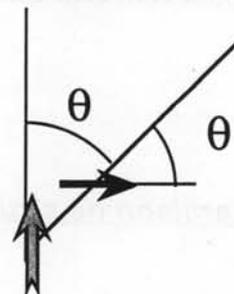


Fig III.19b : Dipôle infini.

Nous avons le champ créé en un point P par un dipôle infini situé en O en orienté suivant z . Par le même processus de réciprocité utilisé pour un dipôle ponctuel, on obtient le champ créé en O par un dipôle infini situé en P. Pour avoir la contribution maximale en O du dipôle infini situé en P, il faut qu'il ait une aimantation répondant à l'équation suivante :

$$(eq III.25) \quad \vec{M} = m . (\cos\theta . \vec{u}_r + \sin\theta . \vec{u}_{\theta})$$

Pour comparer les différents modèles, nous avons utilisé :

- une sphère de Halbach (d'aimantation $\cos\theta.\vec{u}_r + \sin\theta.\vec{u}_\theta$).
- une sphère à aimantation optimisée ($2.\cos\theta.\vec{u}_r + \sin\theta.\vec{u}_\theta$).
- un ovoïde à aimantation optimisée ($2.\cos\theta.\vec{u}_r + \sin\theta.\vec{u}_\theta$).

Les dimensions sont:

$$\begin{array}{llll} R1 = 10 \text{ mm} & , & R2 = 100 \text{ mm} & \text{pour les sphères.} \\ R1 = 10 \text{ mm} & , & a = 92 \text{ mm} & , \quad c = 117 \text{ mm} \quad \text{pour l'ovoïde.} \end{array}$$

Les résultats théoriques sont:

$$\begin{array}{ll} B_z = 3,072 \cdot \mu_0 \cdot M & \text{pour la sphère aimantée en } \cos\theta.\vec{u}_r + \sin\theta.\vec{u}_\theta \\ B_z = 3,179 \cdot \mu_0 \cdot M & \text{pour la sphère aimantée en } 2.\cos\theta.\vec{u}_r + \sin\theta.\vec{u}_\theta \\ B_z = 3,231 \cdot \mu_0 \cdot M & \text{pour l'ovoïde aimanté en } 2.\cos\theta.\vec{u}_r + \sin\theta.\vec{u}_\theta \end{array}$$

Comme nous cherchons à avoir le champ le plus intense possible, c'est donc vers une structure ovoïde que nous allons construire car on obtient un champ supérieur de 5% à celui d'une sphère de Leupold/Halbach, pour un même volume de matériau magnétique utilisé.

Par contre, le champ obtenu par l'ovoïde n'est pas homogène. De plus, l'aimantation de la sphère de Halbach confine le champ à l'intérieur de la sphère d'où un flux de fuite nul. Tandis que l'ovoïde, de par sa géométrie et son aimantation, présente de légers flux de fuites.

III.9 Conclusion.

Dans cette partie, nous avons défini un modèle de source de flux optimisée. Son aimantation et sa géométrie ont été choisies de manière à obtenir le champ magnétique le plus intense, tout en utilisant le moins de matériau possible.

Nous avons comparé notre structure théorique avec une autre famille de structure : les cylindre et sphère de Leupold/Halbach . Ces deux structures sont très proches dans le principe car elle optimisent le positionnement et l'orientation d'un dipôle infini. Par ce raisonnement, ces deux types de structures obtiennent une aimantation de la même forme.

En s'appuyant sur une approche dipôle ponctuel, nous avons obtenu une distribution d'aimantation différente permettant de réaliser un gain de l'ordre de 3% en champ. L'optimisation de la géométrie de notre dispositif nous a permis encore de gagner 2%.

Ceci reste une approche théorique. Nous allons passer de cet ovoïde théorique à une structure réalisable. Pour ceci, nous allons simuler numériquement un modèle réalisable en vue de la réalisation d'un prototype.

It is apparent that the number of molecules is not constant, and varies with the pressure and temperature. The number of molecules is proportional to the pressure and inversely proportional to the temperature.

Let us suppose that

$$N = \frac{PV}{kT}$$

Let us suppose that

$$N = \frac{PV}{kT}$$
$$N = \frac{PV}{kT}$$
$$N = \frac{PV}{kT}$$

Let us suppose that the number of molecules is not constant, and varies with the pressure and temperature. The number of molecules is proportional to the pressure and inversely proportional to the temperature.

Let us suppose that the number of molecules is not constant, and varies with the pressure and temperature. The number of molecules is proportional to the pressure and inversely proportional to the temperature.

Let us suppose that

Let us suppose that the number of molecules is not constant, and varies with the pressure and temperature. The number of molecules is proportional to the pressure and inversely proportional to the temperature.

Let us suppose that the number of molecules is not constant, and varies with the pressure and temperature. The number of molecules is proportional to the pressure and inversely proportional to the temperature.

Let us suppose that the number of molecules is not constant, and varies with the pressure and temperature. The number of molecules is proportional to the pressure and inversely proportional to the temperature.

Let us suppose that the number of molecules is not constant, and varies with the pressure and temperature. The number of molecules is proportional to the pressure and inversely proportional to the temperature.

Chapitre IV
SIMULATIONS NUMÉRIQUES

IV Simulations numériques.

IV.1 Introduction.

Dans cette partie, nous allons étudier la faisabilité d'un prototype de source de flux à aimants permanents, basé sur le principe du dipôle ponctuel. Cette étude commencera par une vérification numérique des modèles comparés précédemment.

Ensuite, nous discrétiserons la structure théorique de manière à la rendre réalisable. Nous verrons quelles sont ses performances, ses problèmes, les solutions et les optimisations géométriques locales apportées.

Puis nous verrons la séquence choisie pour le montage de la structure. Nous vérifierons que les aimants ne se désaimantent pas, lors de l'approche. Nous calculerons les forces entre les aimants.

IV.2 Présentation des logiciels.

Pour simuler toutes les structures, nous disposons de trois logiciels développés au LEG :

- Flux2D et Flux3D [16] sont des logiciels de calcul de champs électromagnétiques commercialisés par Cedrat Recherche. Ils utilisent la méthode des éléments finis. Cette méthode est un outil très performant de conception assistée par ordinateur. Elle permet de résoudre des équations aux dérivées partielles qui n'ont pas de solutions analytiquement simples. Cette méthode ramène le problème physique à une équation matricielle où l'inconnue est la valeur de la variable d'état en certain point du domaine. Le domaine étudié est découpé en sous-domaines (maillage en éléments 3D) (FigIV.1). Le problème est résolu d'abord sur ces sous-domaines qui sont plus simples à traiter. Puis la variable d'état est reconstruite en assemblant les solutions obtenues sur les sous-domaines.

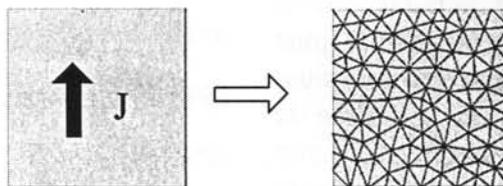


Fig IV.1 : Exemple de maillage d'une surface.

Cette méthode donne de très bons résultats pour les grandeurs globales.

- Dipôle3D [17] est un logiciel de calcul pour les structures à aimants. Ce logiciel a été développé pour la conception et la réalisation de paliers et de sources de flux RMN. Il est basé sur le principe d'utilisation des dipôles ponctuels. Les aimants sont discrétisés en une somme de dipôles magnétiques. Pour obtenir le champ ou les forces, le logiciel résout et additionne une par une toutes les interactions entre les dipôles. Ce logiciel a une très grande précision de l'ordre de 10^{-6} et est très rapide.

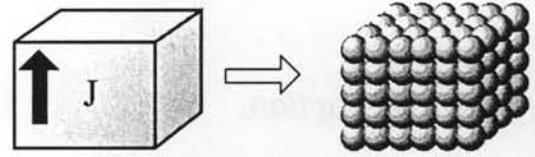


Fig IV.2 : Discrétisation d'un volume.

IV.3 Vérification des résultats obtenus.

Dans la partie précédente, nous avons réussi à obtenir une structure ovoïdale (à aimantation optimisée) et nous l'avons comparé à une sphère de même aimantation et à la sphère de Leupold/Halbach. Ces modèles théoriques ne peuvent pas se réaliser simplement car, technologiquement les aimants ne peuvent avoir qu'un seul axe d'anisotropie (c'est d'ailleurs un des facteurs le plus recherché en élaboration des matériaux, le but étant d'avoir le maximum de moments dans le même axe). Or dans les modèles les plus performants, l'aimantation est variable. Pour rendre réalisables ces structures, il nous faut discrétiser l'aimantation variable (fig. IV.3a) en domaines à aimantation fixe (fig. IV.3b).

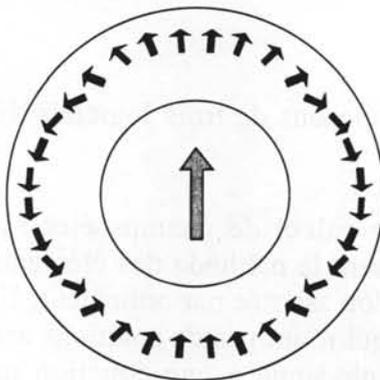


Fig IV.3a

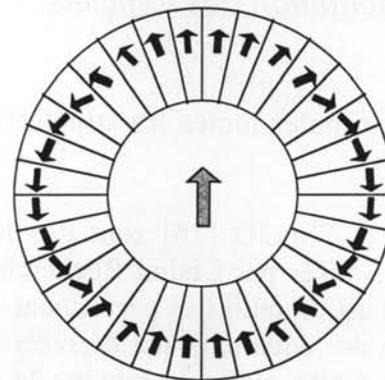


Fig IV.3b

Le champ magnétique obtenu au centre de la structure dépend de la façon dont on a discrétisé. Plus il y a de segments, plus on s'approchera d'une variation continue. Moins on fera de découpe, plus la baisse de champ sera importante par rapport au champ créé par une distribution continue. Cette perte de champ est représentée, en fonction du nombre de segments, sur la figure IV.4.

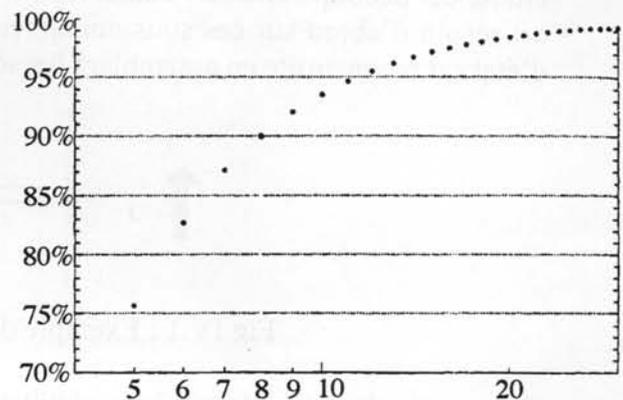


Fig IV.4

Pour comparer les structures, nous les avons discrétisé en trente-deux segments (8 par quartier). Pour calculer l'orientation de chaque segment, nous avons considéré l'angle θ défini par l'axe médian du segment et l'axe z vertical. Ces segments sont aimantés le long de l'axe de facile aimantation. Les angles des segments définis par l'aimantation optimale (utilisée pour l'ovoïde et la sphère) sont donc différents de ceux obtenus avec la sphère de Leupold/Halbach.

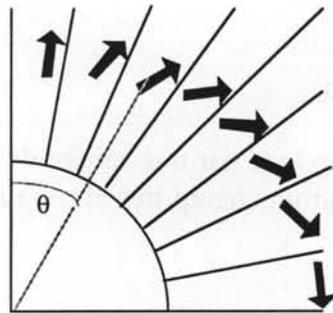


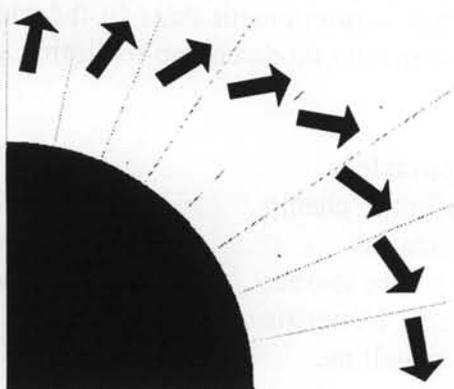
Fig IV.5

Pour plus de facilité, les simulations de ces modèles ont été réalisées avec le logiciel Flux2D en axisymétrique. Nous avons résolu ces problèmes en considérant une symétrie axiale autour de l'axe z. Pour ces résolutions, nous n'avons étudié que le quart supérieur de chaque structure par raison de symétrie. Pour des raisons de continuité de flux, nous avons appliqué la condition aux limites de Neuman (équiflux perpendiculaires) pour le plan équatorial, et la condition de Dirichlet (équiflux parallèle) pour les autres bords du domaine de définition, y compris l'axe de rotation.

Pour entamer la simulation numérique, nous avons défini un matériau magnétique dur idéal ayant pour rémanence 1T. Ceci nous permet de normaliser le résultat pour un aimant unitaire.

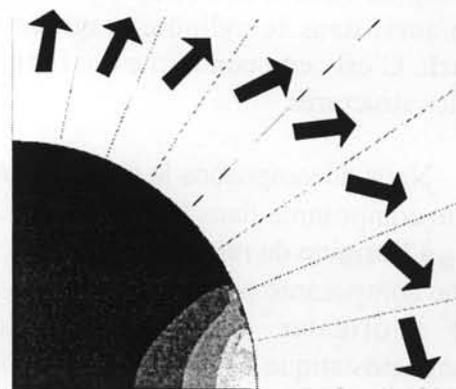
Les résultats obtenus par simulation concordent avec les calculs (III.7). L'induction obtenue au centre de la sphère de Leupold/Halbach est homogène (sauf aux interfaces air/aimants lors de changements d'aimantations)(fig IV.6a). L'induction au centre de l'ovoïde optimisé n'est pas homogène, mais sa valeur est supérieure à celle de la sphère (fig IV.6b).

➔ représente le sens de l'aimantation.



$$B(0,0) = 3,03 \text{ T}$$

Fig IV.6a : Quart de la sphère.



$$B(0,0) = 3,20 \text{ T}$$

Fig IV.6b : Quart de l'ovoïde.

IV.4 Problèmes liés à la structure.

Grâce aux simulations précédentes, nous avons vu apparaître les problèmes intrinsèques à ce type de structure. Les deux problèmes sont liés à la propagation du champ central dans les aimants proches de cette zone.

IV.4.1 Renversement d'aimantation.

D'après l'équation du champ créé par une sphère de Leupold/Halbach (fig III.15b), il est théoriquement possible d'obtenir un champ très élevé au centre dépendant du rapport des rayons intérieur et extérieur.

Cette approche ne tient absolument pas compte des caractéristiques des matériaux utilisés. On considère qu'ils ont une aimantation constante (quel que soit le champ H imposé), mais aussi un champ coercitif suffisant pour qu'ils ne se désaimantent pas.

Dans la figure IV.7, nous avons représenté le champ magnétique dans les aimants. Ce champ est discontinu aux interfaces entre les aimants car l'aimantation varie de façon discrète.

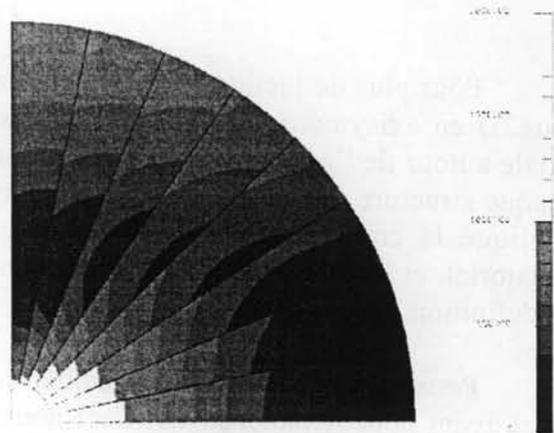


Fig IV.7 : Champ magnétique.

Nous avons mis en évidence une limitation sérieuse liée aux propriétés magnétiques des matériaux. En effet, dans une zone entourant le plan équatorial, la continuité de la composante tangentielle du champ H à l'interface air-aimant crée un champ interne opposé à l'aimantation. Pour ne désaimanter localement la structure, il est nécessaire que l'intensité du champ H ne dépasse pas la valeur du champ coercitif de l'aimant. Des études très précises sur les matériaux NdFeB ont montré que la grandeur pertinente est en fait la projection du champ H le long de l'axe d'anisotropie de l'aimant. Remarquons que cette limitation technologique existe aussi dans le cylindre magique mais apparait pas explicitement dans la théorie de Halbach. C'est cette contrainte qui limite actuellement le maximum de champ réalisable avec de telles structures.

Nous décomposons le champ local en deux composantes :

- une composante dans l'axe de l'aimantation, qui définit le champ H_D à l'origine du retournement irréversible de l'aimantation.
- une composante perpendiculaire H_R qui a tendance à faire tourner et à orienter l'aimantation afin de minimiser l'énergie magnétostatique et l'énergie d'anisotropie magnétocristalline.

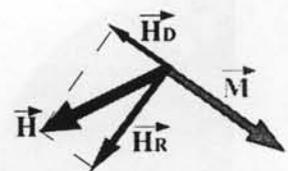


Fig IV.8

Le critère de désaimantation est donné en première approximation par la relation :
(eq IV.1)

$$H_D = \vec{H} \cdot \frac{\vec{M}}{|\vec{M}|} < -H_d$$

Si le champ H_D dépasse la valeur du champ coercitif, l'aimant se désaimante. Ce critère est valable uniquement dans le cas où le champ transverse H_R reste faible devant la composante H_D du champ démagnétisant de l'aimant.

Le rôle de la composante du champ démagnétisant H_D est très important dans nos simulations car c'est lui qui définit le point de fonctionnement de l'aimant. En effet, la valeur de l'aimantation d'un aimant est donnée directement par $J(H_D)$ et sa direction est toujours selon l'axe d'anisotropie dans le modèle utilisé.

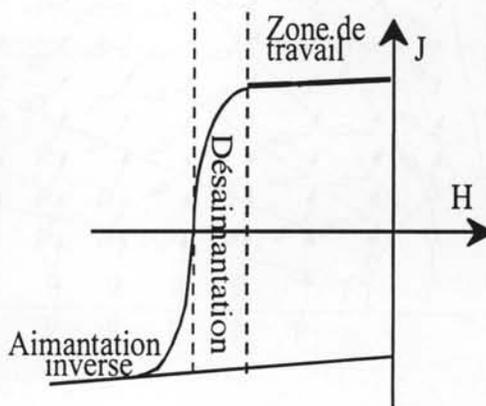


Fig IV.9

Pour illustrer le phénomène de désaimantation sur notre structure, nous avons simulé notre structure avec des aimants tous identiques caractérisés par une rémanence de 1T et un champ coercitif de $8 \cdot 10^5$ A/m. Dans le plan équatorial due à la continuité de la composante tangentielle du champ magnétique H à travers l'interface air-aimant, le champ démagnétisant est dirigé antiparallèlement à l'aimantation. Il dépasse la valeur du champ coercitif comme l'indique la figure IV.10. Les aimants dans cette zone ont donc tendance à se retourner. Ils ne fournissent plus la contribution voulue pour la création du champ au centre de la structure.

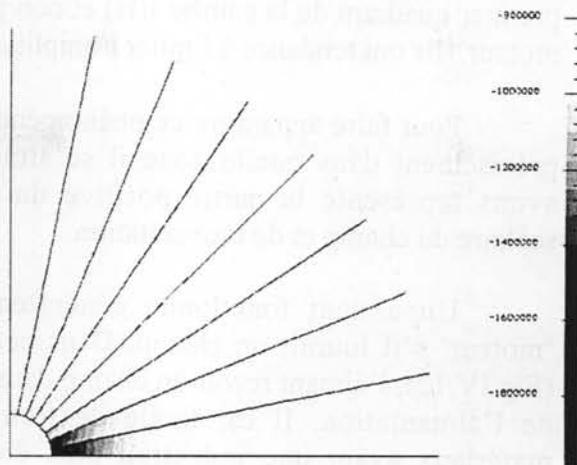


Fig IV.10 : Partie démagnétisée.

Le calcul de l'étendue de la zone désaimantée est en fait pessimiste, car l'aimantation locale reste figée en amplitude et en direction. En supposant que, dans le système réel, les aimants dans ce domaine ont globalement une aimantation négligeable, le système se comporte qualitativement comme une structure de Halbach avec un rayon interne plus grand. Il crée donc un champ dans la cavité plus faible que le système non désaimanté. Dans le cas le plus défavorable, l'aimantation de ces aimants est complètement retournée et sa contribution au champ central est à l'opposée de celle désirée.

Il est donc nécessaire soit d'enlever ces aimants de la structure, quitte à insérer un matériau amagnétique, soit de les remplacer par un matériau ayant un champ coercitif plus grand.

IV.4.2 Renforcement d'aimantation.

Nous avons tracé le champ magnétique, l'aimantation et l'induction centrale sur une même figure (fig IV.11)

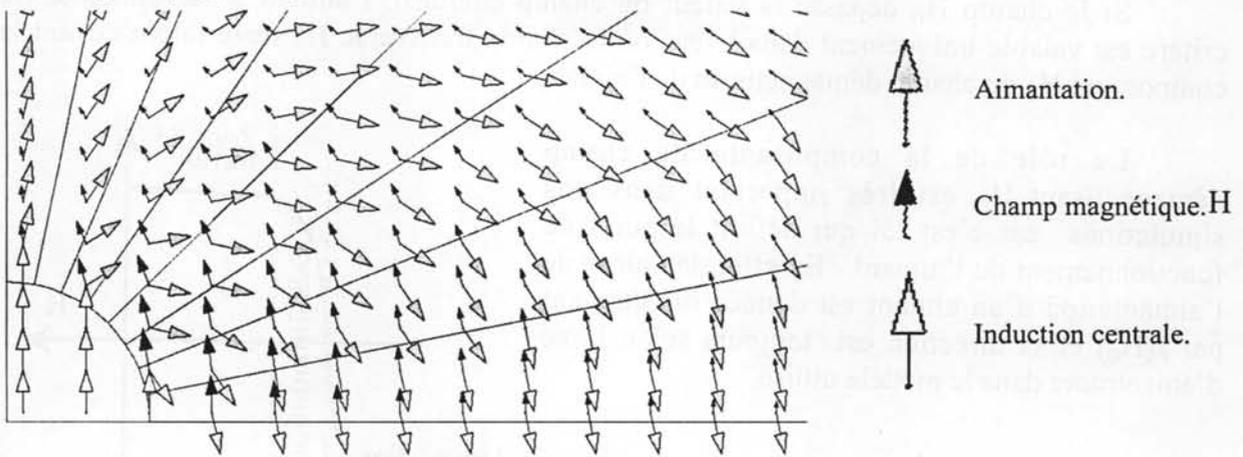


Fig IV.11

Contrairement au phénomène précédent, les aimants le long de l'axe Oz subissent une induction intense dans le sens de l'aimantation due à la continuité de la composante normale de l'induction à l'interface air-aimant. Comme leur point de fonctionnement se trouve dans le premier quadrant de la courbe $J(H)$ et non pas dans le deuxième quadrant pour avoir un mode moteur, ils ont tendance à limiter l'amplitude du champ produit au centre.

Pour faire apparaître ce phénomène et voir précisément dans quelle zone il se situe, nous avons représenté la partie positive du produit scalaire du champ et de l'aimantation.

Un aimant fonctionne généralement en 'moteur' s'il fournit un champ. Dans cette zone (Fig IV.12), l'aimant reçoit un champ dans le sens de l'aimantation. Il est facile de trouver des matériaux ayant une induction plus élevée en subissant le même champ.

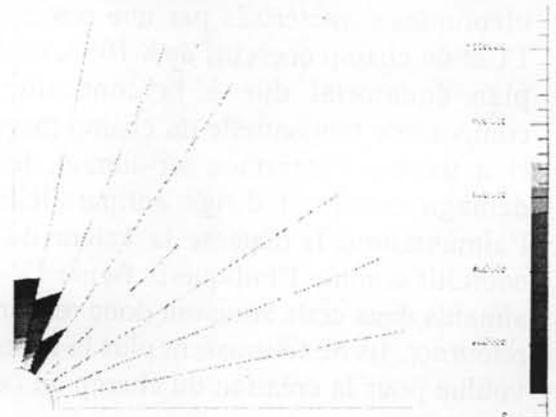


Fig IV.12

Sur la figure ci-contre, en représentant schématiquement les courbes d'aimantation des matériaux magnétiques doux et durs, on voit tout de suite qu'une grande différence d'aimantation apparaît. Lorsque l'on regarde le champ créé par un dipôle, sa contribution à la création du champ central dépend linéairement de la valeur de l'aimantation. Donc plus l'aimantation est grande, plus sa contribution à la création du champ central est élevée.

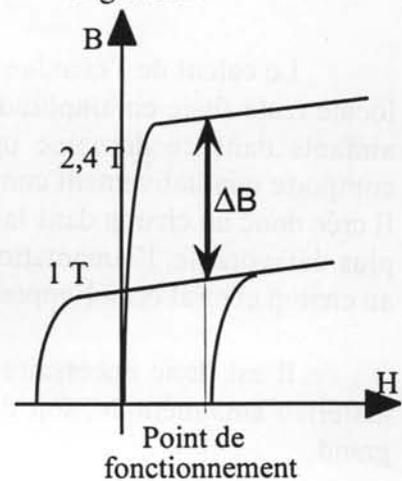


Fig IV.13

La solution est donc de remplacer les aimants dans cette zone par un matériau doux. Ce type de matériau aura un fonctionnement adapté, ainsi qu'une contribution beaucoup plus importante à la création du champ central.

L'induction centrale, avec un morceau de matériau doux, augmente de plus de 35 %. En plaçant les pièces en matériau doux correctement, on arrive à canaliser le champ au centre de la structure. Dans ce cas, le champ démagnétisant dans les aimants ne varie presque pas (augmentation de 5 %).

Lors de ces simulations, nous avons vu apparaître les problèmes communs aux deux types de structures sphère de Halbach et sphère optimisée. Ceci nous impose des limites technologiques dues au champ démagnétisant dans les aimants, mais impose aussi une combinaison optimale de matériaux magnétiques durs et doux.

Toutefois, il est impossible de réaliser les deux structures que nous avons comparées. L'aimantation discrétisée comme précédemment n'est pas encore réalisable. Il est techniquement inenvisageable d'avoir des cônes aimantés radialement avec des angles d'aimantation spécifiques.

Nous devons donc discrétiser plus finement l'ovoïde de manière à obtenir une série de pavés réalisables uniformément aimantés.

IV.5 Discrétisation de la structure.

Lors de cette étude, nous avons décidé de rendre réalisable le modèle optimal théorique. Nous allons donc discrétiser l'ovoïde (d'abord la section puis les bagues obtenues) pour obtenir des pavés d'aimants réalisables. Nous optimiserons l'orientation de ces pavés avec une aimantation unitaire. Ensuite, des caractéristiques réelles d'aimants seront affectées, ce qui nous donnera une structure optimale réalisable.

Nous étudierons différents moyens d'optimiser les pièces polaires en matériau doux ou non. L'approche finale de la conception est de réaliser différents accès au champ central en fonction des besoins des applications scientifiques.

Nous ne présenterons que le résultat final des différentes études en expliquant d'une part le cheminement, mais aussi les avantages et les caractéristiques des évolutions.

IV.5.1 Discrétisation de la section de l'ovoïde.

Le principe de cette étape est défini dans la figure IV.14. A partir d'une aimantation à variation continue, le but est d'obtenir une variation discrète de l'aimantation avec des morceaux uniformément aimantés.

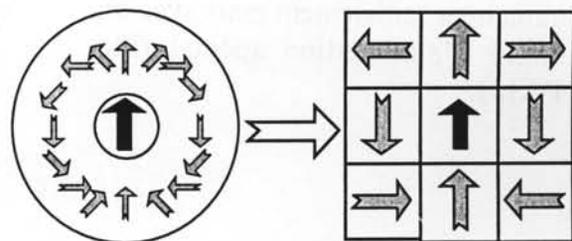


Fig IV.14 : Principe de la discrétisation.

Lors de cette étape, nous avons tenu compte de plusieurs facteurs :

- Le nombre de morceau : comme précédemment (Ch. IV.3), plus le nombre d'éléments sera élevé, plus on s'approchera d'une variation continue. Si le nombre d'éléments est trop faible, il y aura une perte importante par rapport à la variation continue (Fig IV.4).
- Le renforcement d'aimantation : nous avons remplacé les aimants situés au dessus de la zone centrale par du matériau doux.
- La simplicité en vue d'une réalisation. Toute la discrétisation a été envisagée en vue de la réalisation d'un prototype. La structure est donc constituée de pavés à section rectangulaire pour permettre une plus grande facilité de réalisation et de vérification des dimensions.

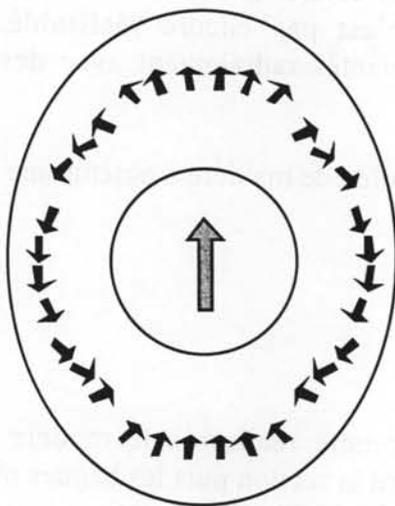
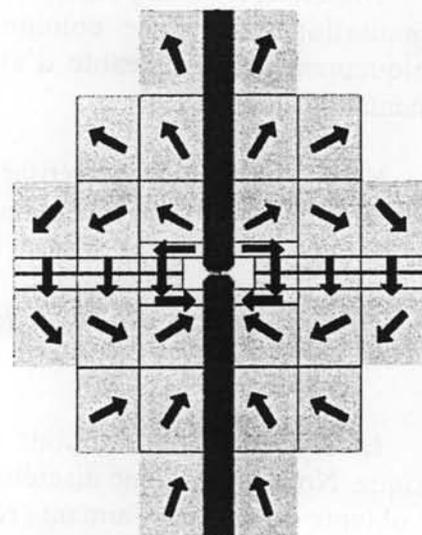


Fig IV.15a : Structure théorique



□ Aimants. □ Centre.
■ Matériau doux.

Fig IV.15b : Structure discrétisée réelle.

Pour avoir un minimum de perte, nous avons 34 pavés dans la section. Cette discrétisation nous donne une structure qui n'est toujours pas réalisable car on obtient une somme de bagues aimantées radialement mais avec un angle d'aimantation spécial (Fig IV.15).

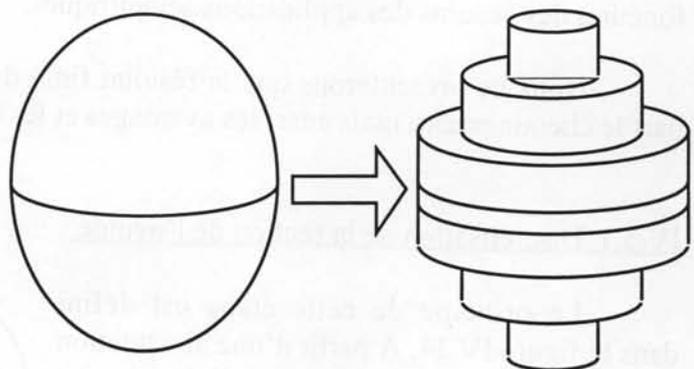


Fig IV.15c : Vue 3D avant et après discrétisation.

IV.5.2 Discrétisation des bagues obtenues.

Le principe de cette seconde discrétisation est de couper les bagues obtenues précédemment en secteurs à aimantation discrète.

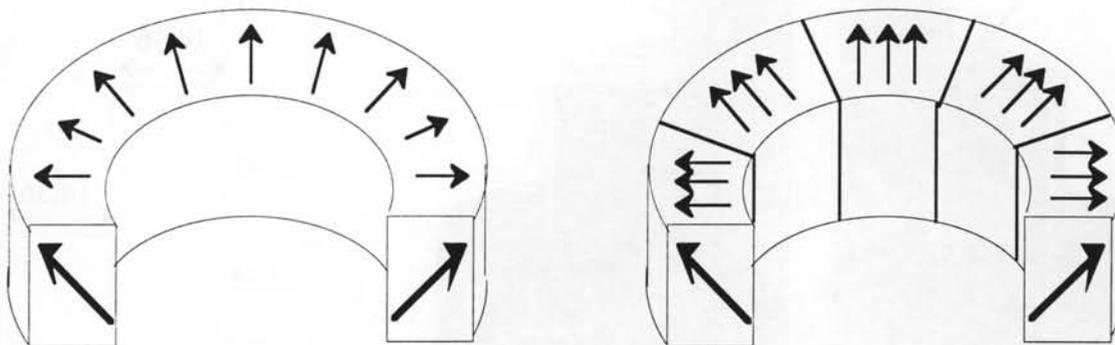


Fig IV.16 : Passage d'une couronne aimantée radialement en secteurs uniformément aimantés.

Le champ magnétique obtenu avec une couronne discrétisée dépend du nombre de secteurs. Plus il y a de secteurs, plus on s'approche d'une variation continue. Dans le cas où l'on discrétise avec un nombre infini de secteurs, on aura une variation continue de l'aimantation et donc un champ maximal.

Dans notre cas, nous allons discrétiser les couronnes en douze secteurs. Cette discrétisation limite la perte de champ à moins de 5%.

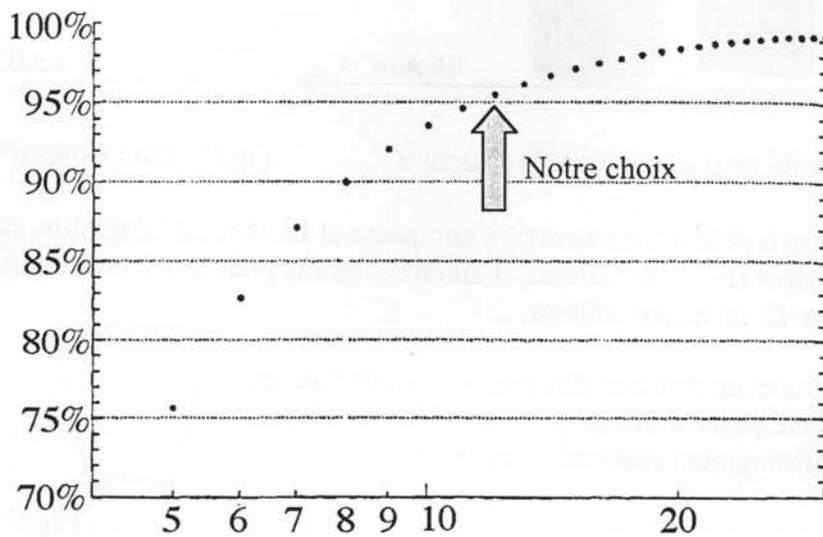


Fig IV.17

Grâce aux deux discrétisations, notre structure optimale est composée alors de douze tranches, elles mêmes composées de 17 secteurs, soit au total 204 morceaux d'aimants.

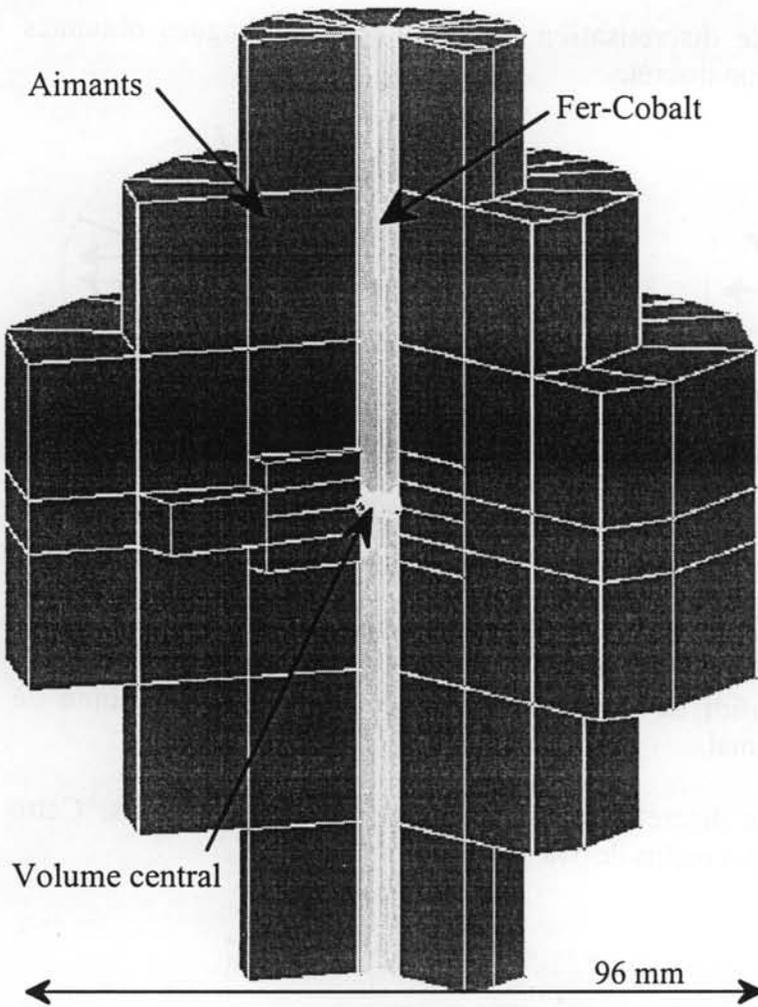


Fig IV.18a : Vue de neuf tranches de la structure

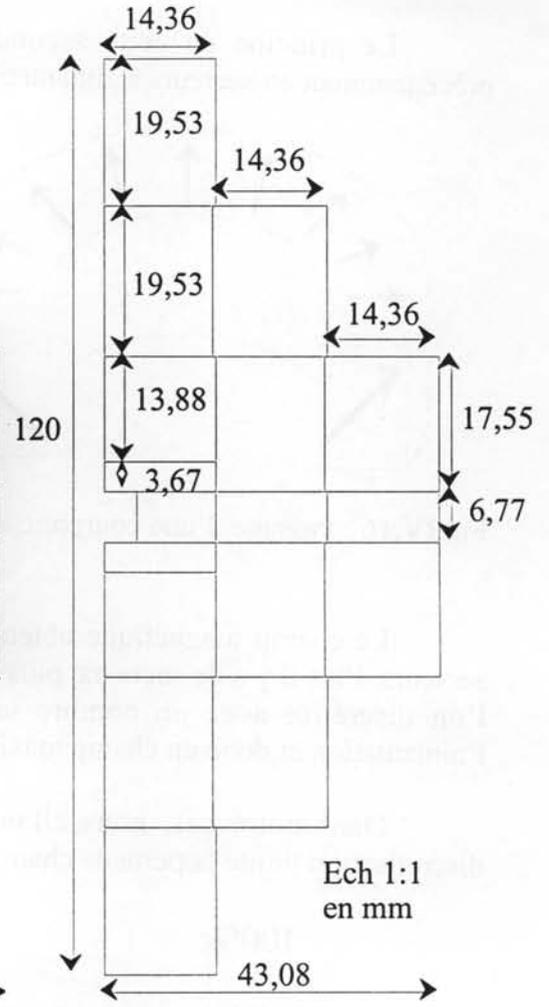


Fig IV.18b : Côtes d'une tranche.

De manière à obtenir une structure compacte et facilement adaptable, nous avons fixé des côtes extérieures (hauteur 120mm, diamètre :96mm) pour avoir un volume équivalent à celui d'une sphère de diamètre 100mm.

Enfin il est difficile de réaliser des secteurs cylindriques. Nous sommes donc passé à des secteurs parallélépipédiques trapézoïdaux uniformément aimantés (Fig IV.19).

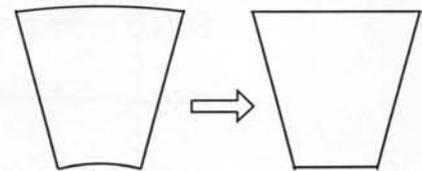


Fig IV.19

IV.5.3 Optimisation de l'angle d'aimantation des couronnes aimantées.

Lors de la discrétisation de la section de l'ovoïde, il est devenu impossible de conserver l'angle d'aimantation. En effet, l'angle d'aimantation théorique varie beaucoup dans un même secteur alors que nous ne pouvons fixer technologiquement qu'une seule orientation.

Nous cherchons à maximiser la contribution de chaque aimant au champ central. Notre méthode est de traiter au cas par cas toutes les bagues aimantées (les 12 secteurs d'une même bague ont une contribution identique). Nous allons chercher le champ maximal créé par cette

bague en faisant varier l'angle d'aimantation par pas de un degré (plus de précision serait impossible à avoir lors de la réalisation). Cette optimisation a été faite grâce au logiciel Dipôle3D. Il est très adapté pour ce genre de calculs car il permet de faire varier les angles d'aimantation facilement. Après avoir obtenu la distribution produisant le champ optimal, les angles obtenus sont réintroduits dans le logiciel Flux3D car contrairement au logiciel Dipôle3D, il permet de traiter des systèmes comportant des matériaux doux.

Le logiciel Flux3D bien qu'il soit plus lourd à l'utilisation est pour ce genre de calcul, mais qui donne accès au champ démagnétisant. Avec trois (ou plus) résolutions non-linéaires, nous avons simulé l'angle obtenu et deux angles proches l'encadrant, de manière à vérifier si cet angle est bien un maximum global.

Sur la figure IV.20, seul le quart supérieur d'une tranche est représenté. La distribution de la partie inférieure est obtenue par symétrie. Pour chaque secteur de cette tranche, nous avons indiqué la valeur de l'angle par rapport à l'horizontale, obtenu après optimisation. Pour faciliter la réalisation, nous avons orienté horizontalement l'aimantation de certains secteurs près du centre lorsque l'angle calculé était inférieur à 10°. En effet, la perte de champ due à la modification de l'angle devient négligeable devant la simplification des découpes d'aimants lors de la réalisation.

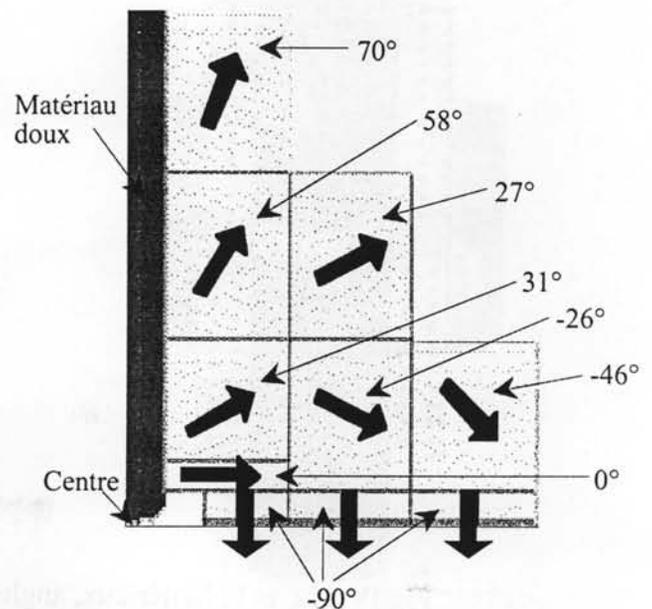


Fig. IV.20 : Angles d'aimantation fixés.

IV.5.4 Affectation de matériaux magnétiques réels.

Tout au long de ces optimisations, nous avons utilisé une caractéristique de matériaux magnétique idéale. Son aimantation est fixe et ne varie pas en fonction du champ magnétique. De plus, son champ coercitif est infini (donc pas de désaimantation).

Ensuite, nous avons utilisé deux types de d'aimants théoriques:

- Néodyme-Fer-Bore (Haute rémanence): $B_r=1,35 \text{ T}$ $\mu_r=1$ $H_c=8.10^5 \text{ A/m}$
- Samarium-Cobalt (Fort champ coercitif): $B_r=0,9 \text{ T}$ $\mu_r=1$ $H_c=3,2.10^6 \text{ A/m}$

Grâce à ces matériaux, nous avons optimisé géométriquement la structure en respectant les caractéristiques magnétiques. Nous avons trouvé un certain optimum entre:

- Le volume de matériau magnétique.
- L'induction au centre de la structure.
- Le volume central utile.
- Le champ démagnétisant dans les aimants.

Le principe est d'affecter la nuance ayant la rémanence la plus forte pour avoir une contribution maximale. Mais il faut que l'aimantation résiste au champ démagnétisant auquel il est soumis.

Nous avons alors imposé les caractéristiques des aimants disponibles commercialement. Elles ne sont pas identiques aux valeurs sur lesquelles nous avons tablé initialement. Nous n'allons pas utiliser de Samarium-Cobalt mais quatre nuances de Néodyme-Fer-Bore, fournies par le partenaire industriel UGIMAG.

- 44M1	Br=1,35 T	$\mu_r=1,05$	Hc=9.10 ⁵ A/m
- 37B1	Br=1,27 T	$\mu_r=1,05$	Hc=1,1.10 ⁶ A/m
- 34KC1	Br=1,20 T	$\mu_r=1,05$	Hc=1,5.10 ⁶ A/m
- HC411	Br=1,05 T	$\mu_r=1,05$	Hc=3,2.10 ⁶ A/m

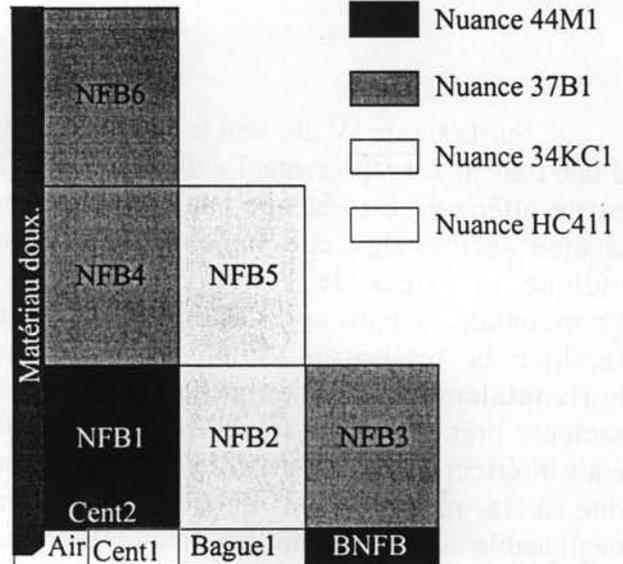
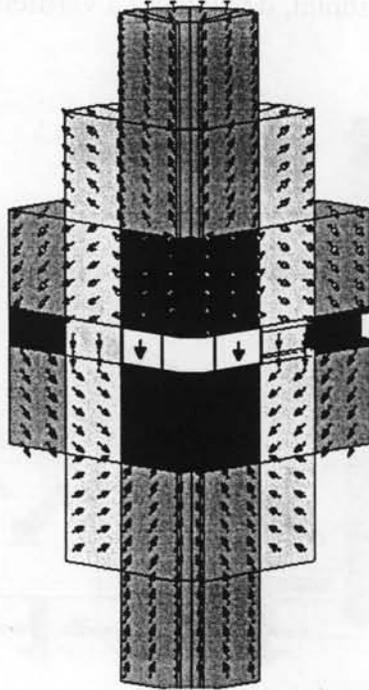


Fig IV.21a et b: Matériaux, angles d'aimantation et noms des secteurs.

Le tableau ci-dessous définit les nuances des aimants choisies en fonction du champ démagnétisant (Les pavés sont présentés avec leurs symétriques) :

Régions Dénominations initiales	Nuances	H coercitif du matériau	H démag (pointe)	H démag (moyen)
Néodyme-Fer-Bore 1, 7 (NFB1, NFB7)	44M1	9.10 ⁵ A/m	5.10 ⁵ A/m	4.10 ⁵ A/m
Néodyme-Fer-Bore 2, 8 (NFB2, NFB8)	34KC1	1,5.10 ⁶ A/m	1,2.10 ⁶ A/m	8.10 ⁵ A/m
Néodyme-Fer-Bore 3, 9 (NFB3, NFB9)	37B1	1,1.10 ⁶ A/m	9,5.10 ⁵ A/m	8.10 ⁵ A/m
Néodyme-Fer-Bore 4, 10 (NFB4, NFB10)	37B1	1,1.10 ⁶ A/m	1,2.10 ⁶ A/m	8.10 ⁵ A/m
Néodyme-Fer-Bore 5, 11 (NFB5, NFB11)	34KC1	1,5.10 ⁶ A/m	1,2.10 ⁶ A/m	1,05.10 ⁶ A/m
Néodyme-Fer-Bore 6, 12 (NFB6, NFB12)	37B1	1,1.10 ⁶ A/m	1,2.10 ⁶ A/m	9.10 ⁵ A/m
Bague en Néodyme-Fer-Bore (BNFB)	44M1	9.10 ⁵ A/m	8.10 ⁵ A/m	7.10 ⁵ A/m
Bague en Néodyme-Fer-Bore (Bague1)	34KC1	1,5.10 ⁶ A/m	1,6.10 ⁶ A/m	1,3.10 ⁶ A/m
"Aimants centraux" 1, 3 (Cent1-Cent3)	HC411	2,6.10 ⁶ A/m	3.10 ⁶ A/m	2,4.10 ⁶ A/m
"Aimants centraux" 2, 3 (Cent2-Cent4)	44M1	9.10 ⁵ A/m	8,7.10 ⁵ A/m	7.10 ⁵ A/m

Dans ce tableau, on peut remarquer que les aimants NFB2 et NFB5 sont 'surdimensionnés' magnétiquement. En fait si on affecte la nuance supérieure donc une rémanence plus forte, ils subissent un champ démagnétisant trop intense en moyenne. De plus, il est préférable de garder une marge de sécurité car nous avons utilisé les caractéristiques nominales et non pas minimales. Une autre constatation est que la nuance HC411 à fort champ coercitif est seulement utilisée dans la partie la plus proche du centre. Actuellement, malgré les caractéristiques exceptionnelles de ces aimants, ils se désaimantent et donc la partie désaimantée est remplacée par un matériau amagnétique ou de l'air (FigIV.22).

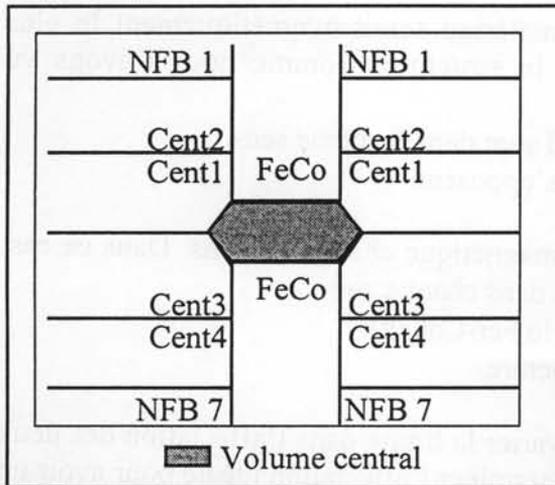


Fig IV.22a : Aimants centraux théoriques.

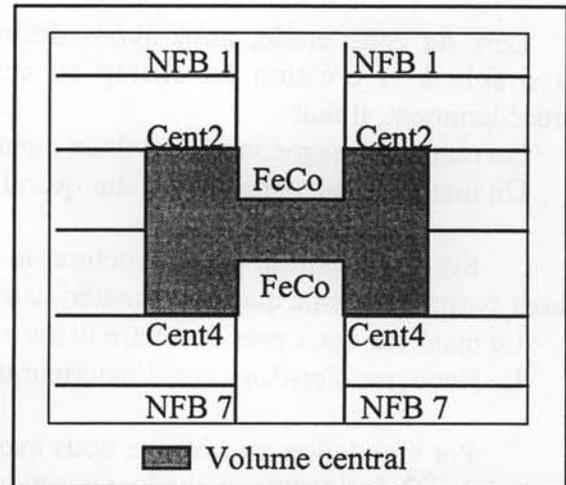


Fig IV.22b : Aimants centraux réels.

Cette nuance n'étant pas encore commercialisée, nous n'en tiendrons pas compte lors des simulations. Dès qu'elle sera disponible, nous l'inclurons à notre structure. Pour le moment, nous remplaçons ces pavés par du laiton.

IV.5.5 Optimisation des pièces polaires : Design et matériaux.

Dans cette partie, nous allons traiter les pièces polaires. Dans un premier temps, nous étudierons la forme de ces pièces et l'influence par rapport à l'induction au centre de la structure. Ensuite nous verrons quels matériaux magnétiques affecter. Lors d'une première approche, nous avons simulé la structure avec des pièces polaires plates. Nous avons appliqué un chanfrein vers la zone centrale.

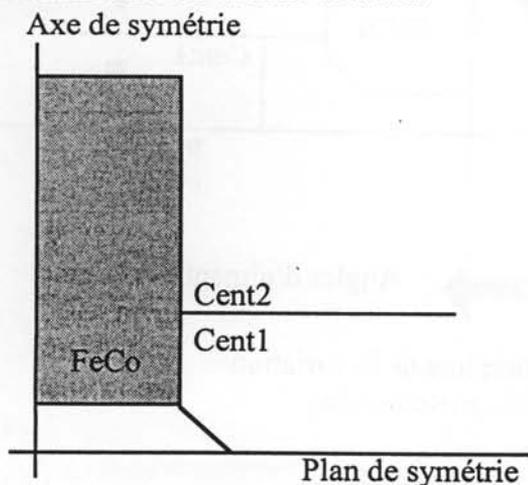


Fig IV.23a : Pièce polaires plates.

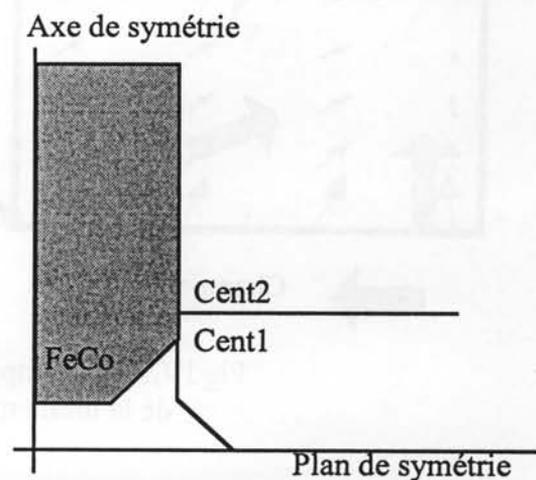


Fig IV.23b : Pièces polaires optimisées.

Pour cette étude, nous avons fait varier deux facteurs : la taille du chanfrein et son angle. L'angle optimal généralement admis est de $\arctan(2^{0,5})=54^\circ$. La taille dans notre cas représente la moitié de la partie plane restante.

Après simulation, nous avons comparé les valeurs des champs au centre de la structure par simulation numérique. La valeur de l'induction au centre a progressé de 2%, sans augmenter le champ démagnétisant dans les aimants.

Lors de cette étude, nous avons défini quel matériau serait magnétiquement le plus favorable à la création du champ au centre de la structure. Comme nous l'avons vu précédemment, il faut :

- Un matériau magnétiquement doux quand B et H sont dans le même sens.
- Un matériau magnétiquement dur quand B et H s'opposent.

Sur l'axe central de la structure, le champ magnétique change de sens. Dans ce cas, nous avons déterminé quel est le matériau approprié dans chaque zone :

- Le matériau doux près du centre (dans notre cas le Fer-Cobalt).
- Le Néodyme-Fer-Bore vers l'extérieur de la structure.

Par simulation numérique, nous avons fait varier la limite dans l'affectation des deux matériaux. Grâce à cette méthode, nous avons pu déterminer l'affectation idéale pour avoir un champ magnétique central maximal.

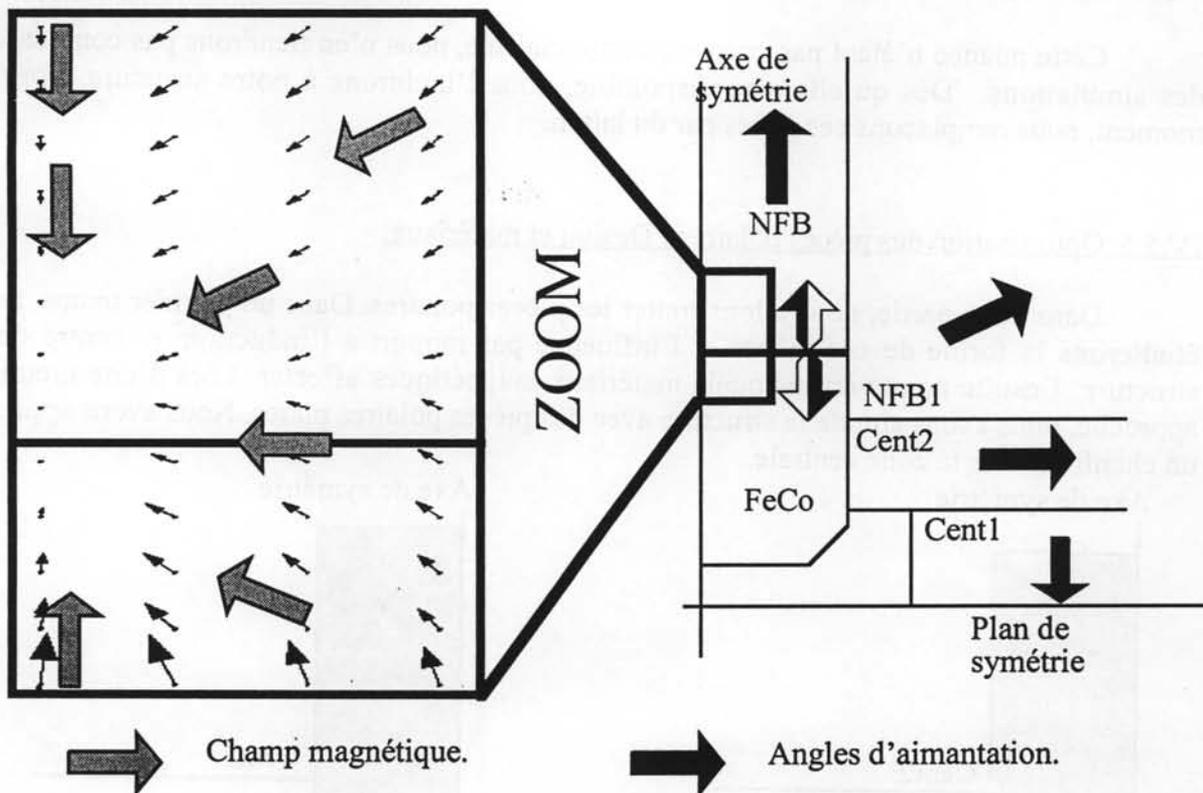


Fig IV.24 : Champ et aimantation lors de la variation de la limite matériau doux - matériau dur.

Lors de cette approche, les simulations mettent en évidence un gain de 1% pour l'induction centrale entre une pièce polaire mixte (NdFeB + FeCo) et une pièce en une seule partie (FeCo). Donc si on veut une aimantation plus forte, il faut utiliser les pièces polaires mixtes. Par contre lors de la réalisation, ces pièces seront beaucoup plus difficiles à découper et usiner, mais aussi à assembler. Il sera donc plus facile pour les premiers essais de laisser une seule pièce en Fer-Cobalt bien que la partie supérieure apporte une contribution inverse à la création du champ central.

Le compromis choisi à terme est de laisser la partie de FeCo définie précédemment près du centre et de remplacer le NdFeB par un matériau amagnétique facile à usiner comme le laiton. Cette technique n'apporte pas le gain de champ du NdFeB. Mais au moins, il n'y a pas la baisse de champ due à la partie supérieure du FeCo.

Il est difficile de quantifier les forces d'attraction des pièces polaires vers le centre de la structure. Il est donc impossible de savoir si des pièces collées résisteraient. Les matériaux magnétiques utilisés (FeCo et NdFeB) sont très difficiles à usiner car ils sont très cassants.

Dans un premier temps, pour la réalisation, nous utiliserons les pièces polaires pleines. Nous verrons ensuite la réalisation de pièces polaires mixtes.

IV.5.6 Conception des accès dans le plan xy.

Jusqu'à présent, nous avons optimisé la structure au niveau magnétique. Cette structure crée un champ central tout en respectant les caractéristiques des matériaux disponibles. Il reste un problème : l'accès au champ central. C'est ce que nous allons étudier dans cette partie.

Les accès au champ magnétique dépendent directement des applications de la structure. Pour certaines applications, il faut :

- un accès transversal au champ.
- un accès longitudinal au champ.

Un autre aspect est aussi de savoir l'utilisation de cet accès pour définir sa taille :

- laisser passer un faisceau (quelques microns).
- laisser passer un échantillon (quelques millimètres).
- installer un cryostat (proche du centimètre).

Notre approche s'est orientée vers les applications et surtout en fonction des possibilités de réalisations. Pour pouvoir adapter notre prototype à de multiples expériences, nous avons prévu deux accès équatoriaux linéaires (axes x,y).

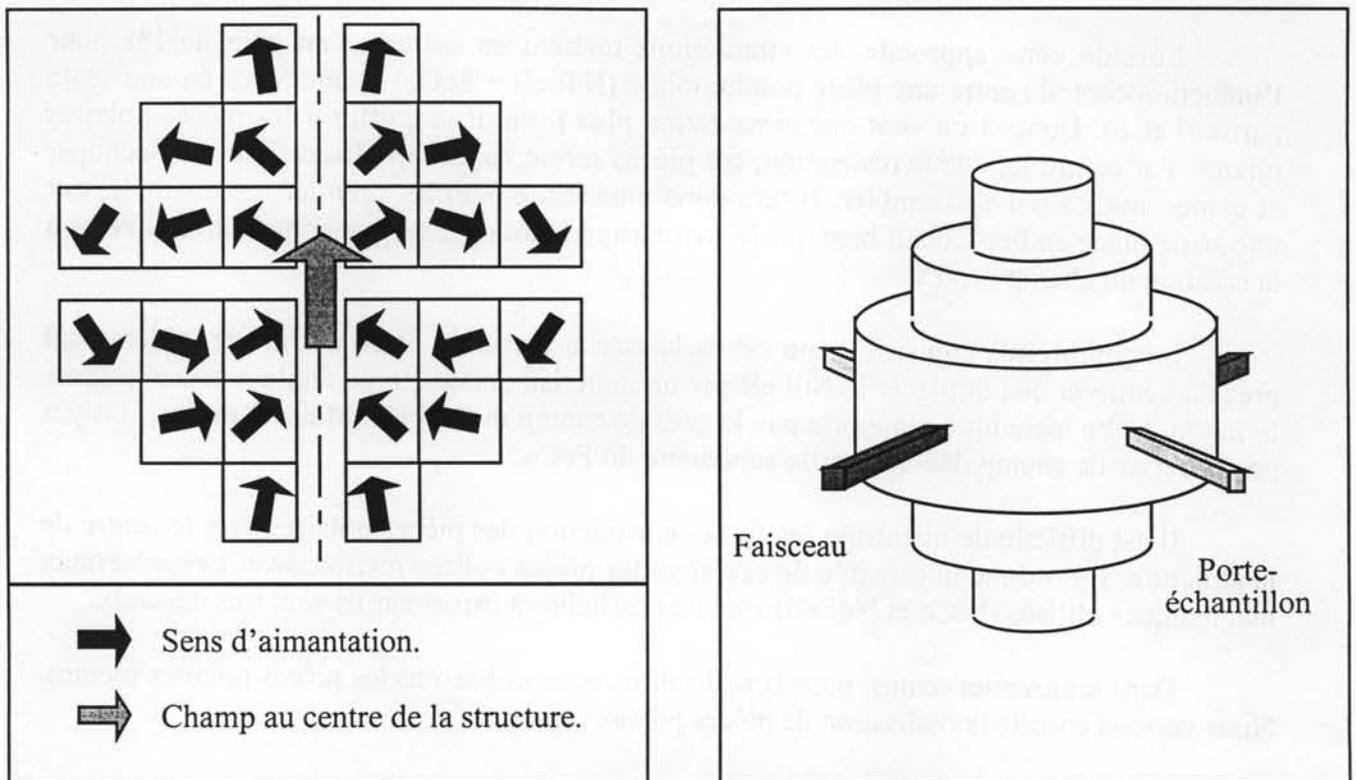


Fig IV.25 Vue en 2D et 3D des accès.

Dans un premier temps, nous allons étudier la variation de champ que subit l'échantillon lors de son approche vers le centre de la structure. Nous avons recherché à avoir un champ magnétique nul puis strictement croissant lors de l'introduction de l'échantillon. Il est impératif que l'échantillon magnétique ne subisse pas de cycles mineurs pour que son état magnétique soit bien défini.

Sans modification, le modèle précédent impose à l'échantillon lors de son introduction un champ décroissant négatif atteignant $-0,3\text{T}$, puis positif allant jusqu'à $4,3\text{ T}$.

La solution consiste à blinder l'accès horizontal avec un matériaux doux comme le Fer-Cobalt. Physiquement, le champ passera dans le matériau doux au lieu de passer dans l'air. Grâce à ce "blindage" magnétique, le champ le long de l'accès varie de manière monotone dans le sens positif.

Lors de la conception de l'accès, on a remplacé de l'aimant par du matériau doux et de l'air. Ceci a pour effet de faire baisser la contribution à la création du champ au centre, donc il ne faut pas que l'accès soit trop grand. Nous avons fixé la valeur de la hauteur interne du tube à section carrée à celle de l'espacement théorique entre les deux tubes centraux de Fer-Cobalt ($2,8\text{ mm}$).

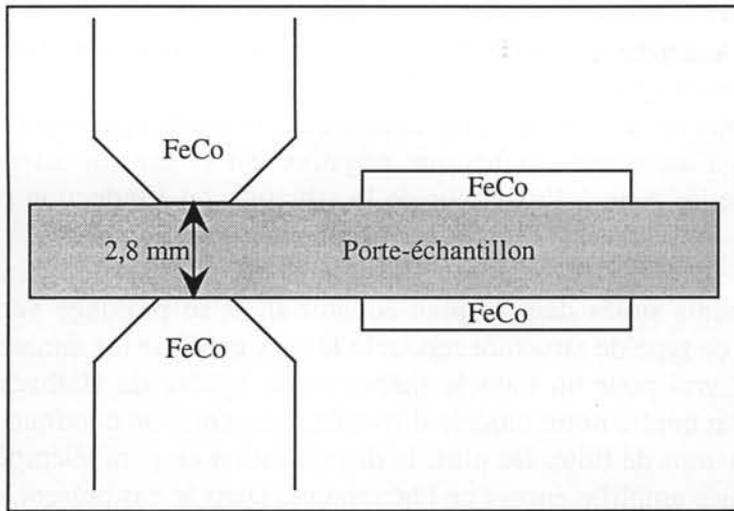


Fig. IV.26a : Schéma représentant la taille de l'accès.

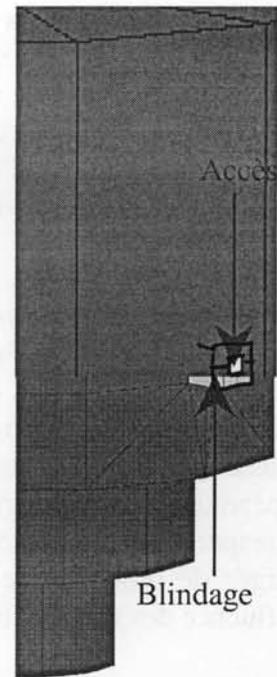


Fig IV.26b : Vue 3D de l'accès.

Pour simplifier la réalisation, nous avons fixé la hauteur extérieure du tube à celle des pavés d'aimants situés dans le plan équatorial, soit 6,77 mm. Pour que le "blindage" soit efficace, il faut que le tube de matériau doux ne soit pas trop saturé. Il faut qu'il puisse facilement canaliser le flux dans la zone où l'on en a besoin, donc il lui faut une certaine épaisseur. De plus, si le tube est trop fin, il sera impossible à réaliser technologiquement. Avec ces deux valeurs (intérieur = 2,8 mm, extérieur = 6,77 mm) pour l'accès, nous obtenons le meilleur compromis.

Pour mieux présenter notre solution, nous avons fait un schéma de la structure et de l'accès et ajouté en dessous la courbe de l'induction en fonction de la position :

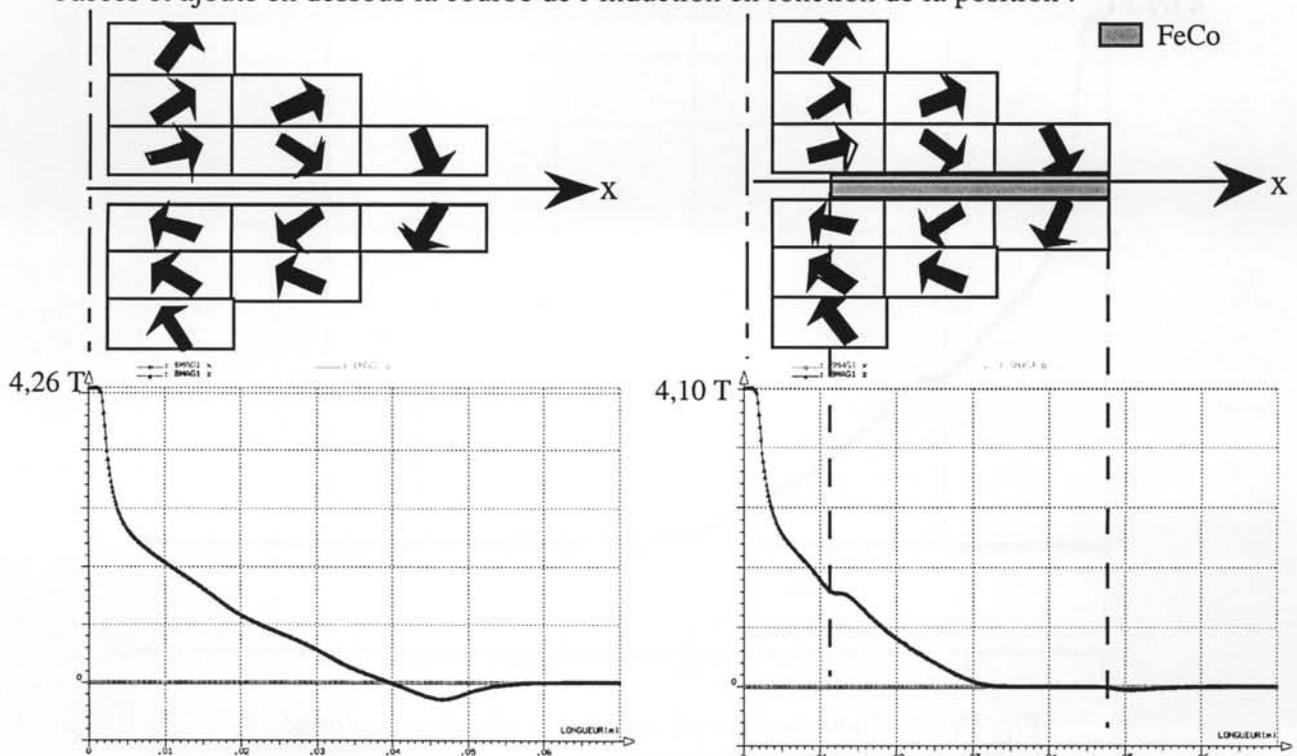


Fig IV.27 : Induction le long de l'accès avec et sans blindage.

Grâce à ces deux courbes, nous pouvons remarquer trois choses :

- L'induction varie de la même manière au centre de la structure. Par contre dans l'accès, l'induction s'annule au lieu d'être négatif.
- La baisse de l'induction au centre de la structure a été constatée et évaluée à près de 4 %.
- À l'extérieur de la structure, l'induction magnétique négative est largement atténuée. Malgré tout, il subsiste une petite zone à l'extérieur de la structure où l'induction reste négative.

Cet accès traverse les aimants situés dans le plan équatorial, et se prolonge vers le centre de la structure. En théorie, ce type de structure reboucle le flux créé par les aimants et le concentre au centre. Ceci est vrai pour un modèle théorique de sphère de Halbach où l'aimantation varie continûment. Par contre notre modèle d'ovoïde à aimantation continue met déjà en évidence l'existence de champs de fuite. De plus, la discrétisation en parallélépipèdes trapézoïdaux uniformément aimantés amplifie encore ce phénomène. Dans le cas présent, ceci correspond à un léger champ négatif à la sortie de la structure (Fig. IV.27). Nous sommes obligés de prolonger le blindage de l'accès jusqu'à l'extérieur des aimants pour minimiser l'influence des flux de fuites.

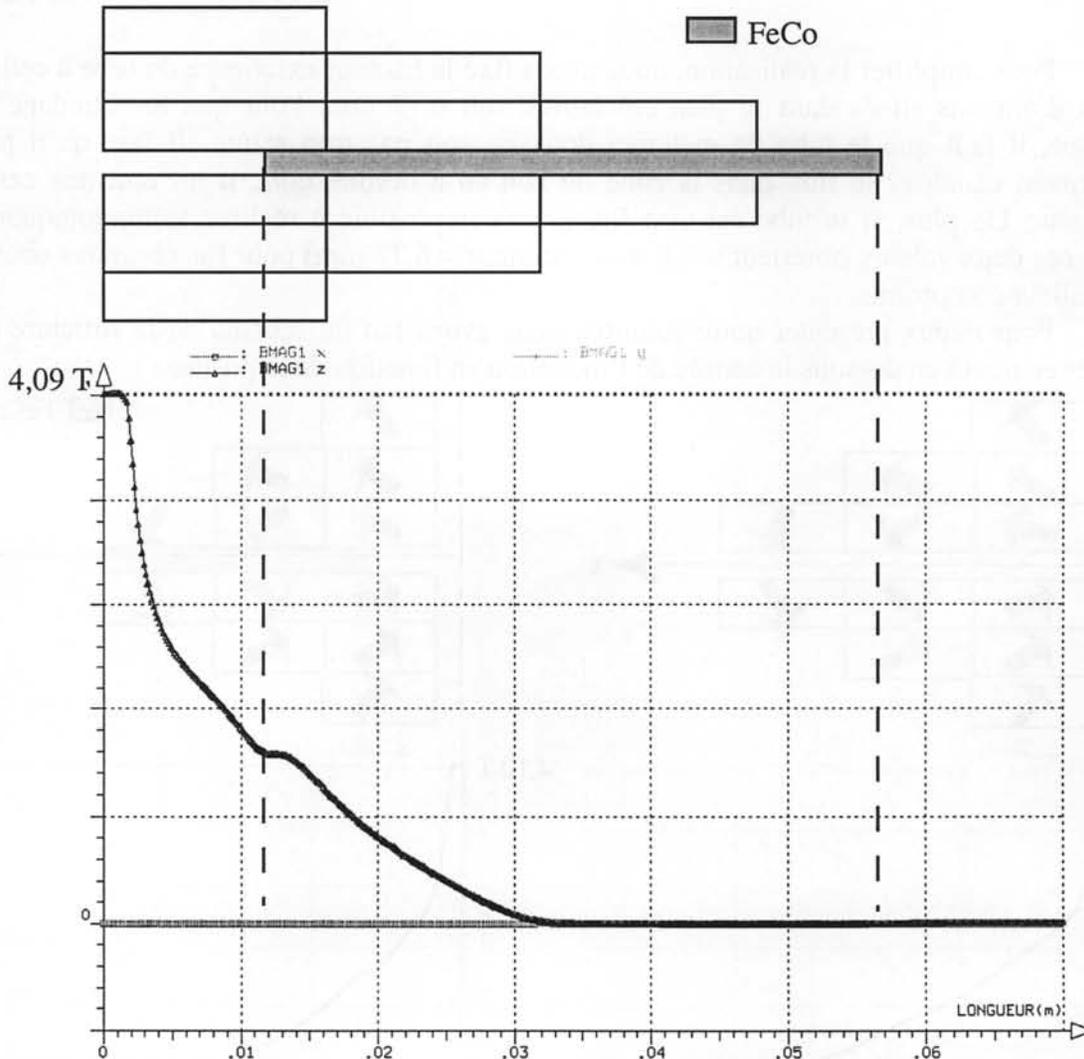


Fig. IV.28 : Induction dans l'accès avec blindage prolongé.

Si on compare les résultats, on peut voir que l'objectif est atteint. En effet, l'amplitude du champ négatif a fortement diminué: Elle passe de $-0,4\text{T}$ à $-0,025\text{T}$ soit -25 mT , ce qui devient négligeable devant le champ au centre de la structure. La longueur du tube a été prolongée vers le centre, mais a tendance à abaisser l'amplitude du champ au centre. De plus, le champ démagnétisant dans les aimants proches de cette zone augmente ponctuellement.

La longueur du tube vers le centre a été optimisée, car le fait de mettre le matériau doux trop près fait baisser le champ au centre de la structure. De plus, le champ démagnétisant dans les aimants proches de cette zone augmente ponctuellement.

Nous avons étudié l'influence du nombre d'accès sur l'amplitude du champ central :

- sans accès : $B = 4,26\text{ T}$
- deux accès (axe x): $B = 4,18\text{ T}$
- quatre accès (axes x,y) : $B = 4,09\text{ T}$

Pour ne pas avoir de limitations dans les applications scientifiques, nous nous sommes basés sur une structure à quatre accès dans le plan longitudinal. En fonction du volume nécessaire pour les applications, nous aurons des accès blindés ou pas.

IV.5.7 Conception de l'accès suivant l'axe z.

Nous allons maintenant voir les possibilités de l'accès central vertical de la structure (le long de l'axe z). Nous étudierons différentes pièces polaires. Nous verrons aussi la possibilité de faire varier l'entrefer entre les pièces polaires.

Comme nous l'avons vu précédemment, dans le chapitre IV.5.5, le rôle des pièces polaires est très important. Elles nous permettent d'augmenter le champ magnétique au centre sans désaimanter davantage les aimants.

Nous avons vu que l'optimal théorique correspond à des pièces polaires mixtes (matériaux magnétiques doux et dur). Pour simplifier la réalisation, nous avons étudié des pièces polaires entièrement en Fer-Cobalt. En partant de ce principe, nous avons étudié deux types de pièces polaires :

- des pièces polaires pleines. Ces pièces ne permettent pas un accès vertical au champ par le centre de la structure. C'est avec ces pièces que l'on aura le champ central le plus intense.

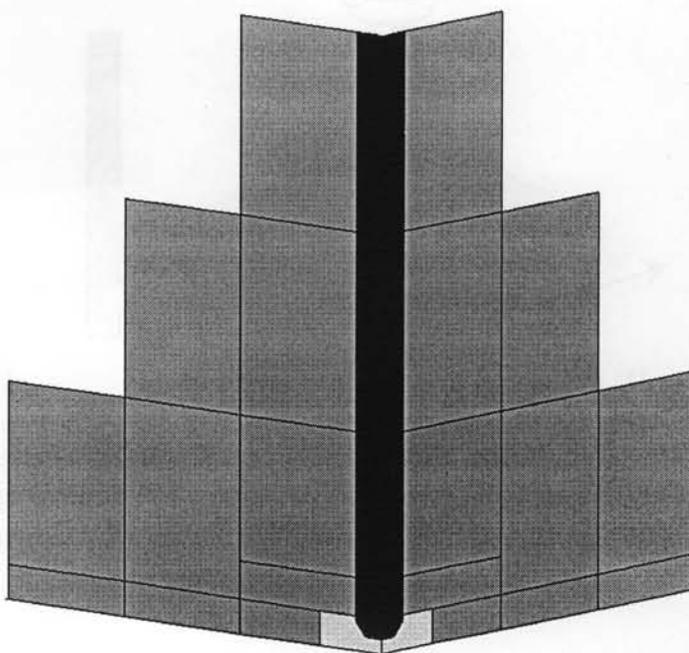


Fig IV.29a : Pièce polaire pleine.

- des pièces polaires avec un accès. Comme il y a moins de matériau magnétique, la contribution à la création du champ central est plus faible. Par contre, elles permettent de laisser passer un faisceau de RX en vue d'une étude de dichroïsme. Nous avons prévu un accès de 1mm de diamètre vers le centre de la structure, élargi à 3mm vers le haut pour tenir compte de la divergence du faisceau.

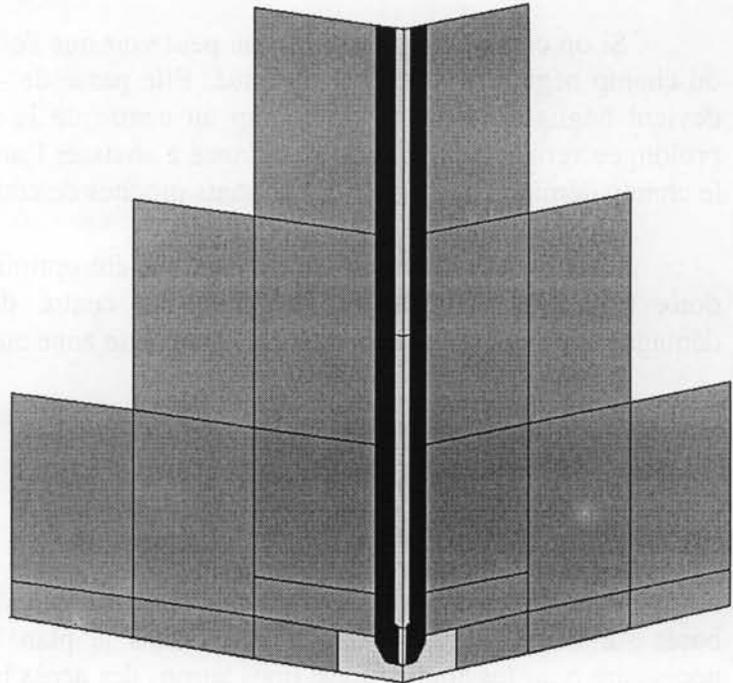


Fig IV.29b : Pièce polaire avec accès vertical.

Le fait de créer un accès dans les pièces polaires fait varier non seulement l'induction au centre de la structure, mais aussi la zone d'homogénéité du centre.

Pour la structure avec les pièces polaires pleines, le champ au centre de la structure augmente jusqu'au point central. Le maximum de champ est au centre de la structure car il est canalisé par le matériau doux.

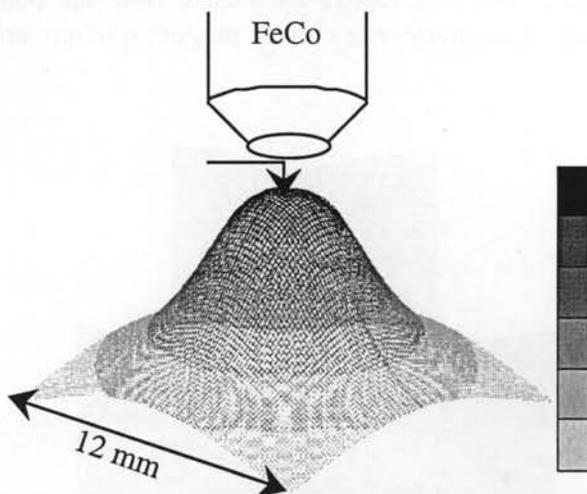


Fig IV.30a : Cartographie du champ central

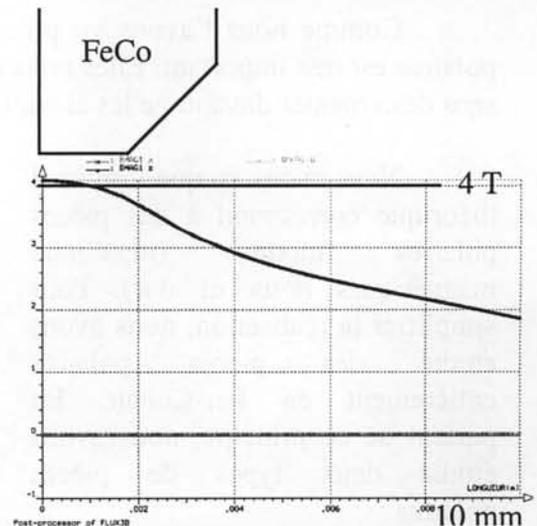


Fig IV.30b : Courbe du champ central.

Pour la structure avec les pièces polaires percées, le champ augmente puis baisse vers le centre. Le manque de matériau doux de l'accès n'apporte pas la contribution à la création du champ central. Le champ est canalisé à côté de la zone centrale, et non pas au centre.

C'est pourquoi on n'obtient pas le champ maximal au centre. Le champ maximal se situe au niveau où les pièces polaires sont les plus proches.

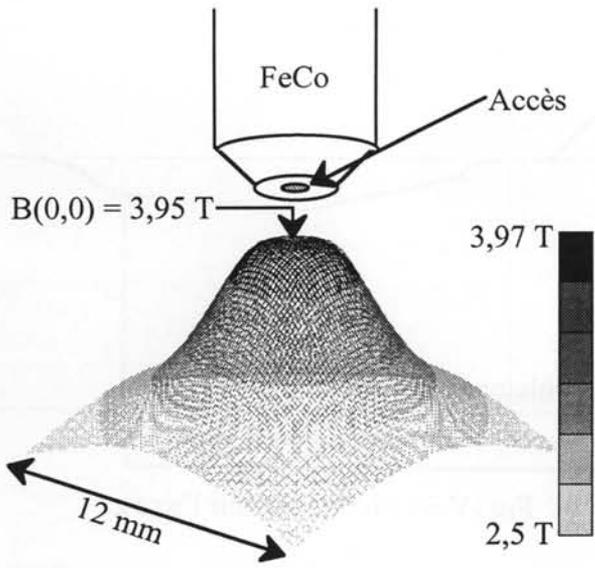


Fig IV.31a : Cartographie du champ central

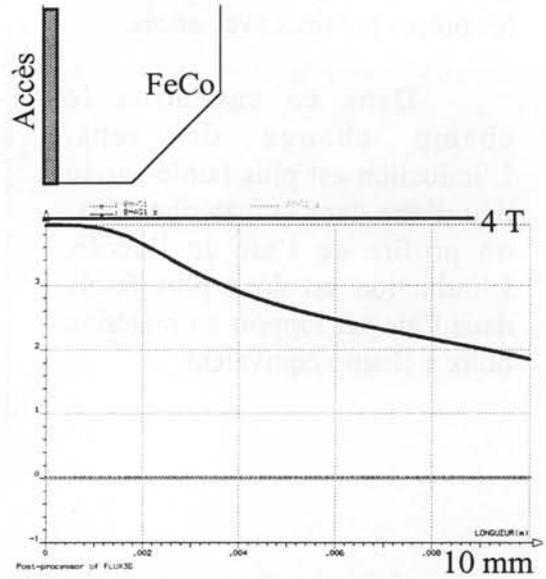


Fig IV.31b : Courbe du champ central.

La figure ci-contre représente la courbe de l'induction sur l'axe z avec une pièce polaire pleine. On peut remarquer tout de suite que le champ magnétique sur cet axe change de sens. L'amplitude de l'induction est amplifiée par le matériau doux car il lui faut très peu de champ pour arriver à obtenir une induction proche de sa saturation.

De plus, l'amplitude de l'induction met en évidence cette saturation au changement de sens du champ.

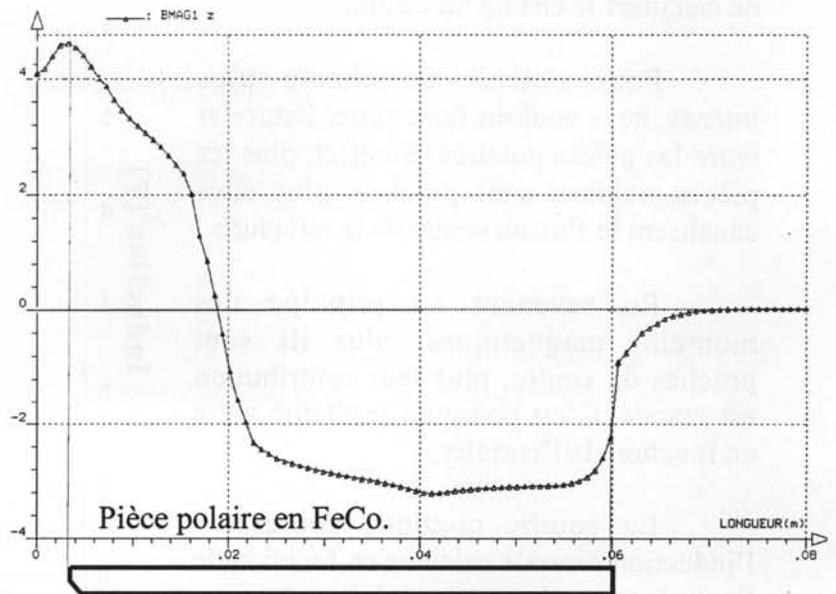


Fig IV.32 : Induction sur l'axe z.

Le Fer-Cobalt est un alliage ayant un très faible champ coercitif (Il atteint plus de 2T avec seulement 10 Oe à température ambiante).

La figure ci-contre représente elle aussi la courbe d'induction sur l'axe z, mais avec les pièces polaires avec accès.

Dans ce cas aussi le champ change de sens. L'induction est plus faible car au lieu d'être dans le matériau doux, on profite de l'air de l'accès. L'induction est donc plus faible dans l'air par rapport au matériau doux à champ équivalent.

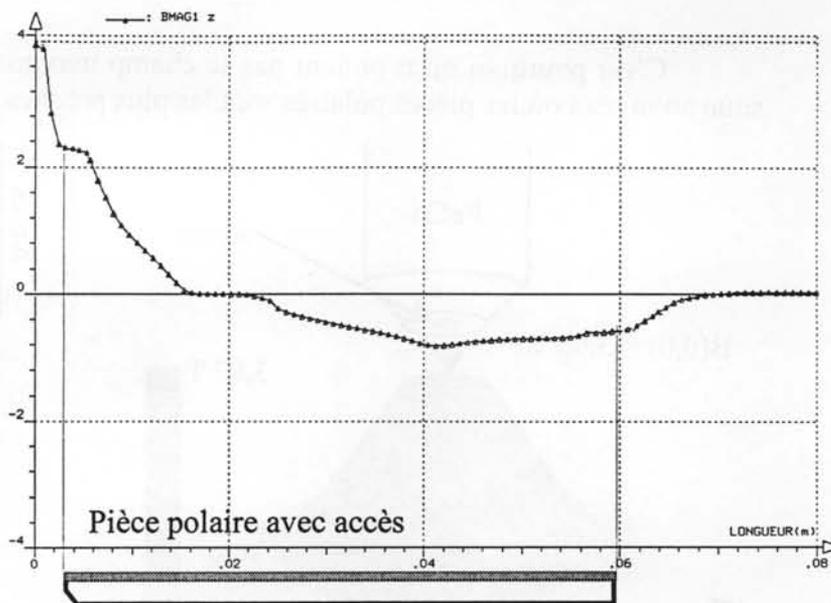


Fig IV.33 : Induction sur l'axe z.

Grâce à cet accès central vertical, on peut faire passer un faisceau. Par contre il n'est pas du tout prévu de mettre un échantillon au centre de manière verticale.

Dans les pièces polaires, le rôle du matériau doux est non pas de blinder l'accès mais de canaliser le champ au centre.

Pour obtenir un champ plus intense, nous voulons faire varier l'entrefer entre les pièces polaires. En effet, plus les pièces polaires sont proches, plus elles canalisent le flux au centre de la structure.

En revenant au principe des moments magnétiques, plus ils sont proches du centre, plus leur contribution est grande. C'est pourquoi le champ varie en fonction de l'entrefer.

La courbe ci-contre représente l'induction centrale calculée en fonction de l'entrefer avec des pièces polaires pleines.

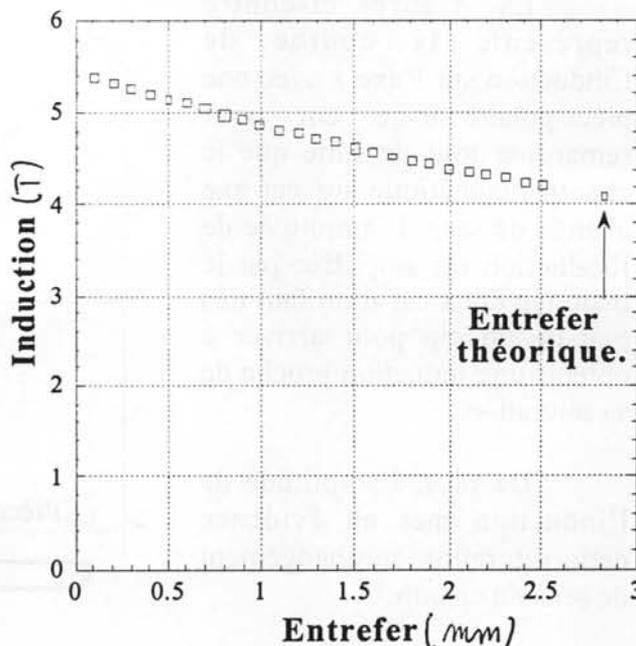


Fig IV.34 : Induction en fonction de l'entrefer.

Cette approche est valable pour la structure avec les pièces polaires pleines. Dès que l'on remplace les pièces polaires pleines par celles avec accès, la variation de l'entrefer fait apparaître une grande différence entre les courbes.

Lorsque l'on rapproche les pièces polaires pleines, l'induction centrale augmente constamment. Par contre, avec un accès vertical, l'induction augmente pour atteindre son maximum vers 1,3mm, puis baisse.

Les moments magnétiques dans les pièces polaires vers le centre sont orientés verticalement, dans la direction du champ créé par la structure. Si ces moments ne sont pas placés proche de l'axe, ils n'auront plus une contribution favorable à la création du champ magnétique, mais ils vont faire baisser le champ au centre. Plus les pièces polaires percées seront proches plus on se trouvera dans ce cas.

Ce phénomène peut se voir sous un autre angle. Le champ magnétique ne passera plus seulement au centre, mais sera canalisé par les pièces polaires. Plus on rapprochera les pièces polaires, plus le champ sera concentré dans les tubes et donc plus l'induction centrale baissera. On s'approchera d'un phénomène de court-circuit magnétique.

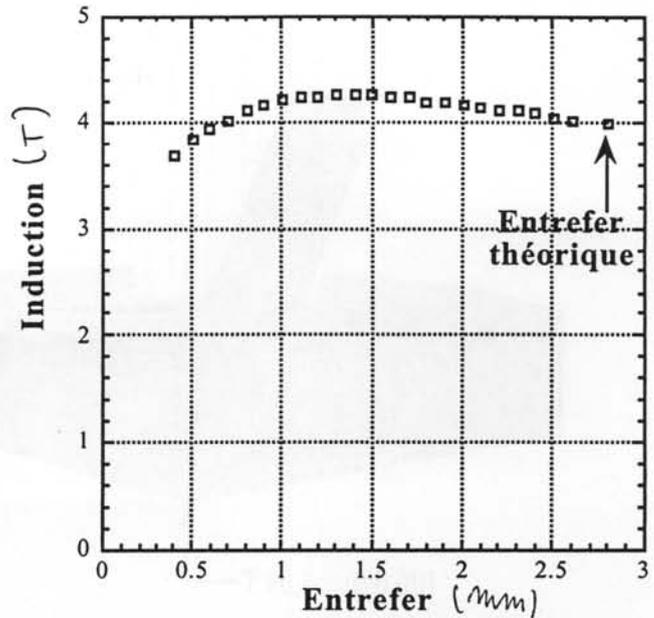


Fig IV.35 : Induction en fonction de l'entrefer.

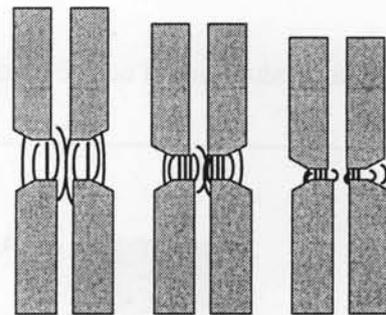


Fig IV.36 : principe de canalisation du flux.

IV.6 Résultats et caractéristiques de la structure.

Tout au long de cette approche, nous avons décidé de rendre réalisable le modèle optimal théorique. Nous avons :

- discrétisé l'ovoïde (d'abord la section puis les bagues obtenues) pour obtenir des pavés d'aimants réalisables.
- optimisé l'aimantation de ces pavés et affecté des caractéristiques réelles d'aimants.
- optimisé les pièces polaires en matériau doux ou non.
- conçu différents accès au champ.

Nous allons maintenant présenter les principales caractéristiques magnétiques de la structure obtenue :

- induction au centre (Fig IV.37a).
- induction à l'extérieur de la structure : champ de fuit (Fig IV.37b).
- champ démagnétisant dans les aimants (Fig IV.38).

Nous avons conçu cette structure en fonction des matériaux magnétiques disponibles. Nous sommes arrivés à obtenir une structure créant en son centre une induction de plus de 4 T tout en respectant les caractéristiques des aimants.

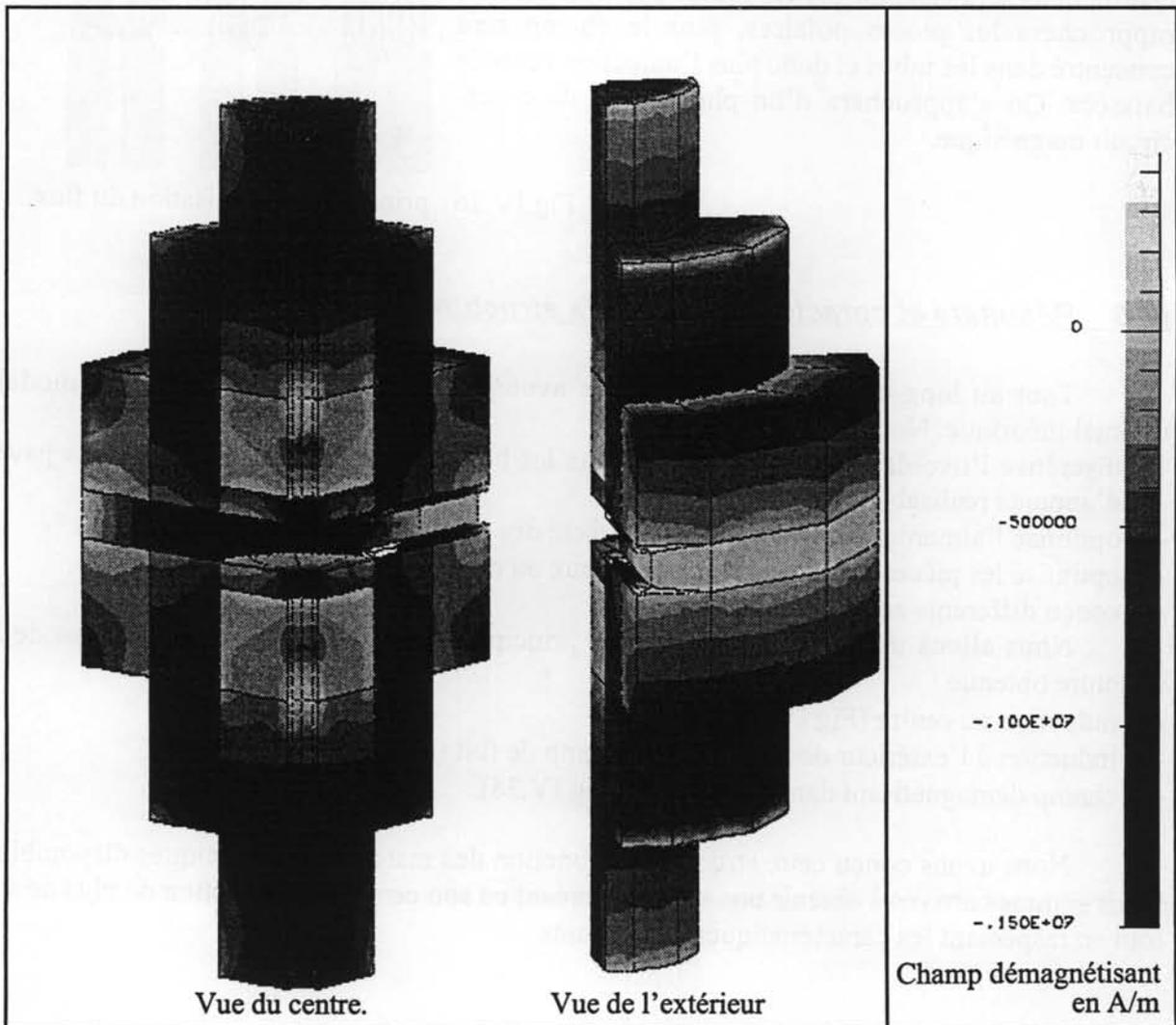
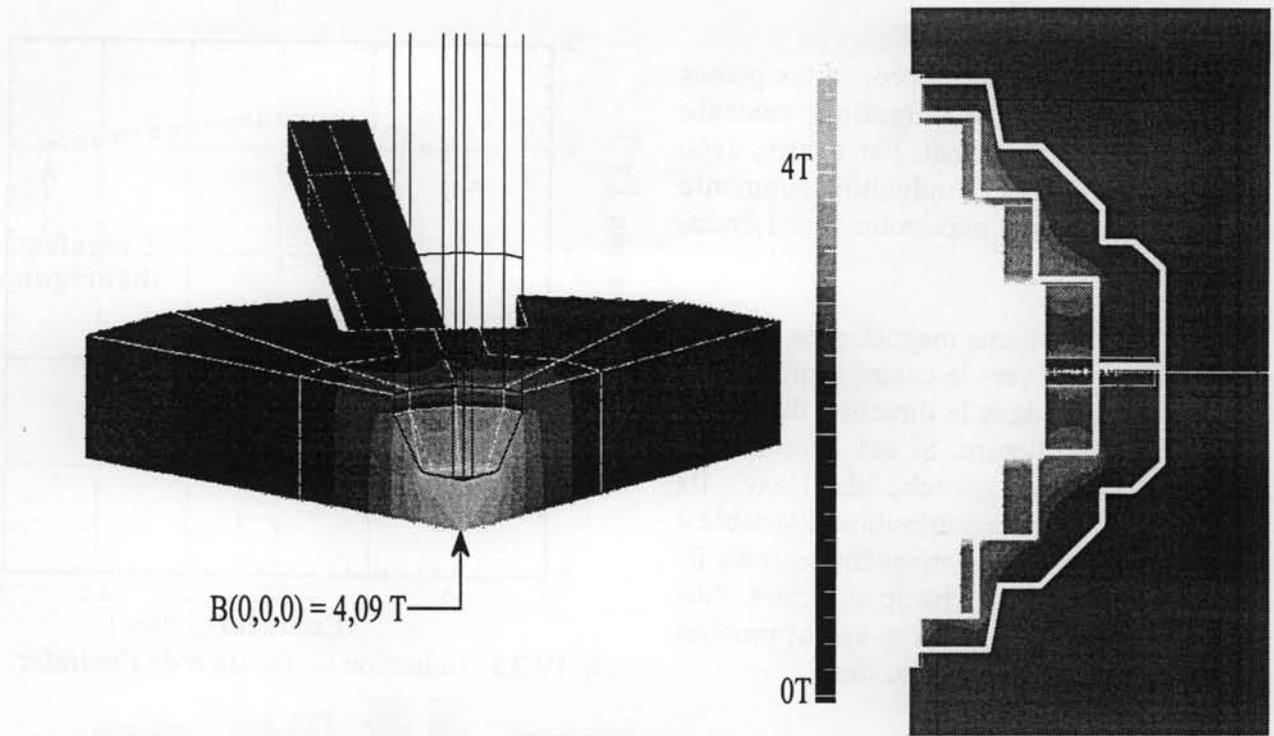


Fig IV.38 : Composante H_D du champ démagnétisant dans la structure.

IV.7 Simulations du montage de la structure.

À présent, nous avons obtenu une structure, mixant aimants permanents et matériaux doux, stable du point de vue magnétique. Il est maintenant nécessaire de prévoir des séquences de montage des pavés aimantés dans les tranches en n'oubliant pas l'aspect pratique de la réalisation avec ses contraintes mécaniques de faisabilité. Il faut donc définir un protocole d'approche des aimants pour éviter leur désaimantation et pour contrôler le mieux possible les forces d'interaction magnétostatique.

IV.7.1 Interactions entre aimants.

Il existe un moyen rapide de prédire qualitativement l'interaction entre deux blocs aimantés. Il suffit de placer les charges magnétiques virtuelles. Il est facile d'en déduire le signe des interactions car, comme en électrostatique:

- Les charges opposées s'attirent.
- Les charges de même signe se repoussent.

Par contre avec cette méthode, nous n'avons aucune notion de l'amplitude des forces mises en jeu.

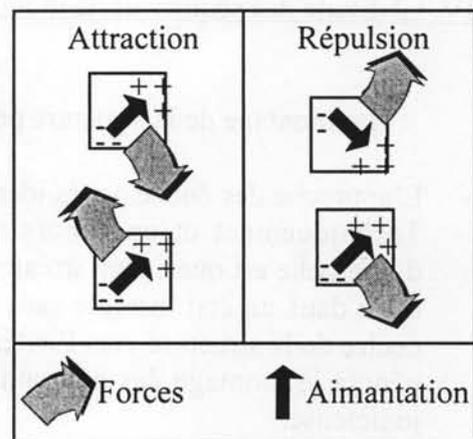


Fig IV.39

Il faut aussi tenir compte de la raideur entre les aimants. Cette grandeur représente une variation de la force entre les aimants par rapport à la distance les séparant. Elle est très importante car elle définit le sens de variation des forces (minima locaux, attraction de plus en plus forte, répulsion puis attraction, etc.), souvent traître.

L'interaction entre deux aimants varie en fonction de leur position spatiale relative. Dans la figure IV.40, nous avons représenté deux aimants identiques. En fonction de leur position, on voit que l'interaction n'est pas la même. De toute façon, le système tend à minimiser l'énergie. Si on n'intervient pas, les aimants trouvent un état final stable en attraction et au contact l'un de l'autre après déplacement ou rotation physique d'un des aimants.

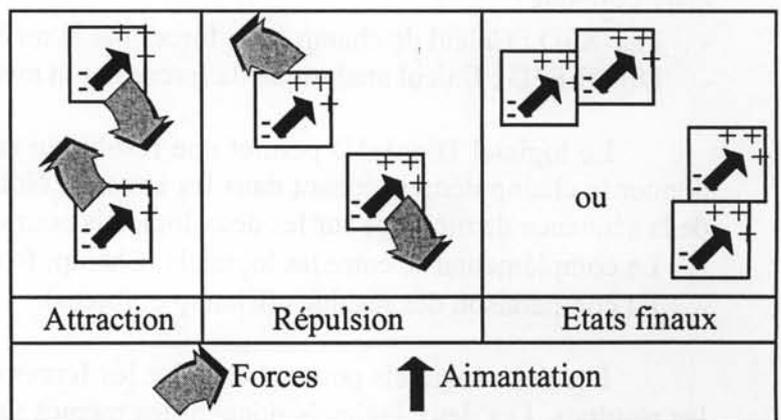


Fig IV.40

Lors de la réalisation, il est important de connaître l'ordre de grandeur de ces forces pour savoir s'il est encore possible de les manipuler manuellement ou si l'on devra prévoir des systèmes mécaniques d'approche. Dans notre cas, nous avons posé deux limites en fonction du type d'interaction :

- en attraction, des forces de moins de 70 newtons sont encore manipulables.
- en répulsion, des forces de moins de 20 newtons sont encore manipulables.

Au-delà de ces amplitudes, nous ferons appel à un système mécanique de maintien des pièces.

D'une manière générale, lors de l'approche de deux pavés, il faudra faire attention de ne pas les entrechoquer afin d'éviter tout cassure ou ébréchure de l'aimant.

IV.7.2 Étude des séquences de montages possibles.

Le montage de la structure peut se voir de deux façons :

- L'approche des douze pavés identiques formant une bague, puis l'approche de ces bagues. Techniquement et en dehors de toute considération de désaimantation, ce principe d'approche est quasiment irréalisable. Dans une bague, les pavés sont en répulsion, et sont donc dans un état instable sans un système de maintien. De plus, le montage se fera du centre de la structure vers l'extérieur et donc le système de maintien des aimants centraux gênera le montage des couronnes suivantes. Cette séquence de montage n'est donc pas judicieuse.
- La deuxième possibilité consiste à monter individuellement les douze tranches, puis à les rapprocher globalement ensemble. Ce principe est beaucoup plus intéressant car les pavés dans une tranche sont en majorité en attraction. Il permet ainsi d'obtenir une grande stabilité lors de la réalisation ; c'est un avantage certain. Par contre, pendant leur approche les douze tranches sont en répulsion entre elles. Malgré tout, cette solution a été retenue.

Nous avons simulé cette séquence d'approche en testant à chaque fois le critère de désaimantation et en vérifiant l'amplitude maximale des forces. Pour cela nous avons utilisé deux logiciels :

- FLUX3D : Calcul de champ et de forces par la méthode des éléments finis.
- DIPOLE3D : Calcul analytique de forces par la méthode des dipôles magnétiques.

Le logiciel Dipole3D permet une résolution rapide du système, mais il ne peut nous donner le champ démagnétisant dans les aimants. Nous avons donc simulé les mêmes étapes de la séquence de montage sur les deux logiciels pour deux raisons :

- La complémentarité entre les logiciels (Champ, forces, raideur, couple, désaimantation).
- La comparaison des résultats (Champ et forces).

Les deux logiciels pouvant calculer les forces et les champs, nous avons pu comparer les résultats. Les deux logiciels donnent les mêmes valeurs à quelques pour cents près. C'est pourquoi nous considérons que les résultats obtenus sont complémentaires.

IV.7.3 Montage d'une tranche.

Dans cette partie, nous allons voir précisément le montage d'une tranche.

Une tranche est composée de 16 pavés d'aimants. Pour cette étude, nous l'avons séparé en trois ensembles composés de tous les morceaux ayant la même section horizontale trapézoïdale (Fig. IV.41).

La première simulation a été de calculer les forces dans une tranche complète (Fig. IV.42). Grâce à cette simulation, on a pu mettre en évidence les interactions entre les aimants. Lors de la réalisation, il est beaucoup plus intéressant d'avoir des pavés en attraction (stabilité).

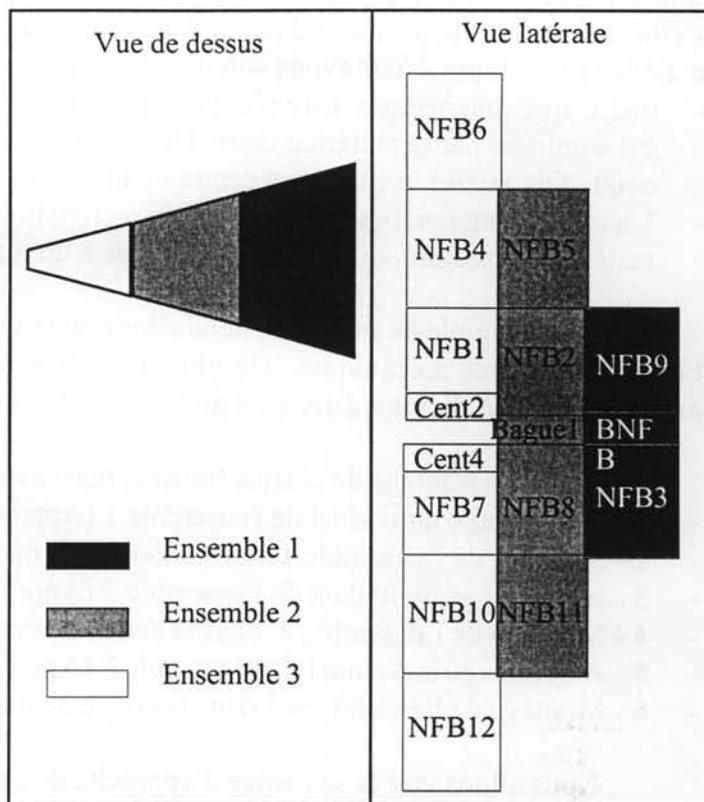


Fig IV.41

Avec la distribution d'aimantation indiquée par la figure IV.40, seuls quelques pavés représentés en grisé sont en répulsion avec leur voisin.

Lorsque l'on regarde les sens des forces, on voit tout de suite que :

- les pavés vers l'extérieur sont attirés vers l'axe centrale de la structure.
- les pavés proches de cet axe sont attirés vers l'extérieur de la structure.

Grâce à ces deux séries de forces, on obtient un effet de pincement des aimants de l'ensemble 2 (Fig. IV.41). Ces forces ont pour effet de stabiliser la structure.

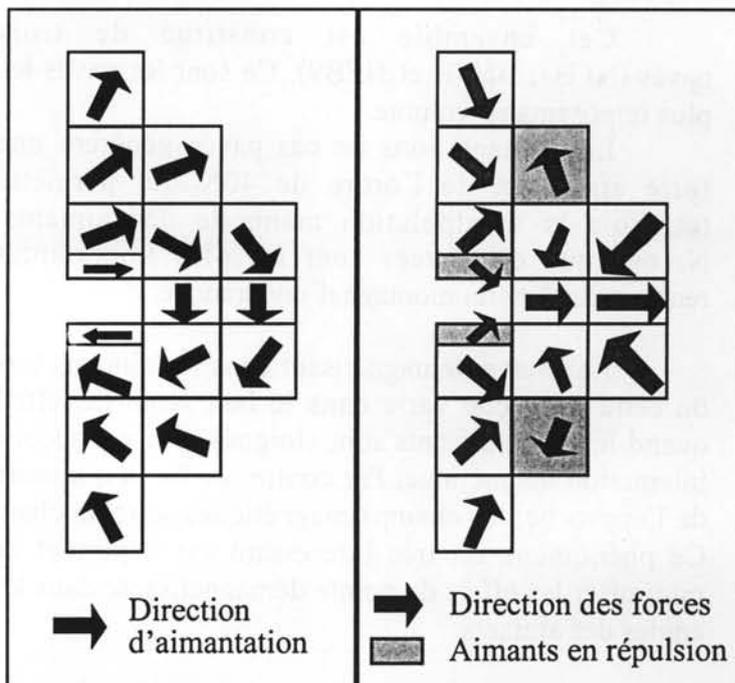


Fig IV.42 : Aimantation et forces dans une tranche.

Bien que la plupart des pavés soient en attraction, les pavés d'aimants NFB5 et NFB11 sont en répulsion (pavés centraux en gris sur la figure IV.40) et ont tendance à vouloir s'éloigner de la tranche. Nous devons donc prévoir de monter les aimants dans un système de maintien mécanique. Nous avons simulé deux types de coques de maintien :

- une coque magnétique. Elle n'est pas intéressante car l'induction de fuite de la structure est amplifiée par le matériau doux. De plus, la contribution des moments magnétique de la coque fait baisser le champ au centre de la structure.
- Une coque amagnétique. De par ses caractéristiques magnétiques, elle n'influence pas le reste de la structure. Son rôle s'arrête donc à un maintien mécanique.

Pour la coque de maintien, nous allons donc utiliser un matériau amagnétique ayant de bonnes propriétés mécaniques. De plus, tout système d'approche sera réalisé en matériau amagnétique afin d'éviter différents problèmes : forces, désaimantation, etc.

Pour l'assemblage de chaque tranche, nous avons suivi l'ordre d'assemblage suivant :

- 1 - Assemblage individuel de l'ensemble 1 (Approche pavé par pavé).
- 2 - Montage de l'ensemble 1 dans la coque de maintien mécanique.
- 3 - Assemblage individuel de l'ensemble 2 (Approche pavé par pavé).
- 4 - Montage de l'ensemble 2 dans la coque de maintien mécanique.
- 5 - Assemblage individuel de l'ensemble 3 (Approche pavé par pavé).
- 6 - Montage de l'ensembles 3 dans la coque de maintien mécanique.

Nous allons voir la séquence d'approche de chaque ensemble.

- 1 - Assemblage individuel de l'ensemble 1 (Approche pavé par pavé).

Cet ensemble est constitué de trois pavés (NFB3, BNFB et NFB9). Ce sont les pavés les plus imposants en volume.

Les aimantations de ces pavés génèrent une forte attraction de l'ordre de 40N qui permette toutefois la manipulation manuelle des aimants. Notons que ces forces sont les plus importantes rencontrées lors du montage d'une tranche.

Le champ démagnétisant dans les aimants lors de cette approche varie dans le bon sens. En effet, quand les deux aimants sont éloignés, il n'y a aucune interaction magnétique. Par contre, au fur et à mesure de l'approche, les champs magnétiques se rebouclent. Ce phénomène est très intéressant car il permet de minimiser les effets de pointe démagnétisante dans les angles des aimants.

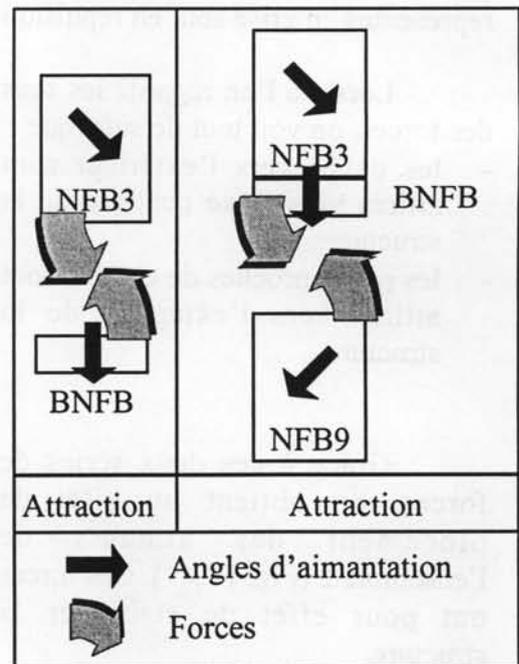


Fig IV.43

En fait, l'aimant seul dans l'air a déjà subi une désaimantation partielle due à sa forme géométrique et à son angle d'aimantation.

Pour l'ensemble 1, Nous arrivons donc facilement à obtenir un état stable. Les trois pavés étant en attraction, il n'y a pas de problèmes pour les assembler.

Toutefois, comme l'orientation de l'aimantation est variable d'un pavé à l'autre, les pavés se trouvent dans un état stable légèrement désaligné. En effet, d'après la figure IV.44, la composante z des forces permet l'attraction, mais il existe une composante x car l'aimantation dans les aimants NFB3 et NFB9 n'est pas dirigée vers le bas contrairement au pavé BNFB. Cette composante trouve un minimum en ayant une position proche de celle représentée sur la figure ci-contre.

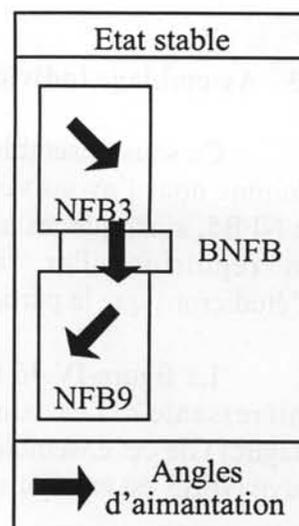


Fig IV.44

La force d'attraction est d'environ 160 N au contact, 80 N à 1mm d'espacement et 20 N à 7 mm. Il faudra faire très attention à les tenir lors de l'approche. En conclusion, nous n'aurons pas de problèmes lors du montage de cet ensemble.

- 2 - Montage de l'ensemble 1 dans la coque de maintien mécanique.

Pour insérer les aimants dans la coque amagnétique, il est nécessaire d'appliquer une force latérale, de manière à donner à l'ensemble 1 sa position définitive. Une vis permet finalement de maintenir les aimants à leur place prévue par les simulations. (Fig.IV.45).

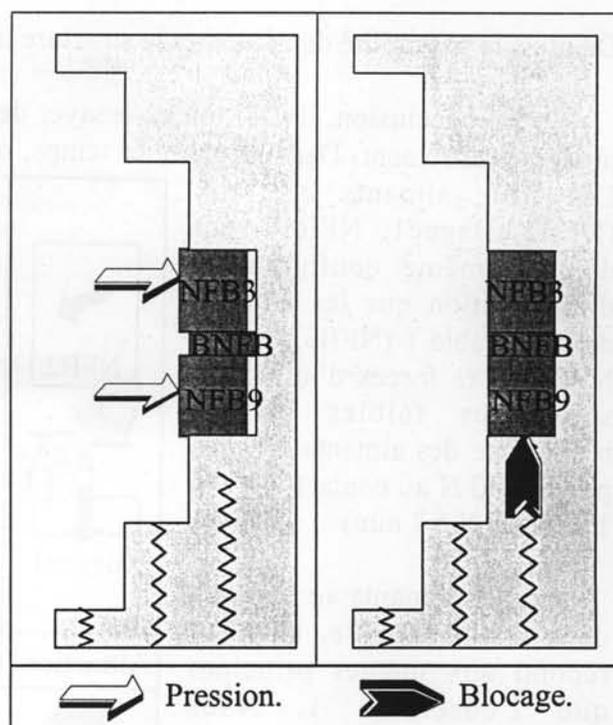


Fig IV.45

- 3 - Assemblage individuel de l'ensemble 2 (Approche pavé par pavé).

Ce sous-ensemble est composé de cinq pavés (NFB5, NFB2, Bague1, NFB8, NFB11). Comme nous l'avons vu lors de la simulation des forces dans une tranche, les aimants NFB2 et NFB5, ainsi que les aimants NFB8 et NFB11 sont en répulsion. Par raison de symétrie, nous n'étudierons que la partie supérieure de la structure.

La figure IV.46 représente une approche peu intéressante : Les aimants centraux (NFB2 et Bague1) de cet ensemble sont bien en attraction, et le pavé NFB5 est en répulsion avec les deux autres.

Pour contrecarrer cette répulsion, il faudrait coller les aimants. C'est une approche théoriquement simple, mais très difficile à mettre en œuvre au niveau de la réalisation. Des problèmes de choix de colle sont nécessaires, des essais sont obligatoires pour validation, avant d'inclure les aimants dans la structure. De plus, l'épaisseur de la colle est une contrainte très importante pour respecter les côtes de la structure.

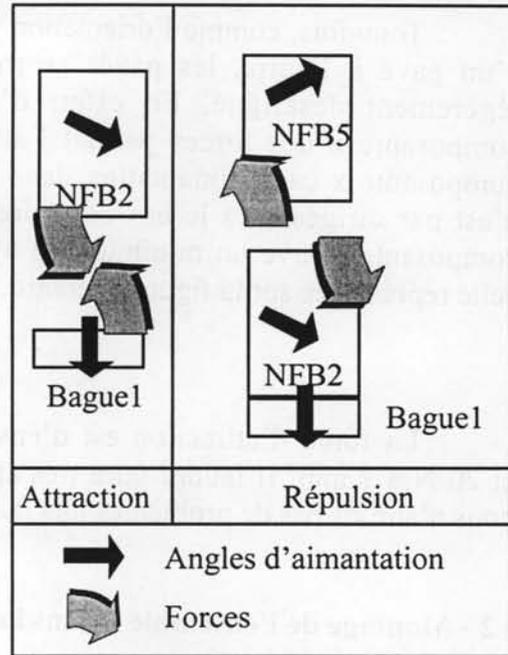


Fig IV.46 : Etape à ne pas faire.

De plus, la possibilité de démonter la structure est un avantage certain pour son évolution.

En conclusion, il vaut mieux essayer de ne pas coller les aimants. Nous devons donc procéder autrement. Dans un premier temps, nous allons associer les aimants en attraction.

Les trois aimants centraux (NFB2, Bague1, NFB8) sont dans la même configuration d'aimantation que les aimants de l'ensemble 1 (NFB3, BNFB, NFB9). Les forces d'attraction sont plus faibles car la rémanence des aimants est plus petite (100 N au contact, 40 N à 1 mm, 15 N à 7 mm)

Les aimants se trouvent dans un état stable. Cet état répond aux mêmes principes que l'ensemble 1. Nous obtenons un état stable entre les trois aimants.

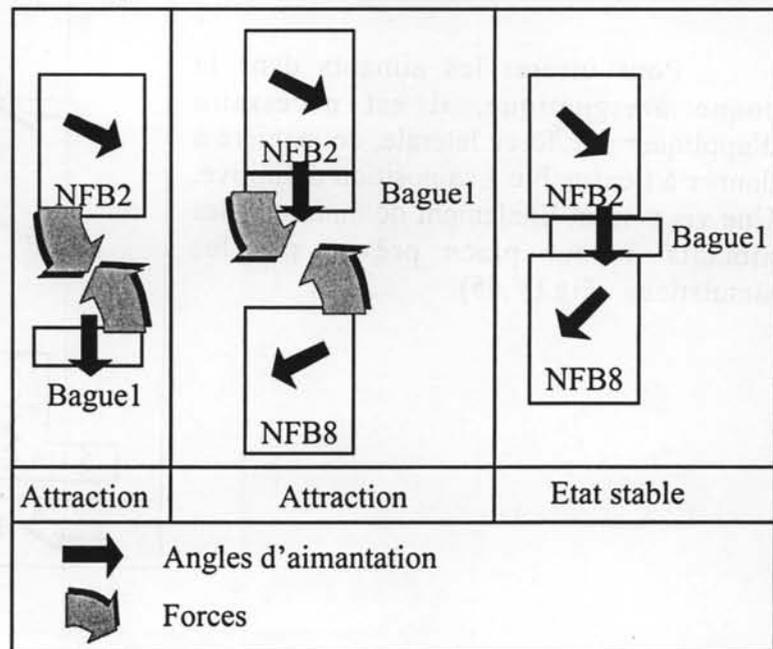


Fig IV.47

De même, plutôt que de coller les deux aimants récalcitrants (NFB5 et NFB11), nous allons approcher la série de pavés en attraction de ceux déjà montés dans la coque.

- 4 - Montage de l'ensemble 2 dans la coque de maintien mécanique.

Le montage de cet ensemble incomplet dans les coques de maintien ne pose pas de problème magnétique. Le seul problème rencontré est la force d'attraction. En effet, vu les angles d'aimantation, les six aimants sont en attraction. Les forces atteignent 150 N au contact, 110 N à 1 mm, 70 N à 7 mm, ce qui est encore manipulable. Mais il faudra concevoir un système pour les maintenir les aimants de l'ensemble 2 incomplet tous à la même distance de l'ensemble 1.

On obtient donc un ensemble de six aimants en attraction. Cet ensemble est très stable.

Dans un second temps, il faut approcher les deux aimants manquants de l'ensemble 2.

Dans cette configuration, les forces pour approcher les deux aimants (NFB5 et NFB11) sont plus intéressantes : au début, il faut une pression raisonnable pour les approcher (jusqu'à 50 N). Ensuite, ils prennent leur place prévue.

En effet, il y a répulsion de ces pavés (NFB5 et NFB11) avec les pavés de leur ensemble (respectivement NFB2 et NFB8). Mais l'ensemble 1 permet d'avoir une attraction avec ces pavés, et donc d'avoir une interaction quasi nulle (très faible).

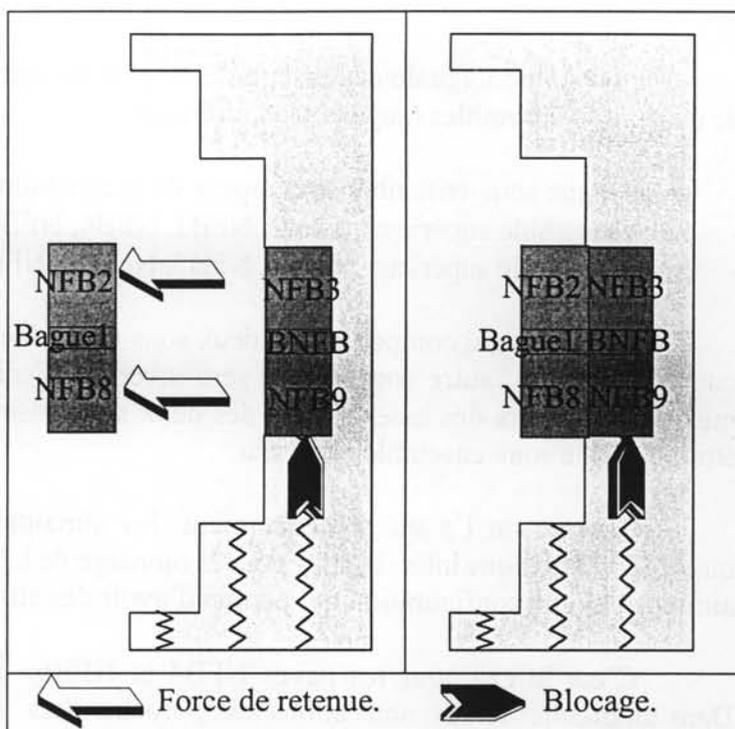


Fig IV.48

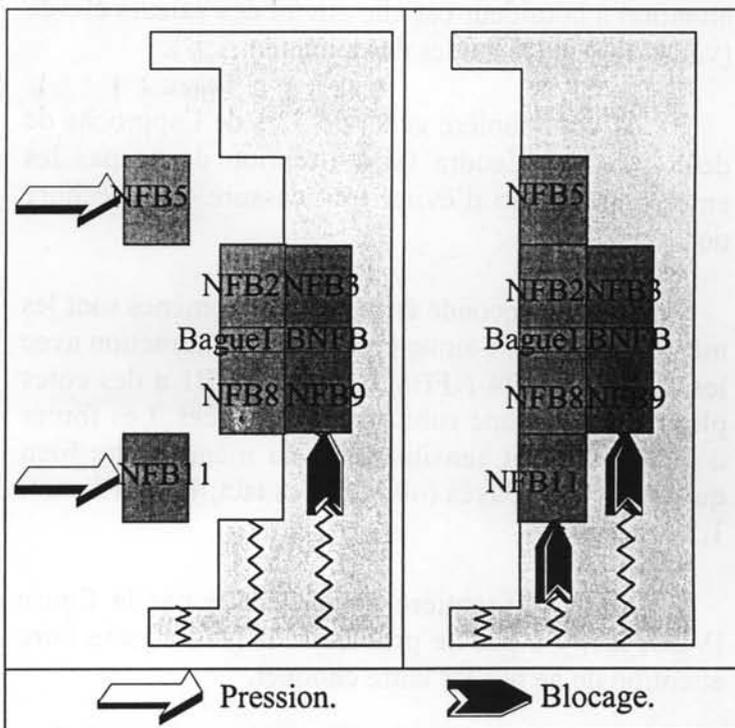


Fig IV.49

Lors de la réalisation et du montage de la structure, il faudra essayer de suivre cette méthode pendant cette étape. Au niveau magnétique, comme on l'a constaté lors de l'approche de l'ensemble 1, les configurations des aimants permettent d'avoir une légère baisse du champ démagnétisant au niveau des angles des aimants.

- 5 - Assemblage individuel de l'ensemble 3 (Approche pavé par pavé).

Pour le montage de cet ensemble, on peut facilement voir qu'il est composé lui-même de deux sous-ensembles (supérieur et inférieur).

Chaque sous-ensemble se compose de quatre morceaux :

- Sous ensemble supérieur : Cent2, NFB1, NFB4, NFB6.
- Sous ensemble inférieur : Cent4, NFB7, NFB10, NFB12.

Les pavés qui composent ces deux sous-ensembles ont pour leurs orientations la même composante z et l'autre composante sera inversée. Ceci revient à dire que l'on va avoir les mêmes forces lors des assemblages des deux sous-ensembles. C'est pourquoi nous n'allons étudier que le sous-ensemble supérieur.

Comme on l'a vu précédemment, les aimantations des pavés permettent dans la majorité interactions intéressantes pour le montage de la structure. Dans ce sous-ensemble, les aimants ont une configuration qui permet d'avoir des attractions entre plusieurs pavés.

C'est le cas pour les pavés NFB4 et NFB6. Dans un premier temps, nous allons les approcher. Les forces mises en jeu ne dépassent pas 70 N au contact, 30 N à 1mm et 5 N à 7mm. Par contre il faut faire très attention à la raideur car elle atteint des valeurs élevées (vu la taille et les angles des aimants).

D'une manière générale, lors de l'approche de deux pavés, il faudra faire attention de ne pas les entrechoquer afin d'éviter toute cassure ou ébréchure de l'aimant.

Pour la seconde étape, les phénomènes sont les mêmes. En effet, l'aimant NFB1 est en attraction avec les aimants NFB4-NFB6. Le pavé NFB1 a des côtes plus petites et donc subit moins de forces. Les forces d'attraction sont sensiblement du même ordre bien qu'il y ait trois pavés (40 N au contact, 15 N à 1 mm, 1,5 N à 7 mm).

Pour la première étape décrite par la figure IV.50, il n'y a pas de problème. Il faudra juste faire attention de ne pas les entrechoquer.

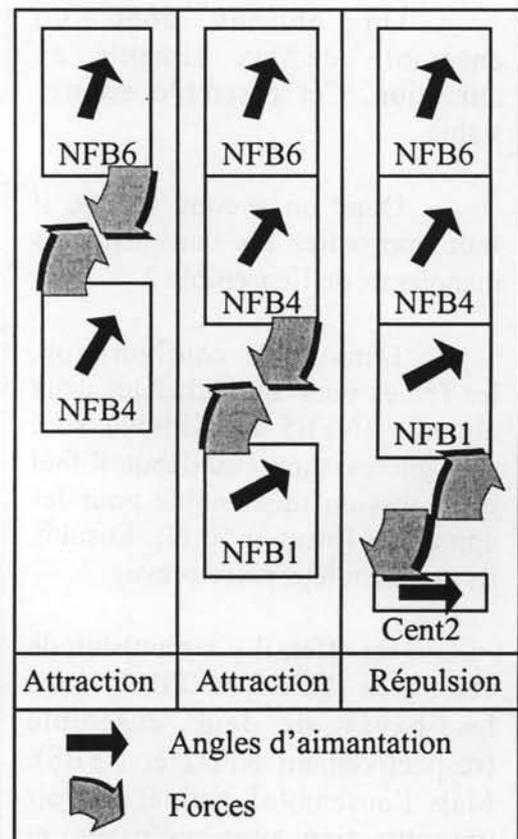


Fig IV.50

Par contre, le pavé d'aimant Cent2 est en répulsion avec l'assemblage des trois autres pavés. Dans ce cas, il n'y a qu'une manière de les assembler : le collage.

Cette approche est pour avoir un ensemble individuel or nous n'allons pas laisser ces aimants seuls, mais les inclure dans la structure avec d'autres aimants. Nous allons suivre le même cheminement que pour l'ensemble précédent.

- 6 - Montage de l'ensemble 3 dans la coque de maintien mécanique.

Sur la figure IV.50, on peut voir que les aimants Cent2 et Cent4 sont en répulsion avec les aimants du même sous-ensemble. Mais les deux aimants Cent2 et Cent4 sont attirés par le reste de la structure quand ils ont leurs places au sein de la tranche (Fig. IV.51). C'est pourquoi on obtient une certaine stabilité. Nous allons donc essayer d'éviter le collage de ces aimants (les plus petits de la structure).

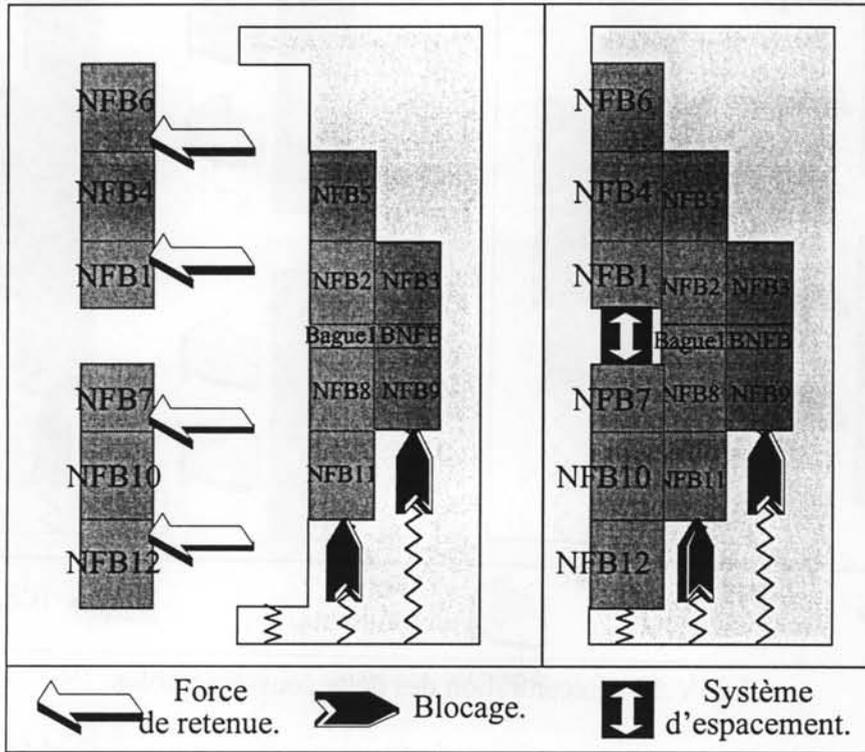


Fig IV.51

Dans un premier temps, nous allons approcher simultanément les deux sous-ensembles incomplets vers le reste de la tranche. Cette approche risque d'être délicate à mettre en œuvre car les deux sous-ensembles sont en forte attraction avec le reste de la tranche (180N au contact, 140 N à 1 mm, 45 N à 7 mm), ce qui est encore manipulable. Mais il faudra concevoir un système pour les maintenir les aimants des deux sous-ensembles tous à la même distance de l'ensemble 2.

De plus, ce système sera étudié pour tenir les aimants espacés car les deux sous-ensembles vont vouloir se coller ensemble. Il ne faut pas qu'ils forment un seul ensemble car il sera impossible de les séparer pour insérer les aimants Cent2 et Cent4.

En ayant pris en compte le système d'espacement, la tranche est dans une position de très grande stabilité. Les aimants qui posaient des problèmes (NFB5 et NFB11) lors du montage de l'ensemble précédent, se trouvent encerclés par des aimants en attraction (ensemble 1 et les deux sous-ensembles 3). Ils subissent une force dont la plus forte composante a tendance à plaquer les aimants dans la coque de maintien. Ils sont comme pris dans un étau.

Pour compléter cette étude, on a simulé une excentration verticale. Nous avons fait cette simulation pour envisager un aspect de la faisabilité (Fig. IV.52).

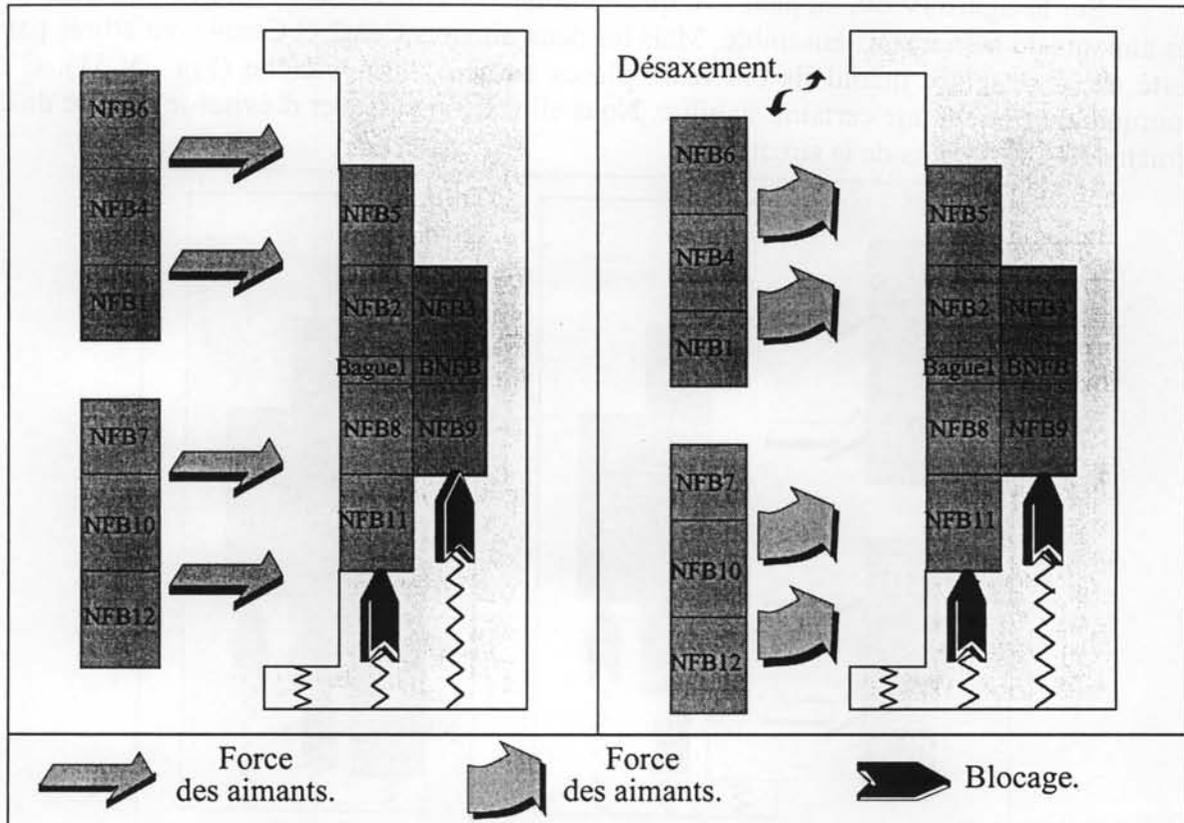


Fig IV.52 : Excentration des deux sous-ensembles.

Le résultat de cette simulation est positif car les deux sous-ensembles tendent à se centrer automatiquement. En effet, les deux sous-ensembles vont se placer dans une zone géométrique (via des forces et un déplacement) où le gradient de champ est nul.

La seule position est à sa place finale. Dans une étape intermédiaire (à une distance fixe de la tranche sur l'axe x, mais ayant un degré de liberté suivant l'axe z), la position pour subir le moins de gradient est la position centrée par rapport à la tranche.

D'une façon analogue, nous avons simulé une excentration sur l'axe y. Pour les mêmes raisons, nous obtenons aussi une force de rappel qui tend faire subir aux deux sous-ensembles un gradient nul.

Cette approche à été faite pour l'approche des deux sous ensembles composant l'ensemble 3. Par vérification, nous avons fait aussi le même type de simulation pour l'approche de l'ensemble 2 (incomplet) vers l'ensemble 1. On arrive au même résultat, c'est à dire une force qui recentre automatiquement les deux ensembles.

Grâce à cette étude, on a pu vérifier que le système tend à être stable, et à se centrer de lui-même. Ceci facilitera la réalisation.

Dans un second temps, on va approcher les deux aimants en dernier lors du montage de la tranche. De cette façon, nous évitons les problèmes de collage des aimants. Comme on l'avait vu lors de l'affectation des matériaux, nous avons séparé les deux aimants centraux par une pièce en laiton. Cette pièce représente la nuance d'aimant qui n'est pas encore disponible. Elle est nécessaire pour maintenir les aimants dans leurs positions théoriques.

Le champ démagnétisant que subissent les pavés (Cent2 et Cent4) est assez important. Mais étant donné leur géométrie et leurs angles d'aimantation, ils sont légèrement désaimantés avant même de les approcher du reste de la tranche. À partir de ce moment, il sera très difficile de les désaimanter plus.

Vu la taille des aimants centraux, les forces agissant sur ces aimants sont très petites (inférieures à 20 N au contact). Le seul inconvénient, au niveau de la réalisation, est qu'il faut trouver un système d'espacement (pour les deux sous-ensembles) qui puisse ensuite inclure les deux aimants centraux.

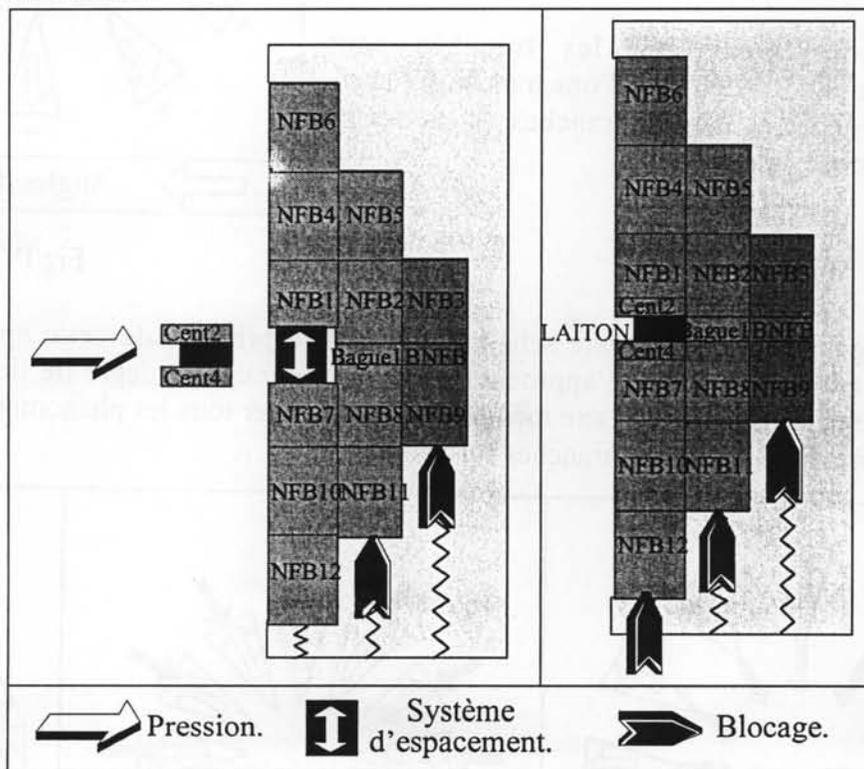


Fig IV.53

En conclusion pour le montage d'une tranche, nous avons :

- pas de problème de champ démagnétisant. Vu les angles d'aimantation de la structure, les champs démagnétisant se rebouclent.
- pas de problèmes lors du montage des ensembles séparément. Vu les forces mises en jeu, une approche manuelle est encore envisageable. Toutefois, il faudra faire attention pour le montage de l'ensemble 1 car ce sont les plus gros aimants.
- pour l'approche de l'ensemble 2 et des deux sous ensembles (qui composent l'ensemble 3), il faudra concevoir deux systèmes d'approches. Les forces ne sont pas le critère le plus important dans ce cas. Il faut les maintenir tous ensemble (pour qu'un aimant ne se dissocie pas de son ensemble pour aller vers l'autre).

IV.7.4 Approche des tranches.

Pour commencer cette étude, nous avons calculé les forces entre chaque tranche pendant qu'on les approche les unes des autres.

Sur la figure ci-contre, nous avons représenté douze pavés d'aimants ayant la même aimantation. En plaçant les charges magnétiques virtuelles, nous arrivons facilement à montrer que les pavés sont en répulsion. En effet, lorsqu'on approche les pavés vers le centre, les charges magnétiques négatives se rapprochent. Or deux charges de même signe se repoussent donc les pavés sont donc en répulsion.

En considérant que les tranches sont constituées de pavés identiques d'une tranche à l'autre, on arrive à déduire que les tranches (considérées stables) sont donc en répulsion.

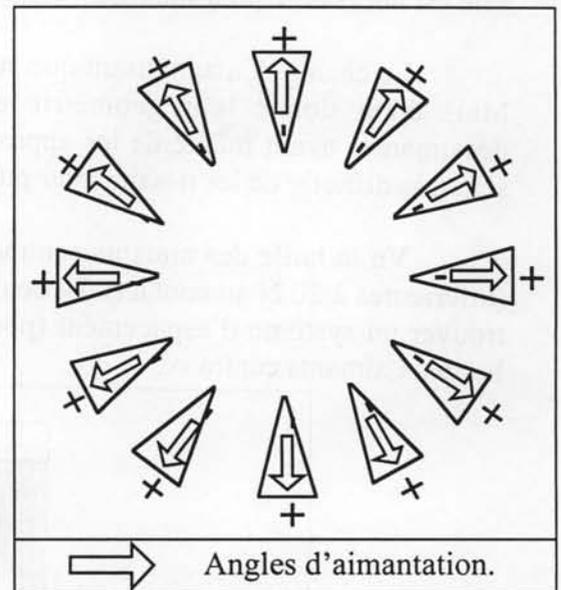


Fig IV.54

La figure IV.55 représente schématiquement le principe de cette approche. Nous devons concevoir un système d'approche ayant un minimum de degré de liberté. Elles ne devront se déplacer que sur leur axe médian car il faut éviter tous les phénomènes de couples qui tendraient à faire pivoter les tranches sur leur axe.

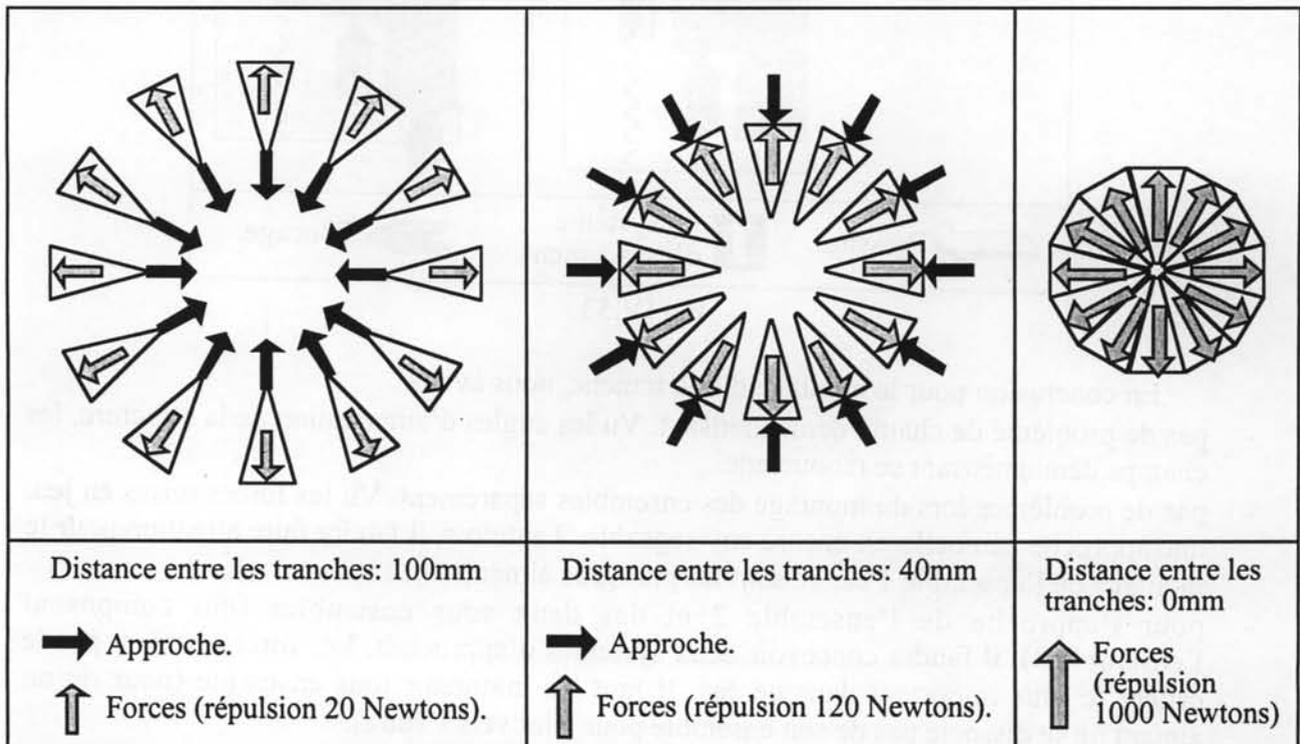
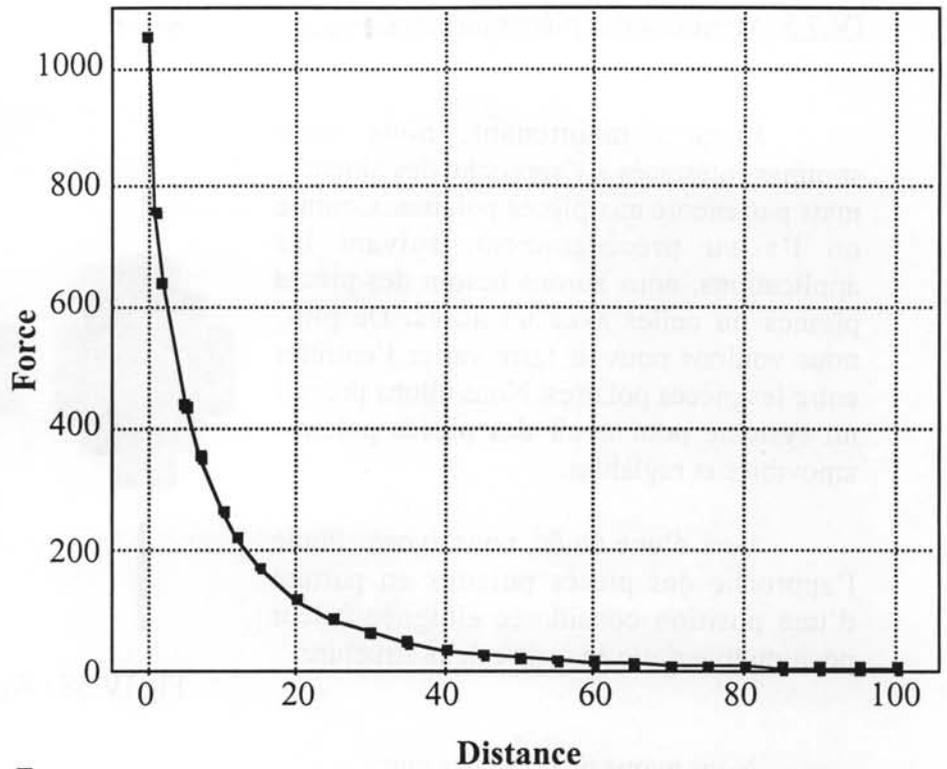


Fig IV.55 : Principe d'approches des douze tranches (Vue de dessus).

Lors du montage, notre structure tend à minimiser son énergie, ce qui correspond dans notre cas à une répulsion entre les tranches.

Cette étude est très importante car c'est elle qui va définir la distance minimale à partir de laquelle les forces seront trop grandes pour que l'on manipule de façon manuelle les tranches, en toute sécurité.



F
ig. IV.56 : Courbe des forces sur chaque tranche lors de l'approche des douze tranches (Distance tranche-centre).

En effet, vu l'amplitude des forces exercées lorsque les tranches sont en contact (1000 Newtons soit 100 Kg), nous allons utiliser un système d'approche mécanique.

Si on regarde les forces les plus importantes sur trois tranches, les forces de répulsion des tranches supérieure et inférieure sur celle du centre se compensent. Il n'y a donc qu'une force résultante sur l'axe de la tranche centrale. Il en est de même sur toutes les tranches.

L'interaction entre les deux tranches encadrant la tranche centrale (supérieure et inférieure) est négligeable car elles sont séparées par une distance beaucoup plus importante que celle entre deux tranches mitoyennes.

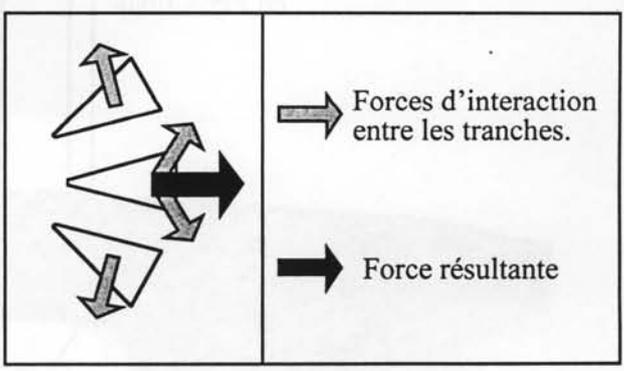


Fig. IV.57 : Interactions sur trois tranches

En conclusion sur cette étude, nous devons concevoir un système d'approche mécanique car les forces sont trop importantes pour une approche manuelle. Par contre, avec ce système, nous aurons un minimum de problèmes dû aux compensations des forces entre les tranches car il y a une forte symétrie. Grâce à cette symétrie, nous allons obtenir des forces qui vont maintenir un écartement constant entre les tranches.

IV.7.5 Approche des pièces polaires.

Jusqu'à maintenant, nous nous sommes intéressés à l'approche des aimants, mais pas encore aux pièces polaires. Comme on l'a vu précédemment, suivant les applications, nous aurons besoin des pièces pleines ou celles avec un accès. De plus, nous voulons pouvoir faire varier l'entrefer entre les pièces polaires. Nous allons prévoir un système pour avoir des pièces polaires amovibles et réglables.

Lors d'une étude, nous avons simulé l'approche des pièces polaires en partant d'une position considérée éloignée à leur position théorique au centre de la structure.

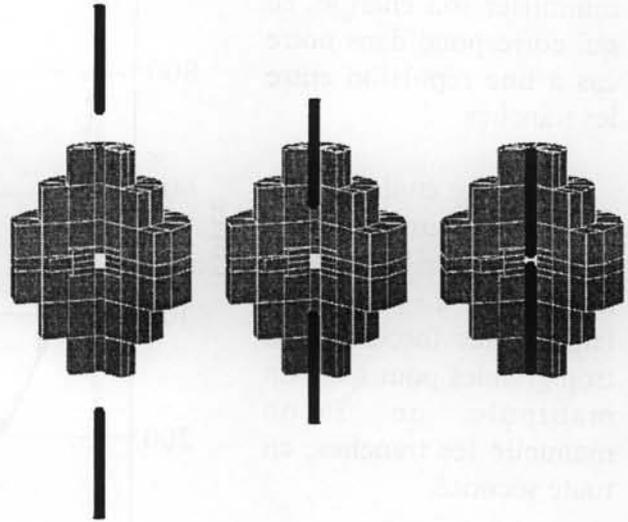


Fig IV.58 : Approche des pièces polaires.

Nous avons pu constater que:

- L'approche des pièces polaires permet d'obtenir une augmentation de l'induction variant de 2,5 T à plus de 4 T. Par réglage de l'entrefer, il est possible d'avoir n'importe quelle valeur comprise dans cette fourchette.
- Lorsqu'on les enlève, ou lorsqu'on les écarte suffisamment, les têtes des pièces polaires se situent au voisinage des aimants proches de la zone centrale. Dans cette position, elles canalisent le champ, et il se propage dans les aimants. Ces aimants se désaimantent car le champ imposé est supérieur au champ coercitif quelle que soit la nuance choisie.

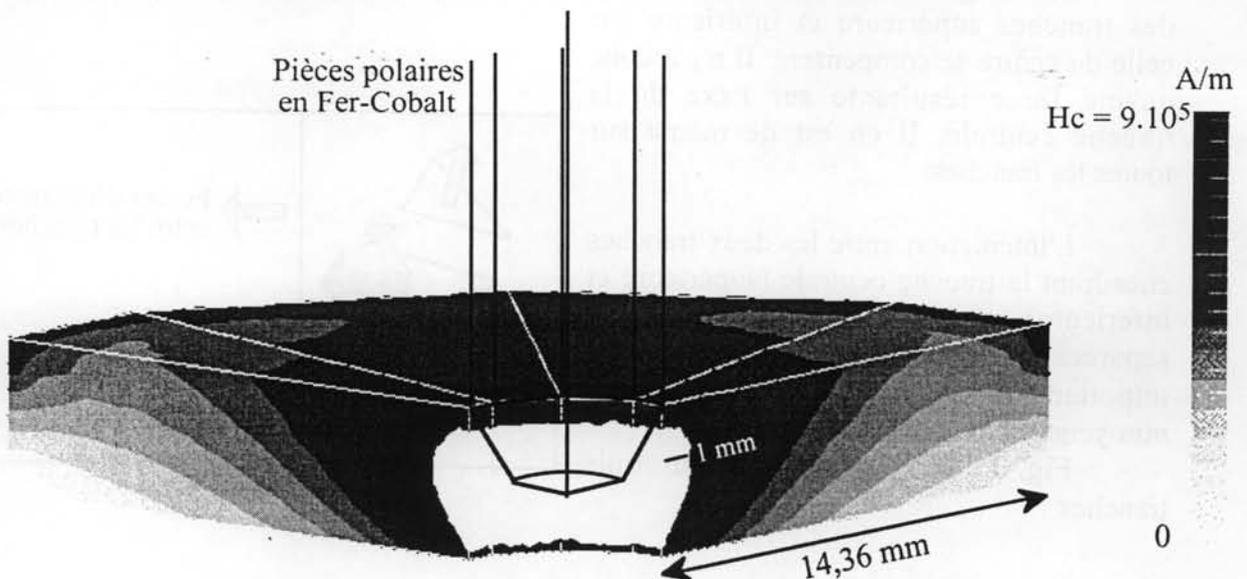


Fig IV.59 : Partie démagnétisée des aimants Cent2 (en blanc au centre).

Ce phénomène se produit dans une zone cylindrique (autour de l'axe z) et sur une distance inférieure à 1mm. La partie désaimantée reste relativement faible.

IV.8 Conclusion des simulations.

Grâce aux simulations, nous avons conçu une structure réalisable, fondée sur le modèle de l'ovoïde présenté au chapitre III. Il a été nécessaire de la discrétiser en pavés aimantés à base trapézoïdale.

Nous avons cherché à optimiser la distribution des angles d'aimantation des pavés pour créer une induction centrale maximale. Tout au long de cette étude, il a fallu tenir compte des caractéristiques des aimants, dû à la présence de forts champs démagnétisants.

On a remarqué que l'utilisation de pièces polaires le long de l'accès vertical permettait de faire varier l'induction de 2,5 à plus de 4 T au centre de la structure.

Du point de vue pratique, nous avons prévu quatre accès dans le plan équatorial pour insérer un échantillon de taille millimétrique.

La séquence de montage se compose de :

- Montage d'une tranche :
 - Assemblage individuel des trois ensembles.
 - Montage des ensembles dans les coques de maintien mécanique.
- Approche finale des douze tranches.

La simulation numérique a permis de connaître la distribution des forces qui s'exercent lors du montage, et donc de prévoir les systèmes mécaniques lorsque leur amplitude est trop importante. Ces systèmes permettent aussi d'assembler les différents éléments de la structure de manière plus sûre.

... Cette conclusion est donc la conséquence de l'absence de tout autre élément de preuve...

... L'absence de tout autre élément de preuve...

... Cette conclusion est donc la conséquence de l'absence de tout autre élément de preuve...

... L'absence de tout autre élément de preuve...

... Cette conclusion est donc la conséquence de l'absence de tout autre élément de preuve...

... L'absence de tout autre élément de preuve...

... Cette conclusion est donc la conséquence de l'absence de tout autre élément de preuve...

Chapitre V

RÉALISATION DU PROTOTYPE

V Réalisation du prototype.

V.1 Introduction.

Après avoir simulé d'une part la structure, d'autre part son montage, nous avons procédé à la réalisation. Il y a eu plusieurs étapes que nous allons représenter par un schéma :

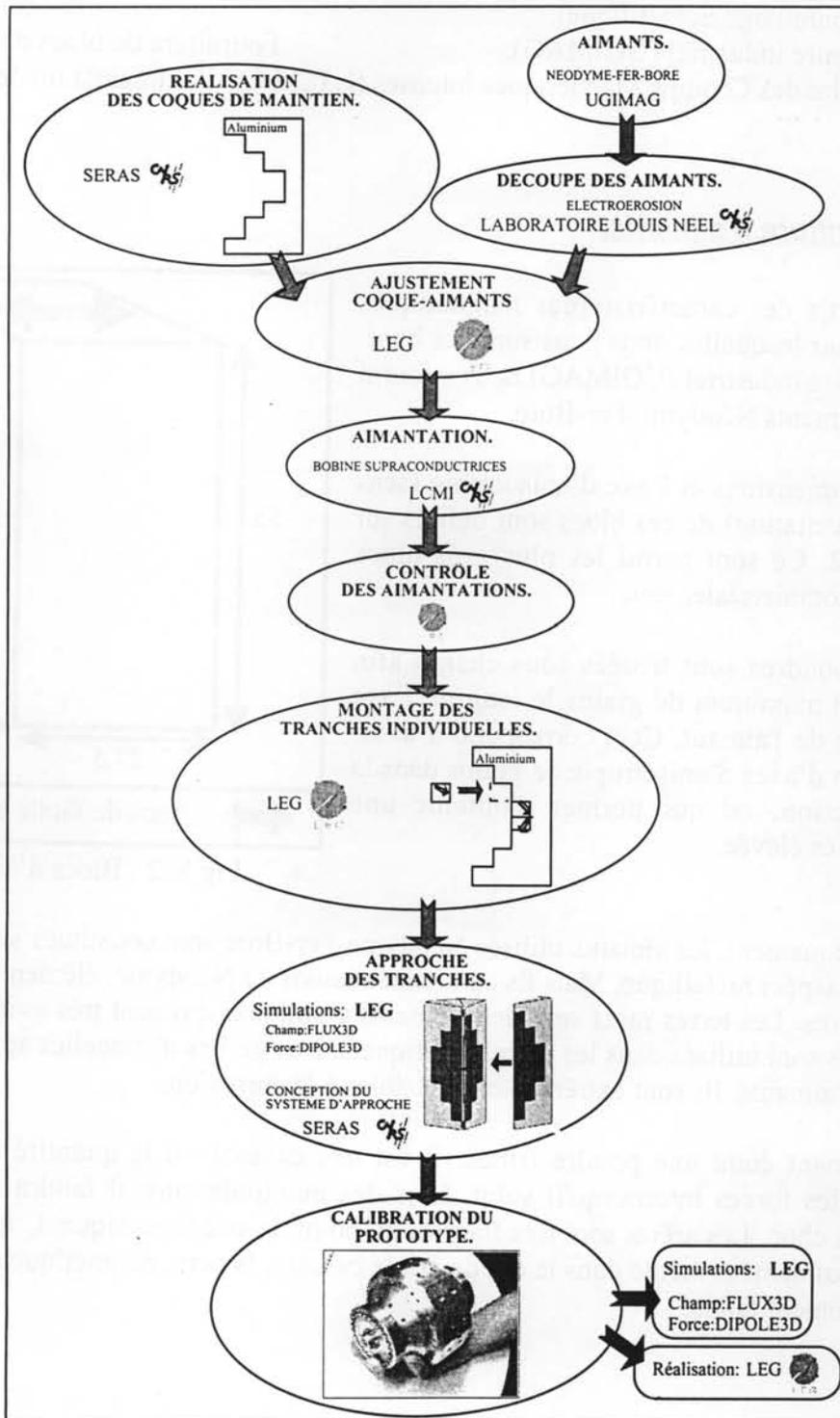


Fig V.1 : Principe de la réalisation

Sur le schéma, on peut voir les principales opérations, ainsi que les collaborations entre :

- Le Laboratoire d'Électrotechnique de Grenoble (L.E.G.): Simulation et montage.
- Le Laboratoire de Magnétisme Louis Néel (C.N.R.S.): Découpe des aimants.
Étude théorique - simulations.
- Le SÉRAS (C.N.R.S.)
(Service d'Étude et de Réalisation
d'Appareillage Scientifique):
Conception et réalisation
du système de montage.
- Notre partenaire industriel (UGIMAG): Fourniture de blocs d'aimants.
- Le Laboratoire des Champs Magnétiques Intenses (L.C.M.I.): Aimantation des blocs.

V.2 Fourniture d'aimants.

À partir des caractéristiques magnétiques des aimants sur lesquelles nous nous sommes basé, notre partenaire industriel (UGIMAG) nous a fourni des blocs d'aimants Néodyme-Fer-Bore.

Les dimensions et l'axe d'anisotropie (sens de facile aimantation) de ces blocs sont définis sur la figure V.2. Ce sont parmi les plus gros blocs disponibles commercialement.

Les poudres sont frittées sous champ afin d'orienter un maximum de grains le long de l'axe d'anisotropie de l'aimant. Ceci correspond à avoir un maximum d'axes d'anisotropie de grains dans la même direction, ce qui permet d'obtenir une rémanence très élevée.

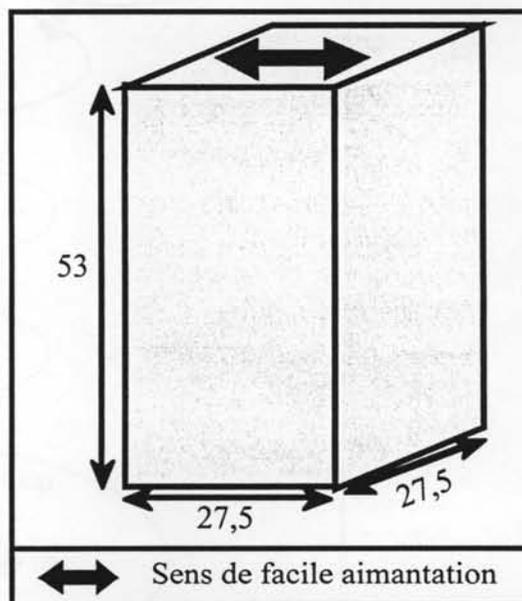


Fig V.2 : Blocs d'aimants.

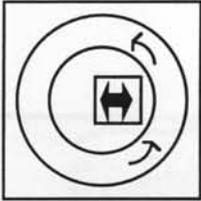
Physiquement, les aimants utilisés Néodyme-Fer-Bore sont constitués surtout de fer et donc ont un aspect métallique. Mais ils contiennent aussi du Néodyme, élément qui fait partie des terres rares. Les terres rares sont des éléments chimiques qui sont très avides d'oxygène. Ces éléments sont utilisés dans les pierres à briquets. Des gerbes d'étincelles apparaissent lors de cassure d'aimants. Ils sont extrêmement sensibles à la corrosion.

L'aimant étant une poudre frittée, il est très cassant vu la quantité d'énergie qu'il contient et les forces internes qu'il subit. Lors des manipulations, il faudra faire attention d'éviter tout choc. Les arêtes sont très fragiles du point de vue mécanique. Comme elles sont toujours désaimantées même dans le cas de faible cassure, la perte magnétique en aimantation reste relativement faible.

V.3 Découpe des blocs d'aimants.

V.3.1 Moyens de découpe.

Nous avons envisagé trois méthodes et moyens de découper les aimants.

	Scie circulaire diamant	Scie annulaire diamant	Électroérosion
Schéma de principe			
Avantages	- Découpe rapide.	- Découpe rapide. - Rigidité (pas de flèche)	- Très précis. - Par de force exercée.
Inconvénients	- Manque de rigidité (flèche). - Découpe non plane. - Découpe très peu précise - Force exercée sur le matériau.	- Découpe peu précise	- Très lent.

Disposant d'une scie circulaire, nous avons fait des essais de découpe. Techniquement, la scie est capable de couper les aimants de type Néodyme-Fer-Bore. La vitesse de rotation qui est très élevée, engendre une flèche non négligeable, et donc il est impossible d'obtenir une coupe plane. Nous avons considéré que l'erreur maximale acceptable est de 5 centièmes de millimètre et l'erreur moyenne acceptable de l'ordre de deux centièmes. Nous avons décidé d'utiliser la méthode de la découpe par électroérosion.

V.3.2 Principe de l'électroérosion.

Le principe de l'électroérosion suppose que le matériau à découper est conducteur. On le relie à la terre. Le système de découpe est un fil conducteur placé au potentiel de l'ordre de 150 Volts. Le contact fil-aimant engendre un arc électrique qui arrache un peu de matière et donc découpe l'aimant tout en usant le fil).

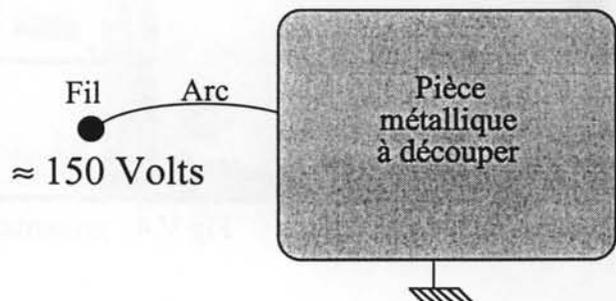


Fig V.3 : Principe de l'électroérosion.

V.3.3 Présentation de la machine à électroérosion disponible: Réglages et possibilités .

La machine dont nous disposons au Laboratoire Louis Néel se compose de cinq parties principales (Fig. V.4) :

- 1 - Le contrôle de la machine (Réglages électriques et programmes).
- 2 - La table numérique de la machine et sa commande ainsi que la gestion du fil.
- 3 - Les têtes de guidage.
- 4 - La commande du groupe de filtration du liquide diélectrique.
- 5 - Les accessoires.

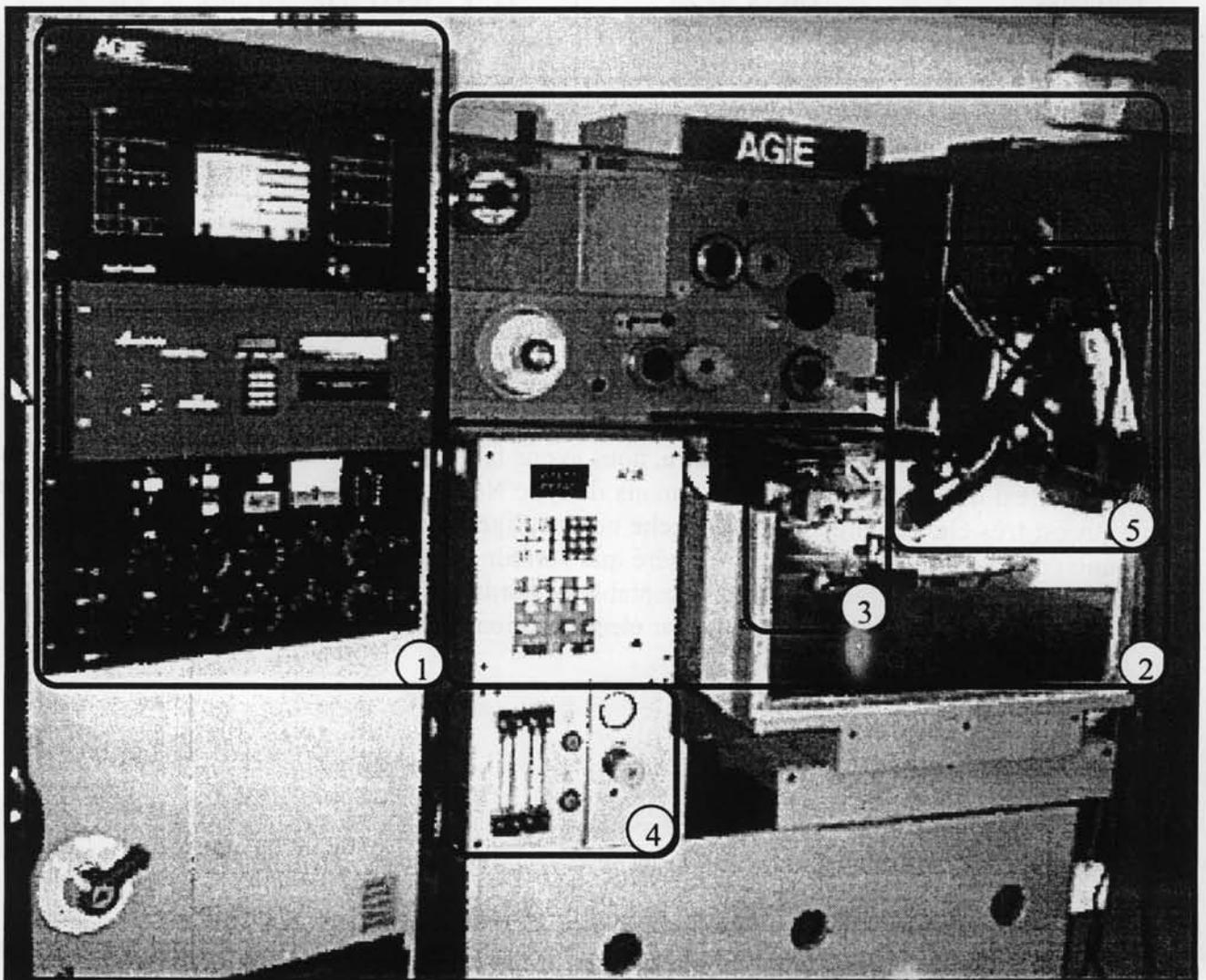


Fig V.4 : présentation de la machine

Nous allons présenter précisément les propriétés de cette machine et les possibilités qu'elle offre. Pour cela, nous allons voir les principaux éléments.

- 1 - Le contrôle de la machine (Réglages électriques et programmes).

Réglages électriques :

Le fil est alimenté par un hacheur spécifique possédant des fonctions standards (réglage de puissance, fréquence de hachage variable, limiteur de courant de sortie), mais aussi des fonctions spéciales pour l'électroérosion:

- Traitement du signal pour le réglage électrique de la flèche du fil pour la découpe de pièces hautes.
- Réglage du taux de découpe qui correspond au rapport temps de repos sur temps de découpe.

Ces fonctions sont très importantes car c'est d'elles dont dépendent la qualité de la coupe mais aussi sa rapidité. Nous adapterons ces paramètres pour avoir une découpe des aimants la plus propre possible, le critère de temps de découpe intervient en second plan.

Programmes :

La machine à électroérosion se commande de deux manières :

- soit avec les programmes pré-installés dans la machine. Ces programmes permettent des découpes simples utilisées la plupart du temps (droites, cercles...).
- soit avec les programmes que l'on aura préparés à l'aide du logiciel AUTOCAD et d'un programme de transcription (Fichier dessin -> Fichier machine). Grâce à cette procédure de programmation, la machine peut réaliser des pièces de géométrie complexe en utilisant les fonctions simples décrites précédemment.

Dans notre cas, nous utiliserons le second système de programmation pour les raisons suivantes :

- Facilité d'utilisation.
- Réalisation de pièces complexes.
- Vérification de la précision des découpes réalisées avec ce programme (angles et cotes).
- Vérification de la compatibilité entre le programme et la machine.
- Vérification du protocole de déroulement d'un programme.

Grâce à une série de vérifications sur du laiton, puis sur du Néodyme-Fer-Bore, nous avons pu vérifier l'exactitude des cotes à quelques microns près. La plupart du temps, pour des découpes de pièces rectangulaires, nous arrivons à un maximum d'erreur de 3 centièmes de millimètres.

Nous avons pu aussi nous rendre compte de la vitesse de découpe qui est environ de 8 mm/heure pour un bloc de Néodyme-Fer-Bore de 53mm de hauteur. Cette vitesse est très lente car le matériau découpé est très dur. Il est possible d'avoir une vitesse de découpe plus rapide, mais la qualité au niveau de la surface n'est pas satisfaisante.

- 2 - La table numérique de la machine et sa commande ainsi que la gestion du fil.

Commande de la table numérique :

La table numérique peut bouger suivant les deux axes horizontaux comme pour une table traçante avec une précision de l'ordre du micron.

Si on veut une certaine répétitivité, il faut espérer avoir des pièces découpées à dix fois l'unité numérique minimale près. Dans notre cas, l'unité minimale étant le micron, nous ne pouvons espérer avoir des pièces ayant une précision inférieure au centième de millimètre. Bien sur, ceci est une erreur par rapport aux cotes théoriques définies à partir d'instructions de bases de la machine. En plus, il faut ajouter les erreurs dues à la transcription de fichier.

Un des plus gros problèmes est de placer et de fixer et d'aligner correctement l'aimant sur la table. Nous devons le maintenir mécaniquement de manière à ce qu'un des bords de la pièce soit accessible pour une vérification de parallélisme. Nous n'utilisons pas de maintien mécanique sous peine d'aimanter partiellement l'aimant. Ces systèmes de bridage de la pièce sont donc strictement mécaniques.

Pour pouvoir vérifier le parallélisme entre les axes de la pièce et ceux de la machine, nous disposons d'un système sonore de détection de contact. Comme il est lié à la commande de la table numérique, sa précision en dépend. On peut considérer que l'erreur de parallélisme est de l'ordre du centième de millimètre.

En résumé, pour une série de pièces, nous ne pouvons atteindre qu'une précision de quelques centièmes. Comme nous l'avons vu précédemment (cf. V.3.1), ces erreurs rentrent dans les marges acceptables.

Gestion du fil:

Le fil est en laiton. On le fait défiler car l'arc arrache aussi de la matière au fil. Si on le fait défiler trop vite, on gaspille du fil. Si on le fait défiler trop lentement, il casse vu son faible diamètre (0,25 mm). De plus, même si le fil ne casse pas et qu'il est trop usé, on n'aura pas une découpe très précise car le fil n'aura pas le même diamètre entre le bas et le haut de la pièce. D'un point de vue matériel, on peut régler la vitesse du fil sur la partie de la commande numérique de la table.

Le parcours du fil permet de vérifier la tension mécanique du fil. On peut donc vérifier si la pièce ne pince pas le fil accidentellement. Dans le cas contraire, une erreur est renvoyée à la machine, arrêtant aussitôt la découpe. Lorsque l'on découpe des matériaux aimantés, il arrive souvent que les deux parties découpées s'attirent. Dans ce cas de figure, le fil qui sert à la découpe ne peut plus ni garder un espace suffisant pour l'arc, ni même défiler dans ce cas extrême.

Pour éviter ces problèmes, nous avons demandé à notre partenaire industriel de nous fournir des aimants non aimantés. Ceci facilite leur découpe et les vérifications des côtes, mais aussi on pourra vérifier que les pavés tiennent tous dans les coques de maintien.

- 3 - Les têtes de guidage.

Les têtes de guidage du fil sont les parties situées au dessus et en dessous de la pièce à découper. La tête supérieure est réglable dans les trois dimensions (longueur, largeur et hauteur). Ceci permet d'obtenir des découpes obliques ou coniques, suivant les cas de trajectoires de découpe droites ou circulaires (Fig. V.5).

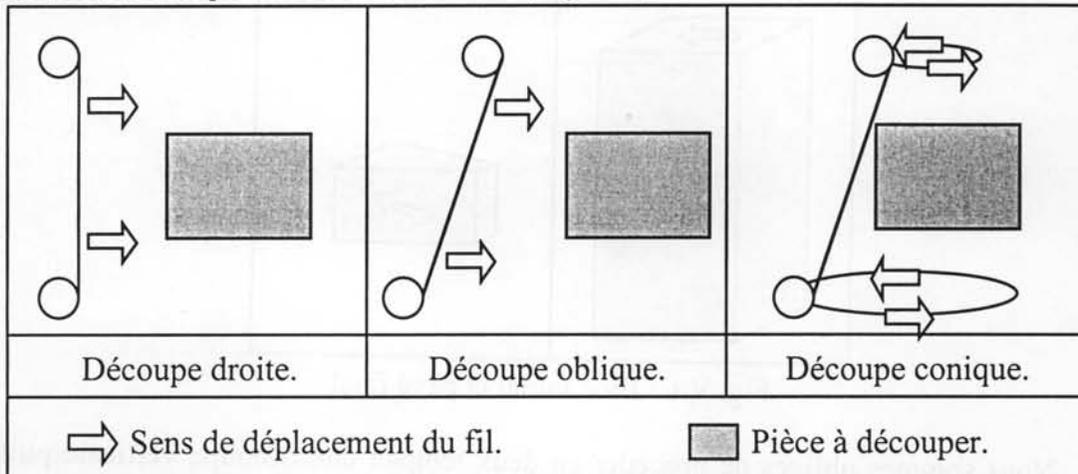


Fig. V.5: Explication des découpes.

- 4 - Le groupe de filtration et sa commande.

De manière à garder un champ électrique constant entre le fil et la pièce à découper, on utilise un diélectrique soit du kérosène traité, soit de l'eau. Le fait d'avoir un champ électrique constant permet d'avoir un arc électrique constant de même puissance et de même longueur et donc une découpe beaucoup plus facile à gérer. Dans notre cas, le diélectrique est de l'eau filtrée pour pouvoir régler sa conductivité, puis projetée autour du fil. Le rôle de l'eau ne se limite pas qu'à un effet diélectrique, elle sert aussi à enlever tous les résidus de matière arrachés lors de la découpe. Le filtrage de l'eau est donc très important car tous ces résidus sont composés de matériau conducteur.

La commande de la résistivité de l'eau est située dans le module de commande de la table numérique. Le filet d'eau entourant le fil passe par les têtes de guidage : il est ainsi possible de modifier la pression et le volume d'eau passant dans chaque tête. Ceci dépend de la solidité du matériau à découper : un faible débit est nécessaire pour un matériau est fin et fragile, sinon il casse. Dans notre cas, nous réglons le flux d'eau de manière à ce qu'il enrobe le fil d'un flux maximal. Nous réglons aussi le flux d'eau pour qu'il ne soit pas turbulent, mais plutôt de type laminaire pour évacuer au mieux les déchets, donc la découpe est plus efficace donc rapide.

- 5 - Les accessoires.

Nous disposons d'une source de lumière orientable pour voir l'avancement de la découpe. Nous avons aussi un extracteur de gaz de manière à évacuer les émanations de vapeur d'eau, mais aussi d'autres vapeurs toxiques.

V.3.4 Découpe des aimants.

Nous disposons de blocs parallélépipédiques uniformément aimantés radialement. Nous voulons obtenir des pavés trapézoïdaux avec des angles d'aimantation spécifiques (Fig. V.6).

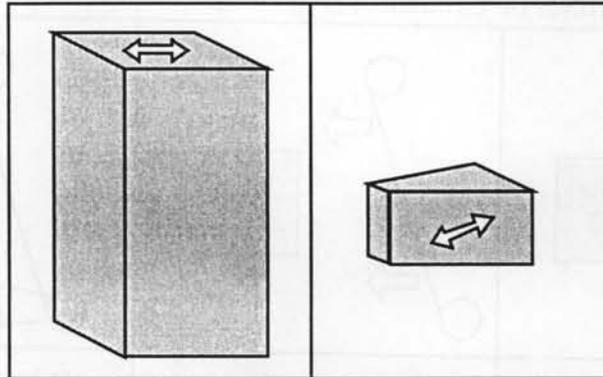


Fig. V.6 : Bloc initial et pavé final.

Nous sommes obligés de procéder en deux temps : une découpe verticale puis une découpe horizontale.

- Découpe verticale.

Dans un bloc d'aimant ayant un axe d'anisotropie fixé (horizontal sur notre figure, ce qui correspond à une aimantation transverse), nous allons découper un pavé ayant l'orientation et les cotes désirées. La découpe verticale permet d'obtenir un bloc ayant deux cotes du pavé final. Il faut donc que les cotes soient déjà dans la marge d'erreur voulue.

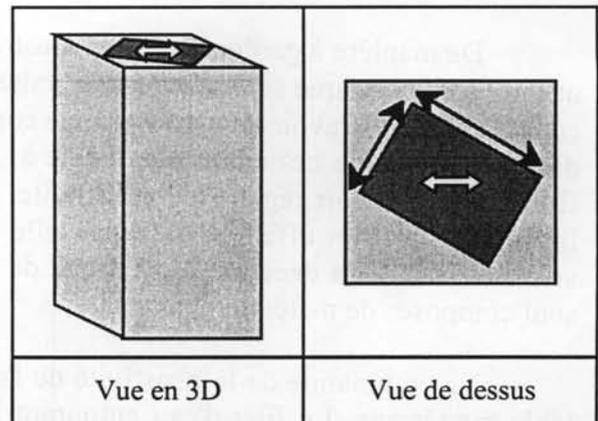


Fig. V.7 : Coupe verticale.

De plus, lors de cette découpe, il faut aussi respecter les angles de découpe.

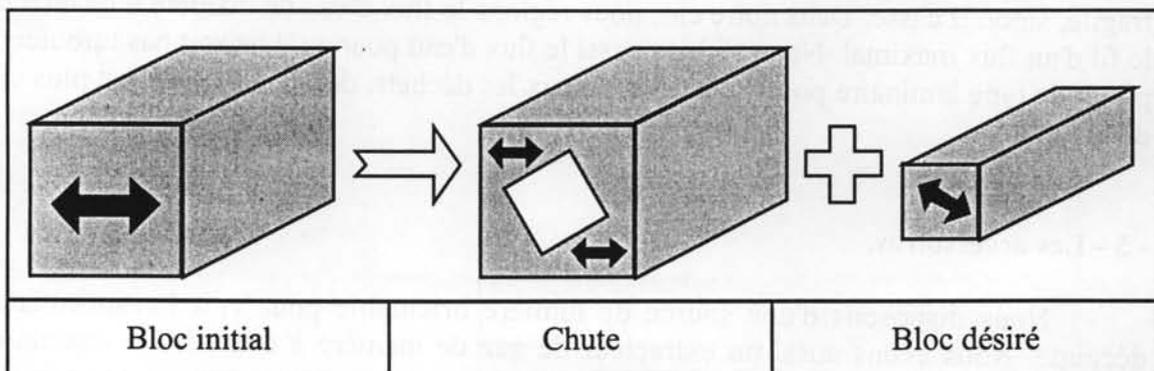


Fig. V.8 : Principe de la coupe verticale.

Pour réaliser cette découpe, on a conçu et réalisé un socle de maintien de manière à pouvoir positionner et maintenir les blocs d'aimants lors de la découpe (Fig. 28).

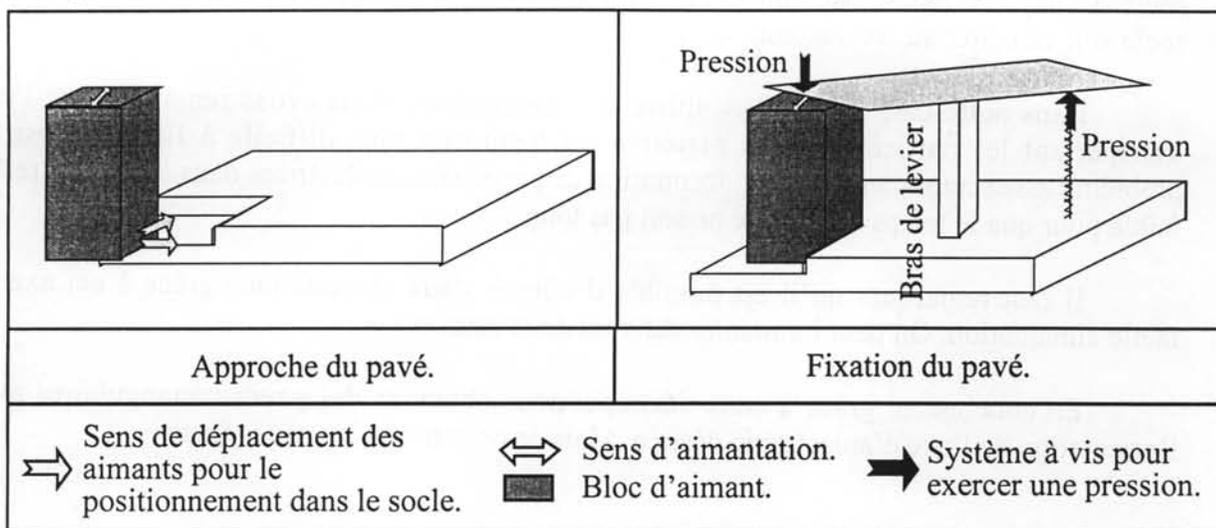


Fig. V.9 : Schéma du socle de maintien.

Pour maintenir les aimants, on les pincera avec une plaque supérieure. Une pression est exercée grâce à un bras de levier et un système à vis. Ce système de socle permet d'obtenir des positions très proches les unes des autres dès que l'on change de morceau à couper. De cette façon, il est facile de repositionner un bloc à moins d'un dixième de millimètre par rapport à la position du bloc précédent. Il est donc possible d'obtenir une bonne répétitivité.

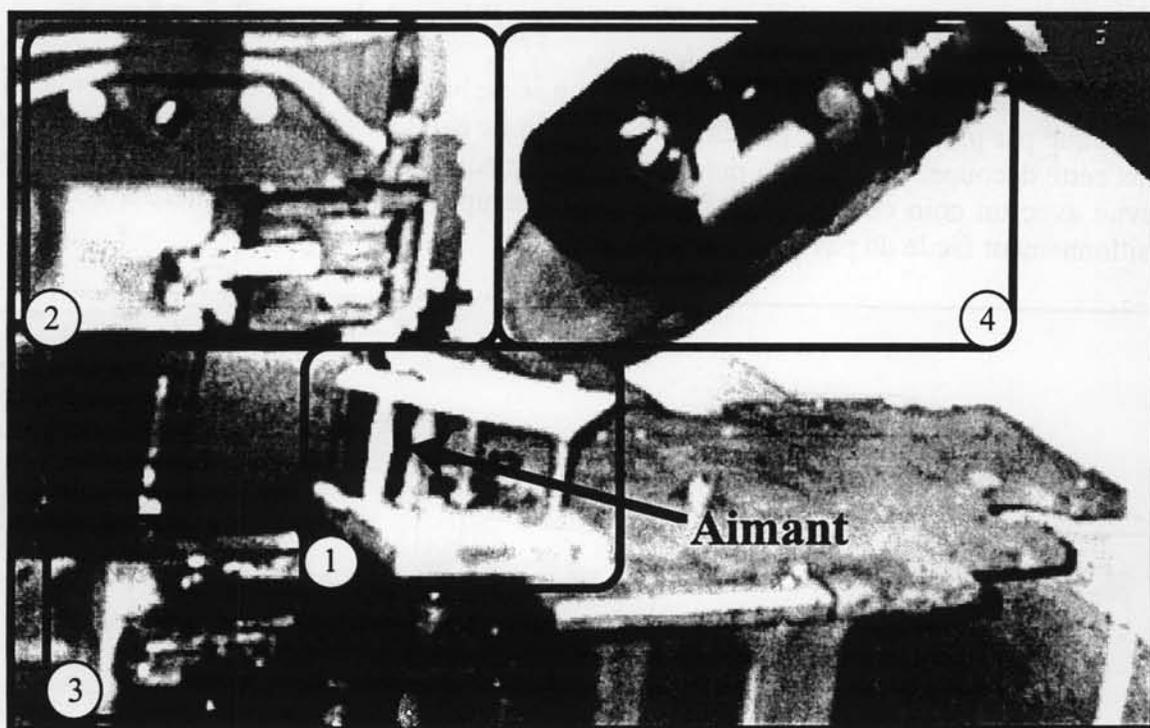


Fig. V.10 : Photographie d'une découpe verticale

- 1 - Socle de découpe.
- 2 - Tête supérieure de guidage.
- 3 - Tête inférieure de guidage.
- 4 - Accessoires

Vu la forme du socle et celle de la découpe, on peut voir tout de suite que la partie du socle sur laquelle repose l'aimant va être découpée avec la pièce par le fil. Ceci impose que le socle soit en matériau conducteur.

Dans notre cas, nous avons utilisé de l'aluminium. Nous avons remarqué que l'eau transportant les particules de ce matériau est beaucoup plus difficile à filtrer. C'est un problème assez important car la concentration de particules conductrices dans l'eau doit rester faible pour que le temps de filtrage ne soit pas long.

Il faut remarquer qu'il est possible d'obtenir deux aimantations grâce à cet axe de facile aimantation. On peut l'aimanter dans les deux sens.

En conclusion, grâce à cette découpe, nous obtenons des pavés rectangulaires avec l'orientation de l'axe d'anisotropie désirée. Mais ce ne sont pas les pavés finaux.

- Découpe horizontale.

La découpe horizontale du bloc résultant de la découpe verticale permet de donner au pavé sa section trapézoïdale. Nous obtenons donc alors les pavés finaux.

Dans notre structure, les blocs sont répartis sur trois ensembles de couronnes concentriques. Suivant les sections trapézoïdales différentes nous avons donc trois programmes différents qui coupent les blocs initiaux (53mm de long) en 2, 3 et 8 pavés.

Pour cette découpe, nous avons réalisé un socle basé sur le même principe de maintien mécanique par pincement. Le principe est différent de celui utilisé pour la découpe verticale. Dans cette découpe, le pavé sera pincé entre deux plaques de laiton. La plaque inférieure est prévue avec un coin cubique (comme pour la découpe verticale) de manière à obtenir un positionnement facile du pavé

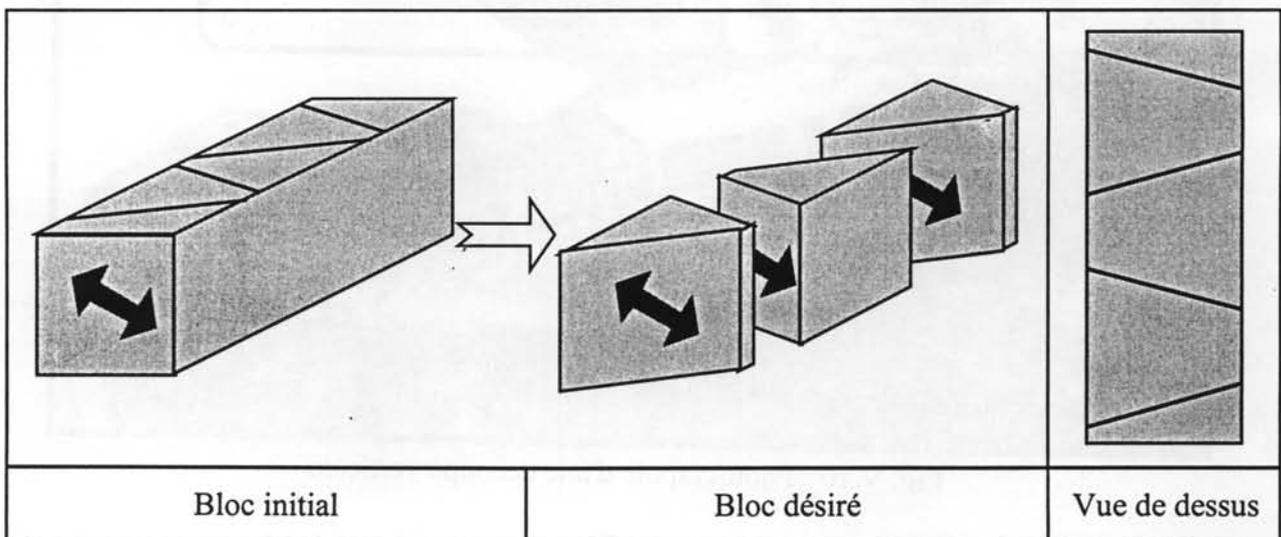


Fig. V.11 : Explication de la découpe horizontale.

Comme pour la découpe verticale, on peut voir que le socle sera découpé. Il faut donc qu'il soit réalisé dans un matériau conducteur. Pour des raisons d'entretien du groupe de filtration de la machine à électroérosion, nous utiliserons un socle en laiton.

Si le pavé n'a pas la bonne largeur, il est impossible d'obtenir un pavé aux cotes exigées même avec la découpe horizontale. C'est pourquoi la découpe verticale doit fournir des côtes extérieures très précises.

Le socle est découpé suivant les programmes (Fig V.12), ce qui fait qu'un trapèze d'aimant sur deux n'est pas soutenu lors de la découpe et tombe. Comme le matériau est très fragile, il faut faire très attention lors de sa chute et la prévenir de manière à ne pas casser l'arête du pavé découpé.

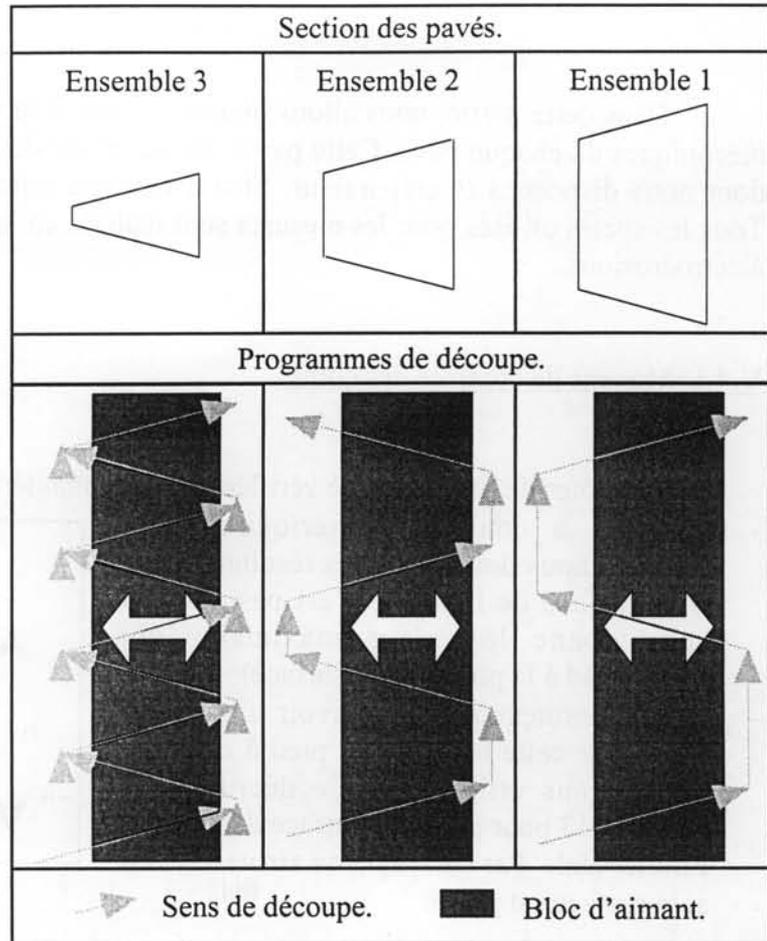


Fig V.12 : Programmes de découpe.

Il faut que les angles soient à 30 degrés sinon, les douze tranches ne porteront pas sur les faces des aimants mais seulement sur les arêtes. Vu les forces agissant sur les aimants lors du montage (pas pendant la découpe), il ne faut pas que les aimants supportent les forces que sur leurs arêtes mais sur leurs faces complètes (sinon les arêtes vont se casser). La précision sur l'angle est de quelques minutes. Après découpe de 12 morceaux en laiton, on a pu vérifier que les angles étaient bons mais que les côtes variaient.

Nous avons donc entamé une mise au point de la découpe des morceaux. Cette étude a été faite avec des morceaux de laiton de 10 mm de hauteur. Ensuite, on a fait une étude comparative entre la découpe de morceaux de laiton et de Néodyme-Fer-Bore. Le laiton étant un matériau beaucoup moins dur que les aimants, il y existait une faible différence de côtes entre les deux matériaux. En prenant en compte cette erreur, on a pu en déduire les corrections sur les programmes de découpe des aimants pour obtenir des pavés ayant des côtes correctes.

V.4 Vérification des blocs d'aimants.

Dans cette partie, nous allons nous intéresser à la vérification des cotes et des angles mécaniques de chaque pavé. Cette partie est basée sur des mesures faites à l'aide du matériel dont nous disposons (Comparateur, pied à coulisse numériques, micromètre Palmer etc.). Tous les socles utilisés pour les mesures sont réalisés en laiton et découpés avec la machine à électroérosion.

V.4.1 Moyens de contrôle des côtes.

Les côtes de pavés ont été vérifiées de deux manières :

- Le pied à coulisse numérique : Cette méthode nous donne de bons résultats. Mais si la surface de l'aimant n'est pas plate, il nous donne la valeur maximale (qui correspond à la pointe de la surface).
- Le comparateur permet d'avoir une valeur proche de celle mesurée au pied à coulisse. Nous avons utilisé le socle décrit sur la figure V.13 pour placer la surface découpée à l'horizontale. Par balayage, on arrive à savoir si la surface est plane.

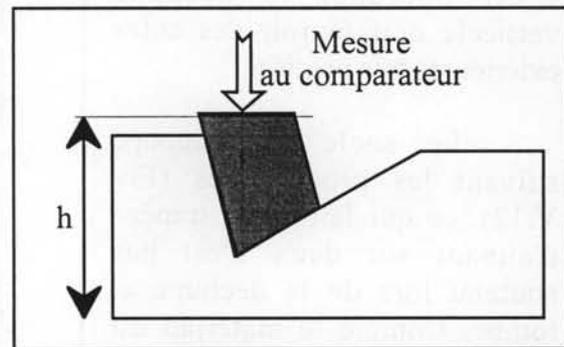


Fig V.13

V.4.2 Moyens de contrôle des angles.

La vérification des angles est très importante. Pour cela, nous avons choisi de vérifier les angles de 15 degrés et non pas ceux de 30 degrés. En effet, si le morceau d'aimant n'est pas exactement dans l'axe de la machine pendant la découpe horizontale, il y a un décalage angulaire. Le morceau d'aimant résultant a bien un angle total de 30 degrés avec deux surfaces parallèles. Mais en fait l'angle de 30 degrés est constitué de deux angles différents de 15 degrés (Fig. V.14b). Un pavé parfait est constitué de deux angles de 15 degrés (Fig. V.14a).

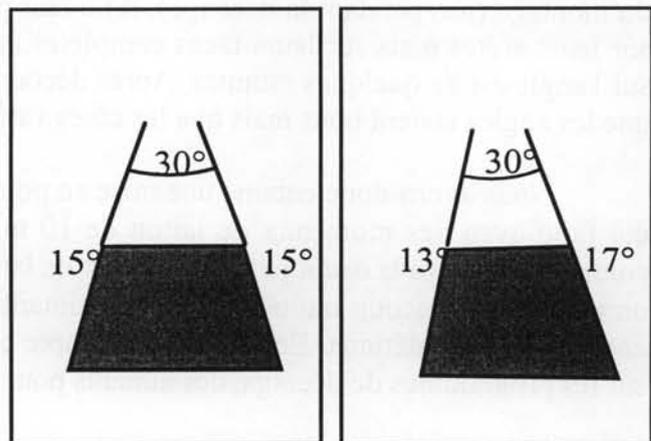


Fig. V.14a : Bloc parfait. Fig. V.14b: Bloc faux.

Nous avons utilisé deux moyens de contrôle :

- 1 - Le contrôle visuel.
- 2 - Le micromètre laser.

Nous avons utilisé ces deux méthodes pour vérifier surtout l'exactitude des angles.

- 1 - Le contrôle visuel.

On a découpé un socle ayant un angle parfait de 15 degrés. En pressant l'aimant sur ce socle, et en mettant une source de lumière en arrière plan pour le rétroéclairer. On peut estimer une erreur en fonction de la lumière passant entre le socle et l'aimant.

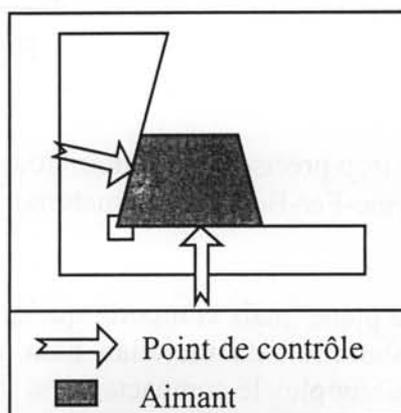


Fig. V.15: Contrôle visuel.

Ce principe permet de vérifier non seulement l'angle de 15 degrés mais aussi la platitude des deux surfaces de contact. Un écart supérieur à trois centièmes de millimètre est décelé instantanément à l'œil. Pour illustrer le protocole, considérons les cas suivants :

- Si une des surfaces de contrôle n'est pas plate (Fig. V.16), la lumière passe et donc il y a une erreur de platitude.
- Si l'angle est supérieur à 15 degrés (Fig. V.17), on obtient un autre type de lumière.
- Il en est de même si l'angle est inférieur à 15 degrés (Fig. V.18),

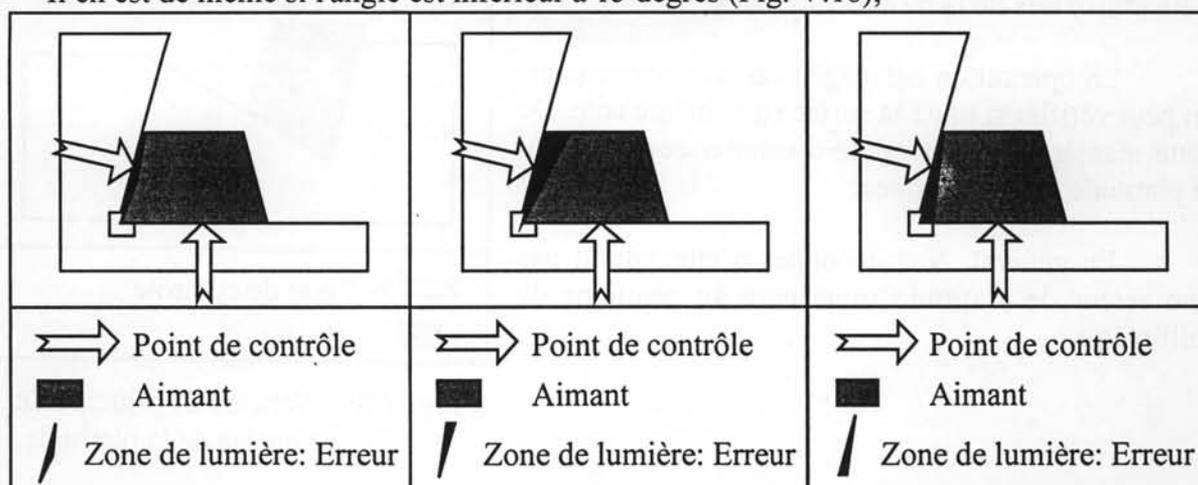


Fig. V.16 : Erreur de platitude.

Fig. V.17 : Erreur d'angle.

Fig. V.18 : Erreur d'angle.

- 2 - Le micromètre laser.

On a découpé un socle de telle manière que si un morceau d'aimant à bien un angle de 15 degrés, sa surface est verticale.

Nous vérifions cette verticalité à l'aide d'un micromètre laser.

Cette mesure nous permet de vérifier la platitude de la surface.

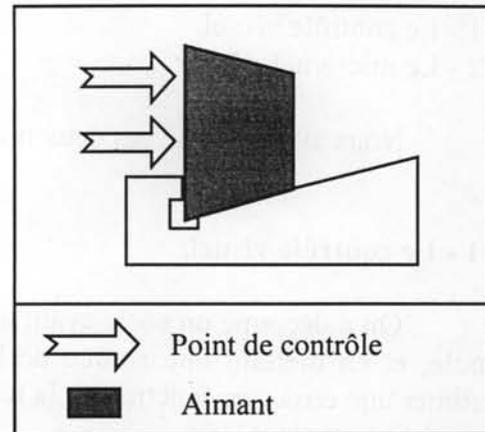


Fig. V.19 : Schéma du principe du micromètre laser.

En fait cette mesure est trop précise ($1\ \mu\text{m}$) pour nous car nous ne pouvons la mesurer correctement. L'aimant Néodyme-Fer-Bore est un matériau fritté, et donc il est légèrement poreux.

Sa surface est en partie plane, mais comporte quelques "trous". C'est un phénomène qu'il faut éviter lors de l'élaboration du matériau pour que l'aimant aie une induction rémanente la plus intense possible: plus le compactage est grand, plus l'induction rémanente est forte car l'induction dépend du nombre de moments magnétique par unité de volume.

V.4.3 Contrôle de la platitude.

On a découpé un socle de contrôle pour qu'une des surfaces du pavé soit horizontale. Ce socle a été utilisé lors de la mesure des côtes.

En opérant un balayage avec un comparateur, on peut vérifier si toute la surface a la même cote. De cette manière, il est possible d'estimer correctement la platitude de cette surface.

En général, Nos découpes n'engendrent pas une erreur de platitude supérieure au centième de millimètre.

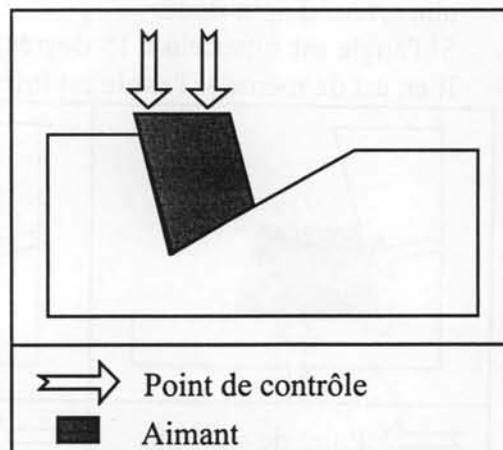


Fig. V.20 : Schéma de principe du contrôle de la platitude.

De plus, ce socle permet de vérifier visuellement les angles, et aussi les côtes. Il est donc adapté à tous les types de mesures.

V.5 Conclusion sur la découpe des blocs d'aimants.

Nous sommes arrivés à obtenir des aimants très proches des côtes lors des deux découpes. Toutefois, lors de la vérification, certains pavés avaient des côtes légèrement différentes. Tous les pavés ont été polis pour enlever la couche oxydée à cause de l'eau lors de la découpe (diélectrique). Malgré la réduction des côtes due polissage, il y a deux cas :

- Les pièces ayant une côte plus importante : ces pièces ont été passées à la pierre de manière à enlever le surplus de matière jusqu'à arriver aux cotes exactes en tenant compte de l'erreur de mesure estimée de l'ordre du centième.
- Les pièces ayant une côte moins importante : dans ce cas, le problème est plus dur à résoudre. Il y a deux cas de figures :
 - Les pièces ont plus de 3 centièmes d'erreur. Il n'y a aucun moyen de les modifier et leurs côtes sont vraiment trop éloignées. Donc il faut les refaire entièrement.
 - Les pièces ont moins de 3 centièmes d'erreur. Il n'y a aucun moyen de les modifier mais l'erreur reste encore acceptable.

Lors des découpes, seul un morceau avait 4 centièmes de millimètres d'erreur. Pour les autres, l'erreur maximale est d'environ 2 centièmes. Ces erreurs sont acceptables.

Aucune erreur mesurable n'a été décelée sur les angles de découpe.

Finalement, une plaque en laiton de la taille de la dernière couronne d'aimant a permis de vérifier si les aimants étaient en contact sur les pointes ou sur toute la surface.

Toutefois, il était impossible de mettre tous les aimants car ils avaient les côtes exactes et donc il n'y avait pas suffisamment de jeu pour les positionner à leur place finale.

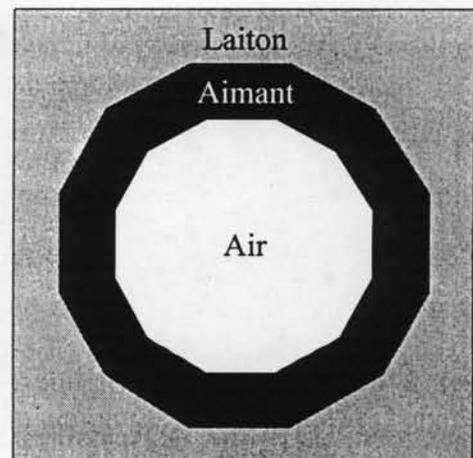


Fig V.21

En résumé lors des découpes, nous n'avons eu aucun problème si ce n'est le temps de découpe. La découpe par électroérosion permet de n'avoir aucune force lors de la découpe car il n'y a aucun contact mécanique entre le fil et la pièce à découper. De plus, c'est la manière la plus propre pour obtenir des découpes très précises. Par contre l'électroérosion est une méthode de découpe très lente. 8 heures pour une découpe verticale et 2 à 3 heures pour une découpe horizontale sont nécessaires.

V.6 Coques de maintien.

V.6.1 Présentation des coques de maintien mécanique.

Chaque tranche est composée d'une coque de maintien mécanique en matériau amagnétique (Fortal 7075) et d'aimants.

Le but de la coque de maintien est de permettre aux aimants d'avoir une position fixe, mais aussi de les maintenir dans la coque. Il est impératif que lors de l'approche des douze coques et de leurs aimants, aucun problème de positionnement ni d'alignement ne survienne dû aux forces de répulsion entre les aimants de chaque coque.

Les coques de maintien ont été conçues et réalisées par le Service d'Étude de Réalisation d'Appareillage Scientifique du C.N.R.S. . Elles ont été prévues pour que la réalisation et le montage soient aussi proches que possible des simulations numériques, tout en respectant la faisabilité technique.

Les figures suivantes illustrent :

- Le montage individuel des aimants dans chaque tranche et leur maintien mécanique.
- L'approche des douze coques (Fig. V.22a).
- Le maintien des coques (Fig. V.22b).

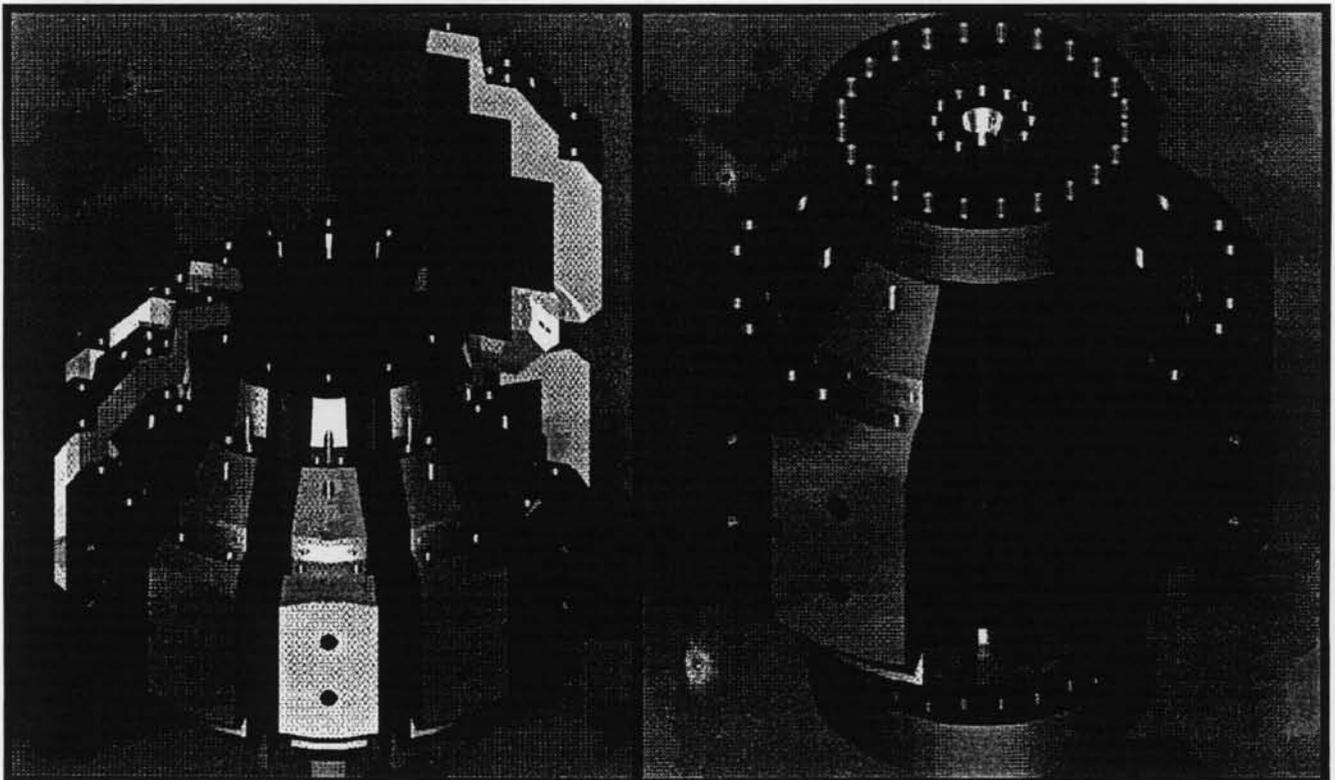


Fig. V.22a : Approche de la dernière tranche.

Fig. V.22b : Dix tranches de la structure.

Nous avons prévu de multiples filetages et trous dans les coques dont nous allons expliquer l'utilité, d'après la numérotation de la figure V.23 :

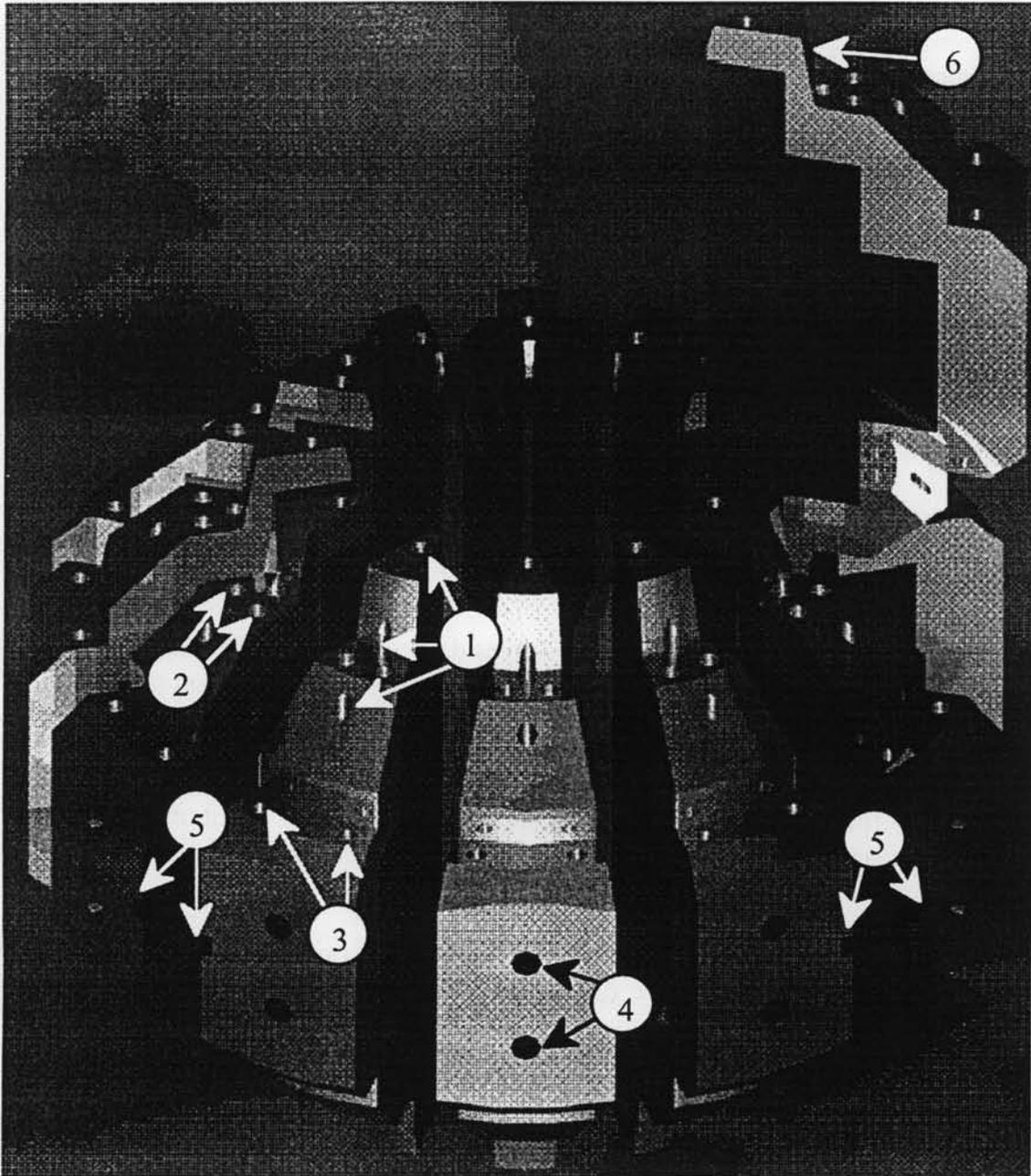


Fig V.23 : Présentation des coques de maintien.

- 1 - Ces filetages permettent de mettre en place des vis qui exercent une pression sur les aimants dans la coque, et les maintiennent en place. Les vis se trouvent au milieu de la face de contact coque-aimants.
- 2 - Ces filetages permettent de tenir la bague de maintien des douze coques (Fig V.22b). On peut remarquer le plan incliné formant un cône (Repéré en n°6 sur la figure V.23). Ce principe permet d'obtenir un maintien des coques par serrage de la bague dû à l'emmanchement conique. Grâce à ce système, on a un moyen rapide et efficace pour finir l'approche de toutes les tranches et aussi pour corriger de manière fine un éventuel décalage vertical entre tranches. Ce décalage intervient car les tranches sont en répulsion et ont tendance à se soulever les unes par rapport aux autres car il n'y a pas d'autre degré de liberté.

- 3 - Ces trous permettent de fixer les coques de maintien au système d'approche des douze tranches. La liaison se fera à base de goupilles. Ce système est simple et autorise un montage (démontage) très facile. De plus, les goupilles ont été largement dimensionnées pour supporter les forces lors de l'approche des tranches.
- 4 - Ces filetages permettent de fixer la structure complète aux appareillages.
- 5 - On peut remarquer les demi-accès prévus dans les coques pour introduire un échantillon.

V.6.2 Vérification de la compatibilité mécanique coque-aimants.

Après avoir vérifié les côtes et les angles de chaque bloc d'aimant, nous avons rempli chaque tranche avec ses propres blocs d'aimants. Il faut rappeler que les blocs ne sont pas encore aimantés, donc il n'y a aucune interaction magnétique. Grâce à ce test, nous avons pu vérifier que chaque ensemble prend sa place sans forcer dans toutes les tranches.

Un trop grand jeu peut provoquer un décalage entre tranches et peut perturber la symétrie magnétique de la structure, d'où une perte de champ au centre de la structure, mais aussi des forces parasites impossibles à évaluer.

Les cotes des aimants et des coques doivent coïncider de manière précise car il faut que le contact entre chaque tranche soit non seulement sur les coques et mais aussi sur les aimants de manière à avoir une surface de contact maximale pour mieux répartir les forces.

De plus, ces aimants sont pincés par des vis dans la coque. Les aimants sont très sensibles aux forces ponctuelles. Les matériaux frittés supportent mal les pressions ponctuelles intenses, sous peine de cassure. Pour minimiser cet effet, nous avons eu deux approches :

- 1- Les têtes de vis qui servent à pincer les aimants dans les coques ont été aplanies. Ceci a pour effet d'agrandir la surface de contact vis-aimant, et donc de réduire la pression ponctuelle sur les aimants.
- 2- On a inséré un petit cylindre de lucoflex entre la tête de la vis et les aimants. Ce matériau se comprime lors du serrage et répartit la force de pression, ce qui prévient le risque de cassure. De plus, ce système limite l'ouverture de la coque (déformation due à un serrage excessif).

V.6.3 Vérification de la compatibilité entre les tranches.

Les blocs d'aimants n'étant pas aimantés, il n'y a pas de force magnétique entre les tranches, mais il subsiste les forces mécaniques. Après le montage des tranches, nous avons vérifié que la structure pouvait être assemblée en approchant chaque tranche. Cet essai nous a permis de rectifier quelques morceaux d'aimants qui empêchaient un rapprochement quasi idéal des tranches. De plus, nous avons pu constater que la moindre poussière ou éclat métallique (ébréchure d'aimant, poussière ferreuse ou non...) provoque un écartement non négligeable des tranches de l'ordre de quelques centièmes de millimètre. Il faudra faire attention lors du montage d'être dans un milieu propre car les aimants créeront un champ magnétique important et attireront toute poussière magnétique.

V.7 Aimantation.

V.7.1 Présentation de l'aimantation : principe et moyens.

Pour aimanter les blocs de Néodyme-Fer-Bore, il faut un champ qui dépasse largement le champ coercitif des aimants. Les bobines à pièces polaires génèrent des champs de l'ordre de 2 à 3 T, trop faibles pour aimanter correctement les aimants Néodyme-Fer-Bore. C'est pourquoi nous avons utilisé les bobines du Laboratoire des Champs Magnétiques Intenses (L.C.M.I.). Ces bobines résistives peuvent créer un champ magnétique statique pouvant atteindre 15 à 20 Tesla.

Le volume dans lequel est créé le champ est de diamètre 50 mm. Le champ varie en fonction de la hauteur nécessaire. Une carte de champ définit la variation du champ suivant la hauteur. En principe, il est préférable d'utiliser la zone centrale de hauteur 50 mm pour avoir un champ homogène. Le champ est créé suivant l'axe du cylindre et orienté de bas en haut.

Dans notre cas, nous avons fixé à 5 Tesla la valeur minimale du champ à imposer. Pour obtenir au moins cette valeur sur une hauteur de 350 à 400 mm, il faut faire passer environ 55 000 A. C'est un courant énorme. La puissance mise en jeu est de l'ordre de 10MW !!!

V.7.2 Système de maintien des aimants lors de l'aimantation.

Nous avons donc prévu un système de maintien des aimants pour cette aimantation. Nous avons fabriqué un cylindre de diamètre 46 mm comportant des trous latéraux de type cylindrique. Ces six trous sont comblés par des petits cylindres mobiles pouvant recevoir les aimants qui eux ont une section rectangulaire. Ce système (Fig V.25) a plusieurs avantages :

- La possibilité de réglage de l'angle d'aimantation. Il faut que l'axe de facile aimantation de l'aimant soit dans l'axe du champ d'aimantation. Dans le cas contraire, il existe un couple sur l'aimant et tend à le mettre dans l'axe. Il faut minimiser cette erreur angulaire de manière à minimiser ce couple, mais aussi aimanter l'aimant dans son axe.
- Grâce à un système de vis, nous pouvons fixer les petits cylindres et leur donner une orientation fixe. Ces vis permettront de tenir les cylindres lorsque l'on va en approcher (ou enlever) un autre.
- Tous les petits cylindres sont identiques car les pavés de la structure ont tous une côte commune (14,36 mm). Nous avons conçu les trous rectangulaires pour les pavés ayant la hauteur la plus importante. Pour les pavés plus petits, nous avons mis des morceaux de clinquant pour minimiser le jeu dans le petit cylindre. De plus, les cylindres sont troués de part et d'autre pour pouvoir enlever les aimants plus facilement en les poussant.

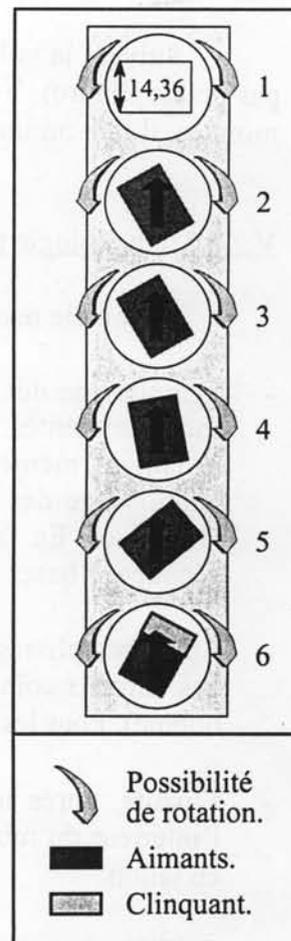


Fig V.25

Autour du cylindre principal, nous avons ajouté un tube en laiton. Il y a plusieurs raisons :

- La prévention des risques à l'intérieur de la bobine.
- Le maintien des petits cylindres à l'intérieur.
- La possibilité de ne sortir qu'un seul petit cylindre à la fois. Ceci est très intéressant lors du stockage individuel des aimants. Dès que l'on sortira les petits cylindres, les aimants ont tendance à s'attirer. Les petits cylindres sont pincés grâce aux vis le tout confiné dans le tube en laiton pour plus de sûreté.

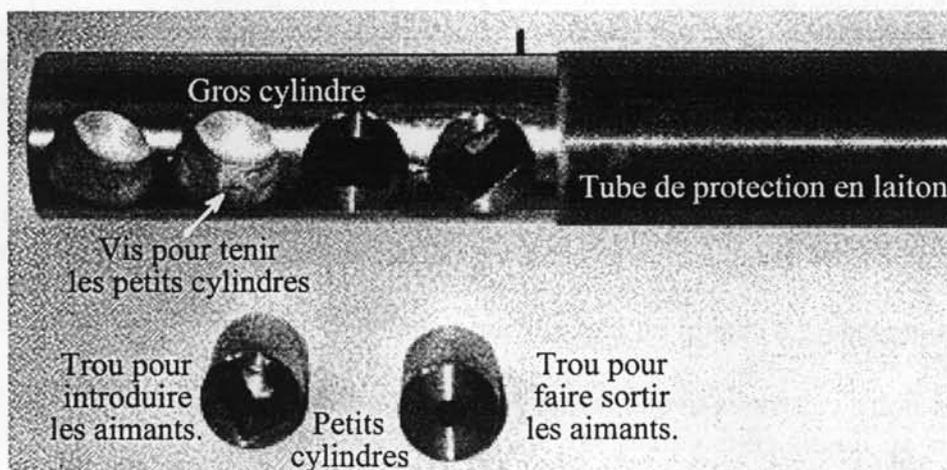


Fig V.26 : Système pour maintenir les aimants pendant l'aimantation.

Suivant la taille des blocs, le remplissage du tube total varie de 6 à 36 blocs (de 1 à 6 par petit cylindre). Vu la consommation d'énergie des bobines qui est de 10 MW pendant 10 minutes, il faut minimiser le nombre de montées en champ.

V.7.3 Méthodologie pour aimanter les pavés.

Pour cette manipulation, nous avons suivi la méthodologie suivante :

- Remplissage des petits cylindres individuellement. Dans ce cas, les aimants ne sont pas encore aimantés. Toutefois, il faut faire attention de ne pas les approcher de pavés déjà aimantés ; même désaimanté, un aimant est toujours attiré par un aimant aimanté. Le remplissage des cylindres se fait avec des aimants dont les axes d'aimantations sont identiques. En fait , on reconstitue les pavés comme ceux obtenus lors de la première découpe, à bases de pavés complémentaires à section trapézoïdale.
- Après remplissage d'un cylindre, on l'oriente de manière à ce que l'angle d'anisotropie des aimants coïncident avec l'axe du grand cylindre indiquant le sens du champ dans la bobine). Pour les maintenir dans cette position, on utilise une vis (Fig V.26).
- Ensuite, après le montage complet du grand cylindre avec les six petits cylindres à l'intérieur du tube de protection, on le positionne au centre de la bobine grâce à une tige en laiton.
- On fait monter le champ. Une montée en champ met près de 6 minutes ($di/dt = 150 \text{ A/s}$).

- On laisse les aimants quelques secondes.
- On diminue le champ. La descente du champ prend autant de temps ($dI/dt = 150 \text{ A/s}$).
- À partir de ce moment, il faut faire attention car les pièces magnétiques sont aimantées. Par prévention, nous avons recouvert de plastique autocollant pour minimiser les risques de cassure lors d'une erreur de manipulation. De plus, ce film sert de protection pour les poussières magnétiques. Cette protection ne sera enlevée qu'au tout dernier moment lors du montage. Une fois que le bloc est aimanté, il est directement mis dans une boîte de protection individuelle. Ce morceau est repéré de manière à ne pas oublier ses caractéristiques (type, côtes, aimantation, nuance d'aimant...).
- Chaque aimant contenu dans un petit cylindre est rangé et repéré individuellement (les autres sont soit vides, soit maintenus par le tube de protection en laiton).

V.8 Vérification de l'aimantation.

Lors de la montée en champ, les aimants lors d'une même aimantation n'ont pas subi le même champ :

- Les deux petits cylindres centraux (3 et 4 sur la figure V.25) ont été soumis à un champ de 10 Tesla aux aimants.
- Les cylindres (2 et 5 sur la figure V.25) à un champ de 7 Tesla aux aimants.
- Les deux petits cylindres aux extrémités (1 et 6 sur la figure V.25) à un champ de 5 Tesla aux aimants.

En mesurant l'aimantation, nous avons vérifié s'il y a une influence sur les pavés en fonction du champ imposé pendant l'aimantation.

Pour mesurer l'aimantation, nous avons utilisé deux bobines de Helmholtz dont la tension en sortie dépend de la structure géométrique de l'appareil. Cet appareil a servi à mettre au point une structure RMN. Sa précision de quelques milliWeber convient largement à nos mesures.

Le champ mesuré dépend de plusieurs paramètres du pavé d'aimant :

- Sa géométrie.
- Son volume.
- Son aimantation.

Dans notre cas, nous avons fait deux séries de mesures. Dans un premier temps, nous avons mesuré la variation d'aimantation de blocs aux caractéristiques magnétiques identiques. Nous avons utilisé les 24 plus gros pavés découpés. Lors de l'aimantation, dans les petits cylindres, un seul pavé pouvait tenir. Nous avons donc 8 pavés aimantés avec 10 T, 8 pavés

aimantés avec 7 T et 8 pavés aimantés à 5 T. Après mesure, on a relevé une aimantation moyenne égale à la valeur nominale fournie par le constructeur. L'erreur maximale constatée sur l'aimantation est de 1%. En conclusion, la différence de champ d'aimantation n'a pas influencé les caractéristiques des aimants. En fait, l'aimantation minimale de 5 Tesla est déjà près du double de celle couramment utilisée. On pourra donc considérer que l'influence de la différence d'aimantation est négligeable.

Dans un second temps, nous avons mesuré l'aimantation de tous les blocs constituant une tranche. Presque toutes les mesures correspondent aux nuances de chaque pavé. L'erreur relative maximale est moins de 1%.

Les seules exceptions sont les aimants centraux (Cent 2 et Cent 4) à aimantation perpendiculaire. En effet, une erreur de 6% a été mesurée (1,27 au lieu de 1,35) car ces pavés sont trop plats. Comme ils subissent un champ démagnétisant intense, proportion de matériau désaimanté devient non négligeable.

De plus, pour ces aimants, la différence entre les côtes théoriques et les côtes réelles engendrent une erreur dans le calcul du volume. D'où la marge d'erreur plus importante qui est observée dans la détermination de l'aimantation, qui est proportionnelle au flux mesuré par unité de volume. Un aspect très important est que l'état de l'aimant n'est pas celui de la rémanence. En effet, le pavé mesuré produit un champ démagnétisant, il ne travaille donc pas à $H=0$.

Dans ce cas, nous mesurons la valeur de l'induction à un point de recul sur la courbe $J(H)$. Ce point dépend de la droite de travail de l'aimant. Dans notre cas, la droite de travail est fixée par la géométrie et l'angle d'aimantation du pavé. Quelle que soit la position du point sur la courbe $J(H)$ dans la zone de travail de l'aimant, son aimantation est toujours plus faible que l'induction rémanente.

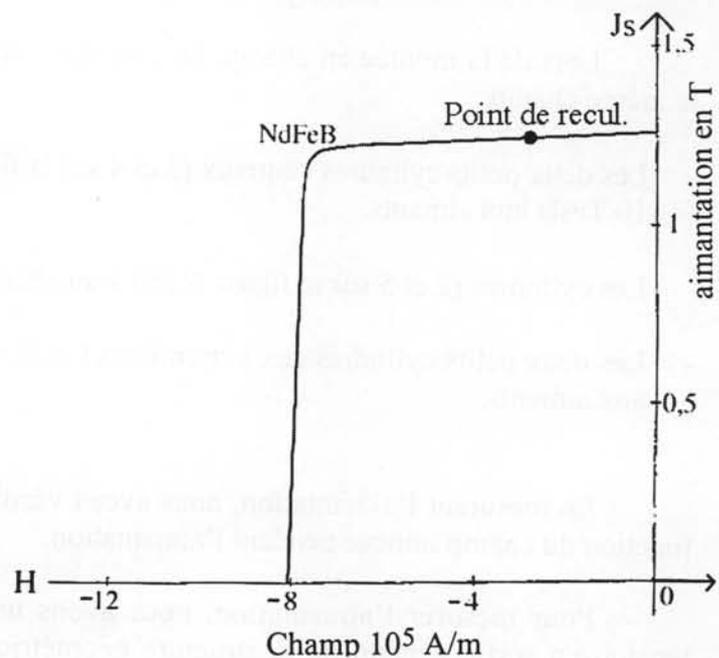


Fig V.26

De plus, comme on a pu le remarquer lors des simulations, les pointes des aimants sont désaimantées (surtout pour les aimants centraux). La désaimantation et le point de recul des aimants induisent des mesures plus faibles que les valeurs théoriques. Mais les valeurs d'aimantation sont très proches des valeurs théoriques implantées lors des simulations numériques.

En conclusion, les mesures des aimantations concordent avec les valeurs sur lesquelles nous nous étions basés, sauf pour les aimants centraux.

V.9 Montage individuel d'une tranche de la structure.

Cette étape est l'une des plus importantes du montage car nous allons pouvoir vérifier si nos simulations sont valides. Le montage de la tranche a été effectué manuellement. Nous n'avons donc pas pu quantifier les forces. Par contre, nous avons facilement validé les signes des interactions.

Dans cette partie, nous verrons donc étape par étape le montage d'une tranche. Pour chacune d'elles, nous expliquerons les phénomènes rencontrés, les problèmes et les solutions. De plus, nous expliquerons le fonctionnement de tous les systèmes de montage.

Dans cette partie, nous avons représenté le montage d'une tranche avec accès, qui est la plus difficile à réaliser. Nous expliquerons les différences de montage entre les tranches avec et sans accès. Chaque accès est conçu en deux parties de manière à avoir un demiaccès sur chaque bord de tranche. Dans ce cas, nous avons 8 tranches avec accès et 4 sans accès.

V.9.1 Assemblage de l'ensemble 1 et montage dans la coque de maintien.

Cette étape a été effectuée manuellement, malgré les forces mises en jeu. Les pavés les plus volumineux (environ 5 cm³) présentent les forces d'interaction les plus fortes, mais restent encore manipulables.

De plus, leur position finale est très stable car ils sont en forte attraction. Par contre dans leur état naturel, sans force extérieure imposée, ils tendent à se désaligner.

Sur la photographie ci-contre, nous avons représenté l'ensemble 1, une coque de maintien et le socle de montage.

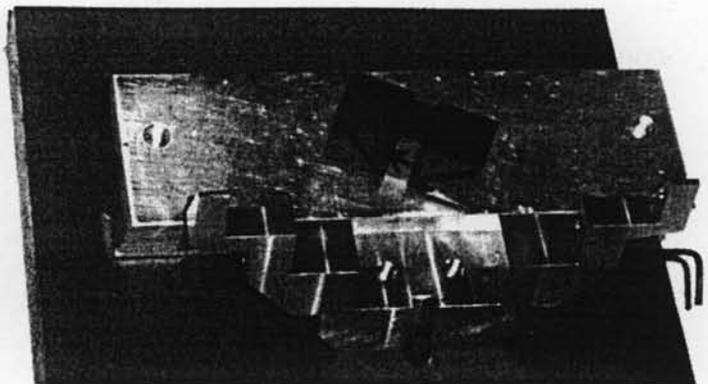


Fig V.27

Ici, on peut voir que l'aimant central est moins large, pour réserver l'épaisseur du demiaccès du blindage de l'accès.

Le socle de montage est constitué de deux parties :

- Une base en Lucoflex épais. On peut fixer la coque de maintien grâce aux filetages prévus numéro 4 sur la figure V.23.
- Un bloc en aluminium ayant un angle de 15°. En le mettant au contact de la coque, on pourra plaquer les ensembles d'aimant contre. Ce système permet d'obtenir une position dans la coque proche d'une position idéale. De plus le bloc d'aluminium a une hauteur légèrement supérieure à celle des pavés, ce qui aidera au positionnement de l'ensemble 2 contre l'arête qui dépasse.

Comme on l'avait vu lors des simulations (IV.7.3 -1-), on voit que les aimants ne sont pas alignés quand on les installe dans la coque. En appliquant une pression raisonnable, on arrive à les aligner et à les maintenir dans cette position grâce à la vis de maintien qui est prévue (numéro 1 sur la figure V.23) et l'embout de lucoflex entre la vis et les aimants.

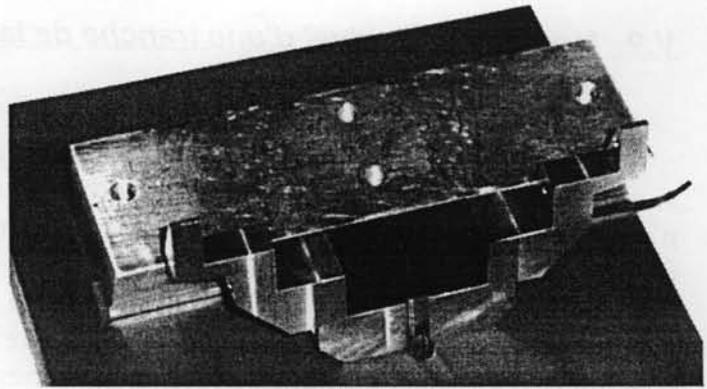


Fig V.28

L'ensemble 1 est finalement en place et les aimants sont solidarisés à la coque.

V.9.2 Assemblage d'une partie de l'ensemble 2 et montage dans la coque de maintien.

Dans un premier temps, nous avons assemblé manuellement les trois aimants centraux de l'ensemble 2. Vu leurs angles d'aimantation, nous avons retrouvé le même type de configuration qu'avec l'ensemble 1.

Leurs tailles étant inférieure à celles des aimants composant l'ensemble 1, les forces sont plus faibles. Comme pour l'ensemble 1, les pavés sont en attraction et non alignés.

La technique de montage consiste à faire glisser l'ensemble 2 sur le bloc en aluminium qui est en appui sur la coque. Lors de l'approche, il y a une forte attraction. L'ensemble 2 subit une force d'attraction due à l'ensemble 1 plus importante que celle en son sein qui tendent à désaligner les blocs aimantés.

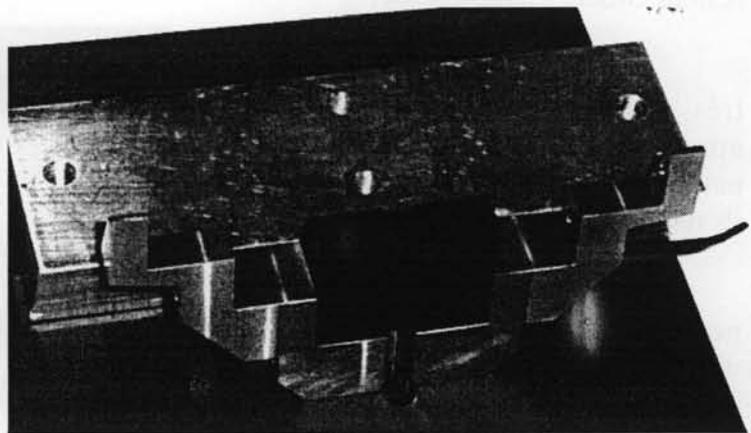


Fig V.29

L'ensemble 2 vient se coller naturellement sur l'ensemble 1, et se centre magnétiquement. En excentrant l'ensemble d'aimants (en le poussant vers une mauvaise position), il tend à reprendre sa position centrale. Elle est stable et presque idéale. Comme le bloc en aluminium est légèrement plus haut d'environ 1/10 de millimètre, on a pu plaquer l'ensemble 2 contre ce bloc. L'alignement est donc optimal.

Les six pavés forment donc un ensemble stable.

V.9.3 Montage de l'accès blindé.

Cette étape est assez rapide car l'accès est en matériau doux. Il est donc en attraction avec les aimants.

Pour la mise en place, nous avons dû desserrer les vis de maintien légèrement pour pouvoir insérer le demi-accès entre les blocs. Ensuite, nous avons resserré les aimants dans la coque.

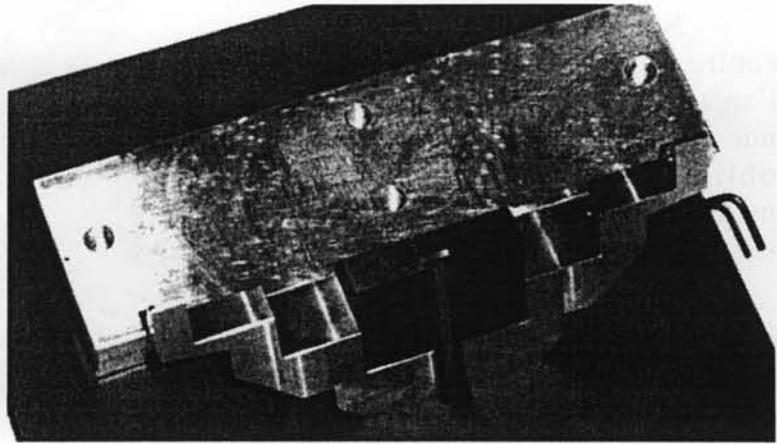


Fig V.30

Pour ne pas gêner le montage des autres aimants de la tranche, il ne faut pas que l'accès dépasse. C'est pourquoi nous avons mis le haut de l'accès au niveau des aimants. Nous avons prévu un trou dans le socle pour y insérer le reste de l'accès. Ensuite pour permettre de placer l'accès dans sa position finale, il suffira de le pousser en desserrant les vis si nécessaires.

V.9.4 Fin de l'assemblage de l'ensemble 2 et montage dans la coque de maintien.

Les aimants NFB5 et NFB11 sont en répulsion avec l'ensemble 2 seul. Par contre lors de l'étape de montage, ils sont en forte répulsion. Mais lorsqu'ils sont à leur place finale, ils se trouvent en faible attraction avec les six aimants déjà installés.

Pour répondre à ce problème, nous avons prévu un système d'approche des deux blocs. Ce système permet de maintenir les aimants à approcher, mais aussi de les centrer.

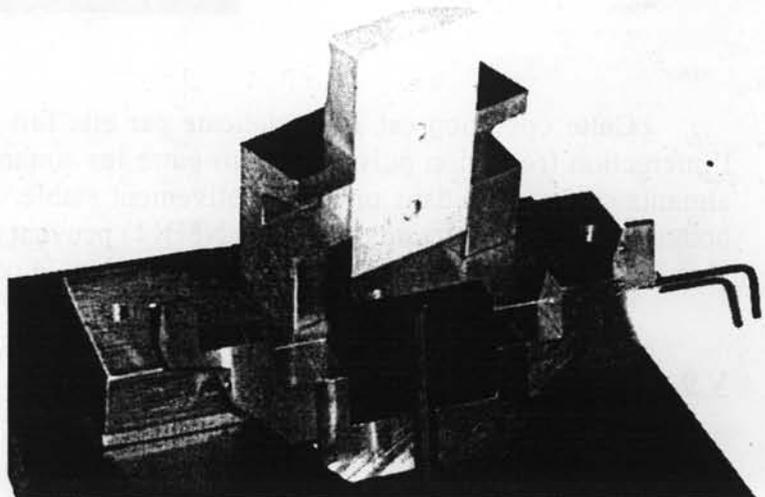


Fig V.31

Suivant le même principe d'approche, nous faisons glisser ce système de maintien sur le bloc en aluminium. Le pavé de lucoflex permet d'avoir un écartement constant entre les deux pavés d'aimants à approcher. La valeur de cet écartement correspond à la largeur des pavés déjà en place. Le pavé de lucoflex est donc mobile par rapport au système d'approche en aluminium.

Sur la photographie ci-contre, nous avons représenté l'approche des deux pavés. Dans une position intermédiaire, on est obligé de les maintenir manuellement. Les forces restent très raisonnables.

Nous avons donc fait glisser le système et les aimants sur le bloc en aluminium.

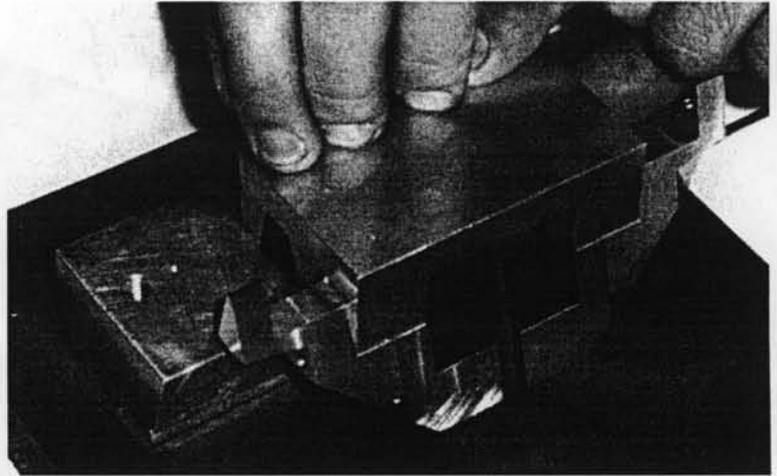


Fig V.32

Comme pour le montage des premiers aimants de l'ensemble 2, ils ont une tendance à se centrer naturellement. De la même manière, nous les avons fait glisser et reculer jusqu'à leur appui sur la plaque en aluminium.

Ils obtiennent donc une position idéale.

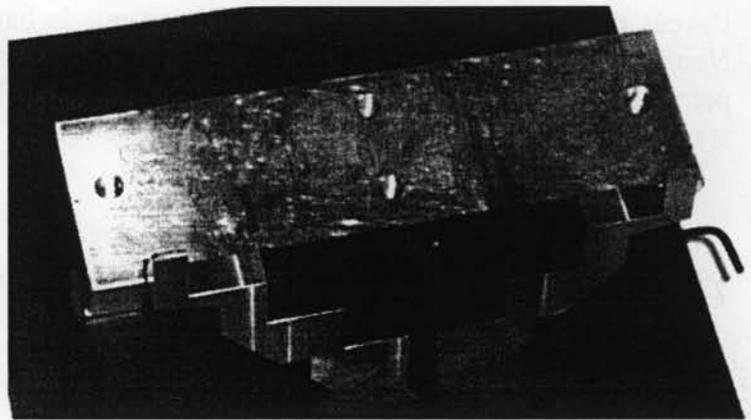


Fig V.33

Cette opération est assez délicate car elle fait intervenir une variation du signe de l'interaction (répulsion puis attraction) entre les aimants qui est assez difficile à gérer. Les aimants se trouvent dans un état relativement stable. Il faut faire attention de ne pas trop bouger car les deux aimants (NFB5 et NFB11) peuvent avoir tendance à partir de la structure. Une fois les aimants en place, nous les serrons dans la coque.

V.9.5 Assemblage des sous-ensembles 3.

Le montage de ces sous-ensembles ne pose pas de problème car ils sont de petite taille et en attraction.

Comme les aimantations ne sont pas colinéaires, ils tendent à se désaligner (Figure ci-contre) mais restent solidaires.

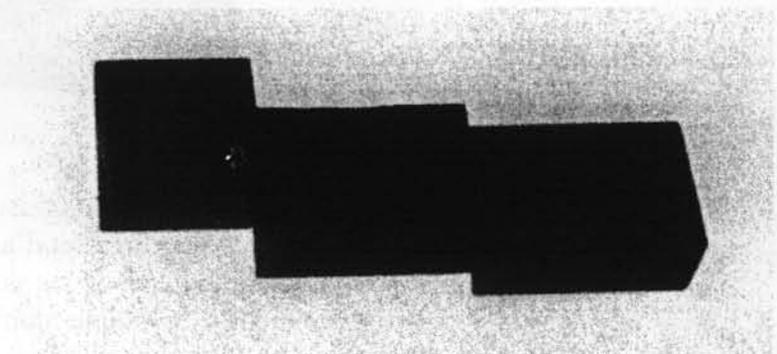


Fig V.34

V.9.6 Montage des sous-ensembles 3 dans la coque de maintien.

Comme prévu par des simulations, les deux aimants centraux sont en répulsion avec les aimants des sous-ensembles 3. Nous avons conçu un système d'approche pour ces aimants. Ce système se base sur le même principe que le système d'approche des aimants de l'ensemble 2. On doit maintenir les aimants en place tout en approchant les aimants en répulsion.

Sur la photographie ci-contre, nous avons représenté ce système d'approche. Il est constitué de deux parties :

- une partie en aluminium qui va maintenir les deux sous-ensembles.
- une partie en lucoflex coulissante qui permet de garder un écartement constant entre les deux sous-ensembles, mais aussi d'approcher les aimants centraux.

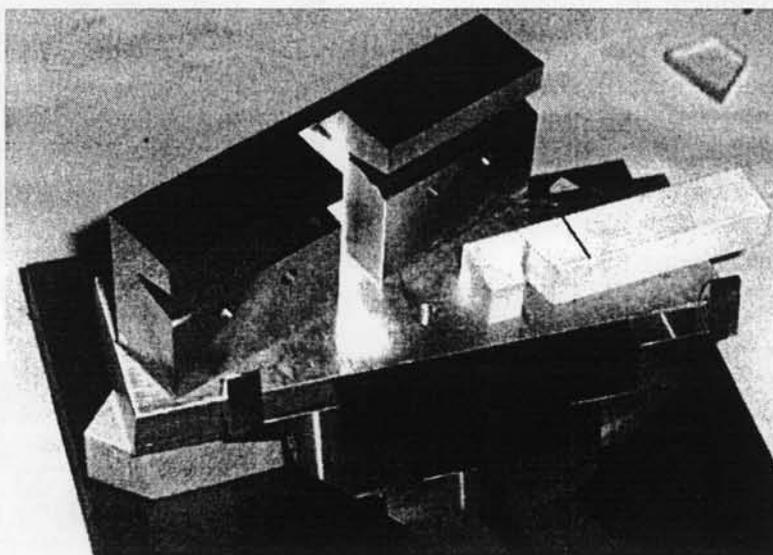


Fig V.35

Sur la photographie ci-contre, nous avons installé un des deux sous-ensembles. Il se trouve pour l'instant dans une position décalée par rapport à son emplacement théorique.



Fig V.36

Il faut donc le maintenir en place. Plutôt que de les approcher individuellement et d'avoir des difficultés pour les séparer, nous allons placer les deux sous ensembles dans le système. Le système d'approche en lucoflex permet de les séparer.

Nous avons surélevé le bloc de montage en aluminium de manière à pouvoir conserver les avantages de ce système (approche latérale par glissement, et calage) et les appliquer de nouveau pour le montage de l'ensemble 3.

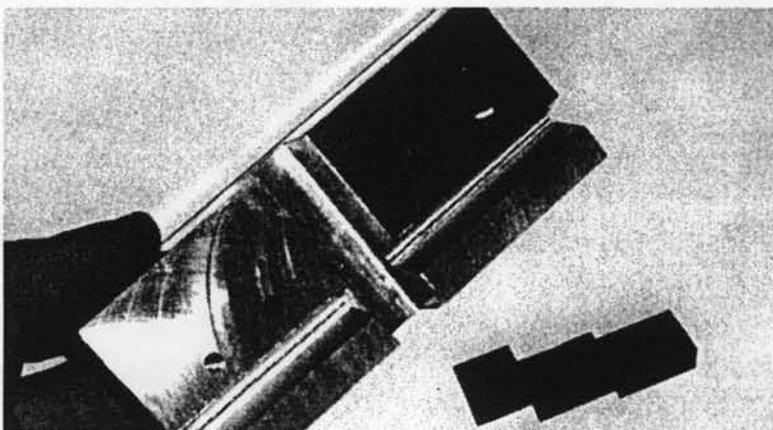


Fig V.37

V.9.7 Montage des aimants centraux.

En réalisant les étapes décrites, nous obtenons une configuration d'aimants très stable. Les deux sous-ensembles plaquent les aimants 'instables' (NFB5 et NFB11). Sur la photographie ci-contre, nous avons retiré le bloc d'approche en aluminium. Malgré les forces d'attraction entre les deux sous-ensembles, on peut faire glisser facilement le système d'approche en lucoflex.

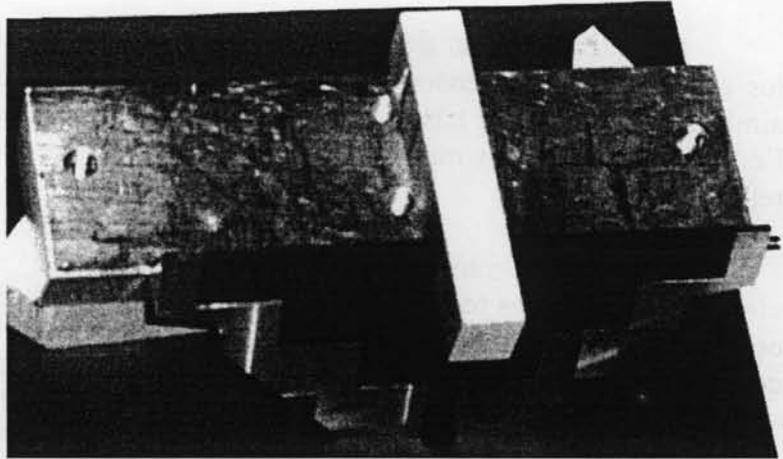


Fig V.38

Comme nous l'avons vu lors des affectations de matériaux (Ch. IV.5.4), nous n'avons pas pu trouver de matériau ayant des caractéristiques magnétiques suffisantes pour les aimants centraux. Donc nous avons découpé des pavés en laiton pour remplacer les aimants indisponibles. Ils ont des géométries identiques aux aimants pour conserver l'espacement théorique entre les aimants centraux.

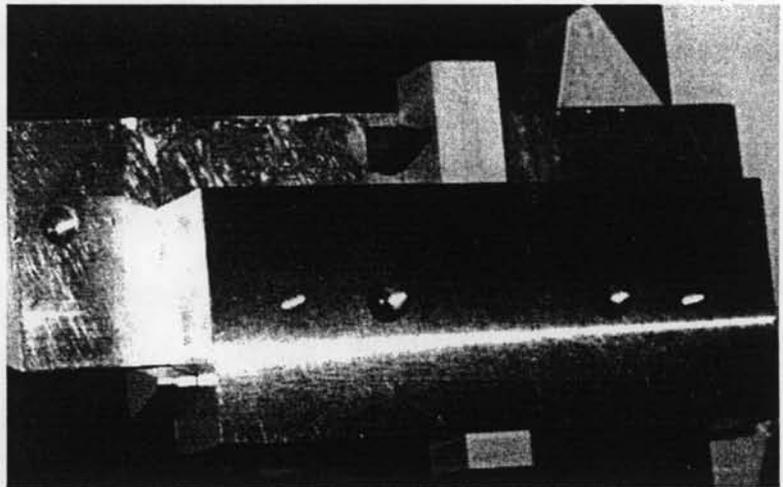


Fig V. 39

V.9.8 Serrage des aimants dans la coque.

Nous avons découpé un V en laiton à 30° grâce à la machine à électroérosion.

Ce V sert à centrer finalement tous les aimants par rapport à la coque de maintien.

Ensuite, on met dans sa position finale le demi-accès. S'il y a de petites différences de côtes, le demi-accès subit un cisaillement. Il faut donc desserrer les aimants de manière à faciliter la poussée de l'accès.

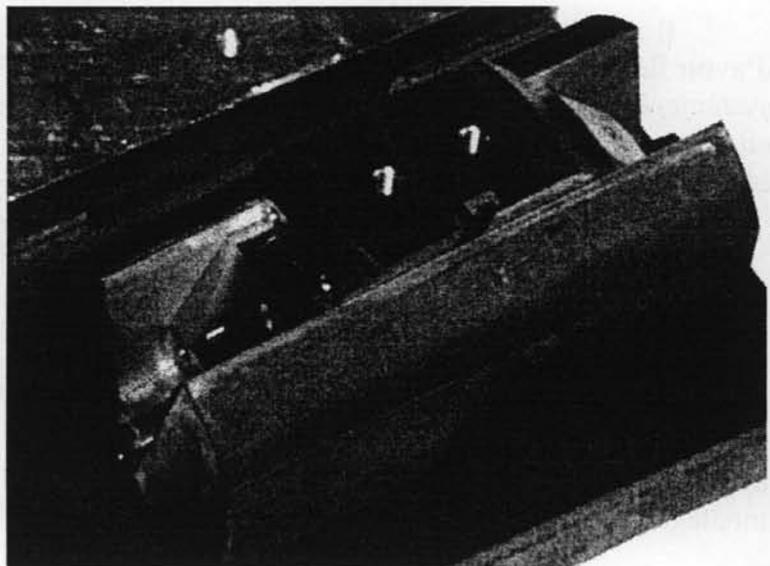


Fig V.40

V.9.9 Présentation d'une tranche.

Pour plus de sécurité et de compréhension, nous avons indiqué sur la tranche les angles et sens d'aimantations des pavés d'aimants.

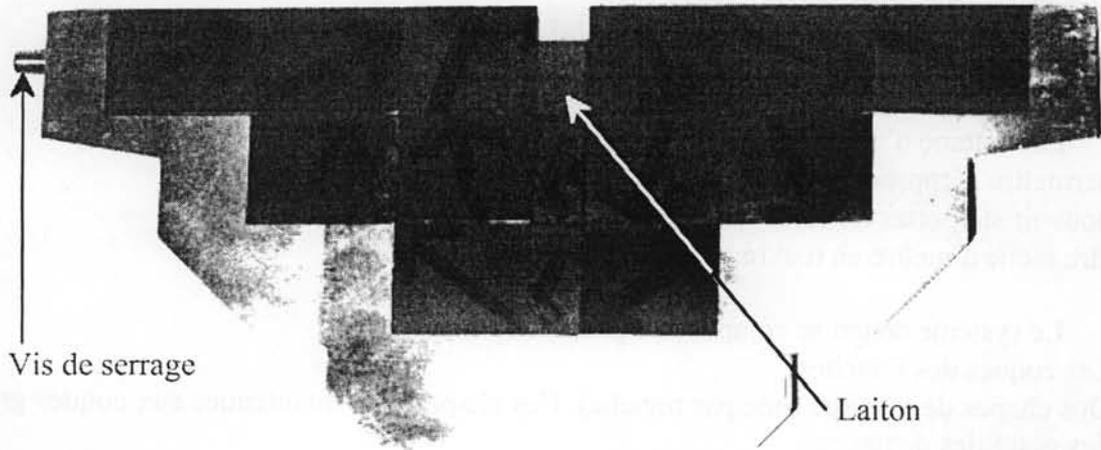


Fig V.41

V.9.10 Protection d'une tranche.

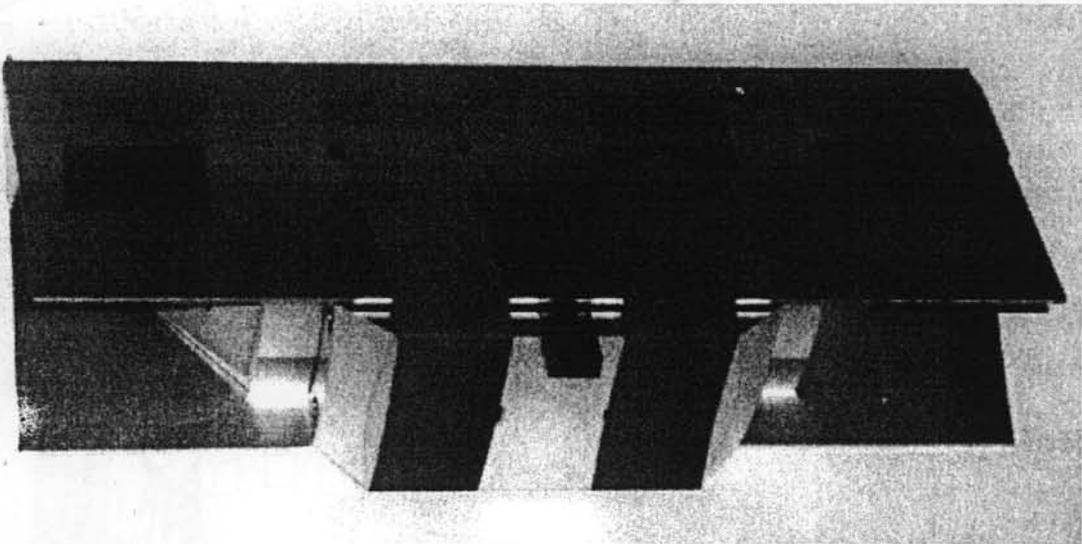


Fig V.42

Pour protéger les tranches, nous avons fixé deux plaques de clinquant pour éviter la plupart des poussières magnétiques. Mais surtout, elles permettent de protéger les tranches des légers chocs.

V.10 Approche des tranches de la structure : principe et système.

Lors de cette étape, nous allons utiliser un système d'approche. Étape par étape, nous expliquerons les caractéristiques spécifiques de chaque pièce.

V.10.1 Présentation du système d'approche des douze tranches.

Le système d'approche des douze tranches doit :

- permettre d'approcher les tranches et de les monter dans le système.
- pouvoir supporter les forces de répulsion imposées par les tranches.
- être facile à mettre en œuvre.

Le système conçu se compose en plusieurs parties :

- Les coques des tranches.
- Des chapes de poussée (une par tranche). Ces chapes sont maintenues aux coques grâce à des goupilles de liaison.
- Deux brides de montage rainurées (12 rainures dans lesquelles viennent se loger les chapes de poussée).
- 12 longerons + 12 vis de poussée. Ce système servira à approcher les tranches. Il a été largement dimensionné en fonction des forces calculées lors des simulations.
- Un écran de protection.

Lors de l'utilisation de chaque élément pendant le montage, on expliquera le raisonnement qui nous a poussé à concevoir la pièce utilisée.

L'idée directrice est d'obtenir les pièces les plus faciles à réaliser au niveau technologique, tout en respectant les données imposées par le montage.

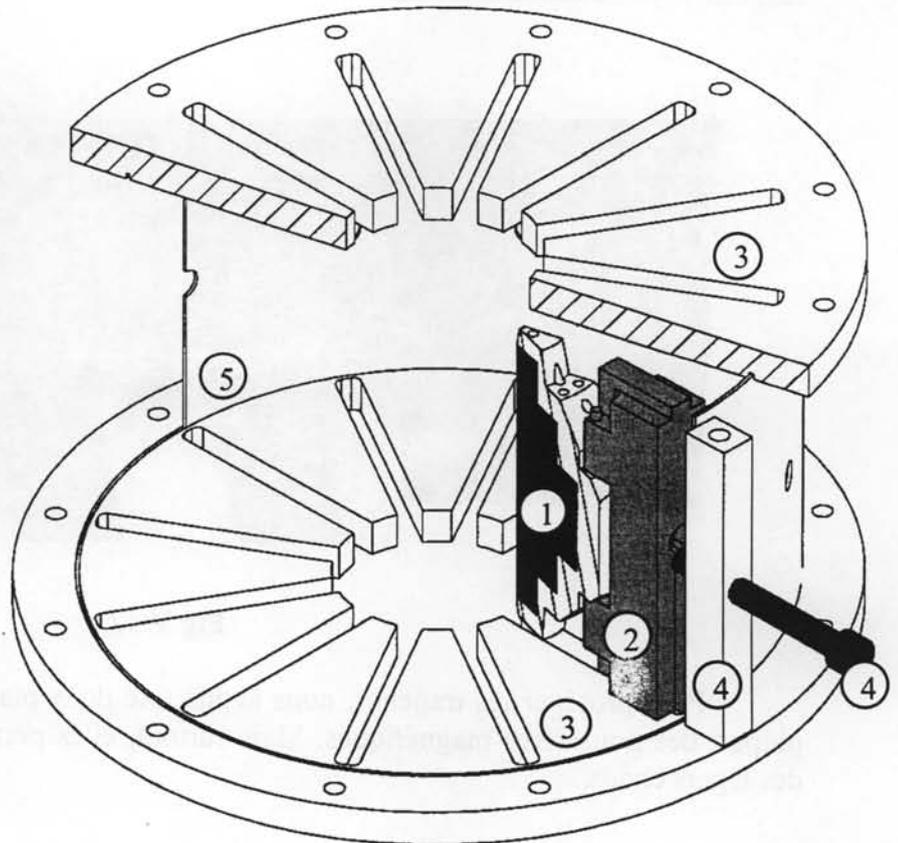


Fig V.43 : Système d'approche des douze tranches.

V.10.2 Mise en place de l'ensemble aimants-coque-chape dans le système d'approche.

Cette étape se fait manuellement. Grâce aux simulations numériques des forces entre les tranches lors de l'approche, nous avons défini une distance minimale à avoir entre les tranches. Nous avons représenté le principe de cette étape sur la figure ci-dessous.

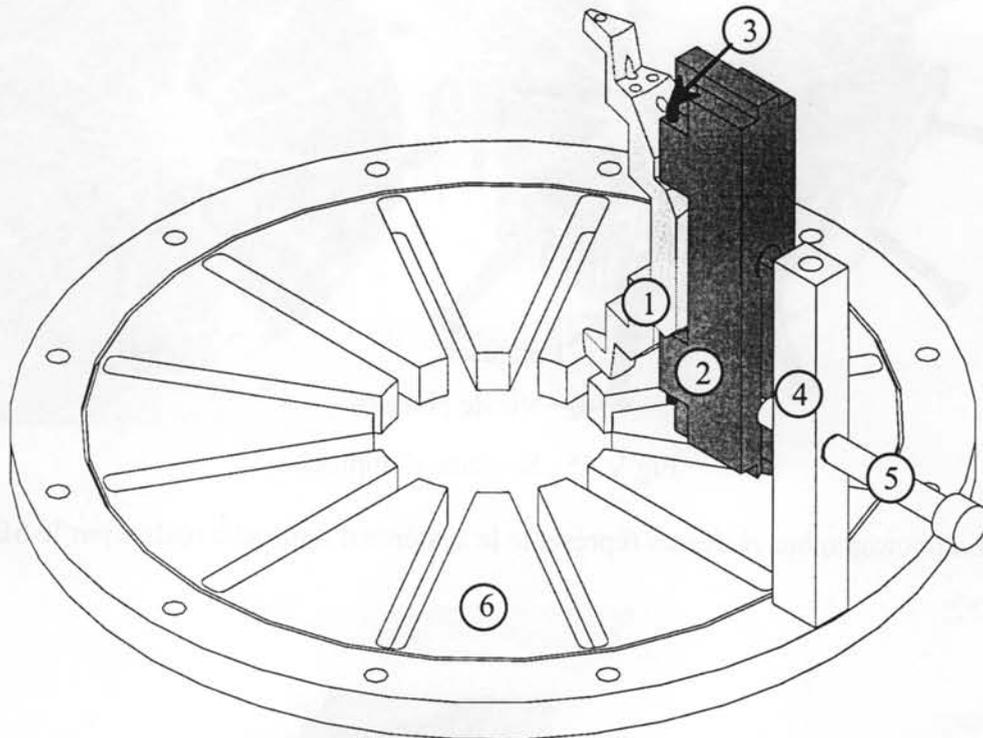


Fig V.44 : Mise en place dans le système d'approche.

- 1- Coque de maintien. Nous n'avons pas représenté les aimants.
- 2- Chape de poussée.
- 3- Goupille de liaison.
- 4- Longeron. Cette pièce sert à relier les deux brides de montage. De plus, il y a un trou fileté prévu pour la vis de poussée. Il y a un longeron par tranche.
- 5- Vis de poussée. C'est elle qui va permettre l'approche des tranches. Elle est évidée sur une faible longueur de manière à obtenir un étranglement. C'est dans cet étranglement que la chape de poussée va se fixer.
- 6- Bride de montage. La chape de poussée a une partie prévue pour se loger dans la rainure des brides de montage.

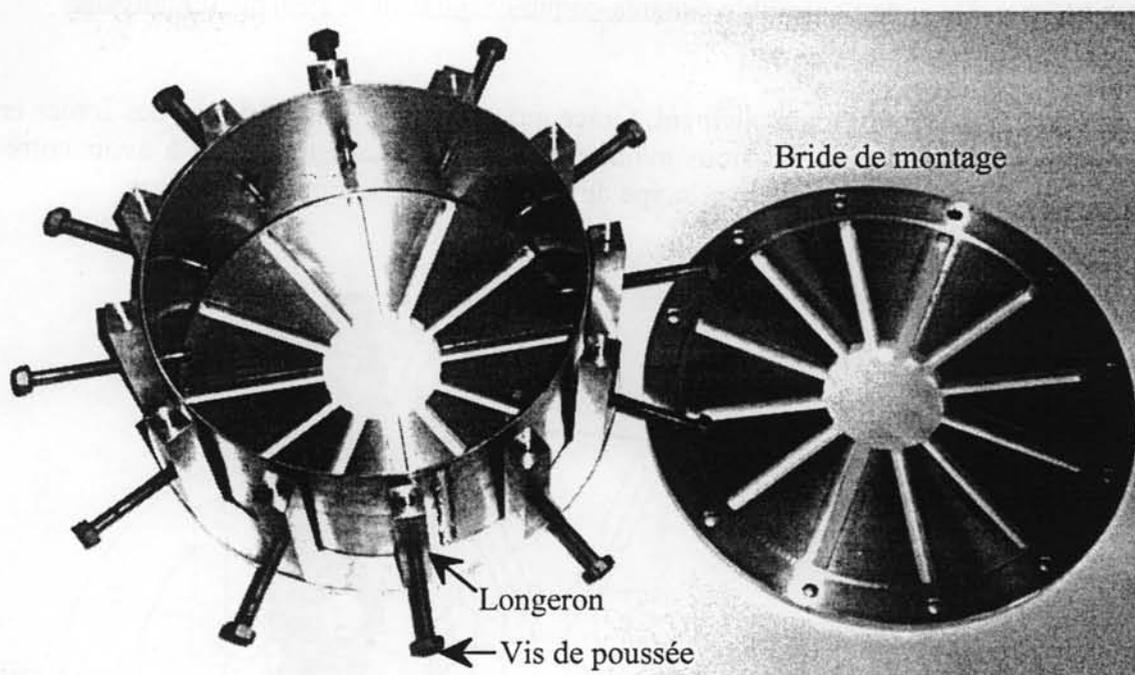


Fig V.45 : Système d'approche.

La photographie ci-dessus représente le système d'approche réalisé par le SERAS.

La photographie ci-contre représente la mise en place d'une tranche. L'approche est verticale.

Pour obtenir des forces faibles et équilibrées, il faut que le positionnement des tranches soit symétrique.

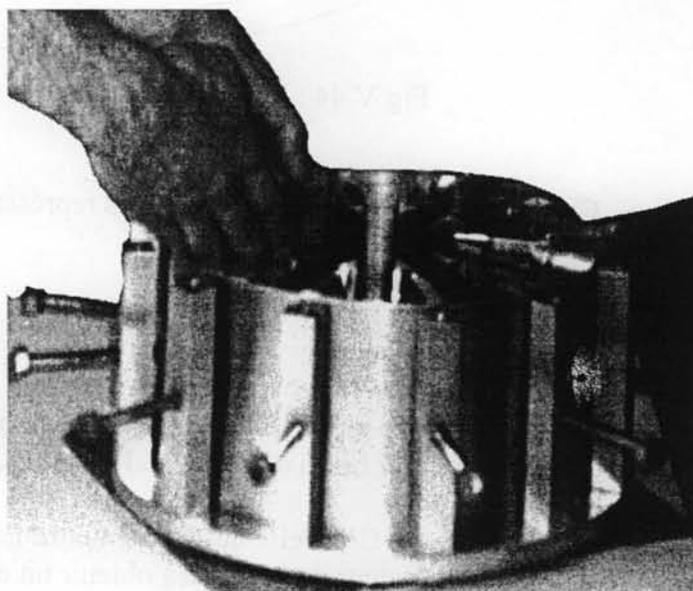


Fig V.46

Lors de l'approche d'une tranche, il y a des forces de répulsion qui apparaissent. Pour que le système soit stable, nous avons bloqué les tranches déjà installées contre les longerons avec les vis de poussée.

V.10.3 Approche des tranches.

Il faut rappeler que les tranches sont déjà protégées par deux plaques de clinquant.

Pour un aspect pratique, nous avons retiré le cylindre de protection latéral (pour pouvoir retirer les plaques de protection).

À cette distance, l'interaction entre les tranches reste encore négligeable par rapport aux forces intrinsèques des tranches.

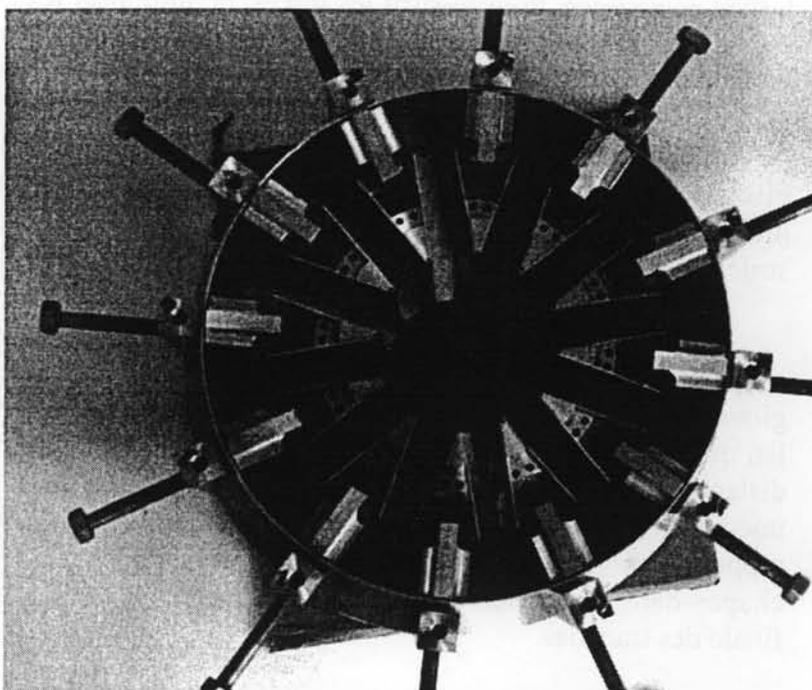


Fig V.47 : Approche des douze tranches.

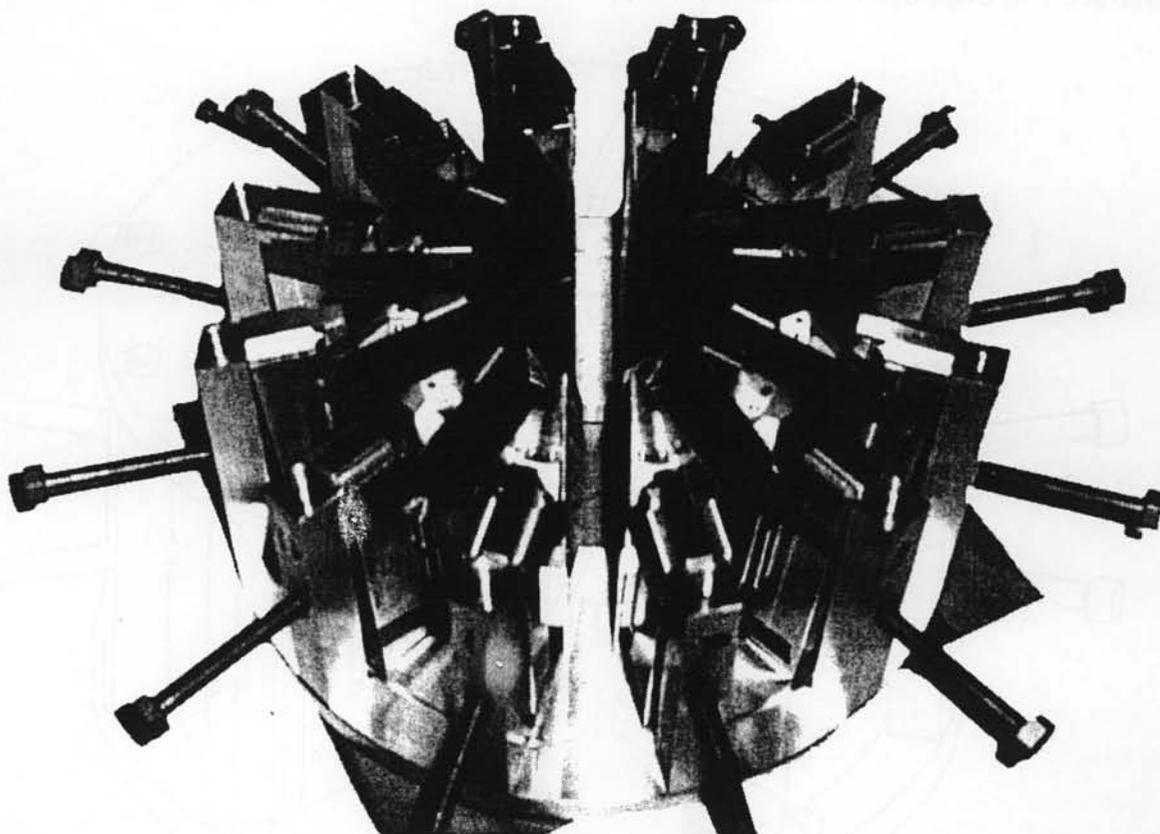


Fig V.48: Approche des douze tranches.

Une fois les tranches mises en place dans le système d'approche, nous avons actionné les vis de poussée. Pour répartir les forces, et minimiser les couples, l'approche des tranches a été faite de manière symétrique. Toutes les tranches sont avancées quatre par quatre, les unes en face des autres.

Lorsque les tranches sont très proches, nous avons enlevé les plaques de protection. En effet, à cette distance, les plus petits aimants sont confinés à l'intérieur de la coque de maintien. De toute façon en cas de problème, les aimants vont s'attirer sans sortir de la structure. De cette manière, il reste très peu de risques.

Un problème est apparu vers la fin de l'approche des tranches. Tout au long de cette approche, les tranches sont en répulsion. De plus, pour que les chapes des tranches puissent glisser dans les rainures des brides, il est nécessaire de laisser un léger jeu. C'est à cause de ce jeu que le problème suivant apparaît : les tranches subissent une très forte répulsion à faible distance. Cette force devrait être uniquement sur l'axe de la vis de poussée. Or dans notre cas, une faible composante perpendiculaire provoque un décalage vertical d'une tranche par rapport à sa voisine. Il y a un cisaillement entre les tranches qui provoque un ancrage des chapes dans les brides. C'est un grave problème car l'arc-boutement empêche l'approche finale des tranches.

Nous avons alors fait passer au centre de la structure une tige filetée. Cette tige permet de maintenir toutes les tranches en les serrant par deux rondelles renforcées. Ce système oblige les tranches à être au même niveau, ce qui évite alors tous les phénomènes dus au cisaillement. Cette tige et les rondelles sont réalisées en inox amagnétique.

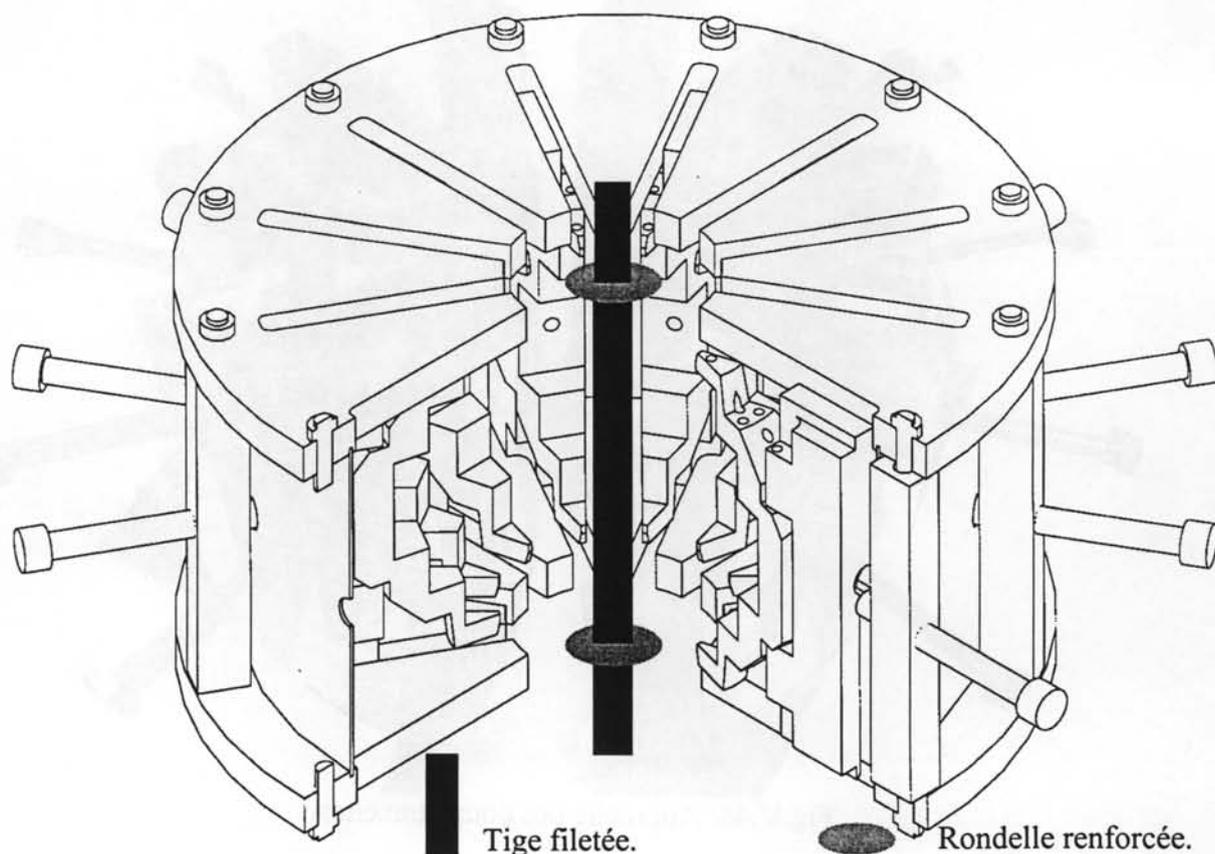


Fig V.49

V.10.4 Mise en place des bagues de maintien.

Une fois que les tranches sont assez rapprochées, nous avons pu mettre les bagues de maintien. Elles sont fixées aux coques par deux vis par bague et par tranche, ce qui fait 24 vis par bague (soit 48 en tout).

Une fois que les bagues sont installées, dans un premier temps, nous avons supprimé la tige filetée et les rondelles qui maintenaient les tranches. Ensuite, nous avons retiré la structure et ses chapes du système d'approche. Puis nous avons retiré les goupilles de liaison pour libérer totalement les tranches en enlevant les chapes.

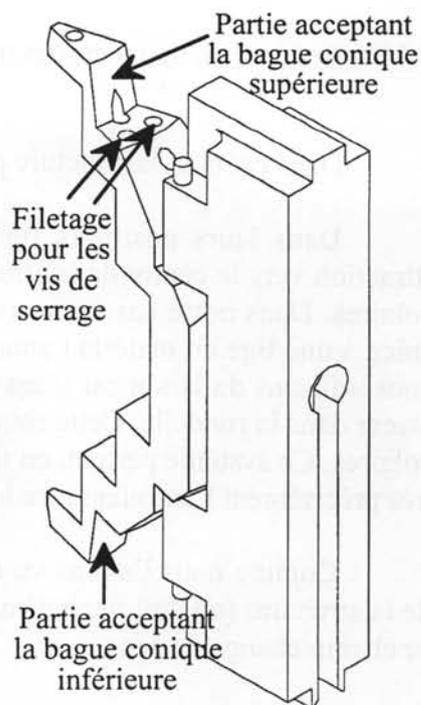


Fig V.51

L'intérieur des bagues est conique. Ce principe (Fig V.52) nous a permis de régler deux paramètres importants :

- L'approche des tranches. Grâce à cette conicité, on a pu avoir un serrage des tranches très puissant en utilisant les 24 vis à tour de rôle. De cette manière, l'approche finale des tranches sur le dernier millimètre maximum a été possible
- L'alignement des tranches. Comme on l'a vu précédemment, les tranches une fois retenues ne peuvent exprimer leur répulsion que par un décalage vertical, pouvant aller jusqu'à 3 ou 4 mm. Grâce au principe des vis et des bagues, nous pouvons régler très précisément la hauteur relative des tranches par rapport aux bagues. L'alignement des tranches est très important car sinon il y aura deux problèmes : une dissymétrie magnétique avec apparition de forces et couples parasites), et surtout un mauvais alignement des accès rendant le dispositif inutilisable.

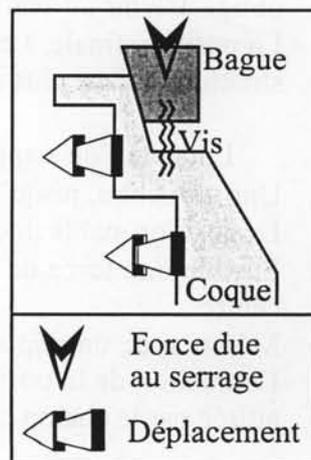


Fig V.52

Nous avons représenté ci-contre la structure dans sa phase finale. Dans cet état, elle est complètement stable.

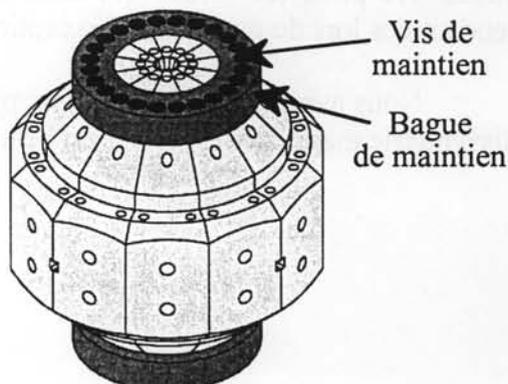


Fig V.53

V.10.5 Système de maintien des pièces polaires : Mise en place des pièces polaires.

Dans cet état, la structure produit déjà un champ magnétique supérieur à 2,5 tesla.

Dans leurs positions finales, les pièces polaires en matériau doux sont en forte attraction vers le centre de la structure. Il faut donc prévoir un système qui retient ces pièces polaires. Dans notre cas, nous avons choisi un système de vis. La pièce polaire est retenue grâce à une tige en matériau amagnétique (cf. IV.5.5 : Optimisation des pièces polaires). Ici, nous utilisons du laiton car il est facile à travailler. Cette tige est filetée au pas fin et vient se placer dans la rondelle. Cette rondelle à l'extérieur de la structure permet de retenir les pièces polaires. Ce système permet, en tournant la rondelle par rapport à la tige en laiton et de régler très précisément l'entrefer entre les pièces polaires.

Comme nous l'avons vu dans le chapitre IV.5.7, le champ le long de l'accès vertical de la structure (où doit venir s'installer les pièces polaires) subit une forte variation. De plus, ce champ change de sens.

Dans notre cas, cette variation de champ va donner aux pièces polaires deux positions stables :

- Une position intermédiaire. La pièce polaire subit deux forces égales : une force due au champ positif et une autre force due au champ négatif. Cette position est stable, mais elle oblige à avoir un écartement entre les pièces polaires très important (environ 20mm).
- La position finale. Les pièces polaires subissent une force d'attraction vers le centre de la structure qui est plus importante.

Lorsque l'on a approché les pièces polaires, nous avons senti plusieurs zones :

- Une attraction, jusqu'à la position intermédiaire.
- La position stable intermédiaire décrite précédemment.
- Ensuite une force de pression est nécessaire pour sortir de cet état de stabilité et aller au centre.
- Même avec un déplacement très faible, il y a une forte variation de force, passant de l'attraction de la position stable, vers la position finale. Il faut retenir la pièce car elle est attirée par le champ central et peut provoquer un choc.

Cette étape est très délicate car il ne faut pas faire s'entrechoquer la coque de maintien et le système de retenue des aimants. Les aimants (matériau fritté) sont très sensibles aux chocs. De plus, les forces qui interviennent dans cette étape sont parmi les plus fortes rencontrées lors du montage à l'exception de l'approche des tranches.

Nous avons approché les deux pièces polaires l'une après l'autre. Ce principe crée une dissymétrie magnétique, mais il est beaucoup plus facile à mettre en œuvre.

V.11 Conclusion sur le montage de la structure.

Pour le montage de la structure, nous avons suivi le principe décrit dans la partie simulation. Un des points les plus importants était les chocs entre les aimants. Il ne fallait absolument pas les entrechoquer sous peine d'ébréchure ou de cassure.

Les étapes d'approche des pavés pour la constitution des ensembles a été facilement réalisée. Les interactions entre les aimants ont confirmé les prévisions des calculs. Pour les forces, nous n'avons pas pu mesurer exactement leurs valeurs. Notre critère de faisabilité manuelle n'a pas été mis en défaut lors de l'assemblage des aimants de la structure.

L'approche des ensembles s'est effectuée comme le prévoyait les simulations numériques. Toutefois, la mise en œuvre des systèmes a été prévue de manière à simplifier l'approche des ensembles.

V.12 Montage de nouveaux aimants.

Dans le chapitre IV.5.4, nous avons affecté les matériaux magnétiques aux pavés d'aimants. Jusqu'alors, nous n'avions pas d'aimants supportant le champ démagnétisant dans la zone très proche de la zone centrale.

Nous avons pu disposer des aimants HC411 plusieurs mois après le montage de la structure avec les pièces en laiton. Nous avons donc été obligé de démonter la structure pour y inclure les nouveaux aimants.

Le démontage de la structure à été identique au montage (naturellement les étapes ont été inversées). Toutefois, vu la position des aimants ajoutés dans la structure, nous n'avons pas eu à démonter entièrement toutes les tranches.

Dans un premier temps, nous avons séparé les tranches de la structure à l'aide du système d'approche. Ce système permet de retenir les tranches (qui sont en forte répulsion).

Ensuite, nous avons suivi les mêmes étapes que le premier montage à partir de l'étape décrite dans le chapitre V.9.7. Dans cette étape, nous avons donc remplacé le morceau de laiton par les aimants.

Nous avons vérifié les interactions entre les aimants. Vu leurs tailles, les aimants sont très faciles à manipuler car les forces mises en jeu sont relativement faibles.

Ensuite, nous avons suivi les mêmes étapes à partir de celle décrite dans le chapitre V.9.8 . Cette facilité de démontage est un atout pour le remplacement progressif d'aimants en fonction de l'évolution des matériaux magnétiques durs.

Chapitre VI

MESURES

VI Mesures.

VI.1 Introduction.

Nous avons mesuré le champ généré par la structure avant et après avoir monté la bague centrale d'aimants HC411.

Dans cette partie, nous allons présenter les résultats. Du fait de la compacité de cette structure, seules deux types de mesures sont possibles :

- Mesures de champ le long des accès.
- Mesures de champ au centre en faisant varier l'entrefer des pièces polaires.

VI.2 Mesures de champ : type de sonde, calibrage.

Toutes les mesures sont faites à l'aide d'une sonde à effet hall. La sonde est alimentée par une source de courant, et délivre une tension proportionnelle à l'induction mesurée.

La sonde utilisée est un modèle FH-301 de la société BELL. Cette sonde a une épaisseur faible d'environ 0,4 mm pour le plateau où se trouve la sonde, soit réellement 0,5 mm avec les connexions des fils. Elle a une largeur de physique d'environ 3,2 mm et une longueur de 2,5 mm. La surface de mesure effective est de 0,64mm x 1,28mm.

Pour calibrer cette sonde, nous avons utilisé la structure en fixant un entrefer important (1,1mm) pour pouvoir insérer une sonde de précision utilisée avec son banc de traitement numérique BELL 9000. Cette sonde de précision a des caractéristiques très intéressantes : induction maximale de 10T, très bonne linéarité, erreur maximale de 2 %.

Avec cet entrefer minimal pour la sonde de précision, nous avons réglé la petite sonde (FH-301). Pour dix entrefers différents de 1 à 6 mm, nous avons comparé les deux valeurs de champ entre la sonde de précision et la sonde que l'on va utiliser. Ces mesures sont très proches avec un écart de 1 à 2 %.

Comme cette erreur est de l'ordre de celle de la sonde de précision, on considèrera que les erreurs de mesure de la sonde Bell FH-301 et celle de la sonde de précision sont identiques.

Pour des raisons d'encombrement de la sonde, nous ne pouvons pas utiliser les accès blindés de section 2,8 mm x 2,8 mm. C'est pourquoi nous effectuerons les mesures sur les accès non blindés de la structure qui sont bien plus grand : 6,7 x 6,7 mm.

VI.3 Mesures de champ sur l'accès.

Cette série de mesures permet de vérifier le champ subi par l'échantillon lors de son approche. Pour ces mesures, l'entrefer des pièces polaires est constant, et dépend de la taille de la sonde. Le but étant de créer le champ le plus intense possible, nous imposons un entrefer entre les pièces polaires le plus petit possible de la taille de la sonde. Toutefois, il ne faut pas la pincer entre les pièces polaires sous peine de cassure.

Lors de ces mesures, nous avons toujours suivi la même méthodologie :

- réglage minimal de l'entrefer des pièces polaires décrit précédemment.
- mise en place de la sonde. Pour avoir des mesures correctes, nous devons placer initialement la sonde au delà du centre de la structure. Cette approche permet de voir les phénomènes et le signe de variation de l'induction dans la zone proche de la zone centrale. De plus, pour les mesures, nous pouvons facilement définir où se situe le centre magnétique de la structure.
- Ensuite, nous retirons la sonde par pas de 50 microns (150 pas) à partir du centre magnétique, puis 0,1 mm (150 pas), puis 0,2 mm (150 pas), puis 0,5 mm.

Cette méthode a été utilisée pour calibrer la structure avec les différents types de pièces polaires :

- Les pièces polaires longues composées uniquement en Fer-Cobalt qui remplissent l'accès sur toute la longueur.
- Les pièces polaires courtes composées de Fer-Cobalt pour la partie proche du centre et maintenue par une pièce en laiton.
- Les pièces polaires avec accès réalisées spécialement pour les applications sur les lignes de lumière du Synchrotron. Ces pièces sont semblables aux pièces courtes mais ont un accès vertical tout le long dans le Fer-Cobalt et le laiton.

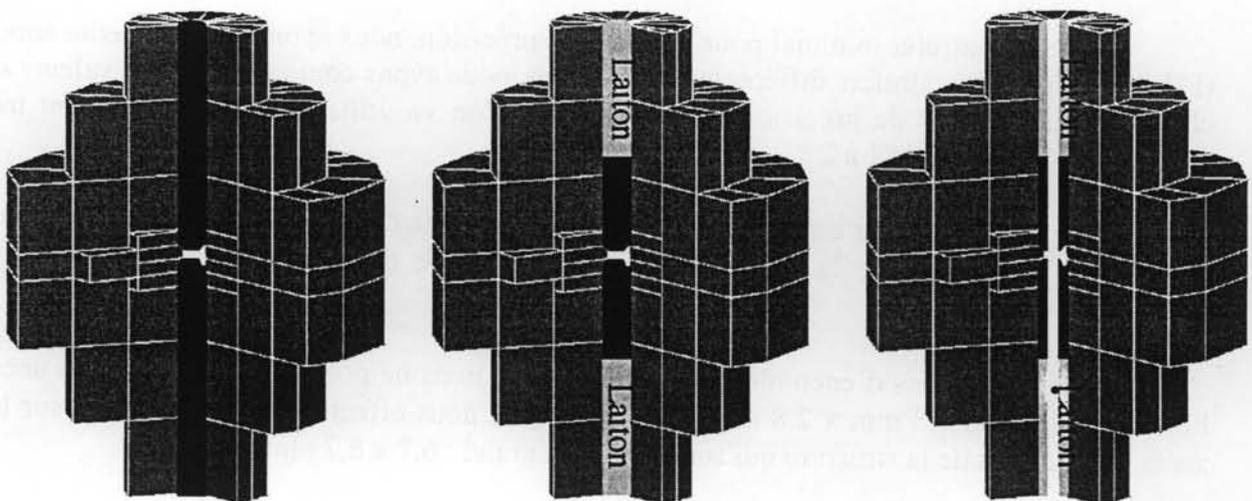


Fig VI.1 : Pièces polaires longues, courtes et courtes avec accès.

VI.3.1 Mesures de champ sur l'accès avec les pièces polaires longues.

L'entrefer est fixé à 0,6 mm. Comme nous l'avons vu dans la partie IV.5.6 (conception des accès), le champ magnétique de la structure varie principalement en quatre temps :

- Une zone de champ homogène (de l'ordre de la précision de la sonde). Cette zone est située entre les parties plates des deux pièces polaires (soit environ 3 mm de diamètre).
- Ensuite, le champ magnétique baisse très vite car, dans cette zone (de 1,5 mm à 5 mm à partir du centre), l'influence de la concentration du champ grâce à la pièce polaire est beaucoup plus faible. L'induction dans l'accès n'ayant aucune discontinuité (puisque l'on est dans le même matériau, dans notre cas l'air), on retrouve donc une variation continue. La sonde faisant la moyenne de l'induction imposée sur la surface de mesure.
- Dans la zone suivante (de 5 mm à 40 mm à partir du centre), nous avons une variation de champ qui subit d'une part l'influence de l'induction centrale qui tend à diminuer au fur et à mesure de l'éloignement de la zone centrale. D'autre part, l'aimantation des aimants dans cette zone fait baisser le champ. Vu leur aimantation, ils ont naturellement tendance à imposer un champ magnétique négatif autour d'eux.

Ensuite, il y a un champ magnétique négatif (de 40 mm à 60 mm) qui est dû aux aimants situés autour des accès. Dans ce cas, l'influence du champ central positif est trop faible.

Les courbes obtenues représentent bien les phénomènes décrits précédemment. Dans la partie où les aimants ont une forte action, nous avons une erreur qui reste relativement faible. Par contre dans la partie entre les pièces polaires, nous avons une différence beaucoup plus importante. Nous essaierons d'expliquer cette différence un peu plus loin.

Bien que l'on soit en dessous des prévisions, l'induction centrale atteint la valeur de 4,48 T avec la structure sans les aimants de la bague centrale. Le champ à l'extérieur de la structure est nul sur l'accès.

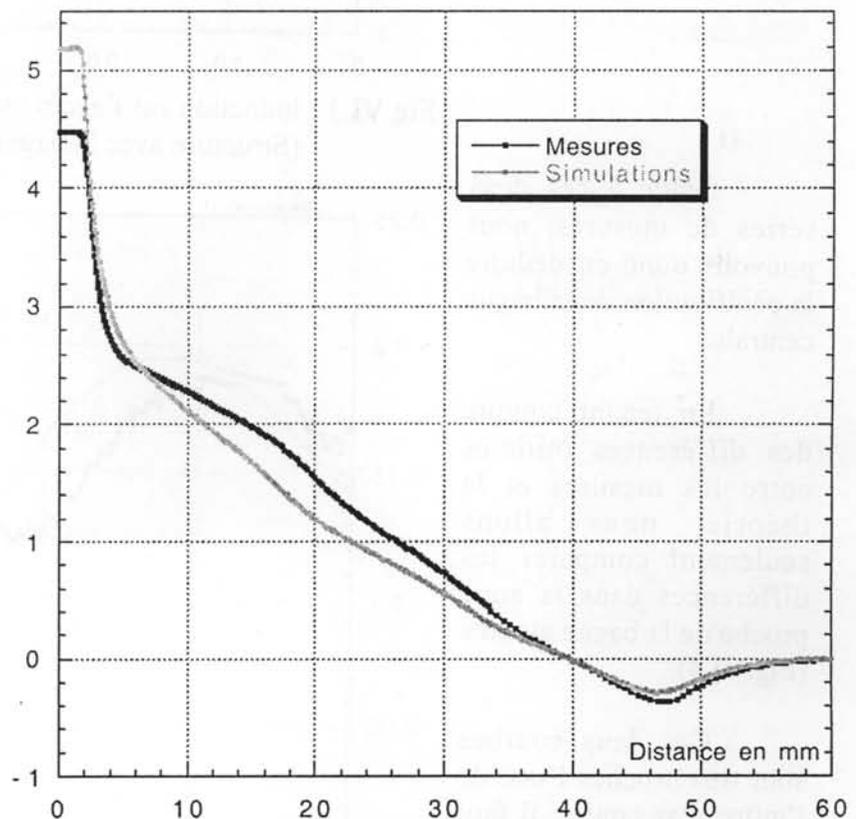


Fig VI.2 : Induction sur l'accès avec les pièces polaires longues. (Structure sans la bague centrale).

Nous avons fait la même mesure avec la structure complète avec la bague centrale.

Comme pour la mesure précédente, nous obtenons une courbe de mesure proche des simulations.

Grâce aux aimants de la bague centrale, l'induction au centre de la structure est portée à 4,58 T.

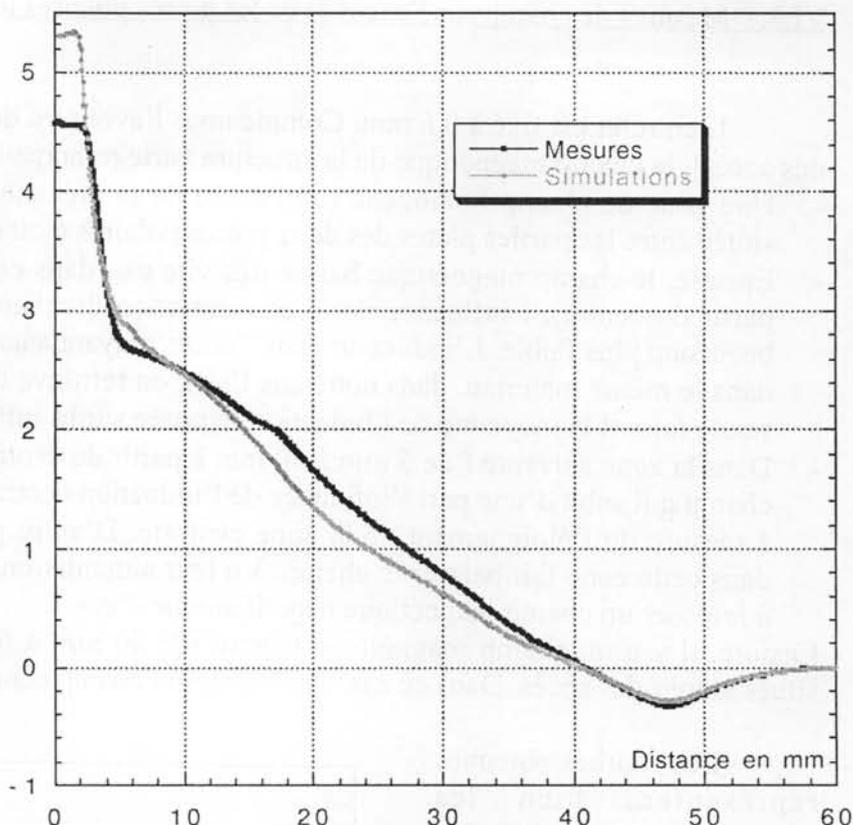


Fig VI.3 : Induction sur l'accès avec les pièces polaires longues. (Structure avec la bague centrale).

Grâce à ces deux séries de mesures, nous pouvons donc en déduire la contribution de la bague centrale.

En tenant compte des différences initiales entre les mesures et la théorie, nous allons seulement comparer les différences dans la zone proche de la bague ajoutée (Fig.VI.4).

Ces deux courbes sont très proches l'une de l'autre. Par contre, il faut prendre en compte que les erreurs de mesures sont plus importantes puisqu'il s'agit d'une différence entre deux séries de mesures.

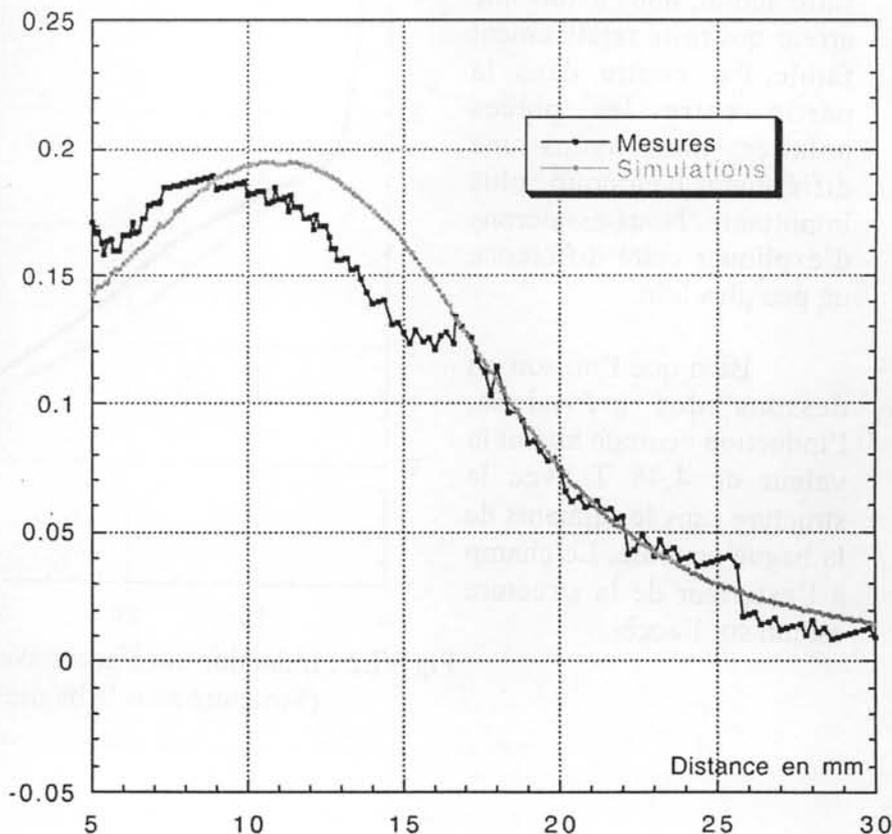


Fig VI.4 : Différence d'induction sur l'accès due à la bague centrale avec les pièces polaires longues.

VI.3.2 Mesures de champ sur l'accès avec les pièces polaires courtes.

Comme nous l'avions prévu dans la partie IV.5.5 (Optimisation des pièces polaires), lors du remplacement des pièces polaires longues entièrement en FeCo par les pièces mixtes (FeCo-Laiton), nous avons constaté une légère augmentation de l'induction centrale.

Cette progression est de l'ordre du pourcent. Cette augmentation permet donc de passer de 4,48 T à 4,52 T. Cette valeur est très proche de celle voulue, mais elle est peu significative à cause de l'erreur relative des instruments de mesures.

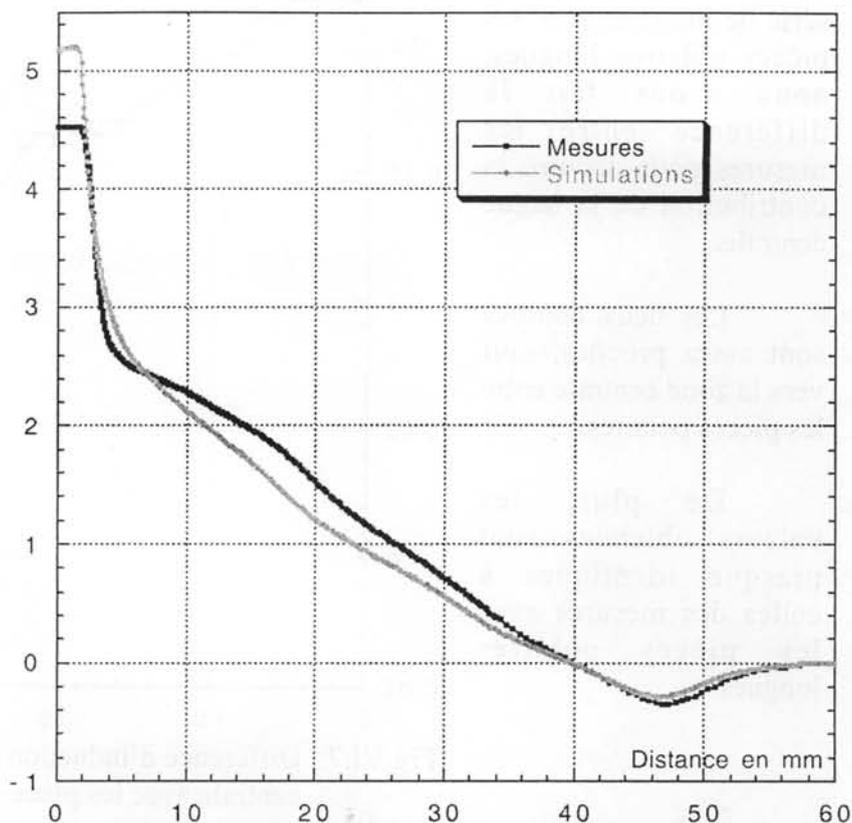


Fig VI.5 : Induction sur l'accès avec les pièces polaires courtes. (Structure sans la bague centrale).

Comme le gain est faible, nous ne pouvons pas faire la comparaison entre les courbes de mesures de la structure avec les deux types de pièces polaires.

Les courbes de l'induction avec les deux types de pièces polaires ont toutes deux la même forme.

Nous avons fait la même série de mesures avec la bague centrale (Fig VI.6). Nous avons atteint une induction de 4,61 T.

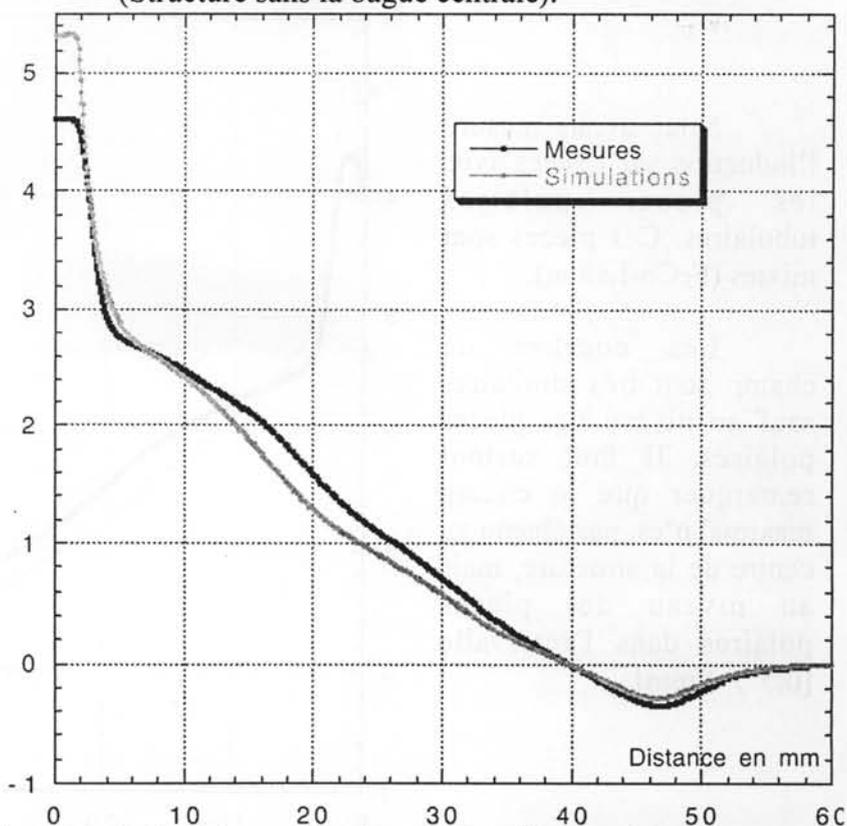


Fig VI.6 : Induction sur l'accès avec les pièces polaires courtes. (Structure sans la bague centrale).

Comme pour la série de mesures avec les pièces polaires longues, nous avons fait la différence entre les mesures pour déduire la contribution de la bague centrale.

Les deux courbes sont assez proches, sauf vers la zone centrale entre les pièces polaires.

De plus, les valeurs obtenues sont presque identiques à celles des mesures avec les pièces polaires longues.

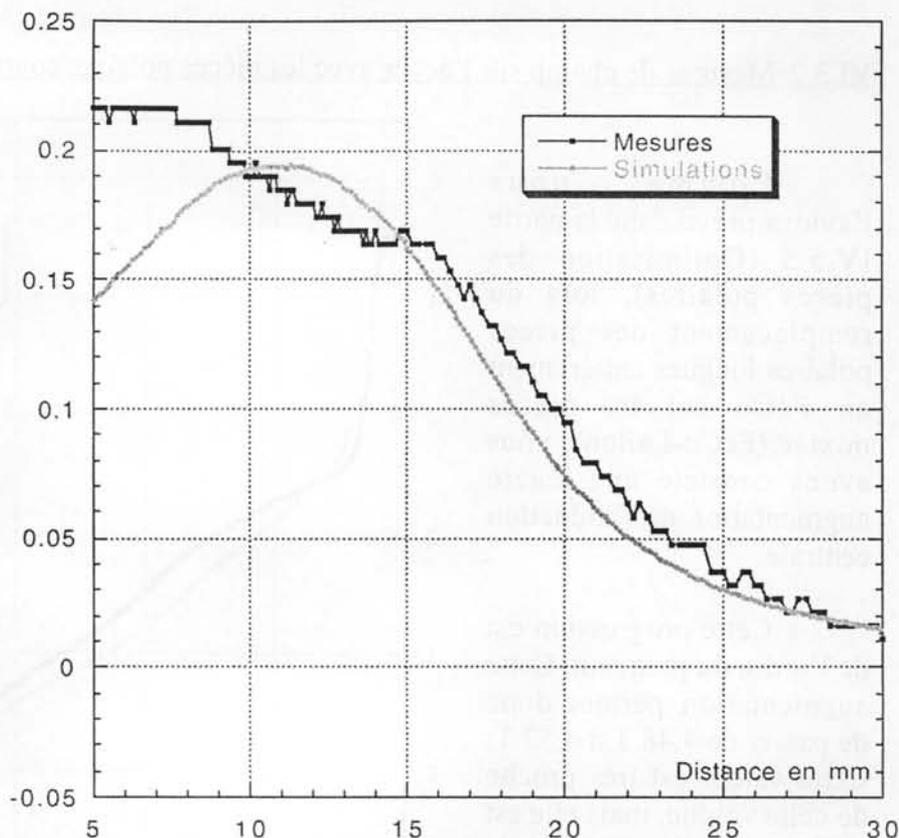


Fig VI.7 : Différence d'induction sur l'accès due à la bague centrale avec les pièces polaires courtes.

VI.3.3 Mesures de champ sur l'accès avec les pièces polaires tubulaires (avec accès vertical).

Nous avons mesuré l'induction sur l'accès avec les pièces polaires tubulaires. Ces pièces sont mixtes (FeCo-Laiton).

Les courbes de champ sont très similaires sauf au niveau des pièces polaires. Il faut surtout remarquer que le champ maximal n'est pas obtenu au centre de la structure, mais au niveau des pièces polaires dans l'intervalle [0,5 , 3 mm].

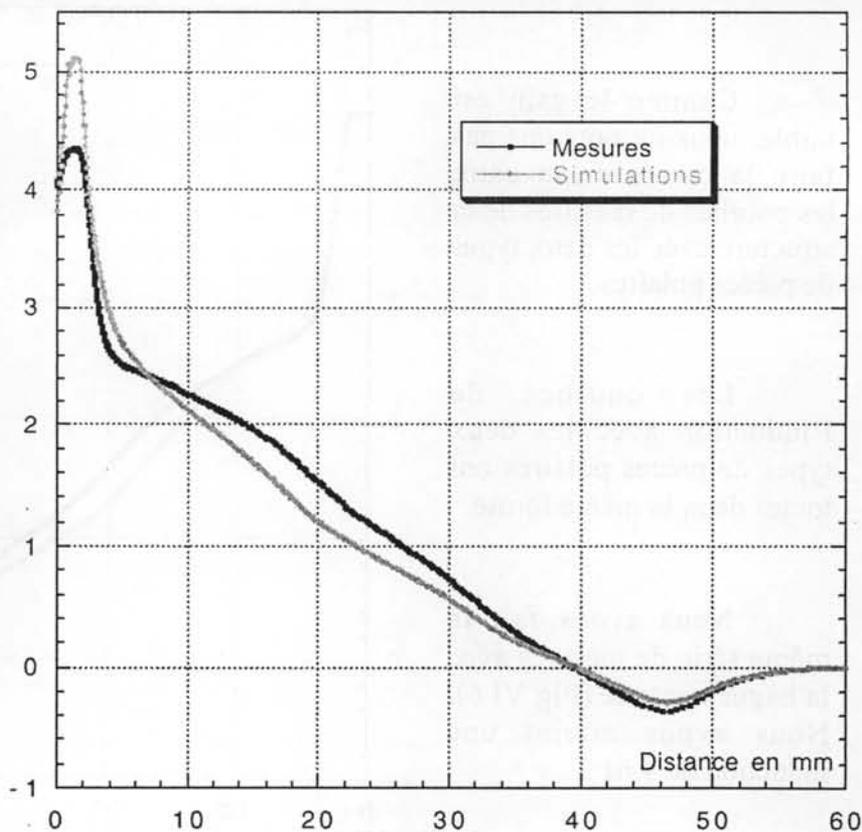


Fig VI.8 : Induction sur l'accès avec les pièces tubulaires. (Structure sans la bague centrale).

Ceci s'explique très simplement :

- Le trou d'accès provoque un manque de matériau magnétique. Il y a alors une contribution faible, donc une baisse de champ est observée dans cette zone.
- Les pièces polaires canalisent le champ et pénalisent donc l'induction centrale.

Pour cette série de mesures, nous obtenons le même type d'erreur que celle constatée avec les mesures précédentes. En effet, il y a une erreur relativement faible dans la zone des aimants. Mais surtout une grosse différence au niveau des pièces polaires.

Cette constatation est aussi valable pour les mesures avec la structure avec la bague centrale (Fig.VI.9).

Dans ce cas, la différence au niveau des pièces polaires est légèrement plus faible par rapport aux mesures faites avec la structure sans la bague centrale.

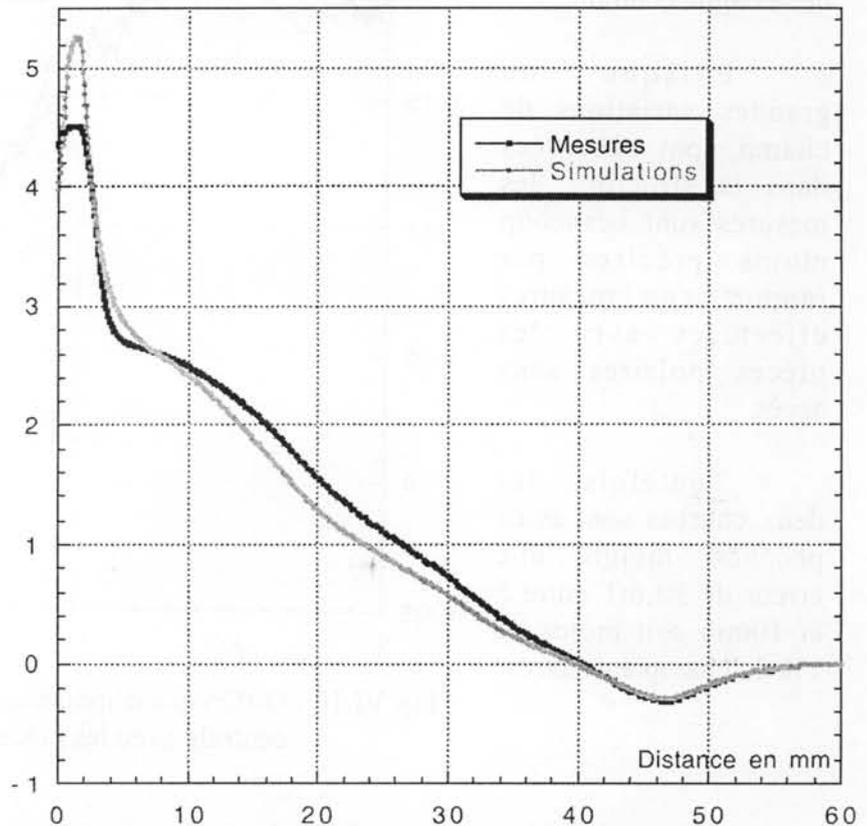


Fig VI.9 : Induction sur l'accès avec les pièces tubulaires.
(Structure avec la bague centrale).

Avec les deux types de pièces polaires (avec ou sans pièce dans l'accès vertical), l'induction centrale n'a pas du tout la même forme :

- Avec les pièces polaires pleines (sans accès vertical), l'induction dans le centre de la structure a une zone de champ constante. Les mesures donnent une différence de seulement 10^{-3} dans une zone d'environ 3mm de diamètre.
- Avec les pièces polaires avec accès, il n'y a aucune comparaison possible au niveau de l'homogénéité dans la zone centrale. En effet, il y a beaucoup trop de variation de champ au centre avec les pièces polaires avec accès.

Le premier objectif d'utilisation de la structure avec l'accès vertical est de polariser un matériau et de lui imposer un faisceau de rayons X. Le faisceau a un diamètre de 50 à 200 μm et doit passer par l'accès vertical. Bien qu'il y ait une grande variation de champ au centre de la structure (surtout au niveau des pièces polaires), dans une zone de la taille du faisceau l'homogénéité est de l'ordre de 40 à 50 mT soit environ 1% du champ. Cette valeur est acceptable pour de nombreuses applications.

Comme pour les deux autres types de pièces, nous avons fait la différence entre les deux séries de mesures pour obtenir le gain en champ de la bague centrale.

Puisque de grandes variations de champ sont observées dans la structure, les mesures sont beaucoup moins précises par rapport aux mesures effectuées avec les pièces polaires sans accès.

Toutefois, les deux courbes sont assez proches, malgré une erreur de 30 mT entre 5 et 10mm soit moins de 1% du champ au centre.

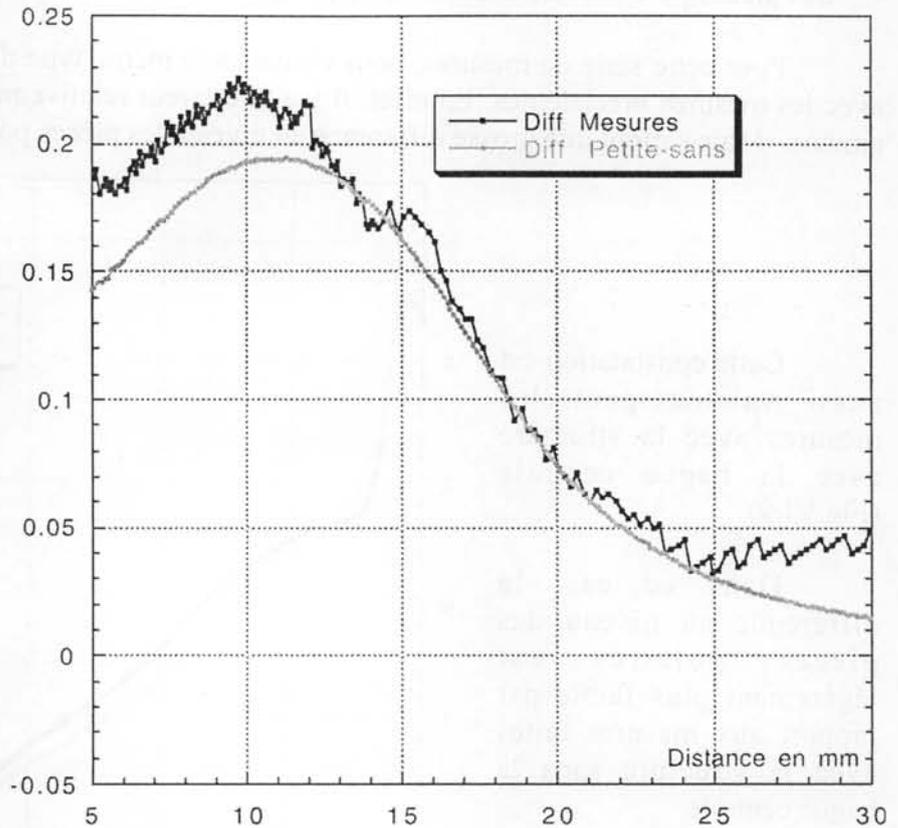


Fig VI.10 : Différence d'induction sur l'accès due à la bague centrale avec les pièces polaires tubulaires.

VI.3.4 Conclusion sur les mesures de champ sur l'accès.

Dans cette partie, nous avons étudié la distribution de champ sur l'accès de la structure avec diverses pièces polaires.

Nous avons mesuré une induction au centre de 4,61 T sur une surface de la taille de la sonde sur une distance de l'ordre de 3mm entre les pièces polaires.

VI.4 Mesures de champ au centre de la structure : variation de l'entrefer.

Dans cette partie, nous allons présenter les résultats des mesures de champ au centre de la structure en faisant varier l'entrefer entre les pièces polaires. Nous avons seulement pu faire les mesures avec les pièces polaires courtes et tubulaires. En effet, les pièces polaires longues imposent un entrefer fixe.

Pour ces mesures, nous avons suivi la méthode suivante :

- Réglage de l'entrefer minimal.
- Positionnement de la sonde au centre de la structure :
 - Soit en se plaçant au plus fort champ pour l'utilisation des pièces polaires courtes. Comme il y a une grande zone d'homogénéité (environ 3 mm), pour le milieu de la zone, on se place au centre de la structure.
 - Soit en se plaçant au champ minimal entre les deux maxima pour l'utilisation de pièces polaires tubulaires.
- Ecartement des deux pièces polaires.

Grâce à cette série de mesures, nous avons pu confirmer les valeurs trouvées lors des mesures précédentes (en se plaçant avec un entrefer minimal). Nous avons donc fait quatre séries de mesures : pièces polaires courtes ou tubulaires, avec ou sans bague centrale.

VI.4.1 Mesures de champ avec les pièces polaires courtes.

Pour cette série de mesures, on retrouve l'erreur que l'on a constatée lors des mesures de champ sur l'accès.

Par contre, on obtient le même type de variation. Dès que l'on rapproche les pièces polaires, le champ augmente. On peut voir ceci sous deux aspects :

- Les moments magnétiques du Fer-Cobalt sont plus près donc ils ont une contribution supérieure
- Comme il y a moins d'entrefer, le Fer-Cobalt canalise plus de champ.

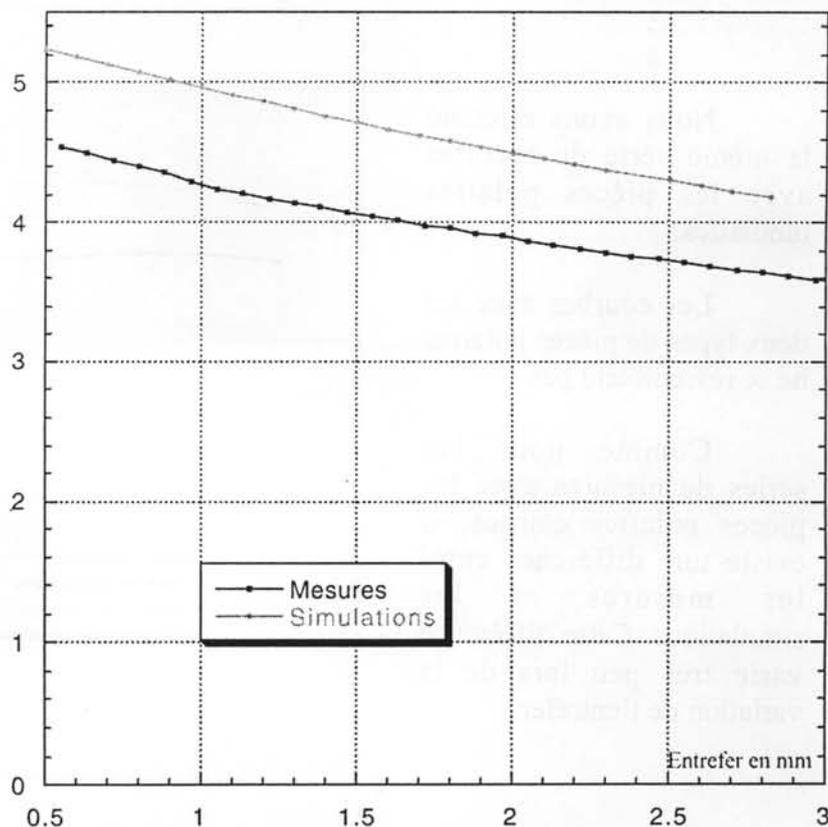


Fig VI.11 : Induction au centre avec les pièces courtes.
(Structure sans la bague centrale).

Nous avons fait la même mesure avec la bague centrale d'aimants (Fig.VI.12).

Les résultats sont très proches des mesures précédentes obtenues avec la structure sans bague centrale.

Les mêmes phénomènes ont lieu : une augmentation du champ est observée lors du rétrécissement de l'entrefer.

La seule différence réside en une augmentation de l'induction entre les deux séries de mesures de près de 0,15 T.

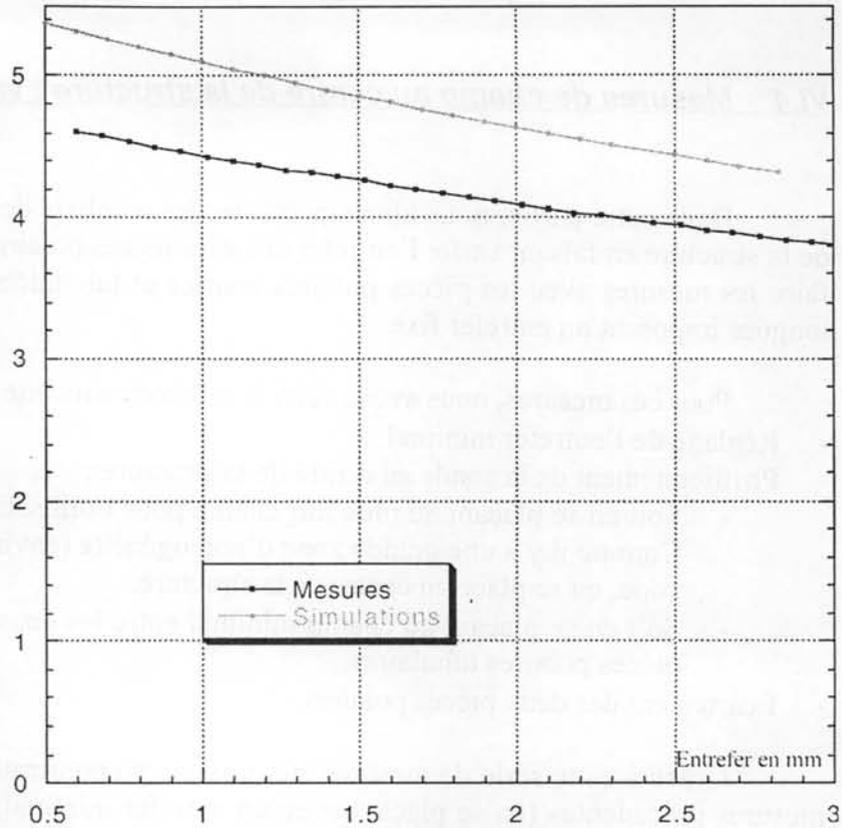


Fig VI.12 : Induction au centre avec les pièces courtes. (Structure avec la bague centrale).

VI.4.2 Mesures de champ avec les pièces polaires tubulaires.

Nous avons effectué la même série de mesures avec les pièces polaires tubulaires.

Les courbes avec les deux types de pièces polaires ne se ressemblent pas.

Comme pour les séries de mesures avec les pièces polaires courtes, il existe une différence entre les mesures et les simulations. Cette différence varie très peu lors de la variation de l'entrefer.

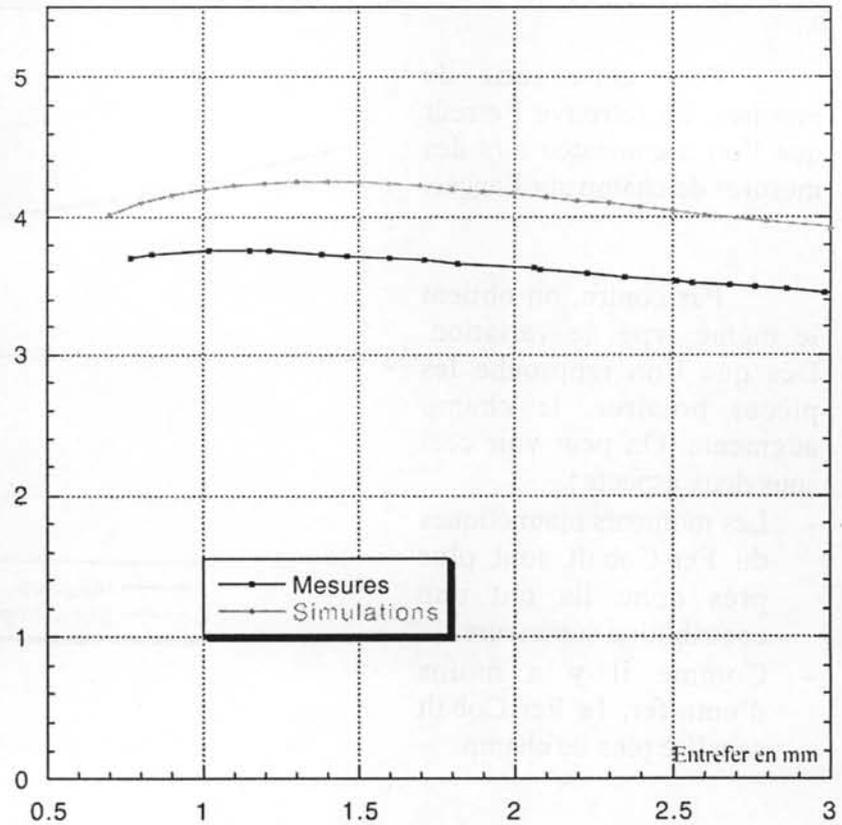


Fig VI.13 : Induction au centre avec les pièces tubulaires. (Structure sans la bague centrale).

Nous avons fait la même mesure avec la bague centrale d'aimants (Fig.VI.14). Les résultats sont très proches des mesures précédentes obtenues avec la structure sans la bague centrale. La seule différence réside en une augmentation de l'induction entre les deux séries de mesures.

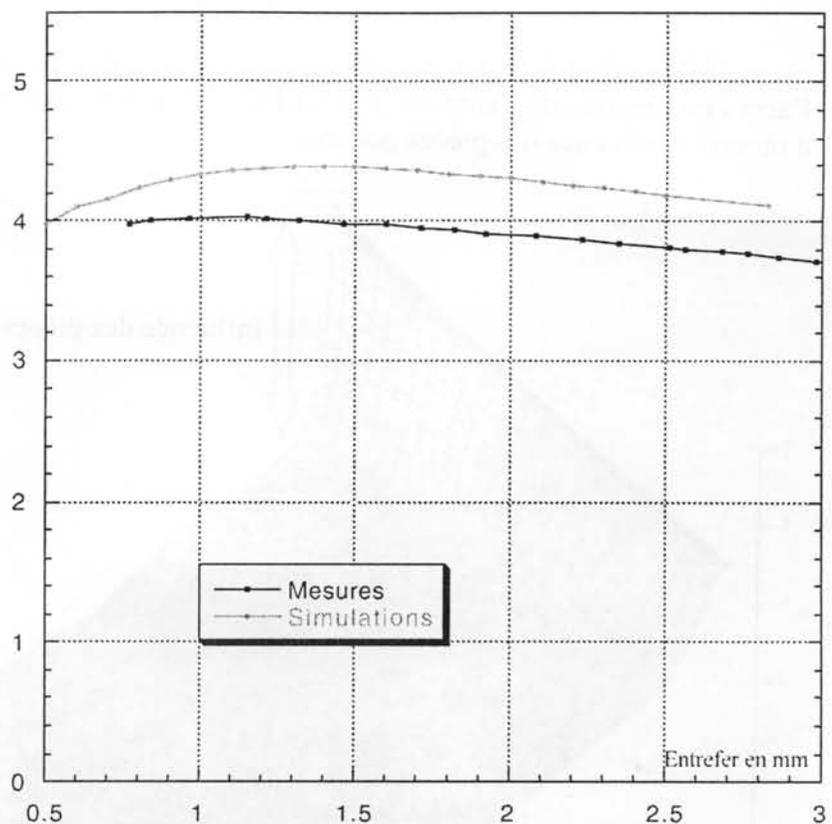


Fig VI.14 : Induction au centre avec les pièces tubulaires. (Structure avec la bague centrale).

Avec les pièces polaires tubulaires, le champ varie en deux temps lors du rapprochement des pièces polaires (Fig VI.15) :

- Dans un premier temps une montée en champ. Les moments magnétiques des pièces polaires ont une contribution favorable à la création du champ central. Les pièces polaires canalisent le champ au centre de la structure.
- Ensuite, le champ au centre de la structure baisse. Les moments magnétiques des pièces polaires ont une contribution défavorable à la création du champ central car ils sont situés sur le côté de la zone centrale. Avec les pièces polaires courtes, les moments magnétiques ont une contribution favorable en majorité. Les pièces polaires canalisent le champ dans les pièces polaires et pénalisent le champ au centre de la structure.

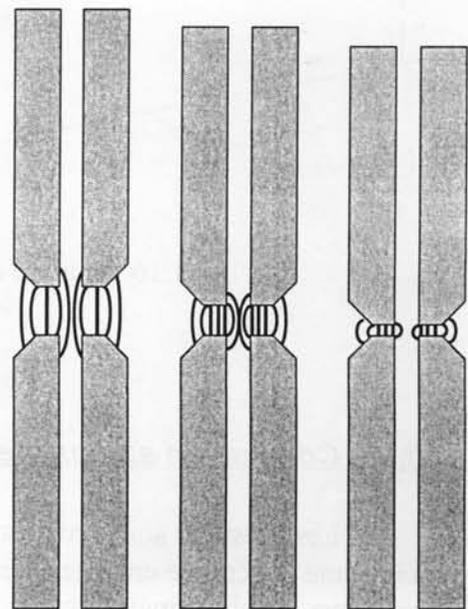


Fig VI.15 : Rapprochement de pièces polaires.

D'un point de vue pratique, les courbes de champ sur l'accès sont faciles à obtenir car elles résultent de la résolution d'un seul fichier de calcul. En effet, la géométrie ne varie pas donc il n'y a qu'un seul maillage et une seule résolution. Par contre, chaque point de calculs des courbes de variation de l'entrefer est le résultat d'un fichier. Comme on fait varier pour chaque valeur de l'entrefer, la géométrie a été modifiée. On est donc obligé de tout remailler puis de résoudre à nouveau.

Mais grâce à toutes ces résolutions, nous avons pu obtenir la courbe de champ sur l'accès en fonction de l'entrefer (Fig VI.16). Grâce à cette courbe, on peut remarquer au fur et à mesure l'influence des pièces polaires.

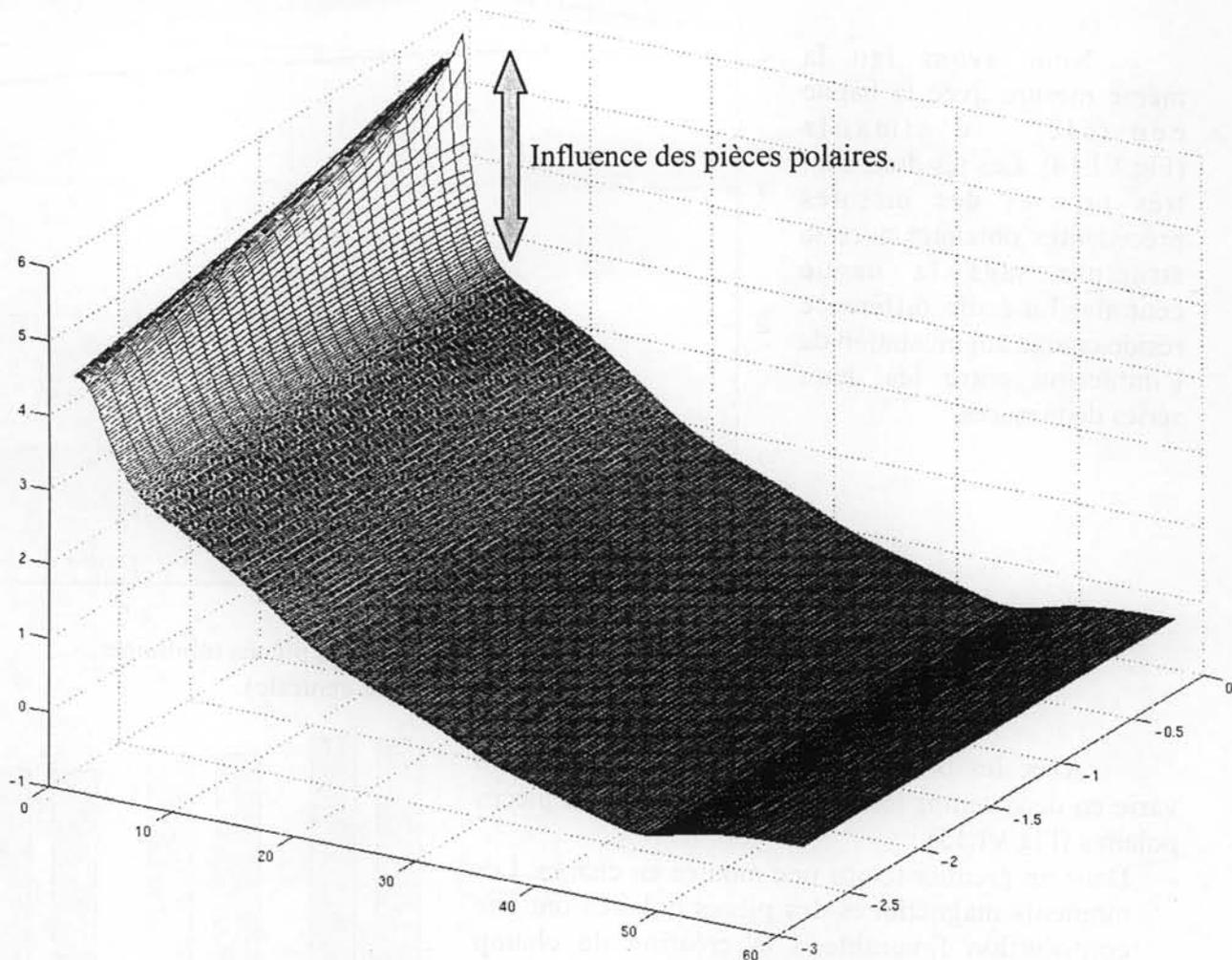


Fig VI.16 : Courbe de champ sur l'accès en fonction de l'entrefer.

VI.5 Conclusion sur les mesures.

Les mesures sont proches des simulations, Mais, comme on l'a vu précédemment, il existe une différence entre les mesures et les simulations qui se situe non seulement au niveau des pièces polaires, mais aussi au niveau des aimants.

Chapitre VII

EXPLICATIONS DES DIFFÉRENCES

MESURES-SIMULATIONS

VII Explications des différences mesures-simulations.

VII.1 Introduction.

Dans ce chapitre, nous allons simuler les problèmes réels et les imperfections dues aux limitations techniques de la réalisation. Nous allons séparer les problèmes en trois parties :

- Les erreurs au niveau de la mesure :
 - Erreur de positionnement de la sonde sur la largeur.
 - Erreur de positionnement de la sonde sur la hauteur.
- Les paramètres dictés par la faisabilité :
 - Entrefer entre les aimants et les pièces polaires.
 - Entrefer entre les tranches.
- Les imperfections au niveau des matériaux
 - Différence de saturation du matériau doux.
 - Variation angulaire au niveau des aimants centraux.
- Les influences dues aux variations de température
 - Propriétés du matériau (Br, Hc).
 - Réponse de la sonde.

Nous allons présenter les résultats et les constatations des séries de simulations.

VII.2 Erreurs de mesure.

VII.2.1 Mauvais positionnement latéral de la sonde dans l'accès.

Le but étant de mesurer la distribution de champ avec la plus grande précision, nous devons utiliser la sonde ayant la hauteur la plus faible pour pouvoir rapprocher les pièces polaires. Dans notre cas, nous utilisons une sonde Bell FH-301 sans protection.

Cette sonde se présente sous la forme du plateau de mesure, très finement protégé. Cette sonde est fixée à un tube de maintien en plexiglas grâce aux fils de mesures de la sonde. Ce système permet d'avoir une certaine flexibilité facilitant le positionnement de la sonde entre les pièces polaires.

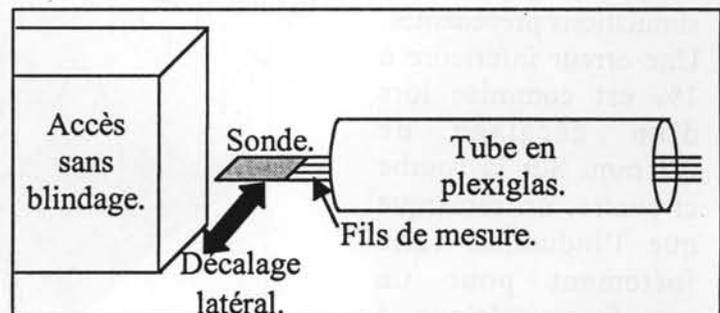


Fig VII.1 : Schéma de principe de l'erreur.

Par contre, il n'est pas possible d'obtenir un positionnement très précis dans l'accès. C'est pourquoi nous avons simulé un décalage de la sonde par rapport à sa position théorique. Dans un premier temps, nous avons simulé une erreur de position dans le plan.

Comme on peut le constater, l'induction est presque constante à l'intérieur de l'accès, par rapport au décalage. Une erreur de l'ordre du pourcent est relevée.

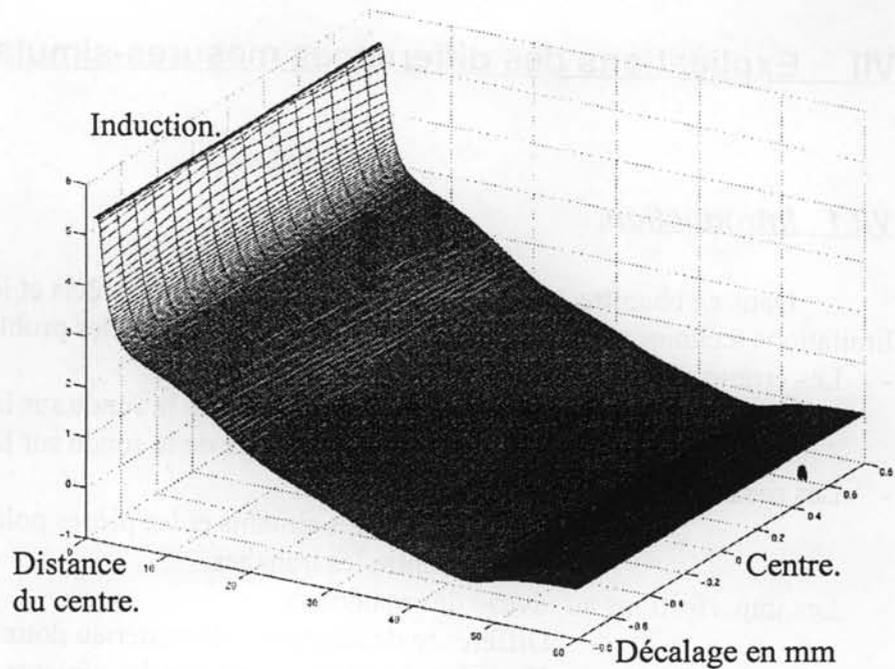


Fig VII.2 : Courbe d'induction dans le plan équatorial à l'intérieur de l'accès.

VII.2.2 Mauvais positionnement vertical de la sonde dans l'accès.

Comme pour l'estimation de l'erreur précédente, nous avons aussi simulé l'influence d'un décalage vertical de la sonde.

Au niveau des mesures, ce décalage reste très faible. Par contre, il peut représenter le décalage dû aux fils de mesures de la sonde.

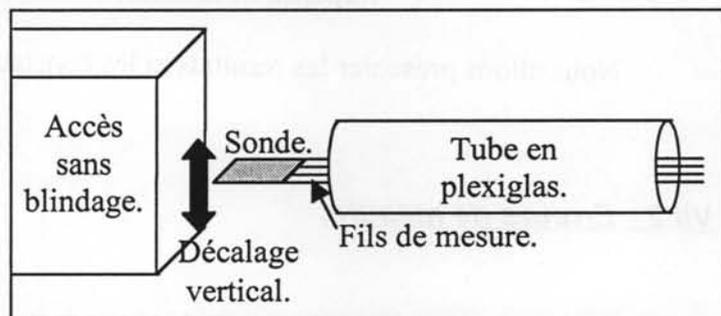


Fig VII.3 : Schéma de principe de l'erreur.

Les résultats sont identiques à ceux obtenus pour les simulations précédentes. Une erreur inférieure à 1% est commise lors d'un décalage de 0,3 mm. Sur la courbe ci-contre, on remarque que l'induction varie fortement pour un entrefer supérieur à 0,3 mm car les points de calculs ne sont plus alors dans l'air mais dans le matériau doux.

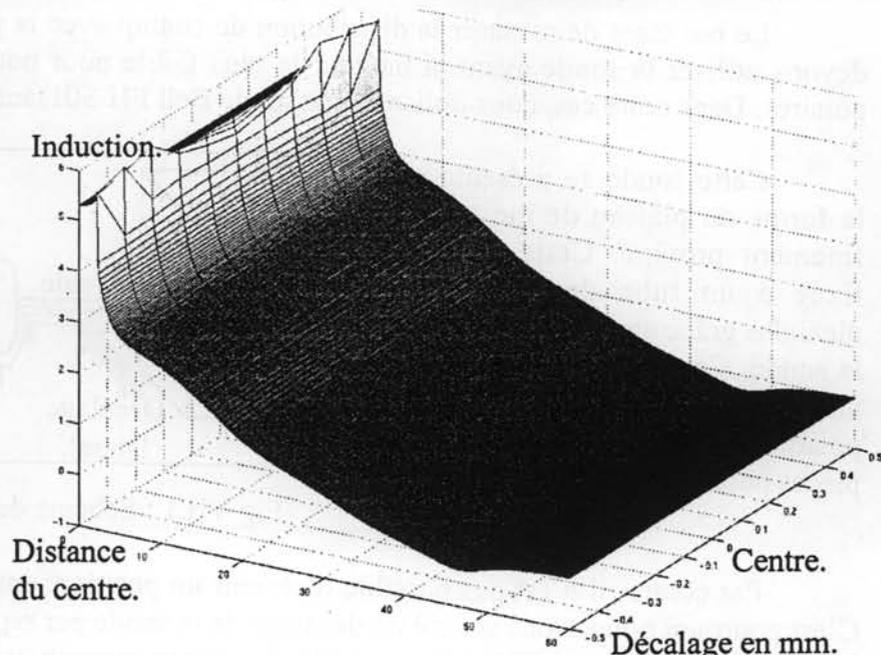


Fig VII.4 : Courbe d'induction dans le plan vertical à l'intérieur de l'accès.

VII.3 Erreurs dues à la faisabilité.

VII.3.1 Entrefer latéral entre les aimants et les pièces polaires.

Pour notre structure, nous avons prévu d'une part de faire varier l'entrefer, et de pouvoir interchanger les types de pièces polaires. Il faut donc que les pièces polaires soient mobiles à l'intérieur de la structure. Il existe donc un entrefer entre les aimants et les pièces polaires. Jusqu'à présent, les pièces polaires étaient simulées en contact avec les aimants. Nous allons voir l'influence d'un tube d'air entre les pièces polaires et les aimants.

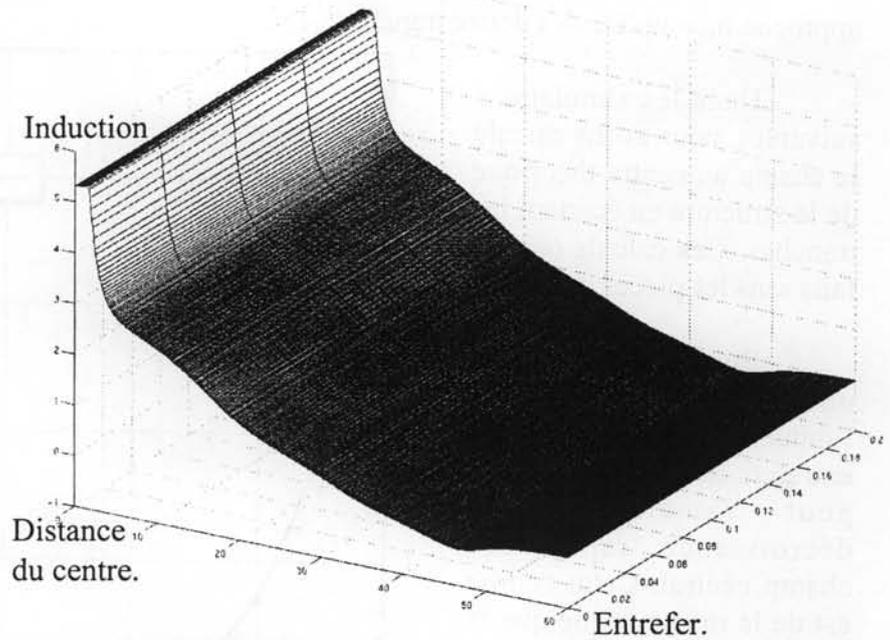


Fig VII.5 : Induction sur l'accès en fonction de l'entrefer.

Sur la figure VII.5, nous avons représenté l'induction sur l'accès en fonction de l'entrefer entre les aimants et les pièces polaires. La valeur de l'entrefer est celle entre un aimant et la pièce polaire.

Sur la figure VII.6, nous avons fait apparaître les résultats des mesures.

La perte de champ théorique au centre est relativement faible environ 1%, mais il faut surtout remarquer un rayon de courbure plus grand lorsque l'on s'éloigne de la zone des pièces polaires dans l'intervalle [1,5, 2mm].

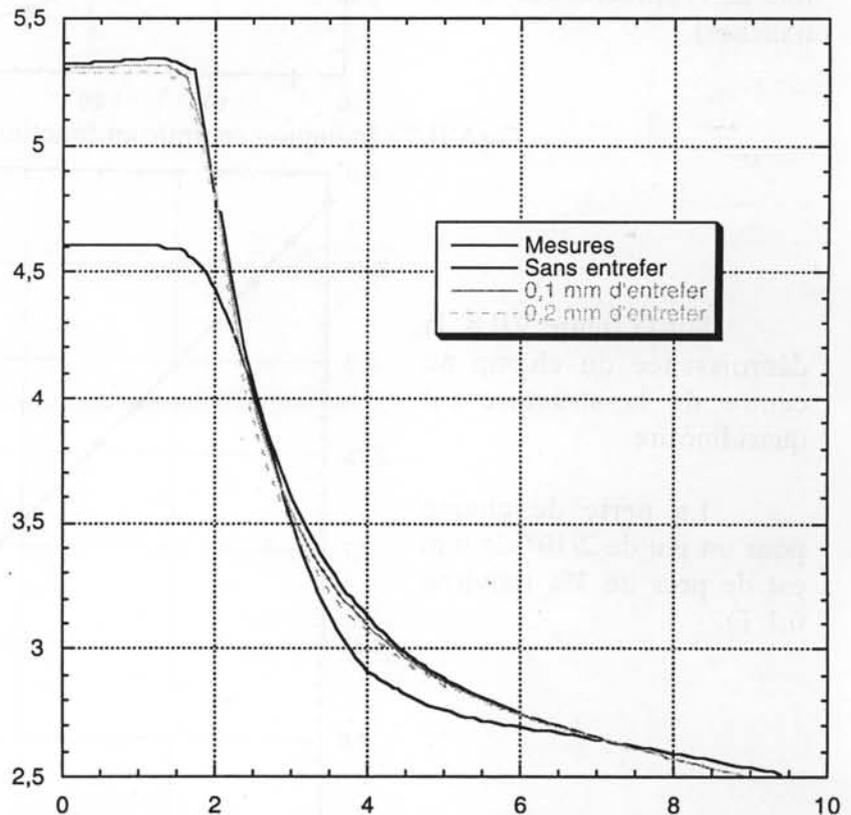


Fig VII.6 : Induction sur l'accès : comparaison en fonction de l'entrefer.

La différence n'est pas essentiellement due à l'existence d'un entrefer entre les pièces polaires et les aimants

VII.3.2 Entrefer entre les tranches.

Comme les pièces polaires sont aux côtes exactes, il existe toutefois un jeu dû à une approche incomplète des douze tranches.

Dans les simulations suivantes, nous avons calculé le champ au centre théorique de la structure en écartant les tranches. Ces calculs ont été faits sans les pièces polaires.

Sur la figure VII.7, nous avons représenté l'induction centrale pour des entrefers très importants. On peut remarquer une décroissance rapide du champ central. Cette courbe est de la même forme que la courbe IV.54 (Courbe des forces sur chaque tranche lors de l'approche des douze tranches).

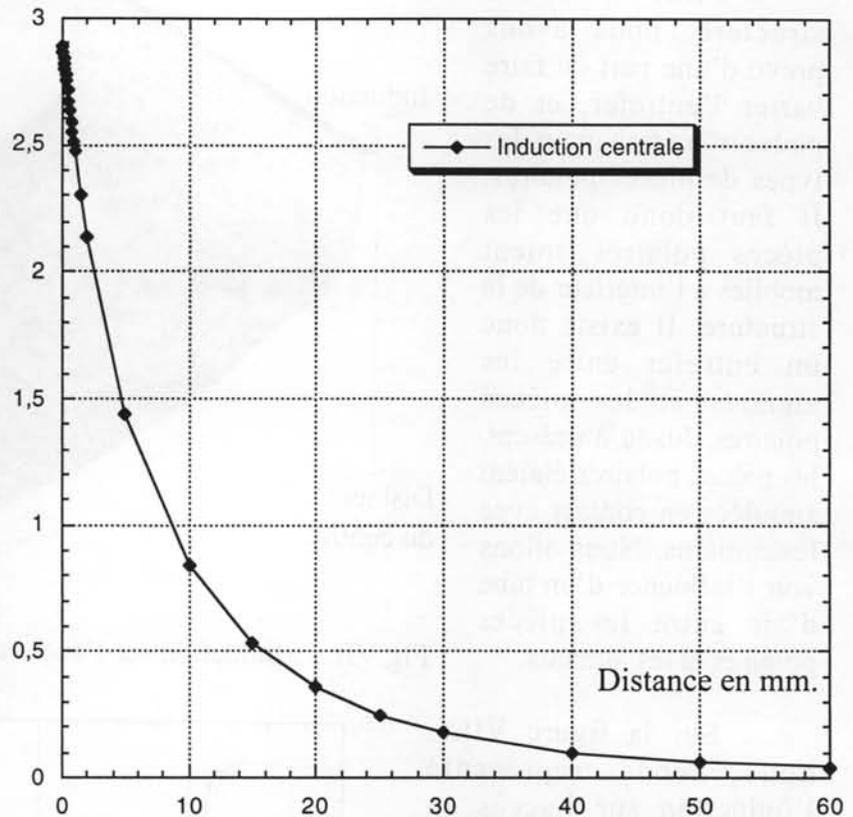


Fig VII.7 : Induction centrale en fonction de la distance tranche-centre.

Sur la figure VII.8, la décroissance du champ au centre de la structure est quasi linéaire.

La perte de champ pour un jeu de $2/10^\circ$ de mm est de près de 3% (environ 0,1 T).

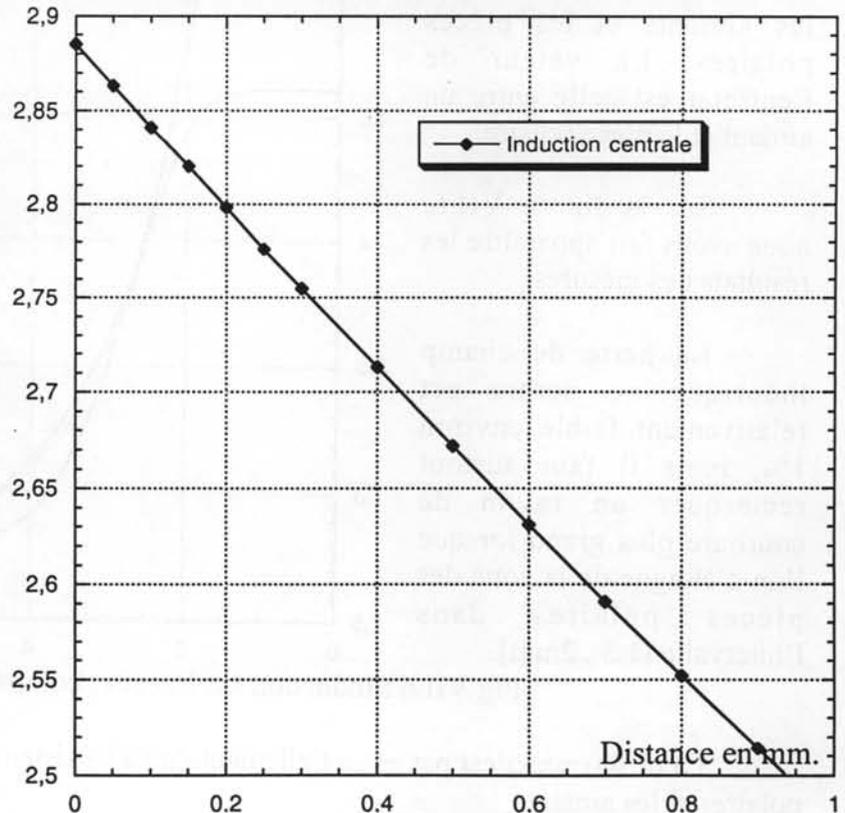


Fig VII.8 : Induction centrale en fonction de la distance tranche-centre.

VII.4 Erreurs dues aux imperfections des matériaux.

VII.4.1 Influence de la saturation du matériau doux.

Lors de la comparaison entre les courbes de mesures et celles qui sont obtenues par simulations, on s'est aperçu d'une grande différence entre les deux courbes surtout au niveau des pièces polaires.

Dans cette série de simulations, on a fait varier la valeur de l'aimantation à saturation J_s du matériau doux. Dans notre cas, il est très saturé et ne travaille pas autour du cycle d'hystérésis. Grâce à ce paramètre, on essaie de prendre en compte la différence entre les mesures et les simulations au niveau du matériau doux. Nous avons donc simulé deux cas : un avec les pièces polaires courtes et l'autre avec les pièces polaires tubulaires.

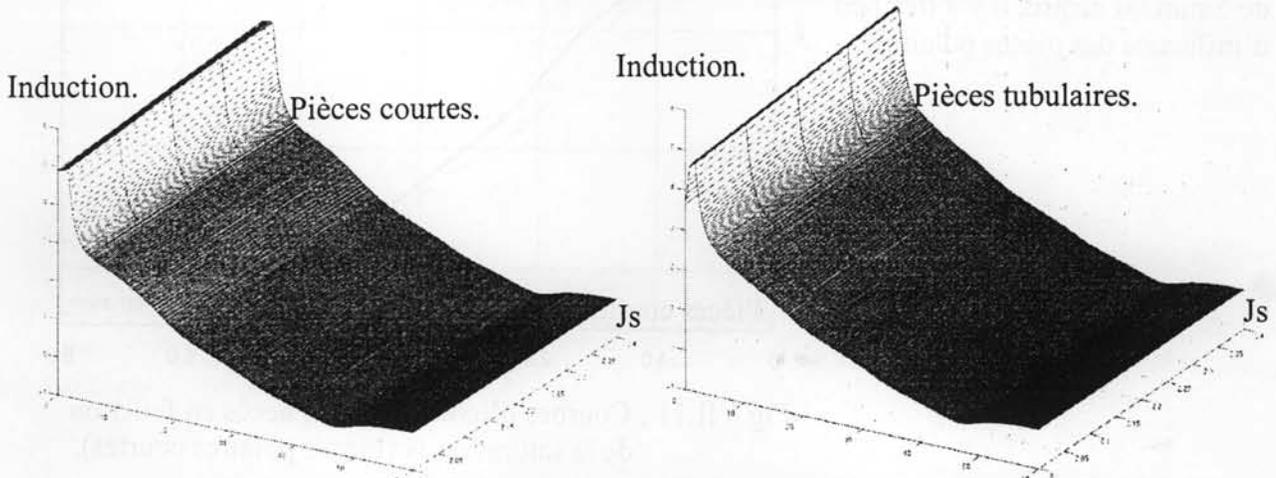


Fig VII.9 : Courbes d'induction sur l'accès en fonction de la saturation J_s .

Sur les courbes VII.9, on remarque une forte baisse de l'induction centrale lorsque la valeur de la saturation est plus faible. Pour mieux estimer ce phénomène, on a représenté les courbes de simulations et de mesures.

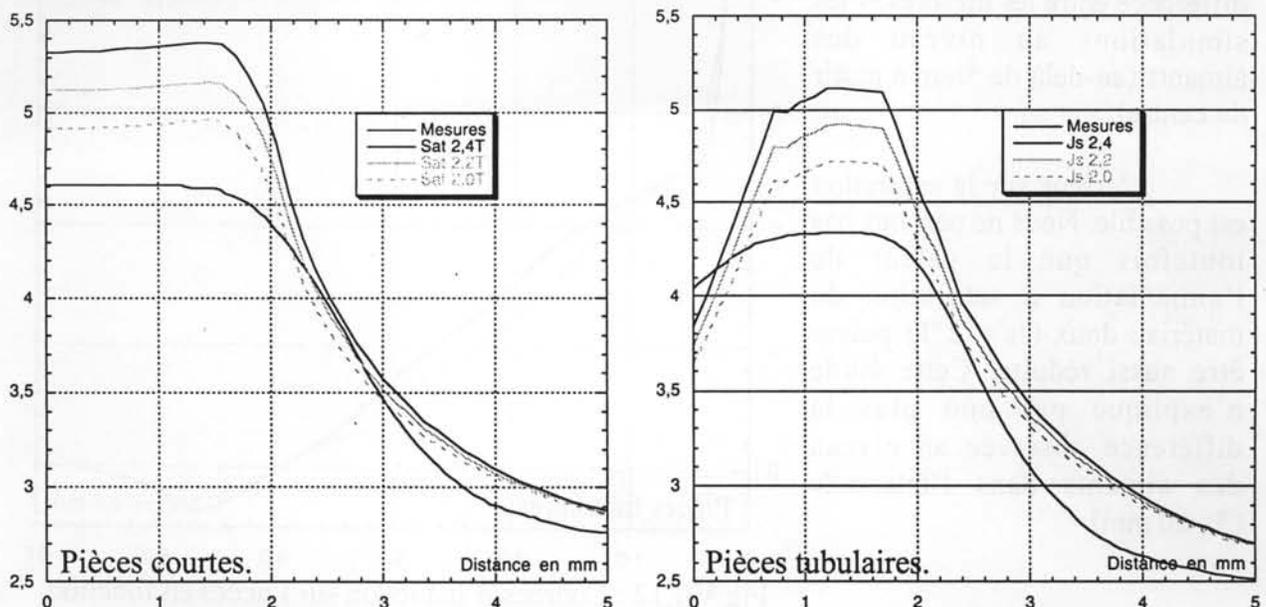


Fig VII.10 : Courbes d'induction sur l'accès en fonction de la saturation J_s .

Grâce à la figure VII.10, nous avons pu voir la perte de champ au centre de la structure, entre les pièces polaires. Cette baisse de champ tend à retrouver les valeurs obtenues lors des mesures.

Sur les figures VII.11 et VII.12, nous avons représenté les mêmes courbes, mais tout le long de l'accès. Même si les courbes dans la zone centrale se rapprochent des mesures, à plus de 5 mm du centre, il y a très peu d'influence des pièces polaires.

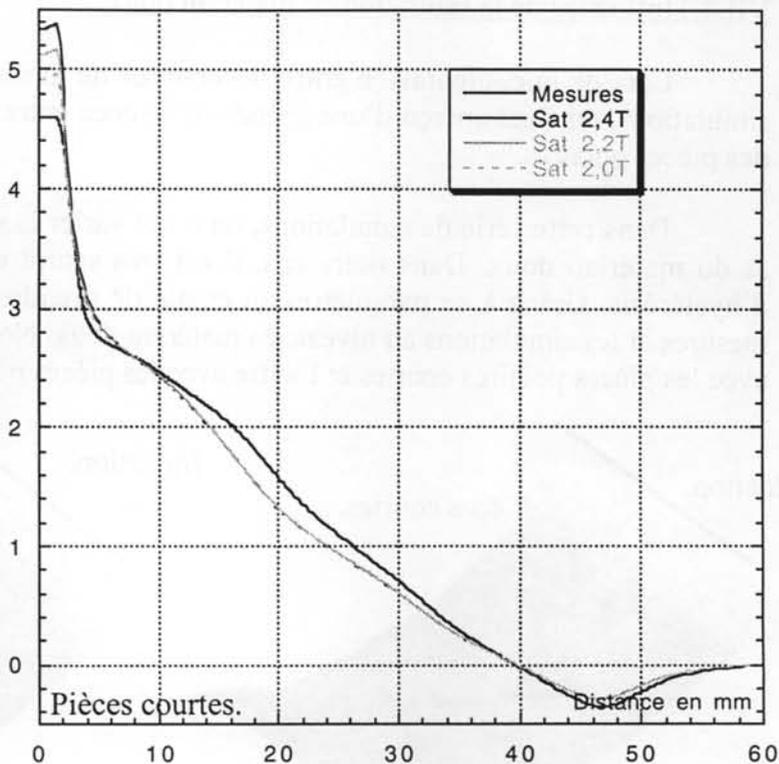


Fig VII.11 : Courbes d'induction sur l'accès en fonction de la saturation J_s (Pièces polaires courtes).

L'influence de la saturation du matériau doux donne une variation de champ uniquement dans la zone centrale. Or il y a aussi une différence entre les mesures et les simulations au niveau des aimants (au-delà de 5mm à partir du centre).

L'erreur sur la saturation est possible. Nous ne pensons pas toutefois que la valeur de l'aimantation à saturation du matériau doux ($J_s = 2 \text{ T}$) puisse être aussi réduite. Cette étude n'explique pas non plus la différence observée au niveau des aimants dans l'intervalle [5, 60 mm].

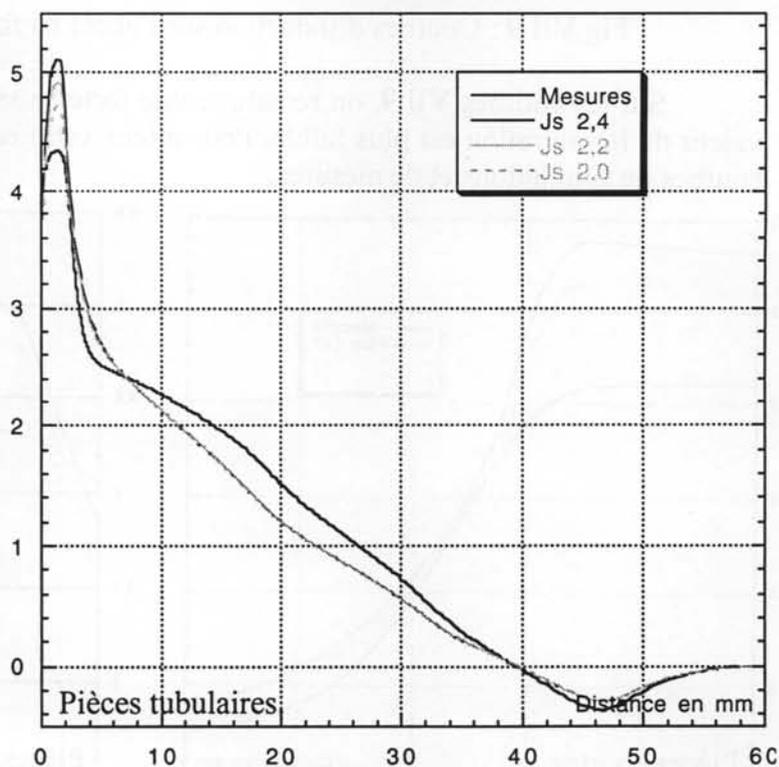


Fig VII.12 : Courbes d'induction sur l'accès en fonction de la saturation J_s (Pièces polaires tubulaires).

VII.4.2 Variation angulaire des aimants centraux.

Jusqu'à présent, le seul critère imposé pour le choix des aimants a été le champ démagnétisant. Les aimants choisis (Ch IV.5.4) ont un champ coercitif suffisamment grand par rapport à la composante du champ magnétique le long de leur axe de facile aimantation. Ce modèle suppose que la rotation cohérente de l'aimantation est négligeable, du à l'existence d'un fort champ d'anisotropie. Ce critère est défini dans la partie IV.4.1. En nous basant sur le principe du retournement non cohérent uniforme de l'aimantation, nous avons uniquement pris en compte la partie du champ magnétique suivant l'axe d'aimantation dans l'aimant.

Sur la figure VII.13, nous avons représenté le champ magnétique et sa composante suivant l'axe d'aimantation de chaque pavé. De plus, nous avons fait figurer les flèches représentant l'aimantation, et le champ magnétique.

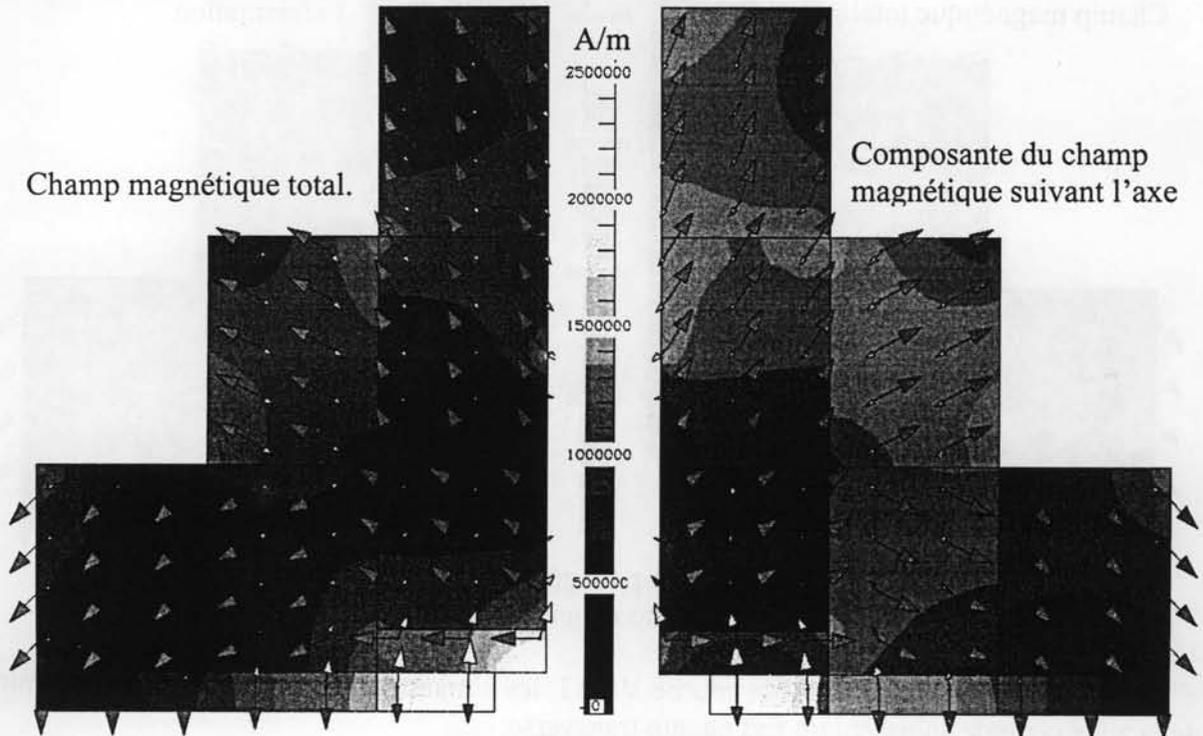


Fig VII.13 : Dégradé : Champ magnétique et champ démagnétisant.
Flèches : Champ magnétique et aimantation.

Les valeurs maximales du module du champ et de sa composante sur l'axe d'anisotropie sont identiques car le champ créé est opposé à l'aimantation des aimants latéralement proches du centre de la structure.

Par contre, les aimants situés proche de l'axe sont les aimants les moins sollicités au niveau de la désaimantation. Le champ dans ces aimants est presque perpendiculaire à l'aimantation, d'où une faible composante du champ sur l'axe d'anisotropie.

Pour ces aimants, nous avons donc affecté une nuance ayant une rémanence élevée ($B_r=1,35$ T), mais un champ coercitif faible ($9 \cdot 10^5$ A/m). Comme ces aimants sont situés vers la zone centrale, ils ont une forte contribution au niveau de la création du champ central.

Le fonctionnement classique d'un aimant est d'avoir un champ démagnétisant sur l'axe de son aimantation, et non perpendiculaire. Pour voir quels aimants sont les plus touchés, nous avons représenté le champ magnétique et sa composante suivant l'axe perpendiculaire à l'aimantation de chaque pavé.

Sur la figure VII.14, nous avons fait figurer les dégradés du champ magnétique et transverse à l'aimantation, et les flèches représentant l'aimantation, et le champ magnétique.

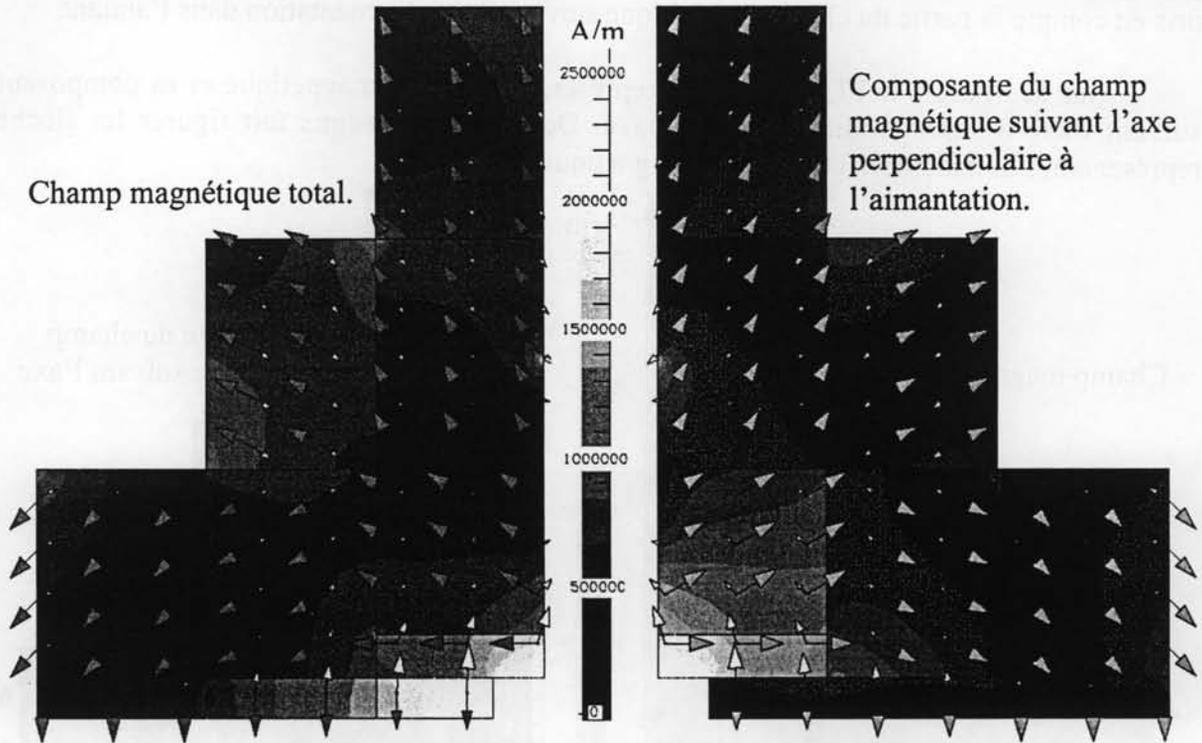


Fig VII.14 : Dégradé : Champ magnétique et champ perpendiculaire.
Flèches : Champ magnétique et aimantation.

Comme on l'avait vu sur la courbe VII.13, les aimants situés dans la partie supérieure de la zone centrale subissent un fort champ transverse.

Pour ces aimants, nous allons voir l'influence d'une rotation de l'aimantation. D'abord dans le cadre du modèle de Stoner-Wohlfarth [13], puis de manière plus phénoménologique en faisant varier l'angle d'aimantation dans les pavés les plus touchés.

Stoner et Wohlfarth ont développé en 1948 un modèle de rotation de l'aimantation due aux actions conjointes d'un champ extérieur H et un champ d'anisotropie H_k défini par:

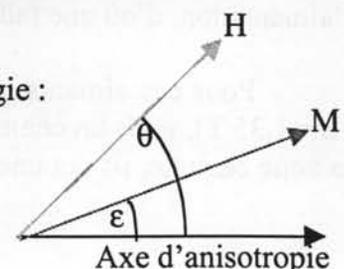
(eq VII.1)
$$H_k = \frac{2 \cdot K}{J_s}$$
 K : Constante d'anisotropie magnétocristaline.
 J_s : Aimantation à saturation.

Le système représenté ci-contre tend à minimiser son énergie :

(eq VII.2)
$$E = - J_s \cdot H \cdot \cos(\theta - \epsilon) + K \cdot \sin^2(\epsilon)$$

Pour un angle θ fixé, on calcule ϵ grâce à l'équation ci-dessous:

(eq VII.3)
$$\frac{-H}{H_k} \cdot \sin(\theta - \epsilon) + \sin \epsilon \cdot \cos \epsilon = 0$$



Prenons à titre d'exemple les pavés juste au dessus de la zone centrale . La figure VII.14 indique que $\theta=\pi/2$ et l'amplitude du champ magnétique $\mu_0.H=3,5$ T. Calculons l'angle de rotation pour une valeur de champ d'anisotropie de l'ordre de 5 T.

$$(eq VII.3) \quad \sin \epsilon = \frac{H}{H_k} \quad \text{d'où } \epsilon = 45^\circ$$

On remarque donc que la rotation peut être très élevée et semble à l'origine des valeurs mesurées.

Nous allons simuler une rotation des aimants par rapport à leur angle théorique.

Dans un premier temps, nous allons faire varier les angles d'aimantation des aimants les plus touchés : Cent2 et Cent4, NFB02 et NFB08, NFB01 et NFB07.

Le but de ces simulations est de retrouver la courbe des mesures, en ne faisant varier que les angles d'aimantation. Nous faisons varier l'angle d'aimantation d'un seul pavé. Nous comparons la courbe obtenue avec la courbe de mesure. C'est une approche assez radicale car en fonction de la valeur du champ transverse, la rotation n'est pas uniforme dans le pavé.

VII.4.2.1 Influence de l'angle d'aimantation des aimants Cent2.

Dans cette partie, nous allons traiter les aimants situés juste dessus de la zone de champ centrale. La position de ces aimants est décrite sur la figure VII.15.

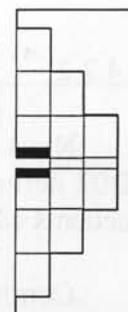


Fig VII.15

Pour tenir compte de la rotation d'aimantation due au champ transverse créé par la structure, nous avons fait varier uniformément l'aimantation des pavés aimantés. Nous avons fait varier cet angle par pas de 5° entre 0° et 90° .

Lors de cette étude, nous avons comparé les simulations et les mesures avec et sans les pièces polaires.

Dans notre cas, la courbe de simulation qui s'approche le plus de celles des mesures est pour une rotation de l'aimantation de 45° . Cette valeur est en accord avec la valeur prédite par le modèle de Stoner-Wohlfarth. Bien que les aimants Néodyme-Fer-Bore soient des aimants très rigides, cette rotation est très importante. Il faut tout de même remarquer que le champ transverse imposé n'est plus négligeable par rapport au champ d'anisotropie. Il est supérieur à deux fois le champ coercitif.

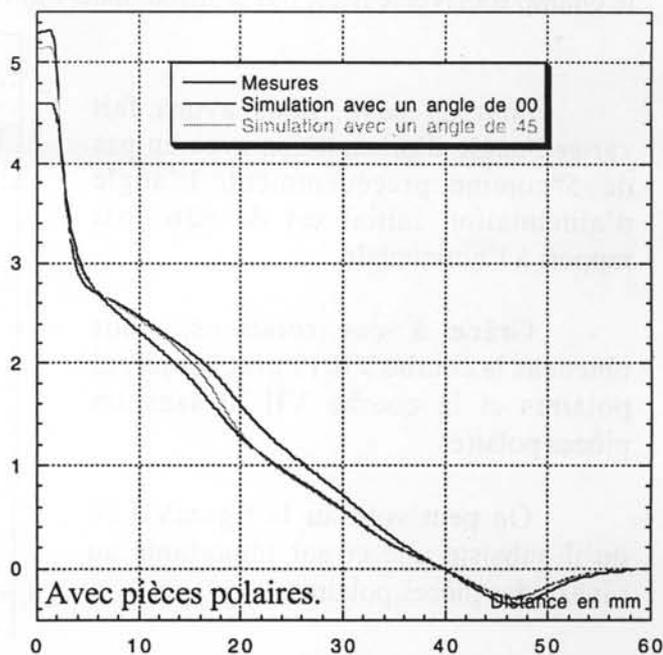


Fig VII.16 : Comparaison des courbes de mesures avec les simulations avec et sans rotation.

Sur les courbes VII.16 et VII.17, on peut voir directement la zone où agissent les aimants dont on a fait varier l'aimantation.

Malgré la rotation des aimants centraux, l'erreur au niveau des aimants n'est pas entièrement corrigée. La différence entre les mesures et les simulations est relativement corrigée uniquement dans la zone où les aimants traités ont une influence.

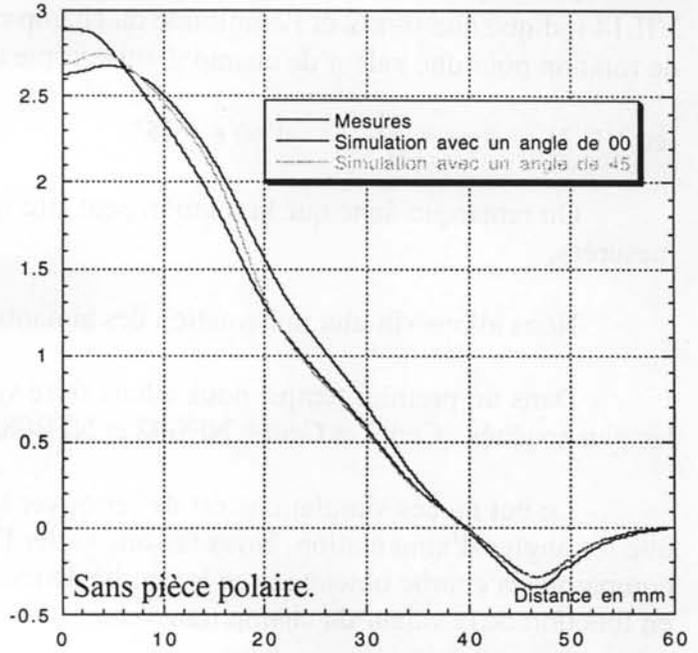


Fig VII.17 : Comparaison des courbes de mesures avec les simulations avec et sans rotation.

VII.4.2.2 Influence de l'angle d'aimantation des aimants NFB02.

Nous allons maintenant essayer d'estimer la rotation des aimants NFB02 définis sur la figure VII.18. Ces aimants sont moins touchés que les précédents car le champ transverse est beaucoup plus faible (Fig VII.14).

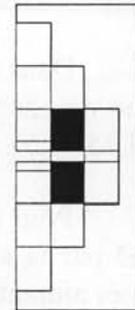


Fig VII.18

Comme on l'a vu précédemment, nous avons fait varier globalement l'angle d'aimantation du pavé. Cette approche est une grosse approximation car le champ transverse n'est pas constant dans l'aimant.

Pour ce pavé, nous avons fait varier l'angle d'aimantation avec un pas de 5° comme précédemment. L'angle d'aimantation initial est de -26° par rapport à l'horizontale.

Grâce à ces rotations, nous obtenons la courbe VII.19 avec les pièces polaires et la courbe VII.20 sans les pièces polaires.

On peut voir sur la figure VII.19 qu'il subsiste une erreur importante au niveau des pièces polaires.

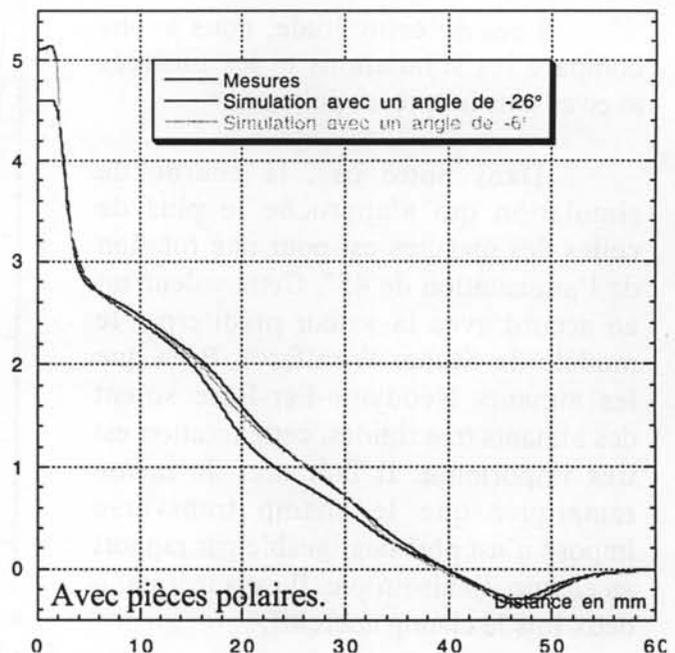


Fig VII.19 : Comparaison des courbes de mesures avec les simulations avec et sans rotation.

Toutefois, les corrections obtenues grâce à la rotation rapprochent les courbes de simulation et de mesures.

Grâce à ces simulations, on arrive à corriger l'erreur au niveau des aimants. Il subsiste toujours une erreur relativement faible due à une variation globale de l'aimantation.

Pour ces aimants, les courbes sont plus proches pour une variation de l'angle d'aimantation de $+20^\circ$.

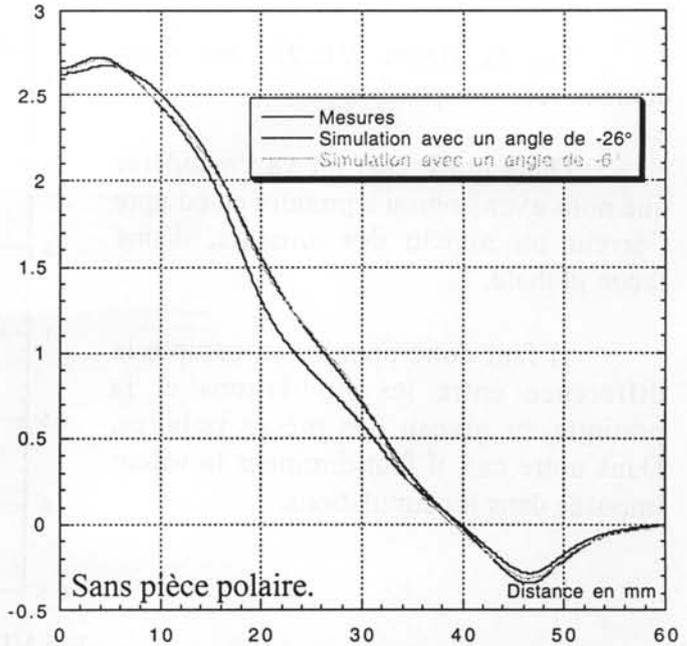


Fig VII.20 : Comparaison des courbes de mesures avec les simulations avec et sans rotation.

VII.4.2.3 Influence de l'angle d'aimantation des aimants NFB01.

Dans cette partie, nous allons estimer la rotation des aimants NFB01 définis sur la figure VII.21. Ces aimants sont moins touchés que les aimants Cent2 car le champ transverse est beaucoup plus faible (Fig VII.14). Pour ces aimants, nous avons simulé une faible rotation de l'aimantation par pas de 5° entre 31° et 56° . Comme pour les variations angulaires précédentes, nous avons simulé la structure avec et sans pièces polaires (fig VII.22 et VII.23).

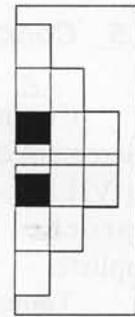


Fig VII.21

Sur les courbes VII.22 et VII.23, les courbes sont très proches car nous avons fait varier très faiblement l'angle de l'aimantation.

Sur la figure VII.22, on remarque une très faible erreur sauf au niveau des pièces polaires.

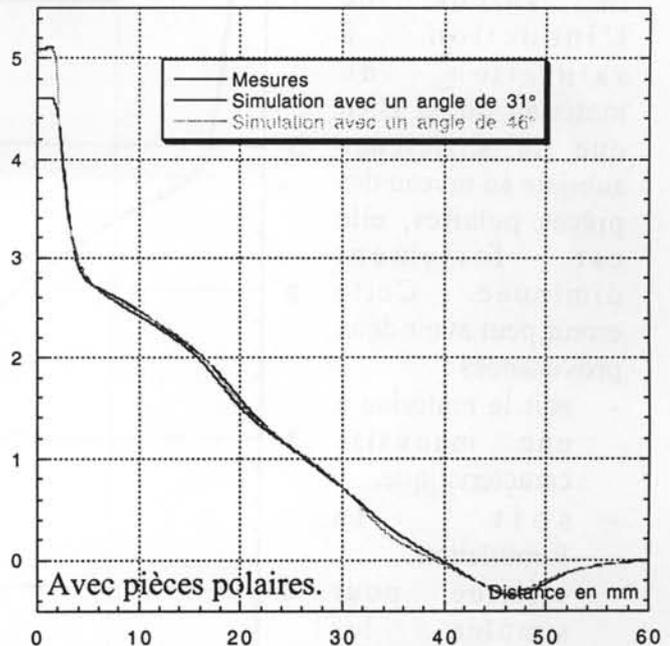


Fig VII.22 : Comparaison des courbes de mesures avec les simulations avec et sans rotation.

Sur la figure VII.23, les deux courbes sont très proches.

Dans notre cas, on va considérer que nous avons réussi à prendre en compte l'erreur au niveau des aimants, d'une façon globale.

Il faut donc prendre en compte la différence entre les simulations et la pratique au niveau des pièces polaires. Dans notre cas, il faut diminuer la valeur imposée dans les simulations.

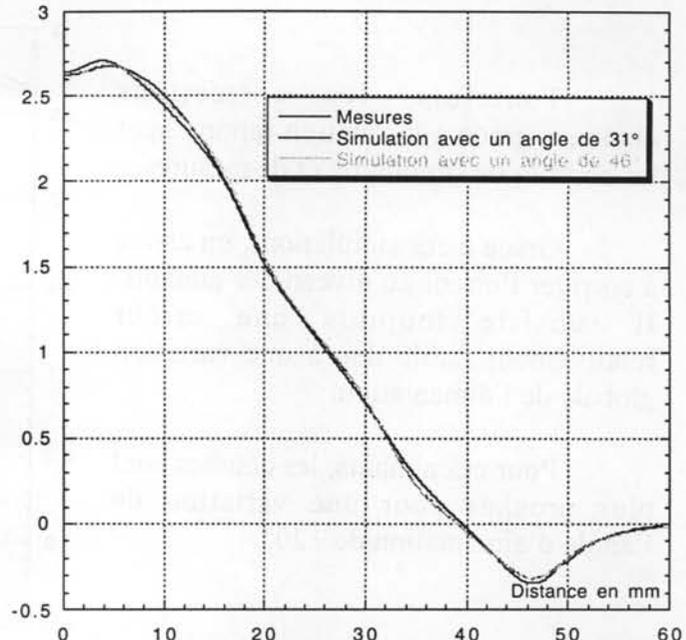


Fig VII.23 : Comparaison des courbes de mesures avec les simulations avec et sans rotation.

VII.5 Conclusion : présentation des résultats finaux.

Comme on l'a vu précédemment, l'erreur au niveau des aimants est presque entièrement expliquée (fig VII.23), avec un approche assez simpliste.

Toutefois, nous avons fait varier la valeur de l'induction à saturation du matériau doux. Bien que la différence subsiste au niveau des pièces polaires, elle est fortement diminuée. Cette erreur peut avoir deux provenances :

- soit le matériau a une mauvaise caractéristique.
- soit la formulation utilisée pour simuler les matériaux doux n'est pas assez précise.

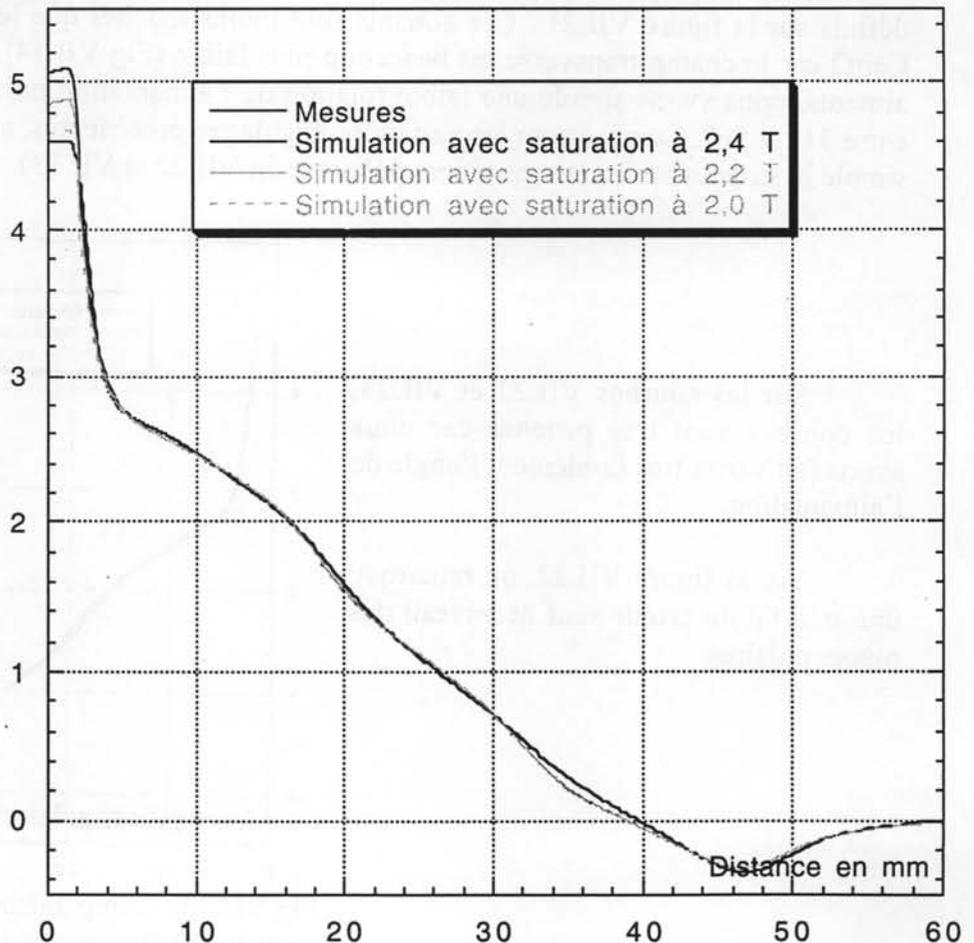


Fig VII.24 : Courbe d'induction sur l'accès en prenant compte le défauts.

Chapitre VIII
CONCLUSION

VIII Conclusion.

Nous avons conçu et réalisé une source de flux à aimants permanents qui génère une induction magnétique supérieure à 4,5 Tesla dans un volume utile de 20 mm³ pour un encombrement extérieur de diamètre 150 mm hors tout. Ce projet financé par la région Rhône-Alpes a été le fruit d'une collaboration entre les trois principaux partenaires :

- Le Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble.
- Le Laboratoire CNRS Louis Néel.
- Pêchiney CRV-Ugimag Inc.

Cette collaboration a impliqué un transfert d'idées, de méthodes et de savoirs-faire qui ont permis la conception et la réalisation de ce prototype original.

Toute la conception de cette structure a été faite dans l'objectif de créer une induction magnétique la plus intense en utilisant des matériaux magnétiques. La conception et la réalisation de cette structure ont duré environ une année chacune. À cause de la taille du prototype, il a été nécessaire d'imposer des tolérances très faibles au niveau de côtes des pièces.

Les mesures lors du calibrage du prototype ont mis en évidence les limitations technologiques des aimants permanents de cette génération et de leur modélisation.

Ce prototype a été utilisé pour des études de dichroïsme magnétique sur le faisceau synchrotron de l'ESRF. Ce type d'application impose d'orienter le champ magnétique (créé par la source) dans l'axe de rayonnement X. C'est pourquoi nous avons développé des pièces polaires spécifiques avec accès dans l'axe du champ.

La structure a été facilement incluse dans cette expérience. Quelques pièces mécaniques ont été réalisées : porte-échantillons, socle de maintien. Sur la figure ci-contre, nous avons photographié le prototype en cours d'utilisation à l'ESRF.

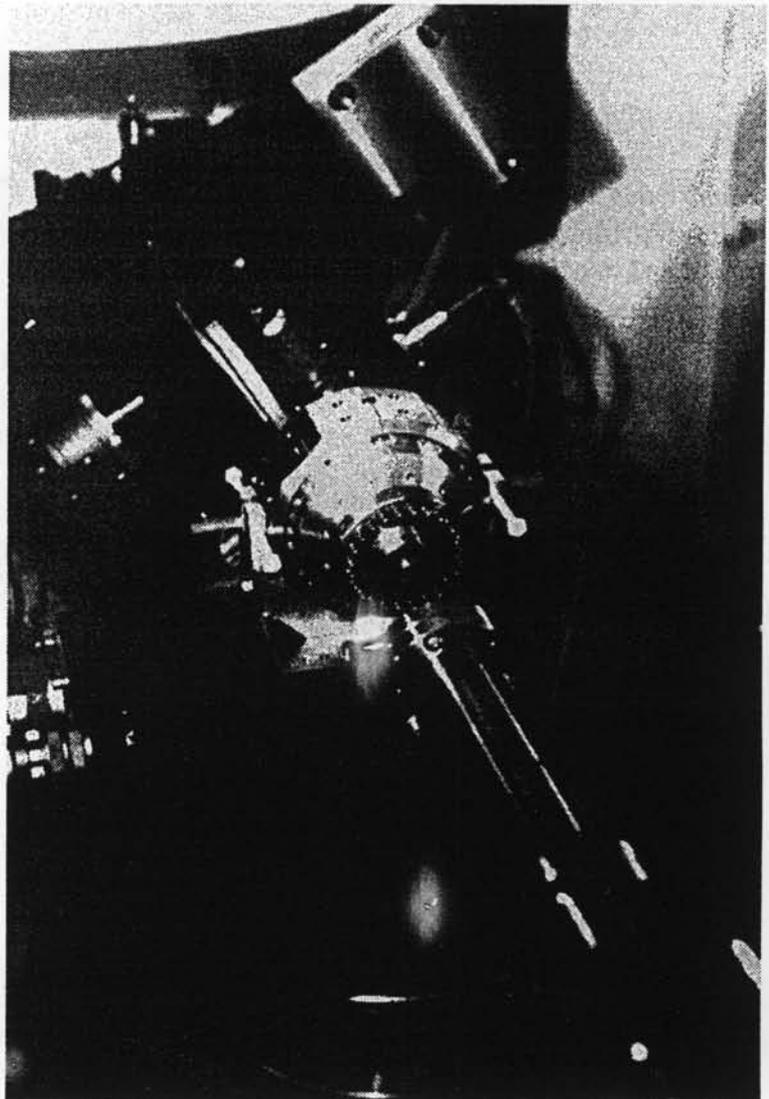
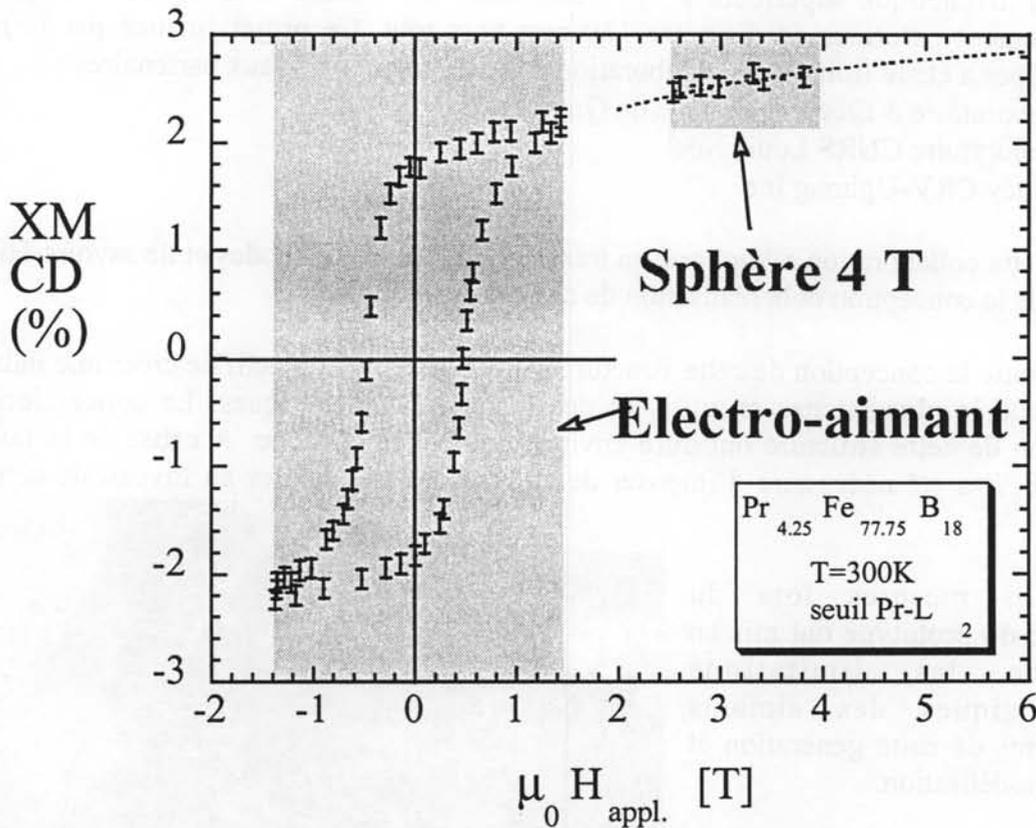


Fig VIII.1 : Structure installée sur une ligne de lumière

Dans le cadre de la collaboration avec le laboratoire Louis Néel, cette structure a servi pour des applications de mesures de réponse X du Praséodyme au seuil L. Sur cette courbe, on voit tout de suite apparaître les limitations des mesures effectuées avec une bobine traditionnelle (de $-1,5T$ à $1,5T$). Notre structure a permis de prolonger ces mesures entre $2,5T$ jusqu'à $4T$.



Grâce à notre structure, M. Stéphane David a pu valider son modèle en fort champ. Cette application a permis de mettre en avant d'une part la facilité d'utilisation de la structure et sa facilité d'installation (due à sa compacité). Elle trouve donc tout son intérêt dans ce type de mesures.

Les perspectives de cette structure sont intrinsèquement liées au développement des performances des aimants futurs. Trois facteurs sont à améliorer :

- L'induction rémanente : Plus elle sera élevée, plus l'induction centrale sera importante puisqu'il y a une dépendance linéaire. Toutefois, il faudra faire attention aux risques de désaimantation.
- Le champ coercitif : Une augmentation de cette caractéristique, permettra d'inclure des aimants plus proches de la zone centrale. La contribution supplémentaire augmentera l'induction centrale de la structure.
- Le champ d'anisotropie magnétocristalline : plus il sera élevé, plus la rotation de l'aimantation sera faible.

Les facteurs ci-dessus tendent à faire évoluer la structure existante. D'autre part, cette structure est longue à mettre en œuvre et à réaliser. En vue d'une fabrication à plusieurs exemplaires et de leur commercialisation, il est souhaitable de concevoir une structure plus simple à réaliser comportant un nombre réduit d'aimants.

ANNEXE 1

Dans cette annexe, nous faisons figurer les travaux de M. AUBERT Guy. Ces travaux ont pour but de trouver la structure créant le plus de champ magnétique à partir d'un certain volume d'aimant.

Toutes ces structures sont à symétrie de révolution autour de l'axe du champ central créé.

Pour commencer, cette étude doit se faire avec le même volume d'aimant pour toutes les structures proposées. Dans cette partie ne figure que les résultats de calculs : d'une part les rayons et volumes de ces structures. D'autre part, les valeurs des champs centraux obtenus.

Sphère de Halbach :

$$r = a$$

$$v = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3$$

$$\frac{B_0}{\mu_0 \cdot M} = \frac{4}{3} \cdot \ln\left(\frac{a_2}{a_1}\right)$$

Sphère à aimantation optimisée:

$$r = a$$

$$v = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3$$

$$\frac{B_0}{\mu_0 \cdot M} = \frac{4}{3} \cdot \ln\left(\frac{a_2}{a_1}\right) \cdot \left(\frac{3}{4} + \frac{\sqrt{3}}{8} \cdot \ln(2+\sqrt{3})\right) = \left(\frac{3}{4} + \frac{\sqrt{3}}{8} \cdot \ln(2+\sqrt{3})\right) \cdot (B \text{ de la sphère de Halbach})$$

$$\frac{B_0}{\mu_0 \cdot M} = 1,035129749 \cdot (B \text{ de la sphère de Halbach})$$

Sphéroïde à aimantation optimisée:

$$r = \frac{a \cdot b}{\sqrt{b^2 \cos^2 \theta + a^2 \sin^2 \theta}} = \frac{b}{\sqrt{1 - e^2 \cos^2 \theta}} \quad e^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2}$$

$$V = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot a \cdot b^2$$

$$a = 1,169799486$$

$$b = 0,9245795573$$

$$\frac{B_0}{\mu_0 \cdot M} = B \text{ de la sphère à aimantation optimisée} + 0,010680403$$

Hippopédoïde à aimantation optimisée:

$$r = \sqrt{b^2 \cos^2 \theta + a^2 \sin^2 \theta} = b \cdot \sqrt{1 + e^2 \cos^2 \theta} \quad e^2 = \frac{a^2 - b^2}{b^2}$$

$$V = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot b^3 \cdot \left[\frac{1}{4} \cdot (1+e^2)^{\frac{3}{2}} + \frac{3}{8} \sqrt{1+e^2} + \frac{3}{8} \cdot \ln \left(\frac{e + \sqrt{1+e^2}}{e} \right) \right]$$

$$a = 1,151013779$$

$$b = 0,9107572600$$

$$\frac{B_0}{\mu_0 \cdot M} = B \text{ de la sphère à aimantation optimisée} + 0,01113848057$$

Optimoïde à aimantation optimisée:

$$r = b \cdot (1 + 3 \cdot \cos^2 \theta)^{\frac{1}{6}}$$

$$V = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot b^3 \cdot \int_0^1 \sqrt{1 + 3 \cdot x^2} \, dx = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot b^3 \cdot \left(1 + \frac{\ln(2 + \sqrt{3})}{2 \cdot \sqrt{3}} \right) = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot b^3 \cdot 1,380172998$$

$$a = 1,131615332$$

$$b = 0,8981636843$$

$$\frac{B_0}{\mu_0 \cdot M} = B \text{ de la sphère à aimantation optimisée} + 0,0112933390$$

En conclusion, c'est l'optimoïde à aimantation optimisée qui crée le champ le plus intense. Il faut surtout remarquer une augmentation de 1,37% de la composante du champ qui ne dépend pas du rapport des rayons.

Dans le cas d'un rapport 10 entre les rayons, nous obtenons les résultats suivants :

Sphère de Halbach : $B = 3,070113457$

Sphère à aimantation optimisée: $B = 3,177965771$

Sphéroïde à aimantation optimisée: $B = 3,188646174$

Hippopédoïde à aimantation optimisée: $B = 3,1891042516$

Optimoïde à aimantation optimisée: $B = 3,18925911$

BIBLIOGRAPHIE
et PUBLICATIONS

BIBLIOGRAPHIE et PUBLICATIONS:

Toutes les références de cette thèse ont été utilisées de manière à définir un état de l'art dans le domaine de la création de champ magnétique à base d'aimants permanents. Toutefois, il faut remarquer que la plupart de ces références traitent les sources de flux destinées à l'imagerie médicale.

- [1] C.Blache, G. Lemarquand
High magnetic field gradients in flux confining permanent magnet structures
J.M.M.M. 104-107 (1992) p1111-1112
- [2] K. Halbach
Design of permanent multipole magnet with oriented rare earth cobalt magnet
Nuclear instruments and method 169 (1980) p1-10
- [3] K. Halbach
Physical and optical properties of rare earth cobalt magnets
Nuclear instruments and method 187 (1981) p109-117
- [4] K. Halbach
Perturbation effects in segmented rare earth cobalt multipole magnet
Nuclear instruments and method 198 (1982) p213-215
- [5] H. Leupold,
Approaches to permanent magnet circuit design.
U.S. Army research laboratory.
manuscript #FA.02
- [6] H. Leupold
Field adjustable transverse flux sources.
United States patent 4862128, 29/08/1989.
- [7] H. Leupold , E. Potenziani , J. P. Clake , J. Douglas .
Impact of the high-energy product materials on magnetic circuit design.
Electronics Technology and devices Laboratory, Fort Monmouth, NJ 07703-5000
- [8] H. Leupold , E. Potenziani
Novel high-field permanent magnet flux source
IEEE transactions on magnetic, vol mag23, n°5, (september 1987), p3628-3629
- [9] M.Marinescu, N. Marinescu
Anisotropy effect in permanent multipole magnets
IEEE transactions on magnetic, vol mag20, n°5, (september 1984), p1930-1932
- [10] M.Marinescu, N. Marinescu
Compensating of anisotropy effects in flux-confining permanent magnet structures
IEEE transactions on magnetic, vol mag25, n°5, (september 1989), p3899-3909
- [11] V. Nguyen, J.Delamare, J-P. Yonnet
Open H-shaped permanent magnet structure for NMR imaging.
Workshop XIII on Rare Earth permanent Magnets and their applications, p291-300
- [12] E. Potenziani , H. Leupold
Permanent magnets for magnetic resonance imaging
IEEE transactions on magnetic, vol mag22, n°5, (september 1986), p1078-1080
- [13] E.C. Stoner, E.P. Wohlfarth
Mil Trans. Mag. Soc (London), 240A, 599,(1948)

- [14] S.V. Zhakov, V.G. Gass et al
The development of optimal magnet system for electronic and laser applications
Workshop XIII on Rare Earth permanent Magnets and their applications, p528-536
- [15] Zjilstra
Infinitely long hollow cylinder with optimum magnetization.
Philips journal of research, Vol 40, N°5,1985

Les deux références ci-dessous présentent les logiciels utilisés (Flux2D, Flux3D et Dipôle3D) tout au long de cette thèse.

- [16] J. Delamare et al.
3D calculation of permanent magnet interactions"
Proceeding Conference IMACS TC'1 93 (July 93) p289-292
- [17] CEDRAT - 4301 ZIRST, 38943 Meylan, France.
Phone (33) 476 90 50 45 - Fax (33) 476 90 16 19

Cette recherche a fait l'objet des publications suivantes :

Publications scientifiques :

- *"4 Tesla au creux de la main "*

F. Bloch, O. Cugat, JC. Toussaint
Revue Internationale du Génie Electrique, Vol 1, n°2/1998, p321

- *"A 4-Tesla permanent magnet flux source"*

O. Cugat, F. Bloch, JC Toussaint
Rare Earth Magnets and their Applications REM XV, Vol 2, p853 (Schultz éd.)
Actes de la Conférence REM-XV, Dresden - Allemagne, septembre 1998 – poster
(Conference and Workshop on Rare Earth permanent Magnets and their applications)

- *"Innovating approaches to the generation of intense magnetic fields -
Optimization of a permanent magnet flux source"*

F. Bloch , O. Cugat, J.C. Toussaint, G. Meunier.
poster à la conférence Compumag '97, Rio de Janeiro, novembre 1997
IEEE Trans. Mag. Vol 34, n° 5 p2465 (septembre 1998)

- *"Approches novatrices à la génération de champs magnétiques intenses :
sources de flux à aimants permanents"*

F. Bloch, O. Cugat, JC Toussaint, G Meunier.
Actes de la Conférence NUMELEC '97 Lyon, mars 97 - poster
Journal de Physique III : European Physical Journal - Applied physics Vol 5 (1999)
Page 85

Articles parus dans la presse :

- Le journal du CNRS n°106, Octobre 1998.
- La recherche n°314, Novembre 1998, page 17.
- Sciences et avenir n°621, Novembre 1998, page 14. (+WEB)
- Instantanés techniques, Décembre 1998, page 7.
- CNRS Info n°363, 15 septembre 1998, page 11.
- CIRCE news (WEB)
- Présences, Novembre 1998, page 19.
- Ingénieur INPG, Juin 1998, page 33.
- Le Mot du LEG, 12 mai 1998, page 1.
- Transversales

Résumé

Le but de cette étude est de développer et optimiser une source originale de champ magnétique intense à base d'aimants permanents. L'aspect novateur de ce projet est l'utilisation des matériaux magnétiques aux terres rares, à très forte anisotropie, pour générer des champs de l'ordre de 4 à 5 Tesla. Des champs de cet ordre de grandeur sont requis dans certaines applications et expériences scientifiques.

De tels champs intenses peuvent théoriquement être atteints avec des configurations d'aimantations non colinéaires. Ce concept a permis depuis dix ans environ de développer des sources de champs très homogènes, inférieurs à 2 Tesla. Notre objectif est différent : il s'agit de générer le champ le plus intense possible dans un volume de quelques mm³ sans souci d'homogénéité.

Les configurations particulières d'aimants ainsi que la discrétisation de la structure sont optimisées par modélisation et simulation numériques à partir des caractéristiques magnétiques des divers matériaux disponibles commercialement.

- FLUX 2D et FLUX3D Logiciel de simulation numérique éléments finis.
- FORCE 3D Logiciel de simulation analytiques des systèmes à aimants.

Ces logiciels ont été développés au LEG.

La conception de la structure tient compte des applications envisagées (champ statique variable, accès au champ).

Le modèle actuel fournit un champ supérieur à 4,5 T dans un volume de quelques mm³, pour un encombrement extérieur d'environ Ø150 mm. Il combine astucieusement plusieurs types nuances d'aimant à base de terres rares Néodyme-Fer-Bore pour sa haute rémanence, ainsi que pour sa forte anisotropie, ainsi qu'une utilisation de pièces polaires en Fer-Cobalt. C'est la coercivité des aimants qui limite le champ maximum productible par ces structures.

Title : **4 Tesla permanent magnet flux source.**

Abstract

The aim of this study is to work out and optimise an original permanent magnet flux source. The innovating aspect of this project is the use of a high anisotropy material in order to generate a magnetic field of 4 to 5 Tesla. Such fields are needed in various scientific applications and experiences.

Such intense fields can theoretically be reached with configurations of non-colinear magnetisation. This concept has permitted, for ten years, to develop high-homogeneity field sources, lower than 2 Tesla. Our objective is different: we want to generate the most intense field in a volume smaller than 1 cm³, without taking care of homogeneity.

The particular magnet configuration and the discretisation of the structure has been optimised with the help of numerical modelisation and simulation tools. This structure must generate a variable field and in order to allow for access to the field zone, as well as to.

For this study, we have used the following software developed in the LEG:

- Flux 2D: Numeric simulation using the finite-element method.
- Force 3D: Analytic simulation of magnet structures.

The latest flux source creates a field superior to 4.5 Tesla in a volume of some mm³, with an external diameter of 150mm. This source combines different grades of Neodymium-Iron-Boron permanent magnet because of its high remanence and anisotropy and FeCo soft magnetic material polar pieces. The field created in the center of the structure is limited by the coercivity of the magnets.

MOTS CLÉS : Aimants, Terres-rares, Source de champ, Champ magnétique intense.

The first of these is the development of a system of...
 The second is the development of a system of...
 The third is the development of a system of...

The fourth is the development of a system of...
 The fifth is the development of a system of...
 The sixth is the development of a system of...

The seventh is the development of a system of...
 The eighth is the development of a system of...
 The ninth is the development of a system of...

The tenth is the development of a system of...
 The eleventh is the development of a system of...
 The twelfth is the development of a system of...

The thirteenth is the development of a system of...
 The fourteenth is the development of a system of...
 The fifteenth is the development of a system of...

4.1 The development of a system of...

4.1.1

4.1.2

The first of these is the development of a system of...
 The second is the development of a system of...
 The third is the development of a system of...

The fourth is the development of a system of...
 The fifth is the development of a system of...
 The sixth is the development of a system of...

The seventh is the development of a system of...
 The eighth is the development of a system of...
 The ninth is the development of a system of...

The tenth is the development of a system of...
 The eleventh is the development of a system of...
 The twelfth is the development of a system of...



Résumé

Le but de cette étude est de développer et optimiser une source originale de champ magnétique intense à base d'aimants permanents. L'aspect novateur de ce projet est l'utilisation des matériaux magnétiques aux terres rares, à très forte anisotropie, pour générer des champs de l'ordre de 4 à 5 Tesla. Des champs de cet ordre de grandeur sont requis dans certaines applications et expériences scientifiques.

De tels champs intenses peuvent théoriquement être atteints avec des configurations d'aimantations non colinéaires. Ce concept a permis depuis dix ans environ de développer des sources de champs très homogènes, inférieurs à 2 Tesla. Notre objectif est différent : il s'agit de générer le champ le plus intense possible dans un volume de quelques mm³ sans souci d'homogénéité.

Les configurations particulières d'aimants ainsi que la discrétisation de la structure sont optimisées par modélisation et simulation numériques à partir des caractéristiques magnétiques des divers matériaux disponibles commercialement.

- FLUX 2D et FLUX3D Logiciel de simulation numérique éléments finis.
- FORCE 3D Logiciel de simulation analytiques des systèmes à aimants.

Ces logiciels ont été développés au LEG.

La conception de la structure tient compte des applications envisagées (champ statique variable, accès au champ).

Le modèle actuel fournit un champ supérieur à 4,5 T dans un volume de quelques mm³, pour un encombrement extérieur d'environ Ø150 mm. Il combine astucieusement plusieurs types nuances d'aimant à base de terres rares Néodyme-Fer-Bore pour sa haute rémanence, ainsi que pour sa forte anisotropie, ainsi qu'une utilisation de pièces polaires en Fer-Cobalt. C'est la coercivité des aimants qui limite le champ maximum productible par ces structures.

Title : 4 Tesla permanent magnet flux source.

Abstract

The aim of this study is to work out and optimise an original permanent magnet flux source. The innovating aspect of this project is the use of a high anisotropy material in order to generate a magnetic field of 4 to 5 Tesla. Such fields are needed in various scientific applications and experiences.

Such intense fields can theoretically be reached with configurations of non-colinear magnetisation. This concept has permitted, for ten years, to develop high-homogeneity field sources, lower than 2 Tesla. Our objective is different: we want to generate the most intense field in a volume smaller than 1 cm³, without taking care of homogeneity.

The particular magnet configuration and the discretisation of the structure has been optimised with the help of numerical modelisation and simulation tools. This structure must generate a variable field and in order to allow for access to the field zone, as well as to.

For this study, we have used the following software developed in the LEG:

- Flux 2D: Numeric simulation using the finite-element method.
- Force 3D: Analytic simulation of magnet structures.

The latest flux source creates a field superior to 4.5 Tesla in a volume of some mm³, with an external diameter of 150mm. This source combines different grades of Neodymium-Iron-Boron permanent magnet because of its high remanence and anisotropy and FeCo soft magnetic material polar pieces. The field created in the center of the structure is limited by the coercivity of the magnets.

MOTS CLÉS : Aimants, Terres-rares, Source de champ, Champ magnétique intense.