



Conception et optimisation de circuits polarisés

Elisabeth Logeais

► To cite this version:

Elisabeth Logeais. Conception et optimisation de circuits polarisés. Sciences de l'ingénieur [physics]. Polytechnique, 1988. Français. ⟨NNT: ⟩. ⟨tel-04510791⟩

HAL Id: tel-04510791

<https://hal.science/tel-04510791v1>

Submitted on 19 Mar 2024

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.



HAL Authorization

THESE

présentée par

ELISABETH LOGEAIS

pour obtenir le titre de DOCTEUR

de l'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE
(arrêté ministériel du 5 juillet 1984)

(Spécialité : Génie Electrique)

CONCEPTION ET OPTIMISATION DE CIRCUITS MAGNETIQUES POLARISES

APPLICATION AUX CONTACTEURS

Date de Soutenance : 18 Octobre 1988

JURY

Monsieur	P. BRISSONNEAU	Président
Messieurs	M. LAJOIE-MAZENC M. LAURAIRE J - C. SABONNADIERE J - P. YONNET	Examineurs

Thèse préparée au sein du Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble

THESE

présentée par

ELISABETH LOGEAIS

pour obtenir le titre de DOCTEUR

de l'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE
(arrêté ministériel du 5 juillet 1984)

(Spécialité : Génie Electrique)

CONCEPTION ET OPTIMISATION DE CIRCUITS MAGNETIQUES POLARISES

APPLICATION AUX CONTACTEURS

Date de Soutenance : 18 Octobre 1988

JURY

Monsieur	P. BRISSONNEAU	Président
Messieurs	M. LAJOIE-MAZENC M. LAURAIRE J - C. SABONNADIÈRE J - P. YONNET	Examineurs

Thèse préparée au sein du Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble

Président:

Georges LESPINARD

Année 1988

Professeurs des Universités

BARIBAUD	Michel	ENSERG	JOUBERT	Jean-Claude	ENSPG
BARRAUD	Alain	ENSIEG	JOURDAIN	Geneviève	ENSIEG
BAUDELET	Bernard	ENSPG	LACOUME	Jean-Louis	ENSIEG
BEAUFILS	Jean-Pierre	ENSEEG	LESIEUR	Marcel	ENSHMG
BLIMAN	Samuel	ENSERG	LESPINARD	Georges	ENSHMG
BLOCH	Daniel	ENSPG	LONGUEUE	Jean-Pierre	ENSPG
BOIS	Philippe	ENSHMG	LOUCHET	François	ENSIEG
BONNETAIN	Lucien	ENSEEG	MASSE	Philippe	ENSIEG
BOUVARD	Maurice	ENSHMG	MASSELOT	Christian	ENSIEG
BRISSONNEAU	Pierre	ENSIEG	MAZARE	Guy	ENSIMAG
BRUNET	Yves	IUFA	MOREAU	René	ENSHMG
CAILLERIE	Denis	ENSHMG	MORET	Roger	ENSIEG
CAVAIGNAC	Jean-François	ENSPG	MOSSIERE	Jacques	ENSIMAG
CHARTIER	Germain	ENSPG	OBLED	Charles	ENSHMG
CHENEVIER	Pierre	ENSERG	OZIL	Patrick	ENSEEG
CHERADAME	Herve	UFR PGP	PARIAUD	Jean-Charles	ENSEEG
CHOVET	Alain	ENSERG	PERRET	René	ENSIEG
COHEN	Joseph	ENSERG	PERRET	Robert	ENSIEG
COUMES	André	ENSERG	PIAU	Jean-Michel	ENSHMG
DARVE	Félix	ENSHMG	POUPOT	Christian	ENSERG
DELLA-DORA	Jean-François	ENSIMAG	RAMEAU	Jean-Jacques	ENSEEG
DEPORTES	Jacques	ENSPG	RENAUD	Maurice	UFR PGP
DOLMAZON	Jean-Marc	ENSERG	ROBERT	André	UFR PGP
DURAND	Francis	ENSEEG	ROBERT	François	ENSIMAG
DURAND	Jean-Louis	ENSIEG	SABONNADIÈRE	Jean-Claude	ENSIEG
FOGGIA	Albert	ENSIEG	SAUCIER	Gabrielle	ENSIMAG
FONLUPT	Jean	ENSIMAG	SCHLENKER	Claire	ENSPG
FOULARD	Claude	ENSIEG	SCHLENKER	Michel	ENSPG
GANDINI	Alessandro	UFR PGP	SILVY	Jacques	UFR PGP
GAUBERT	Claude	ENSPG	SIRYES	Pierre	ENSHMG
GENTIL	Pierre	ENSERG	SOHM	Jean-Claude	ENSEEG
GREVEN	Hélène	IUFA	SOLER	Jean-Louis	ENSIMAG
GUERIN	Bernard	ENSERG	SOUQUET	Jean-Louis	ENSEEG
GUYOT	Pierre	ENSEEG	TROMPETTE	Philippe	ENSHMG
IVANES	Marcel	ENSIEG	VEILLON	Gérard	ENSIMAG
JAUSSAUD	Pierre	ENSIEG	ZADWORNÝ	François	ENSERG

Professeur Université des Sciences Sociales (Grenoble II)

BOLLJET

Louis

Personnes ayant obtenu le diplôme

d'HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES

BECKER	Monique	DEROO	Daniel	HAMAR	Roger
BINDER	Zdenek	DIARD	Jean-Paul	LADET	Pierre
CHASSERY	Jean-Marc	DION	Jean-Michel	LATOMBE	Claudine
CHOLLET	Jean-Pierre	DUGARD	Luc	LE GORREC	Bernard
COEY	John	DURAND	Madeleine	MADAR	Roland
COLINET	Catherine	DURAND	Robert	MULLER	Jean
COMMAULT	Christian	GALERIE	Alain	NGUYEN TRONG	Bernadette
CORNUEJOLS	Gérard	GAUTHIER	Jean-Paul	PASTUREL	Alain
COULOMB	Jean-Louis	GENTIL	Sylviane	PLA	Fernand
DALARD	Francis	GHI BAUDO	Gérard	ROUGER	Jean
DANES	Florin	HAMAR	Sylvaine	TCHUENTE	Maurice
				VINCENT	Henri

CHERCHEURS DU C.N.R.S

Directeurs de recherche 1ère Classe

CARRE	René	LANDAU	Ioan
FRUCHART	Robert	VACHAUD	Georges
HOPFINGER	Emile	VERJUS	Jean-Pierre
JORRAND	Philippe		

Directeurs de recherche 2ème Classe

ALEMANY	Antoine	KLEITZ	Michel
ALLIBERT	Colette	KOFMAN	Walter
ALLIBERT	Michel	KAMARINOS	Georges
ANSARA	Ibrahim	LEJEUNE	Gérard
ARMAND	Michel	LE PROVOST	Christian
BERNARD	Claude	MADAR	Roland
BINDER	Gilbert	MERMET	Jean
BONNET	Roland	MICHEL	Jean-Marie
BORNARD	Guy	MUNIER	Jacques
CAILLET	Marcel	PIAU	Monique
CALMET	Jacques	SENATEUR	Jean-Pierre
COURTOIS	Bernard	SIFAKIS	Joseph
DAVID	René	SIMON	Jean-Paul
DRIOLE	Jean	SUERY	Michel
ESCUDIER	Pierre	TEODOSIU	Christian
EUSTATHOPOULOS	Nicolas	VAUCLIN	Michel
GUELIN	Pierre	WACK	Bernard
JOUD	Jean-Charles		

Personnalités agréées à titre permanent à diriger

des travaux de recherche (décision du conseil scientifique)

ENSEEG

CHATILLON	Christian	SARRAZIN	Pierre
HAMMOU	Abdelkader	SIMON	Jean-Paul
MARTIN GARIN	Régina		

ENSERG

BOREL	Joseph
-------	--------

ENSIEG

DESCHIZEAUX	Pierre	PERARD	Jacques
GLANGEAUD	François	REINISCH	Raymond

ENSHMG

ROWE	Alain
------	-------

ENSIMAG

COURTIN	Jacques
---------	---------

EFP

CHARUEL	Robert
---------	--------

C.E.N.G

CADET
COEURE
DELHAYE
DUPUY
JOUVE
NICOLAU

Jean
Philippe
Jean-Marc
Michel
Hubert
Yvan

NIFENECKER
PERROUD
PEUZIN
TAIEB
VINCENDON

Hervé
Paul
Jean-Claude
Maurice
Marc

Laboratoires extérieurs :

C.N.E.T

DEVINE
GERBER

Rodericq
Roland

MERCKEL
PAULEAU

Gérard
Yves

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé au sein du Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble, (U.A. CNRS n°355) dans l'équipe Matériaux Magnétiques sous la direction scientifique de Mr Jean-Paul Yonnet.

Il a pu être mené à bien grâce au concours financier du Ministère de la Recherche et de la Technologie et de la société Télémécanique Electrique auxquels j'adresse ici mes remerciements.

Je tiens à remercier :

Mr Pierre BRISSONNEAU, professeur à l'INP de Grenoble, qui m'a fait l'honneur de présider le jury de cette thèse, et m'a accueillie chaleureusement dans son équipe

Mr Michel LAJOIE-MAZENC , Directeur de Recherche au CNRS,

Mr Jean-Claude SABONNADIÈRE, professeur à l'INP de Grenoble,

pour avoir manifesté leur intérêt pour ce travail en honorant le jury de leur présence

Mr Michel LAURAIRE, Ingénieur à la Division des Etudes et Recherches de Télémécanique Electrique, avec lequel j'ai pu avoir de nombreuses et fructueuses discussions

Mr Jean-Paul YONNET, Chargé de Recherche au CNRS, qui m'a proposé ce sujet, et qui a toujours su me faire profiter pleinement de ses compétences et de ses idées dans la réalisation de ce travail.

Je remercie également pour son accueil Mr Robert PERRET, directeur du LEG, et à travers lui l'ensemble des membres du Laboratoire pour leur contribution directe ou indirecte à ces travaux.

Je remercie tout spécialement Mme Afef LBOUC, pour avoir accepté avec une constante gentillesse l'envahissement de son bureau par mon encombrante personne. J'ai pu apprécier ses compétences et sa disponibilité tout au long de ces trois ans, et je souhaite qu'elle trouve ici le témoignage de mon amitié.

Je remercie aussi :

MM. J-P. IAFRATE, J-F. IMHOFF, N.TROUCHE et T. WAECKERLE pour toutes les discussions que nous avons eues,

Mr Gérard MEUNIER, pour son aide et ses conseils avisés lors des essais de modélisation par CAO,

Mr Christian BATAILLE de Télémécanique pour tous les renseignements sur les contacteurs qu'il m'a fournis,

Mr Claude BRUN pour son aide et sa contribution à la réalisation des prototypes,

Mme Annie de MURCIA qui a assuré avec beaucoup de gentillesse et de soin la dactylographie de ce mémoire.

Je remercie enfin Philippe CONRAUX pour la patience et l'humour avec lesquels il m'a supportée pendant ces années, et dont il fait heureusement toujours preuve à ce jour ...

SOMMAIRE

INTRODUCTION

CHAPITRE I : LES CONTACTEURS

I - LES CONTACTEURS ELECTROMAGNETIQUES	I - 1
I - 1 <u>Principe de fonctionnement des contacteurs industriels</u>	I - 1
I - 2 <u>Contraintes industrielles classiques pour un contacteur électromagnétique classique</u>	I - 2
I - 2 . a Contraintes électriques	I - 2
I - 2 . b Contraintes mécaniques	I - 2
I - 2 . c Contraintes diverses	I - 3
I - 3 <u>Rôle des contacteurs</u>	I - 3
 II - COMPARAISON ENTRE LES RELAIS ET LES CONTACTEURS ELECTROMAGNETIQUES	 I - 4
II - 1 <u>Technologie des relais électromagnétiques</u>	I - 4
II - 2 <u>Orientation de nos travaux</u>	I - 5
 III - OBJECTIFS DE L'ETUDE	 I - 5
III - 1 <u>Etude théorique des effets de la polarisation</u>	I - 5
III - 2 <u>Mise au point pratique</u>	I - 6
 IV - LIMITES DE NOS TRAVAUX	 I - 6
 V - VOCABULAIRE	 I - 6

CHAPITRE II : INTERET DE LA POLARISATION

I - ETUDE D'UN CONTACTEUR ELECTROMAGNETIQUE CLASSIQUE	II - 1
I - 1 <u>Fonctionnement électromagnétique d'un système non polarisé</u>	II - 1
I - 2 <u>Evaluation de la force électromagnétique créée par un électro-aimant</u>	II - 1
I-2.a Position du problème	II - 1
I-2.b Méthodes de calcul des grandeurs champ, induction et forces dans un dispositif électromagnétique	II - 2
1) Méthodes analytiques	II - 2
2) Calcul analytique simplifié	II - 3

3) Méthodes numériques	II - 5
I - 3 <u>Bilan énergétique d'un système non polarisé</u>	II - 5
II - MISE EN EVIDENCE SUR DES SYSTEMES SIMPLES DES AVANTAGES DE LA POLARISATION	II - 8
II - 1 <u>Grandeurs utilisées pour la comparaison</u>	II - 9
II - 2 <u>Hypothèses de calcul</u>	II - 10
II - 3 <u>Entrefer non polarisé</u>	II - 11
II - 4 <u>Entrefer polarisé simple</u>	II - 11
II - 5 <u>Paire d'entrefers dont la somme est constante</u>	II - 13
II - 6 <u>Comparaison des performances</u>	II - 14
II-6.a Cas du modèle général	II - 14
II-6.b Cas où les dimensions des surfaces d'échange sont grandes devant l'entrefer	II - 15
III - CONCLUSIONS	II - 18
 CHAPITRE III : SYSTEMES POLARISES MONOSTABLES EXISTANTS	
I - INTRODUCTION	III - 1
II - ETUDE DES PRINCIPAUX SYSTEMES POLARISES MONOSTABLES EXISTANTS	III - 1
II - 1 <u>Monostable naturel</u>	III - 1
II - 2 <u>Monostable à aimant auxiliaire</u>	III - 2
II - 3 <u>Monostable à quadripôle</u>	III - 3
II - 4 <u>Monostable associé à un circuit intégré</u>	III - 5
III - CONCLUSIONS	III - 6
 CHAPITRE IV : COMPARAISON THEORIQUE ET EXPERIMENTALE DE DEUX CONFIGURATIONS POLARISEES ELEMENTAIRES	
I - INTRODUCTION	IV - 1

II - POLARISATION DITE "SERIE"	IV - 1
II - 1 <u>Etude théorique simplifiée</u>	IV - 1
I-1.a Première approche	IV - 1
I-1.b Modèle utilisé	IV - 3
II - 2 <u>Importance de la longueur de l'aimant</u>	IV - 6
II-2.a Comparaison polarisé - non polarisé	IV - 7
II-2.b Longueur optimale de l'aimant	IV - 7
 III - POLARISATION DITE "PARALLELE"	 IV - 8
III - 1 <u>Fonctionnement</u>	IV - 8
III - 2 <u>Etude théorique</u>	IV - 9
 IV - COMPARAISON THEORIQUE DES PERFORMANCES	 IV - 11
 V - COMPARAISON PRATIQUE DES SYSTEMES POLARISES ET NON POLARISES	 IV - 14
V - 1 <u>Dispositif de mesure</u>	IV - 14
V - 2 <u>Caractéristiques géométriques et magnétiques des prototypes</u>	IV - 15
V - 3 <u>Résultats des mesures et comparaison des performances</u>	IV - 15
V-3.a Système à polarisation série	IV - 15
V-3.b Système à polarisation parallèle	IV - 17
 VI - CONCLUSIONS	 IV - 20

CHAPITRE V : RECHERCHE DE NOUVELLES CONFIGURATIONS

I - ROLE ET FONCTIONNEMENT D'UN ACTIONNEUR ELECTROMAGNETIQUE	V - 1
I - 1 <u>Fonctionnement magnétique</u>	V - 1
I - 2 <u>Fonctionnement mécanique</u>	V - 2
I - 3 <u>Limitation de la méthode</u>	V - 4
 II - RECHERCHE DE CONFIGURATIONS	 V - 4
II - 1 <u>Performances recherchées</u>	V - 4
II - 2 <u>Représentation des systèmes répondant aux contraintes magnétiques</u>	V - 6
II-2.a Position de la bobine	V - 6
II-2.b Position de l'aimant	V - 8

II - 3	<u>Etude des diverses solutions</u>	V - 10
II-3.a	Somme d'entrefer constant pour la bobine et rappel par aimant seul	V - 10
II-3.b	Entrefer nul en position de travail pour la bobine et rappel par aimant seul	V - 11
II-3.c	Somme d'entrefer constant pour la bobine et force permanente linéaire	V - 13
II-3.d	Entrefer nul en position de travail pour la bobine et rappel par aimant seul	V - 14
III -	REMARQUE	V - 15
IV -	CONCLUSIONS	V - 15

CHAPITRE VI : INFLUENCE DES PARAMETRES GEOMETRIQUES POUR LES SYSTEMES A POLARISATION PARALLELE

I -	GEOMETRIE DE L'AIMANT ET DE SON CIRCUIT MAGNETIQUE	VI - 1
I - 1	<u>Réduction des fuites magnétiques</u>	VI - 1
I-1.a	Fuites autour des entrefer	VI - 1
I-1.b	Fuites dans le reste du circuit magnétique	VI - 2
I - 2	<u>Variation du point de fonctionnement de l'aimant</u>	VI - 4
I - 3	<u>Conclusion</u>	VI - 5
II -	GEOMETRIE DE LA BOBINE ET DE SON CIRCUIT MAGNETIQUE	VI - 5
II - 1	<u>Utilisation optimale des Ampères-Tours dans le circuit magnétique</u>	VI - 5
II - 2	<u>Dimensionnement de la bobine - Utilisation optimale de la puissance électrique</u>	VI - 6
II - 3	<u>Influence des fuites magnétiques</u>	VI - 7
II - 4	<u>Conclusions</u>	VI - 8
III -	GEOMETRIE DES ENTREFERS	VI - 8
III - 1	<u>Modification des entrefer</u>	VI - 9
III - 2	<u>Modification des flux magnétiques</u>	VI - 10
III-2.a	Flux d'excitation	VI - 10
III-2.b	Flux permanent	VI - 10
III - 3	<u>Modification des forces</u>	VI - 10
IV -	EXEMPLE DE GEOMETRIES REpondant A CES CRITERES	VI - 11
IV - 1	<u>Configuration avec l'aimant à l'intérieur de la bobine</u>	VI - 11

IV - 2 <u>Configuration avec les aimants à l'extérieur de la bobine</u>	VI - 12
V - CONCLUSIONS	VI - 13
 CHAPITRE VII : UTILISATION DES TECHNIQUES DE CAO	
I - INTRODUCTION	VII - 1
II - PRINCIPALES METHODES UTILISEES	VII - 1
II - 1 <u>Méthodes des éléments finis</u>	VII - 1
II-1.a Aspect géométrique	VII - 1
II-1.b Aspect physique	VII - 2
II-1.c Détermination de la solution	VII - 2
II - 2 <u>Détermination de la force magnétique - Méthode des travaux virtuels</u>	VII - 3
III - PROBLEMES RENCONTRES	VII - 4
III - 1 <u>Modélisation des aimants</u>	VII - 4
III - 2 <u>Précision de la modélisation en 2D</u>	VII - 5
IV - UTILISATION DE LA CAO POUR NOS DISPOSITIFS	VII - 6
IV - 1 <u>Outils et matériel utilisés</u>	VII - 6
IV - 2 <u>Modélisation de nos dispositifs</u>	VII - 6
IV-2.a Etude de la force permanente	VII - 7
IV-2.b Inclinaison des surfaces	VII - 8
IV - 3 <u>Logiciels d'aide à la conception</u>	VII - 10
V - CONCLUSIONS	VII - 10

CHAPITRE VIII : ETUDE EXPERIMENTALE D'ELECTRO-AIMANTS POLARISES

I - RAPPEL DES DISPOSITIFS ETUDIES	VIII - 1
II - ETUDE DU PREMIER DISPOSITIF	VIII - 2
II - 1 <u>Caractéristiques</u>	VIII - 2
II - 2 <u>Comparaison entre résultats numériques et expérimentaux</u>	VIII - 3

II - 3 <u>Influence de la longueur de l'aimant</u>	VIII - 4
II - 4 <u>Influence des fuites</u>	VIII - 8
II - 5 <u>Essais sur les sections inclinées</u>	VIII - 11
II - 6 <u>Conclusions</u>	VIII - 12
III - ETUDE DU DEUXIEME DISPOSITIF	VIII - 12
III - 1 <u>Caractéristiques</u>	VIII - 12
III - 2 <u>Influence des sections inclinées</u>	VIII - 13
III - 3 <u>Influence de la disposition des sections inclinées</u>	VIII - 16
IV - CONCLUSIONS	VIII - 18

CONCLUSION

ANNEXES

**ANNEXE I : DETERMINATION DES INDUCTIONS ET DES FORCES
MAGNETIQUES DANS UN SYSTEME DE DEUX ENTREFERS
POLARISES A SOMME CONSTANTE**

**ANNEXE II : DETERMINATION DES GRANDEURS MAGNETIQUES DANS
UN CIRCUIT POLARISE SERIE A PARTIR DE SON SCHEMA
EQUIVALENT**

**ANNEXE III : DETERMINATION DES GRANDEURS MAGNETIQUES DANS
UN CIRCUIT POLARISE PARALLELE A PARTIR DE SON
SCHEMA EQUIVALENT**

BIBLIOGRAPHIE

INTRODUCTION

INTRODUCTION

L'électricité en tant que source d'énergie est aujourd'hui omniprésente. Elle se retrouve aussi bien dans les applications industrielles que domestiques, où elle doit permettre de faire fonctionner une multitude d'appareils allant de la pompe hydraulique industrielle au rasoir de Monsieur Tout-le-Monde ou aux essuie-glaces de sa voiture.

Les dispositifs électromécaniques occupent une place essentielle, car ils permettent de transformer cette énergie électrique en énergie mécanique et de créer ainsi des forces et des mouvements.

Les moteurs électriques sont très couramment utilisés. Le couple sur le rotor est obtenu par couplage électromagnétique avec le stator.

Dans les moteurs à courant continu et synchrones, le champ magnétique est créé soit uniquement par des bobinages, soit par des bobinages et des aimants permanents. L'utilisation ou non d'aimants permanents dépend des caractéristiques de ces moteurs.

Les actionneurs linéaires des relais et des contacteurs électromagnétiques sont un autre exemple de dispositifs électromécaniques. Leur fonctionnement est assez différent de celui des moteurs. Pour ces derniers, la partie mobile (le rotor) tourne à entrefer constant. Pour les contacteurs et les relais, le mouvement est une translation à entrefer variable.

Actuellement, certains relais commercialisés fonctionnent avec des aimants permanents. Ces dispositifs de puissance faible ont généralement un fonctionnement bistable, c'est-à-dire qu'ils ont deux positions de repos sans courant d'excitation.

Par contre dans le cas des contacteurs, dont la taille et les pouvoirs de fermeture et de coupure sont plus élevés, l'excitation est uniquement faite par un ou plusieurs bobinages. Mais ils ont généralement un fonctionnement monostable.

Pourquoi ne pas envisager d'utiliser également des aimants permanents dans ces dispositifs, et quelles améliorations peut-on en attendre ?

La présente étude se propose d'essayer de répondre à cette question.

Après l'analyse du fonctionnement de contacteurs classiques (chapitre I), nous évaluerons les

échanges énergétiques dans ces systèmes et les avantages théoriques que peuvent apporter les aimants permanents (chapitre II). Nous compléterons cet aspect en étudiant des systèmes réels basés sur ce principe (chapitre III) et en comparant les performances de deux systèmes élémentaires (chapitre IV). Nous rechercherons les configurations les plus performantes, tant du point de vue magnétique (chapitre V), que géométrique (chapitre VI). Ces configurations seront ensuite optimisées à l'aide de techniques de CAO (chapitre VII). Les résultats de cette étude seront vérifiés expérimentalement (chapitre VIII).

CHAPITRE I

LES CONTACTEURS

I - LES CONTACTEURS ELECTROMAGNETIQUES

I - 1 Principe de fonctionnement des contacteurs industriels

Les contacteurs électromagnétiques occupent aujourd'hui une place essentielle dans le milieu industriel. Nous les retrouvons par exemple dans tous les appareillages où le circuit électrique de commande et le circuit de puissance doivent être isolés l'un de l'autre. En effet, une excitation de commande souvent faible permet de fermer ou d'ouvrir **mécaniquement** les contacts dans lesquels va transiter une puissance beaucoup plus importante.

La figure I - 1 représente un contacteur électromagnétique à courant alternatif en vue éclatée.

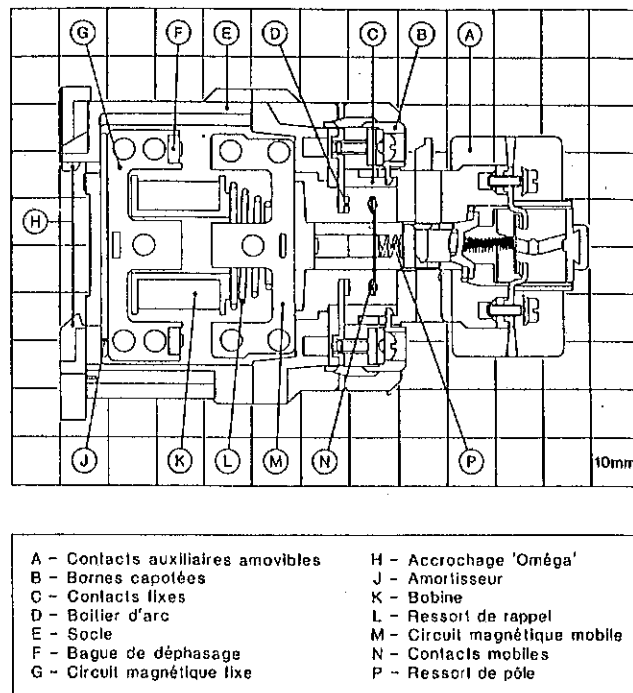


Figure I - 1 : Contacteur électromagnétique
(Document Télémécanique Electrique).

Lorsque l'on alimente la bobine (K), celle-ci crée un champ magnétique et donc des forces électromagnétiques tendant à rapprocher la partie mobile (M) de la partie fixe (G). Chaque partie supporte une rangée de contacts (en (N) contacts mobiles). Lorsque la bobine n'est plus alimentée, le ressort (L) sépare la partie mobile de la partie fixe et la ramène en position initiale entraînant de ce fait la rangée de contacts qui lui est associée.

Deux types de phénomènes apparaissent dans un tel dispositif :

- Les phénomènes électromagnétiques et mécaniques du circuit primaire (bobine d'excitation et

circuit magnétique). Ces phénomènes nous intéressent tout particulièrement et nous détaillerons dans le paragraphe suivant les principales contraintes industrielles qui leur sont associées.

- Les phénomènes essentiellement électriques du circuit secondaire au niveau des contacts. Parmi ceux-ci, il faut citer notamment la création d'un arc électrique au moment de la séparation des contacts. Cet arc est l'un des principaux responsables de l'usure de ces contacts dont dépend directement la durée de vie du contacteur.

I - 2 Contraintes industrielles classiques pour un contacteur électromagnétique

Nous allons citer ici les principales contraintes imposées au fonctionnement électromécanique du contacteur industriel. Ces contraintes sont de plusieurs ordres :

I-2.a Electriques

La norme électrique impose certaines conditions sur le fonctionnement d'un contacteur industriel. On distingue ainsi fonctionnement à froid, à chaud (la température du fil atteignant environ 130 °) contacts neufs ou usés...

Nous retiendrons les contraintes suivantes (U_n désigne la tension nominale de fonctionnement, U la tension réelle d'alimentation) :

- en position initiale ouverte

Si $U > 0,85 U_n$ (à chaud) \Rightarrow fermeture obligatoire

- en position fermée

Si $U > 0,75 U_n$ (à chaud) \Rightarrow maintien en position fermée

Si $U < 0,10 U_n$ \Rightarrow ouverture obligatoire

I-2.b Mécaniques

Ces contraintes mécaniques peuvent être représentées par une courbe d'effort résistant le long de la course du système.

- Le dispositif doit pouvoir soutenir sans dommage une accélération de 3g en position de repos.
- A un certain stade de la course, il doit surmonter un effort résistant supplémentaire correspondant à la mise sous pression des ressorts de contact. A titre d'exemple, la figure I - 2 montre la courbe d'effort résistant pour un contacteur classique de puissance moyenne [1].

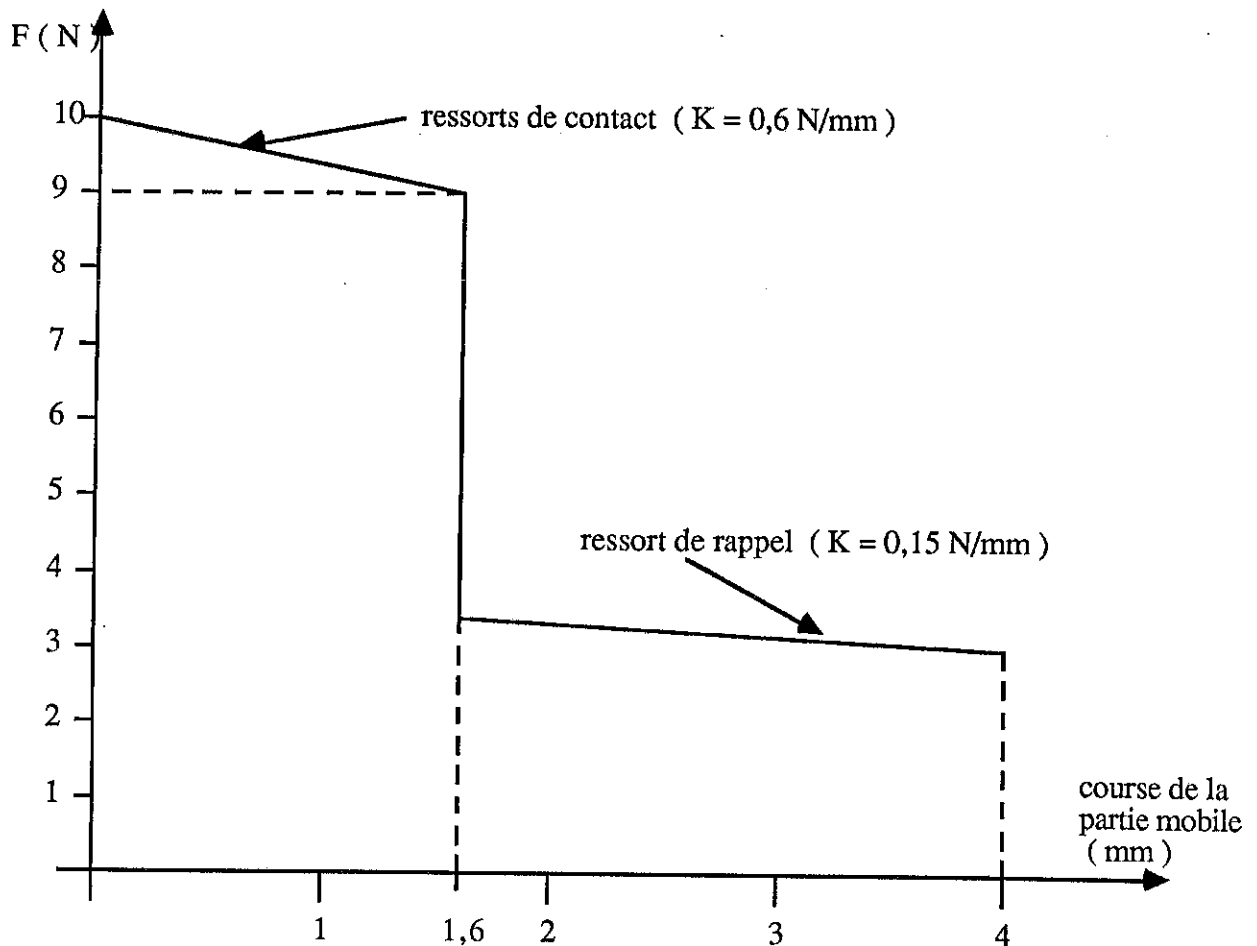


Figure I - 2 : Exemple de courbe d'effort résistant.

I-2.c Contraintes diverses

- Le contacteur doit fonctionner dans une gamme de température très large $[-40^{\circ}\text{C}, +70^{\circ}\text{C}]$.
- Dans le cas où celui-ci est alimenté en courant continu, les industriels utilisent un circuit magnétique feuilleté pour diminuer les pertes par courant de Foucault à l'établissement du courant dans la bobine.

I - 3 Rôle des contacteurs

Le nombre de contacteurs actuellement en service se chiffre en millions et de nombreux industriels se disputent le marché. Télémécanique Electrique en est le leader mondial face à des concurrents européens (Siemens, A.B.B.), américains (Allen Bradley) ou japonais (Matsushita).

Le contacteur électromagnétique tel qu'il a été défini est utilisé principalement pour des applications de moyenne et de forte puissance.

La plupart de ces constructeurs fabrique également des relais électromagnétiques. Ces composants, de principe similaire à celui des contacteurs, permettent de faire transiter des puissances plus faibles dans un encombrement réduit.

Cependant, malgré un fonctionnement identique, relais et contacteurs connaissent un développement technologique bien différent.

II - COMPARAISON ENTRE LES RELAIS ET LES CONTACTEURS ELECTROMAGNETIQUES

II - 1 Technologie des relais électromagnétiques

Selon la norme DIN 41215 :

"Un relais électromagnétique est un composant dans lequel une force électromagnétique actionne les contacts soit directement ou au moyen d'un levier. Ce type de relais possède au maximum trois positions et est conçu pour réaliser des interfaces électriques ainsi que pour traiter des informations électriques".

Nous pouvons considérer que le contacteur électromagnétique répond également à cette définition. Cependant, le fonctionnement magnétique des relais est aujourd'hui bien différent de celui des contacteurs.

En effet, d'après H. Sauer [2], on peut distinguer **trois générations de relais** :

- 1) Pendant longtemps, ceux-ci ont été conçus selon le même principe que les contacteurs.
- 2) A partir de 1968, en raison d'un besoin de miniaturisation pressant, on vit apparaître sur le marché un relais avec un circuit magnétique comportant des aimants permanents. Ceux-ci avaient pour but de créer un champ magnétique permanent, et ainsi de diminuer la puissance de commande nécessaire, et donc le volume de la bobine. On appelle ce phénomène l'effet de "**polarisation du circuit magnétique**".
- 3) Enfin, la 3ème génération de relais serait apparue avec l'association d'un relais polarisé et d'un circuit de commande électronique perfectionné.

Il est indéniable que l'utilisation des aimants permanents a révolutionné la conception des relais électromagnétiques. On peut alors se demander pourquoi la technologie des contacteurs n'a pas connu un développement similaire.

Il nous semble qu'il y a deux raisons principales à ce phénomène :

- 1) Relais et contacteurs sont souvent utilisés différemment dans l'industrie : les contacteurs ont en général une seule position de repos sans excitation (fonctionnement monostable) tandis que les relais en ont fréquemment deux (bistable) voire trois (tristable). De ce fait, le fonctionnement des relais

s'accorde beaucoup mieux à l'utilisation des aimants.

2) Le besoin de miniaturisation concerne beaucoup moins les contacteurs que les relais. Il est donc normal que la mutation technologique touche ceux-ci en premier.

Les technologies mises en oeuvre dans les relais et les contacteurs sont donc directement issues de l'utilisation industrielle différente de ces produits.

II - 2 Orientation de nos travaux

Nous sommes en présence de deux dispositifs très proches mais également très différents.

D'une part, un contacteur électromagnétique :

- moyenne ou forte puissance
- fonctionnement monostable
- excitation par une ou plusieurs bobines

d'autre part un relais électromagnétique :

- faible puissance
- fonctionnement le plus souvent bistable
- excitation mixte par une bobine et un aimant permanent.

Notre but sera d'étudier la faisabilité et les performances d'un système intermédiaire qui présenterait les caractéristiques suivantes :

- Puissance moyenne
- Fonctionnement monostable
- Excitation mixte.

Le système devant évidemment être aussi performant que possible.

Nous allons donc étudier les possibilités d'utilisation d'aimants permanents dans le circuit magnétique des contacteurs électromagnétiques.

III - OBJECTIFS DE L'ETUDE

Nos travaux comporteront trois parties :

III - 1 Etude théorique des effets de la polarisation

Pour mettre au point un dispositif aussi efficace que possible, il est indispensable de bien connaître

les phénomènes physiques mis en jeu.

Pour cela, plusieurs étapes sont nécessaires :

- la mise en évidence des avantages des systèmes polarisés sur les systèmes non polarisés.
- l'étude critique des techniques de polarisation existantes
- l'amélioration éventuelle de ces techniques dans le but d'obtenir un système aussi performant que possible.

III - 2 Mise au point pratique

A partir des résultats de l'étude théorique précédente, nous utiliserons conjointement deux méthodes pour améliorer notre dispositif :

- l'utilisation de logiciels de CAO en électromagnétisme en 2D et en 3D, pour optimiser la géométrie de notre système.
- la validation de nos calculs théoriques ou numériques par des essais sur prototypes.

IV - LIMITES DE NOS TRAVAUX

Comme nous l'avons signalé précédemment, nous nous intéressons exclusivement à l'aspect actionneur électromagnétique du contacteur et notamment à la recherche d'une configuration du circuit magnétique aussi performante que possible.

D'autre part, et sauf cas particulier précisé, nous nous placerons :

1) en régime permanent et statique.

Nous négligeons ainsi le régime transitoire d'établissement du courant et les phénomènes dynamiques dûs au mouvement de la partie mobile.

2) en régime linéaire.

Nous négligeons également l'effet de saturation des tôles magnétiques. Ceci sera fait notamment dans la première phase théorique de l'étude.

V - VOCABULAIRE

Il nous semble utile pour le lecteur de préciser quelques termes ou expressions qu'il rencontrera couramment dans la suite de cette thèse.

- excitation :

alimentation de la bobine de commande. Par extension, désigne également le courant dans cette bobine.

- position de repos :

position stable du système en l'absence d'excitation.

- position de travail :

position stable du système avec excitation.

- monostable :

se dit d'un système n'ayant qu'une position de repos.

- bistable :

se dit d'un système ayant deux positions de repos.

- induction

champ
flux

} **magnétique permanent :** induction, champ, ou flux créés par un aimant permanent.

- induction

champ
flux

} **magnétique d'excitation :** induction, champ, ou flux créés par la bobine de commande.

- décollement :

se dit d'un système qui, sous l'action de l'excitation quitte sa position de repos pour sa position de travail.

- rappel :

se dit d'un système monostable qui, à la coupure de l'excitation revient à sa position de repos soit de lui même, soit sous l'action de forces extérieures.

CHAPITRE III

INTERET DE LA POLARISATION

I - ETUDE D'UN CONTACTEUR ELECTROMAGNETIQUE CLASSIQUE

I - 1 Fonctionnement électromagnétique d'un système non polarisé

Un contacteur de type classique est actionné par un électro-aimant. Nous pouvons schématiser son circuit magnétique de la façon suivante (Figure II - 1) :

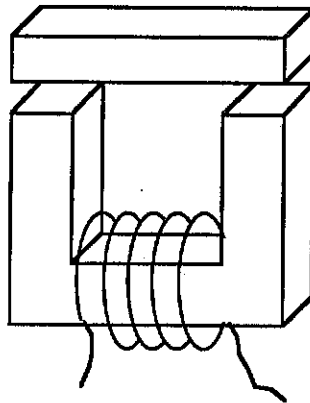


Figure II - 1 : Circuit magnétique d'un système non polarisé.

Rappelons son principe :

Le circuit magnétique se décompose en deux parties : une culasse fixe et une armature mobile. Une bobine d'excitation est disposée sur l'une ou l'autre des parties selon les configurations. En position de repos, lorsque la bobine n'est pas alimentée, la partie mobile est maintenue par un ressort de rappel qui assure aussi la tenue du système aux forces parasites (inertie, chocs,...).

Dès que la bobine est alimentée, elle crée un champ magnétique dans les entrefers, et donc des forces électromagnétiques. Celles-ci tendent dans un premier temps à vaincre les forces de rappel, puis à rapprocher l'armature mobile de la culasse fixe jusqu'au contact. Tant que l'excitation demeure, le dispositif est maintenu dans cette position. A la coupure du courant d'excitation, les forces magnétiques disparaissent, l'armature est alors ramenée en position initiale par l'intermédiaire du ressort de rappel.

Par son principe, ce système est donc monostable.

I - 2 Evaluation de la force électromagnétique créée par un électro-aimant

I-2.a Position du problème

Pour évaluer la force électromagnétique créée dans un tel dispositif, il est indispensable de connaître les valeurs d'induction et de champ magnétique en tout point et notamment dans l'entrefer. La figure II - 2 représente la répartition du flux magnétique.

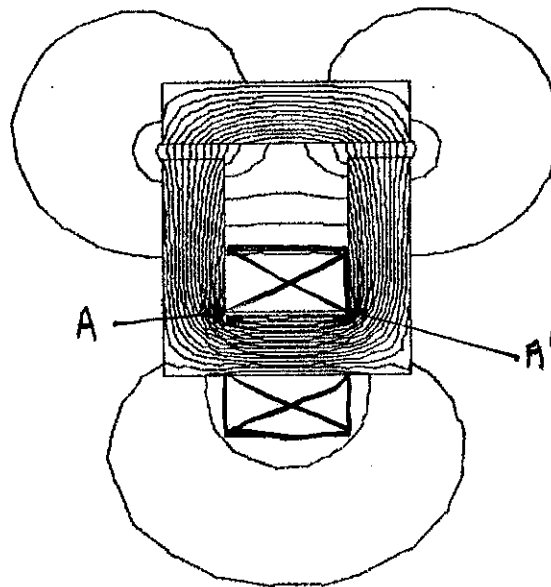


Figure II - 2 : Répartition du flux magnétique.

On constate plusieurs phénomènes :

- Les fuites de flux magnétique hors des entrefers peuvent être très importantes selon la géométrie considérée. De ce fait, le flux "utile" dans les entrefers sera plus réduit que le flux total dans le circuit magnétique au niveau de la bobine.
 Dans le même ordre d'idées, il ne faut pas oublier les pertes de force magnétomotrice (fmm) correspondant aux imperfections du circuit ferromagnétique (entrefers parasites, perméabilité du fer imparfaite). Ceci contribue un peu à réduire l'efficacité de la bobine et peut jouer un rôle s'il y a des aimants permanents.
- La dispersion des lignes de flux dans l'entrefer nous permet de dire que le champ et l'induction magnétique ne sont pas uniformes ni en direction ni en intensité dans cette région.
- Aux points A et A' de la figure II - 2, on constate une concentration importante des lignes de flux. Ceci correspond à une induction magnétique élevée en ces points. On peut alors atteindre la saturation des tôles magnétiques localement comme ici, suivant l'intensité du champ magnétique créé par la bobine.

La détermination exacte des grandeurs magnétiques champ, induction et force dans un dispositif même aussi simple que celui-ci est donc particulièrement délicate du fait de la complexité des phénomènes mis en jeu. Nous allons présenter les différentes techniques dont nous disposons fournissant ou approchant cette solution.

I-2.b Méthodes de calcul des grandeurs champ, induction et forces dans un dispositif électromagnétique

1) Méthodes analytiques

La méthode la plus classique consiste à effectuer un calcul analytique des grandeurs magnétiques

basé sur un modèle plus ou moins approché.

Ce calcul s'appuie :

- sur les relations de base de l'électromagnétisme dérivés des équations de Maxwell et appliquées au circuit magnétique
 - Théorème d'Ampère ($\text{rot } H = J$)
 - Conservation des flux ($\text{div } B = 0$)
- mais aussi sur des approximations plus ou moins élaborées des phénomènes complexes décrits plus haut.

On trouve dans la littérature [1], un certain nombre de formulations analytiques d'approche à la saturation donnant la valeur de l'aimantation en fonction du champ magnétique et des caractéristiques des matériaux pour des géométries particulières.

L'évaluation des coefficients de fuites magnétiques est également très importante mais extrêmement difficile. Ces coefficients dépendent de la géométrie et de la saturation et donc de la valeur de l'entrefer qui dans notre cas est variable. Certains ouvrages classiques [2], [3] fournissent des évaluations de ces coefficients pour différentes géométries mais ces formules sont souvent complexes.

Cette méthode analytique ne donne donc des résultats satisfaisants qu'au prix de calculs très difficiles et fastidieux.

2) Calcul analytique simplifié

Hypothèses de calcul

Nous considérons que :

- le champ et l'induction magnétiques sont uniformes dans l'entrefer.
- les parties ferromagnétiques ne sont pas saturées.

Nous pouvons alors appliquer les théorèmes classiques au circuit magnétique :

Conservation du flux :

$$B_f S_f = \sigma B_e S_e$$

Théorème d'Ampère :

$$NI = (2H_e e + H_f L_f)$$

Equations des milieux magnétiques :

$$B_f = \mu_0 \mu_r H_f$$

$$B_e = \mu_0 H_e$$

Avec :	e, S_e	: longueur et section de l'entrefer
	L_f, S_f	: longueur et section du fer
	μ_r	: perméabilité relative du fer
	B_f, H_f	: induction et champ magnétiques dans le fer
	B_e, H_e	: induction et champ magnétiques dans les entrefers
	σ	: coefficient de fuites magnétiques autour d'un entrefer

Si l'on suppose les sections égales ($S_e = S_f$) la résolution du système d'équations donne

$$B_e = \frac{\mu_0 NI}{2e + \frac{\sigma L_f}{\mu_r}} \quad (\text{II} - 1)$$

L'induction magnétique dépend donc :

- de paramètres géométriques : N, L_f, e (variable)
- de paramètres magnétiques : μ_0, μ_r
- de paramètres électriques : I (variable).

En général $\mu_r \gg 1$ (pour une tôle ferromagnétique classique). Par conséquent, on peut négliger le terme $\sigma L_f / \mu_r$ devant le terme $2e$.

Si l'entrefer devient trop faible, il faut impérativement tenir compte de la saturation, et l'équation (II-1) n'est plus valable.

Dans le cas linéaire , on peut définir un coefficient b tel que :

$$B_e = b I / e$$

b dépend de la géométrie et des grandeurs magnétiques et tient compte des coefficients de fuites.

En supposant que la répartition du champ et de l'induction magnétique soit uniforme dans l'entrefer, on peut évaluer simplement la force créée par l'électro-aimant dans chaque entrefer :

$$F = \frac{B_e^2 S_e}{2 \mu_0}$$

Soit sur deux entrefers :

$$F = \frac{B_e^2 S_e}{\mu_0} = \frac{b^2 S_e I^2}{\mu_0 e^2} = f \frac{I^2}{e^2} \quad \text{avec} \quad f = \frac{b^2 S_e}{\mu_0}$$

Ce coefficient f prend en compte les données géométriques et magnétiques du problème tout comme le coefficient b défini plus haut.

La force exercée sur la partie mobile est donc fortement non linéaire en fonction de l'entrefer. L'un des principaux inconvénients de ce système réside dans le fait qu'il fournit des forces très faibles à grand entrefer, c'est à dire en phase de décollement. Pour vaincre les forces de rappel, il faut que la bobine fournisse des Ampères Tours importants et donc consomme une grande quantité d'énergie électrique.

3) Méthodes numériques

L'arrivée depuis une quinzaine d'années d'ordinateurs de plus en plus puissants a permis de mettre en oeuvre des méthodes de calcul beaucoup plus précises mais inutilisables à l'échelle humaine compte tenu du grand nombre de calculs qu'elles impliquent.

A partir d'un découpage plus ou moins fin de la géométrie 2D ou 3D en " éléments finis", on évalue les grandeurs magnétiques, champ et induction en tout point de manière relativement précise. Ceci permet ensuite d'accéder par des méthodes d'intégration et de dérivation numériques à l'énergie et aux forces magnétiques.

L'un des inconvénients de cette méthode réside dans le fait qu'elle donne un résultat ponctuel, numérique donc chiffré, pour une géométrie donnée. On ne peut donc étudier l'influence d'un paramètre qu'après plusieurs manipulations pour différentes valeurs de ce paramètre.

Cette méthode s'applique donc beaucoup mieux à des études d'optimisation pour des dispositifs dont on connaît approximativement le fonctionnement et dont on cherche à améliorer la géométrie.

Pour cette raison, nous n'utiliserons dans un premier temps que les méthodes analytiques avec des modèles appropriés.

Les études d'optimisation numériques feront l'objet du chapitre VII dans lequel seront décrits plus précisément les méthodes et les logiciels utilisés.

I - 3 Bilan énergétique d'un système non polarisé

On considère le système précédent (cf Figure II - 1). Nous appellerons :

- E élec : énergie électrique fournie par l'alimentation
- E th : énergie thermique correspondant aux pertes par effet Joule

- E mec : énergie mécanique disponible
 E mag : énergie magnétique de l'ensemble (fer + entrefers)
 E cin : énergie cinétique de la partie mobile
 E choc : énergie transmise à l'arrêt en position de travail
 E ext : ensemble des énergies fournies par des sources extérieures (rappel mécanique, gravité,...)

Le bilan énergétique se présente ainsi :

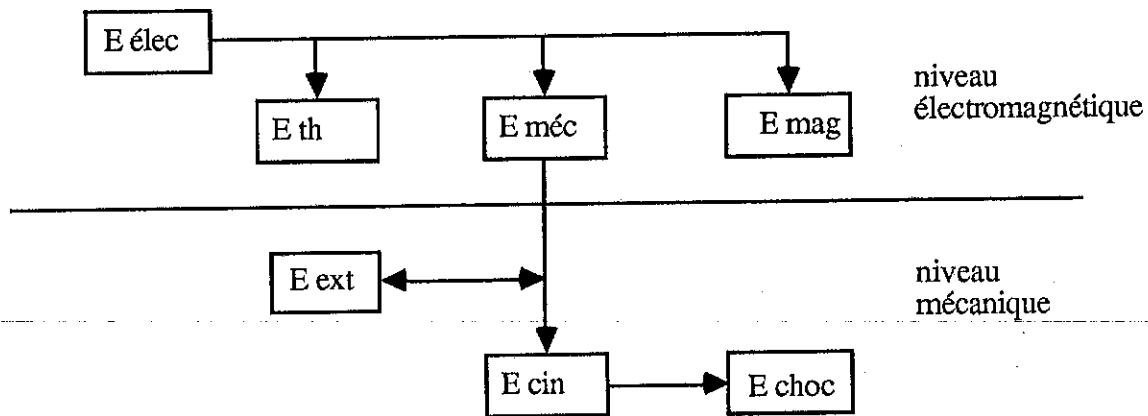


Figure II - 3 : Bilan énergétique d'un système non polarisé.

Les énergies extérieures peuvent permettre soit d'augmenter soit de diminuer l'énergie cinétique suivant le sens des forces qu'elles représentent.

La limite de séparation représente la frontière entre le comportement électromagnétique du système et son comportement mécanique. Le niveau supérieur permet ainsi d'évaluer l'induction dans le système, les forces électromagnétiques créées et les pertes par effet Joule. Le niveau inférieur fournit quant à lui la vitesse et l'accélération de la partie mobile [4].

On peut exprimer chacune des énergies considérées :

- $d E_{\text{élec}} = U \cdot I \, dt$
- $d E_{\text{th}} = R \cdot I^2 \, dt$ énergie perdue par effet Joule
- $d E_{\text{mec}} = - F \, dl$
- $d E_{\text{mag}} = d \left(\frac{1}{2} \iiint_V B \cdot H \, dv \right) = d \left(\frac{1}{2} L I^2 \right) = d \left(\frac{1}{2} * (NI)^2 / R \right)$

avec

- U : tension d'alimentation supposée constante
- I : courant dans la bobine
- R : résistance de la bobine
- L : inductance du circuit magnétique
- N : nombre de spires de la bobine

- R : réluctance du circuit magnétique.

On peut écrire l'équation électrique du système :

$$U = RI + d(LI)/dt$$

$$\text{d'où : } U I dt = R I^2 dt + L I dI + I^2 dL$$

$$\text{or } dE_{\text{mag}} = d\left(\frac{1}{2} L I^2\right) = L I dI + \frac{1}{2} I^2 dL$$

On obtient ainsi :

$$U I dt = R I^2 dt + L I dI + \frac{1}{2} I^2 dL + \frac{1}{2} I^2 dL$$

$dE_{\text{élec}}$	dE_{th}	dE_{mag}	$dE_{\text{méc}}$
--------------------	------------------	-------------------	-------------------

On voit donc que pour obtenir une certaine quantité de travail mécanique, il faut qu'il y ait au moins autant d'énergie magnétique présente dans le système. Cette énergie, n'intervient pas dans le fonctionnement mécanique du dispositif, mais représente cependant une partie importante de l'énergie électrique totale fournie.

Par conséquent, si l'on réduit cette énergie magnétique stockée dans le circuit magnétique, on pourra, à puissance électrique constante, augmenter l'énergie mécanique disponible.

On peut représenter cette énergie magnétique dans le cas simple où le courant final est atteint avant début du déplacement :

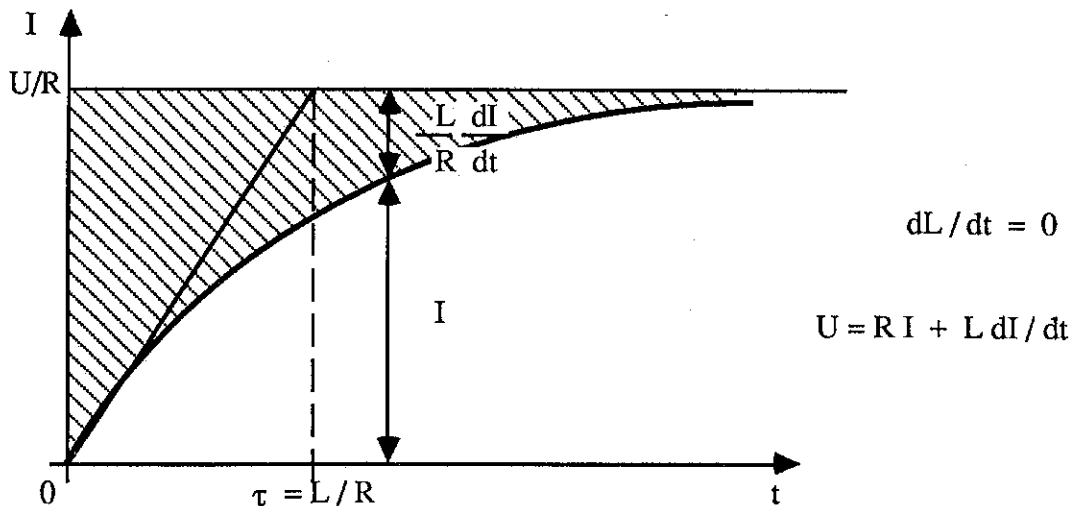


Figure II - 4 : Montée du courant sans déplacement.

Pour déterminer les échanges d'énergie, on écrit alors :

$$U I dt = R I^2 dt + L \frac{dI}{dt} I dt$$

On peut donc tracer la courbe des puissances :

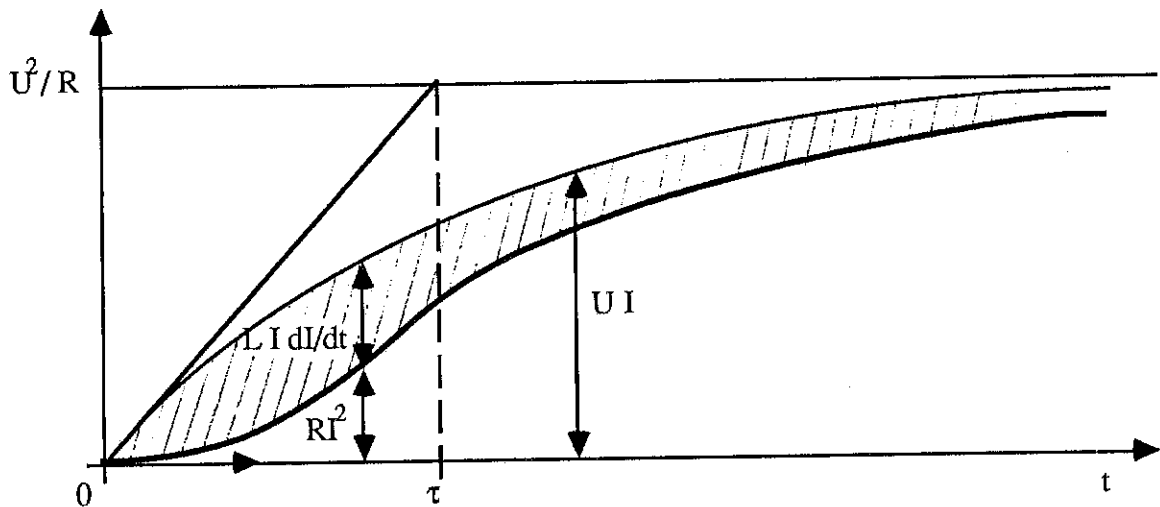


Figure III - 5 : Courbe des puissances.

L'aire hachurée correspond à l'énergie magnétique stockée à la fermeture du courant.

On retrouve également ce type de courbes si l'on fait le bilan énergétique d'un moteur pas à pas, en position rotor bloqué [5].

A partir de là, si l'on veut déterminer les différentes énergies pendant le déplacement, il faut d'abord résoudre les équations du système mécanique (donnant la vitesse et l'accélération) qui interviennent directement dans la résolution magnétique notamment par le biais de la variation de l'inductance, qui provoque à son tour une variation du courant et donc agit sur la force magnétique.

Les équations mécaniques ont donc une importance certaine, mais le fonctionnement d'un tel système dépend principalement de ses caractéristiques magnétiques.

Nous allons donc essayer d'améliorer celles-ci pour obtenir à puissance électrique constante, une énergie mécanique aussi grande que possible.

II - MISE EN EVIDENCE SUR DES SYSTEMES SIMPLES DES AVANTAGES DE LA POLARISATION

Pour montrer les avantages de la polarisation, nous avons choisi deux types d'entrefer polarisés sur lesquels nous allons étudier les forces et les énergies électromagnétiques et mécaniques mises en jeu (Figure II - 6).

D'autres méthodes ont été également développées. L'une d'entre elles figure en référence [6].

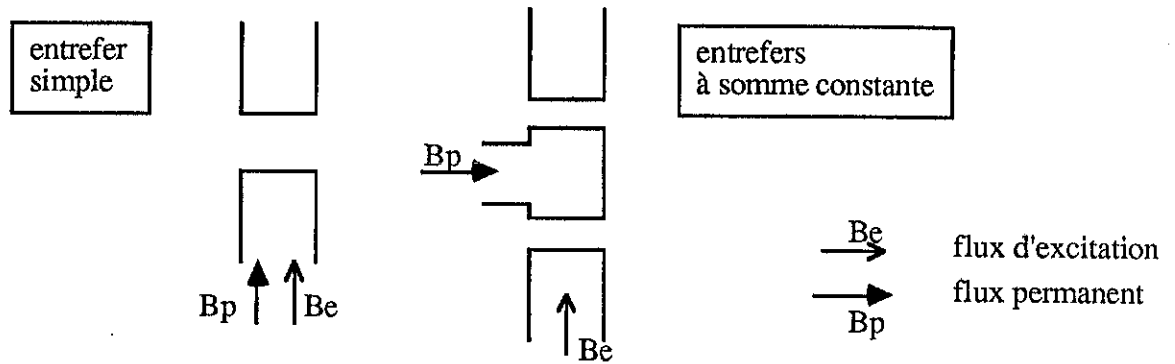


Figure II - 6 : Entrefers polarisés élémentaires

II - 1 Grandeurs utilisées pour la comparaison

Nous avons mis en évidence pour les systèmes non polarisés les deux sortes d'énergie qui déterminent l'évolution du système.

- l'énergie magnétique
- l'énergie mécanique.

Il serait donc intéressant d'évaluer et de comparer ces énergies pour les trois entrefers étudiés. Cependant, cette évaluation est particulièrement difficile. En effet, nous avons besoin de calculer les inductions et les forces tout au long de la course de la partie mobile.

Or ces grandeurs dépendent de la répartition du flux dans les entrefers et doivent prendre en compte en particulier les fuites magnétiques autour de ces entrefers.

Ces fuites se caractérisent par un coefficient σ qui varie de manière complexe en fonction de la position de la partie mobile.

De ce fait, nous pouvons uniquement déterminer les variations d'énergie sur un petit déplacement de la partie mobile pour lequel on peut considérer que les grandeurs magnétiques et notamment les coefficients de fuites ne varient pas.

Si l'on suppose que les deux seuls paramètres variables sont l'entrefer et l'intensité du courant dans la bobine, on peut écrire :

$$dE_{\text{mag}} = \left(\frac{\partial E_{\text{mag}}}{\partial e} \right)_{I_{\text{ct}}} de + \left(\frac{\partial E_{\text{mag}}}{\partial I} \right)_{\text{ect}} dI$$

avec $\left(\frac{\partial E_{\text{mag}}}{\partial e} \right)_{I_{\text{ct}}} = F = - dE_{\text{mec}}/de$

Pour un système non polarisé, on peut représenter la conversion Energie électrique-Force électromagnétique de la façon suivante (Figure II - 7) :

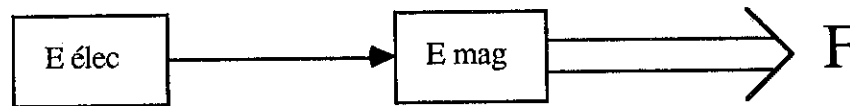


Figure II - 7 : Conversion Energie électrique - Force pour un système non polarisé.

Pour un système polarisé, ce schéma est un peu différent. En effet, en l'absence d'excitation, il existe une énergie magnétique permanente E_0 due à l'aimant placé dans le circuit magnétique. Cette énergie se traduit par une force permanente F_0 (cf figure II - 8).

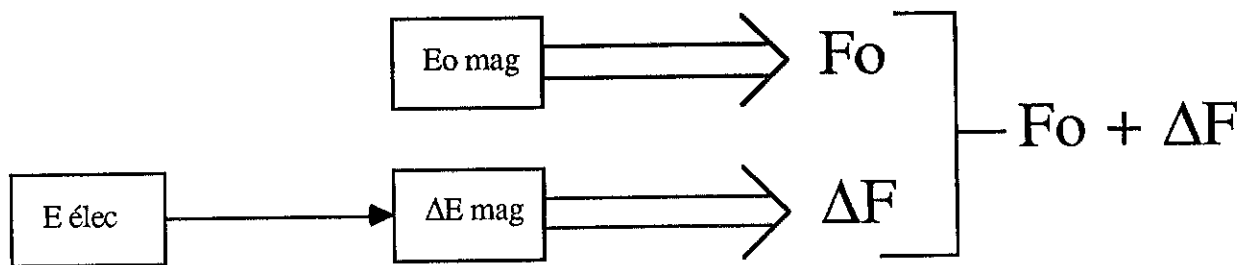


Figure II - 8 : Conversion Energie électrique-Force pour un système polarisé.

L'apport d'énergie électrique permet de créer un surcroît d'énergie magnétique ΔE_{mag} dans le circuit magnétique et donc une force supplémentaire ΔF .

Par conséquent, si l'on veut évaluer les performances des différents systèmes consommant une même énergie électrique, il faut comparer la force F créée dans l'entrefer non polarisé et les forces ΔF créées dans les entrefers polarisés.

Il ne faudra cependant pas perdre de vue la force permanente F_0 dans les entrefers polarisés. Celle-ci est souvent importante et nous verrons dans la suite qu'elle peut poser quelques problèmes .

II - 2 Hypothèses de calcul

Pour les mêmes raisons que précédemment, nous nous placerons dans le cadre d'hypothèses simplificatrices :

- Champ et induction magnétique uniformes dans l'entrefer
- Pas de saturation.

Nous supposerons également que les sources ne voient pas d'autres entrefers que ceux représentés ici et que les flux magnétiques se referment parfaitement autour de ces entrefers.

Cette hypothèse nous permettra d'évaluer les inductions magnétiques en fonction de l'entrefer et donc de calculer les forces mises à jeu.

Nous supposerons enfin que le flux magnétique permanent B_p ne dépend pas de la position de ce

système.

II - 3 Entrefer non polarisé

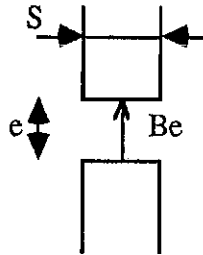


Figure II - 9 : Entrefer non polarisé

En l'absence d'excitation, il n'y a aucun champ magnétique dans l'entrefer, la force permanente est nulle.

Sous excitation, nous avons vu dans la première partie que l'induction magnétique pouvait se mettre sous la forme

$$B_e = b I / e$$

b étant un coefficient dépendant de la géométrie et de constantes magnétiques.

Dans la mesure où l'on néglige la contribution du flux de fuites dans le calcul de la force magnétique, on peut évaluer la force créée sous excitation dans un seul entrefer polarisé :

$$F = \frac{B_e^2 S}{2\mu_0} = \frac{b^2 S}{2\mu_0} \frac{I^2}{e^2} \quad \text{que l'on mettra sous la forme :}$$

$$F = f \frac{I^2}{e^2} \quad \text{avec} \quad f = \frac{b^2 S_e}{\mu_0}$$

II - 4 Entrefer polarisé simple

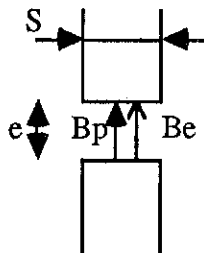


Figure II - 10 : Entrefer polarisé simple.

Force permanente

En l'absence d'excitation, il règne une induction magnétique permanente B_p représentant la polarisation du circuit magnétique.

Dans l'entrefer, l'intensité de l'induction magnétique diminue à cause des fuites. Celle-ci vaut alors B'_p avec

$$B'_p = B_p / \sigma$$

où σ représente le coefficient de fuites autour de l'entrefer.

Si l'on néglige toujours la contribution du flux de fuites dans le calcul de la force totale, on peut évaluer la force magnétique permanente F_o :

$$F_o = \frac{B_p^2 S}{2 \mu_o} = \frac{S}{2 \mu_o \sigma^2} B_p^2$$

que l'on peut écrire sous la forme :

$$F_o = f_o B_p^2 \quad \text{avec} \quad f_o = \frac{S}{2 \mu_o \sigma^2}$$

Force totale sous excitation

Comme précédemment, on peut évaluer l'induction magnétique B_e dans l'entrefer :

$$B_e = b I / e$$

La force totale vaut donc :

$$F = \frac{(B'_p + B_e)^2 S}{2 \mu_o}$$

$$F = \frac{S}{2 \mu_o \sigma^2} B_p^2 + \frac{2 B_p b I S}{2 \mu_o \sigma e} + \frac{b^2 S}{2 \mu_o} \frac{I^2}{e^2}$$

$$F = F_o + f \left(\frac{2 B_p}{\sigma b} \frac{I}{e} + \frac{I^2}{e^2} \right)$$

La variation de force ΔF créée par l'excitation vaut donc

$$\Delta F = f \left(\frac{2 B_p}{\sigma b} \frac{I}{e} + \frac{I^2}{e^2} \right)$$

Nous constatons tout d'abord de manière évidente que l'entrefer polarisé simple est le siège d'une force plus importante que l'entrefer non polarisé puisque l'expression de cette force contient un terme supplémentaire dû à l'interaction entre les champs magnétiques créés par la bobine et par l'aimant.

Ce résultat doit cependant être tempéré par le fait qu'il s'agit ici uniquement d'entrefers et non de systèmes réels où le circuit magnétique et l'arrangement des sources entre elles jouent un rôle important.

Ainsi, nous montrerons que pour obtenir un tel entrefer polarisé, il faut insérer l'aimant dans le circuit de la bobine ce qui modifie légèrement les équations magnétiques obtenues ici.

II - 5 Paire d'entrefers dont la somme est constante

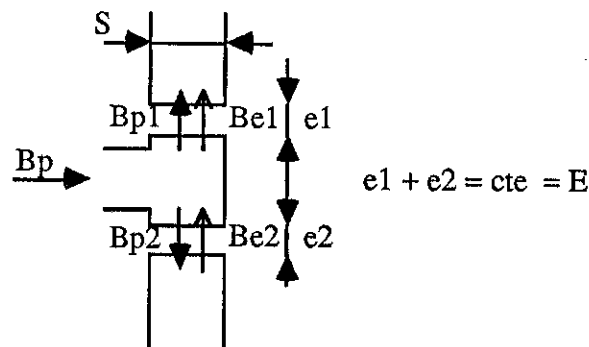


Figure II - 11 : Paire d'entrefers dont la somme est constante.

L'induction magnétique permanente B_p se répartit entre les deux entrefers e_1 et e_2 suivant la position du système.

Par contre, le flux d'excitation voit en série les deux entrefers.

Pour une position quelconque du système, à chaque entrefer e_1 , e_2 est associé un coefficient de fuites σ_1 , σ_2 .

Le calcul des inductions et des forces magnétiques est donc plus complexe que dans les deux cas précédents et figure en annexe I.

Force permanente

$$F_o = \frac{B_p^2 S E (E - 2e_1)}{2 \mu_o (\sigma_1 E + (\sigma_2 - \sigma_1) e_1)^2}$$

Force totale sous excitation

$$F = \frac{1}{(A e_1 + B)^2} \left[\frac{B_p^2 S E (E - 2e_1)}{2 \mu_o} + f \left(f_1 I^2 + \frac{2 B_p I}{b} (f_2 e_1 + f_3) \right) \right]$$

avec

f, b : coefficients rencontrés dans les deux cas précédents

$$A = \sigma_2 - \sigma_1 \quad B = \sigma_1 E$$

$$f_1 = \sigma_2^2 - \sigma_1^2 \quad f_2 = -A \quad f_3 = \sigma_2 E$$

la force ΔF créée par l'excitation vaut $F - F_0$ soit :

$$\Delta F = \frac{f \left(f_1 I^2 + \frac{2 B_p I}{b} (f_2 e_1 + f_3) \right)}{(A e_1 + B)^2}$$

Nous pouvons constater que dans ce cas, la force disponible sous excitation varie de manière beaucoup plus complexe en fonction des variables I et e que dans les deux cas précédents.

Nous allons cependant tenter de comparer les performances de ces trois systèmes.

II - 6 Comparaison des performances

II-6.a Cas du modèle général

Nous avons déjà constaté que l'entrefer polarisé simple était plus performant que l'entrefer non polarisé puisque la polarisation créait une force supplémentaire sur toute la course du système.

En ce qui concerne le deuxième type d'entrefers polarisés étudié, les équations complexes obtenues ne nous permettent pas de comparer les performances dans une position quelconque.

Nous allons donc nous placer dans une position particulière médiane. Dans cette position, les entrefers sont identiques et donc les coefficients de fuite également.

Nous obtenons alors :

$$\sigma_2 = \sigma_1 = \sigma \quad \text{et} \quad e = E/2$$

$$A = 0 \quad B = 2 \sigma e$$

$$f_1 = 0 \quad f_2 = 0 \quad f_3 = B = 2 \sigma e$$

ΔF vaut alors :

$$\Delta F = f \frac{B_p I}{\sigma b e}$$

Si l'on veut comparer ΔF avec la force F du système non polarisé, cela revient à comparer

$$B_p I / \sigma b e \quad \text{avec} \quad I^2 / e^2 \quad \text{ou encore} \quad B_p / \sigma \quad \text{avec} \quad b I / e$$

c'est à dire avec l'induction d'excitation B_e créée dans le système non polarisé.

Nous voyons ainsi apparaître l'opposition entre induction permanente et induction d'excitation.

Dans notre cas, nous travaillerons avec des puissances et donc des courants très réduits sur des entrefers relativement importants. Nous n'obtiendrons alors qu'une induction d'excitation faible comparativement à l'induction permanente que l'on peut obtenir avec un aimant.

Par conséquent, le deuxième type d'entrefers polarisés est également plus performant que l'entrefer non polarisé.

Pour compléter cette étude effectuée pour une position particulière, nous allons étudier un cas donnant lieu à des simplifications.

II-6.b Cas où les dimensions des surfaces d'échanges sont grandes devant l'entrefer

Dans ce cas, on peut considérer que les fuites magnétiques sont très réduites et donc que :

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma = 1$$

Les équations deviennent alors :

Entrefer non polarisé

$$F = \frac{\mu_o (NI)^2 S}{2 e^2}$$

Entrefer polarisé simple

$$\Delta F = \frac{B_p NI S}{e} + \frac{\mu_o (NI)^2 S}{2 e^2} \quad \text{et} \quad F_o = \frac{B_p^2 S}{2 \mu_o}$$

Paire d'entrefers polarisés

$$\Delta F = \frac{B_p NI S}{E} = \text{cste} \quad \text{et} \quad F_o = \frac{B_p^2 S (E - 2 e_1)}{2 \mu_o}$$

Définitions :

Pour permettre une comparaison aisée entre les différents systèmes, nous allons définir plusieurs paramètres supplémentaires.

Nous appellerons :

- e_i : l'entrefer initial en position de repos.

Dans le cas du deuxième type d'entrefers polarisés, on a : $e_i = E$.

- $x = e / e_{ini}$: représente la position du système par rapport à sa course totale :
 en position de repos $x = 1$
 en position de travail $x = 0$

- $\alpha = B_p / B_{e_{ini}}$: représente le rapport entre l'induction permanente B_p due à l'aimant et l'induction d'excitation dans l'entrefer en position initiale qui est identique dans les trois cas d'entrefers.

Dans le cas où les fuites sont négligeables $\alpha = B_p e / \mu_o NI$

- $\eta = \Delta F_{pol} / F_{npol}$: représente l'efficacité des deux types d'entrefers polarisés par rapport à l'entrefer non polarisé.

Nous allons donc tracer les variations de η en fonction de x pour différentes valeurs de α et pour les deux types d'entrefers polarisés (cf Figure II - 12).

Modifications des expressions

- Entrefer polarisé "simple"

$$\eta = \frac{\Delta F_{pol}}{F_{npol}} = \frac{\frac{B_p NI S}{e} + \frac{\mu_o (NI)^2 S}{2 e^2}}{\frac{\mu_o (NI)^2 S}{2 e^2}} = 1 + \frac{2 B_p e}{\mu_o NI}$$

$$\eta = 1 + 2 \alpha x$$

- Entrefers polarisés à somme constante

$$\eta = \frac{\Delta F_{pol}}{F_{npol}} = \frac{NI B_p S}{E} * \frac{1}{\frac{\mu_o (NI)^2 S}{2 e^2}} = \frac{2 B_p e^2}{\mu_o NI E}$$

$$\eta = 2 \alpha x^2$$

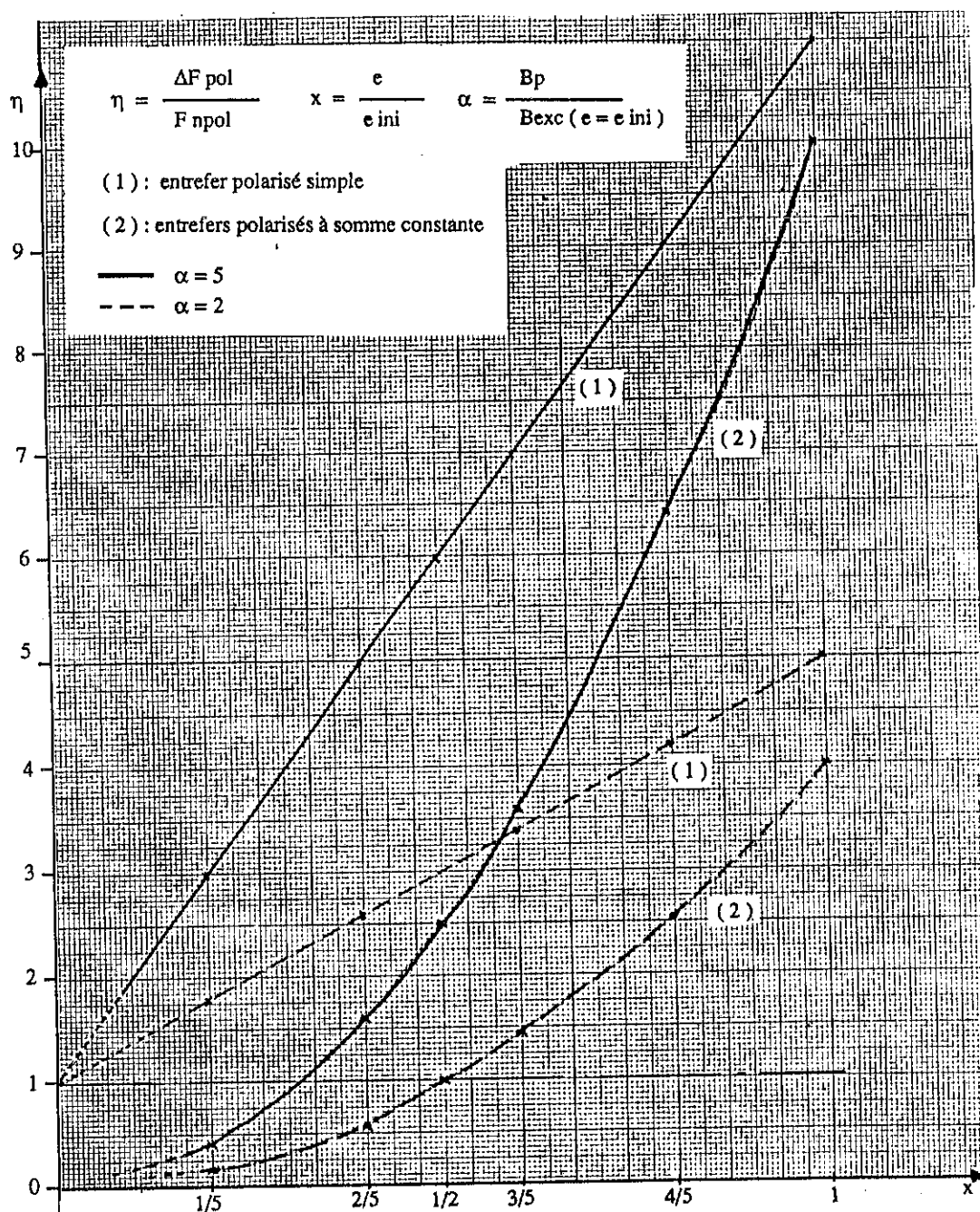


Figure II - 12 : Efficacité des entrefers polarisés.

Nous pouvons constater sur la figure précédente que les entrefers polarisés sont plus efficaces que l'entrefer non polarisé notamment en phase de décollement, et ce pour des valeurs usuelles de l'induction permanente B_p .

En effet, à titre d'exemple, nous pouvons calculer l'induction B_e d'excitation créée dans un entrefer de 5 mm sous 400 At (ordre de grandeur géométrique et magnétique que nous rencontrerons)

$$B_e \approx 0,1 \text{ T (fuites négligeables).}$$

Les possibilités actuelles des aimants nous permettent d'atteindre des inductions permanentes de l'ordre de 1T soit $\alpha = 10$, ce qui est encore supérieur aux valeurs considérées précédemment.

III - CONCLUSIONS

Nous avons mis en évidence sur des types d'entrefer simples les avantages de la polarisation.

Il nous reste à confirmer ces résultats sur des systèmes électromagnétiques réels et notamment sur les dispositifs déjà existants.

CHAPITRE III

**SYSTEMES POLARISES
MONOSTABLES EXISTANTS**

I - INTRODUCTION

Les aimants permanents sont déjà couramment employés dans les systèmes bistables, en particulier dans certains relais électromagnétiques.

Mais la nécessité d'un fonctionnement monostable pour certaines applications (dont la nôtre) a abouti à des solutions très diverses allant de la compensation mécanique la plus élémentaire jusqu'à l'utilisation de semi-conducteurs et de circuits intégrés.

Nous allons présenter dans ce chapitre divers systèmes monostables industriels, leurs avantages et leurs inconvénients.

II - ETUDE DES PRINCIPAUX SYSTEMES POLARISES MONOSTABLES EXISTANTS

II - 1 Monostable naturel [1]

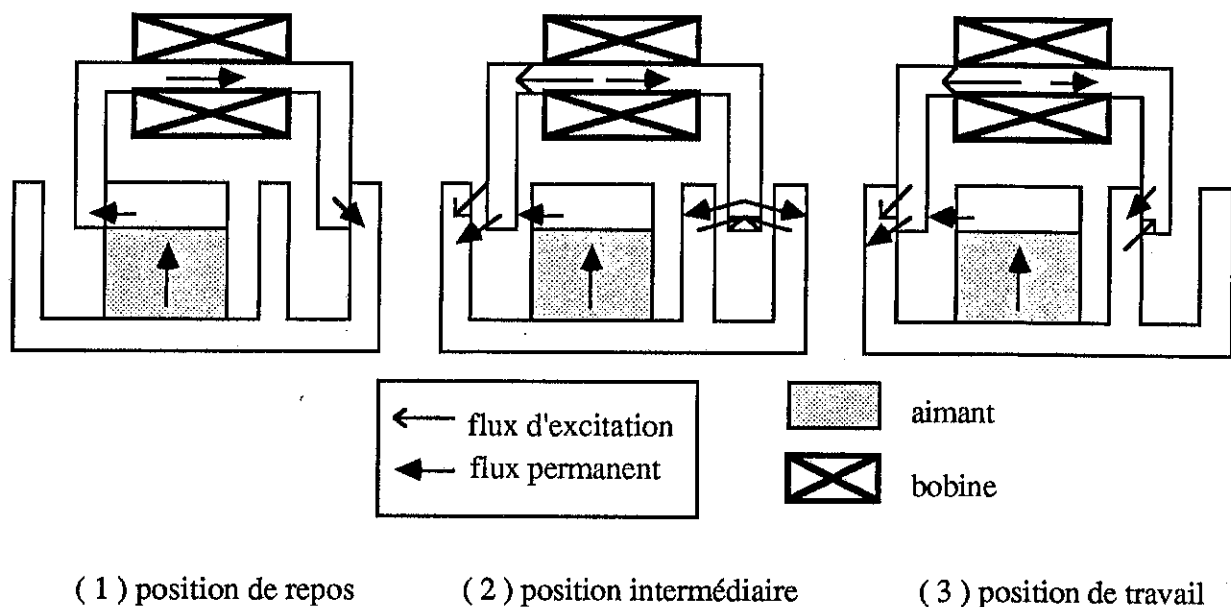


Figure III - 1 : Monostable naturel en positions de repos (1), médiane (2) et de travail (3).

Sans excitation, le flux magnétique de l'aimant est à l'origine de forces permanentes qui maintiennent le système en position de repos (1).

A la fermeture du courant d'excitation, deux phénomènes dissymétriques se produisent : dans les entrefers situés à gauche de l'aimant sur la figure, le flux d'excitation passe principalement par l'entrefer de travail car l'aimant relativement long représente quant à lui un entrefer très important. Par contre, dans l'autre paire d'entrefer, le flux d'excitation tend à s'opposer au flux permanent dans l'entrefer de repos encore fermé.

Au cours du déplacement de la partie mobile (2), les deux flux se répartissent dans les entrefers de repos et de travail mais toujours opposés l'un à l'autre. En position finale (3), le flux de la bobine passe uniquement par les deux entrefers de travail fermés et voit donc un entrefer quasi nul.

Quand on coupe l'excitation, la force créée par l'aimant dans l'entrefer de repos gauche permet de ramener le système en position initiale.

Le principal inconvénient de ce système réside dans la mauvaise répartition des flux magnétiques. En effet, pour que le système soit aussi efficace que possible il faut augmenter la force dans les entrefers de travail et la diminuer dans les entrefers de repos. Il faut donc que l'action de la bobine tende à renforcer le champ magnétique dans un entrefer tout en le diminuant dans l'entrefer antagoniste.

On voit que dans ce cas, l'aimant contrecarre l'effet de la bobine dans l'un des entrefers de travail et joue essentiellement le rôle d'un ressort dans l'un des entrefers de repos. Le système est donc en déséquilibre et peu efficace.

II - 2 Monostable à aimant auxiliaire [2]

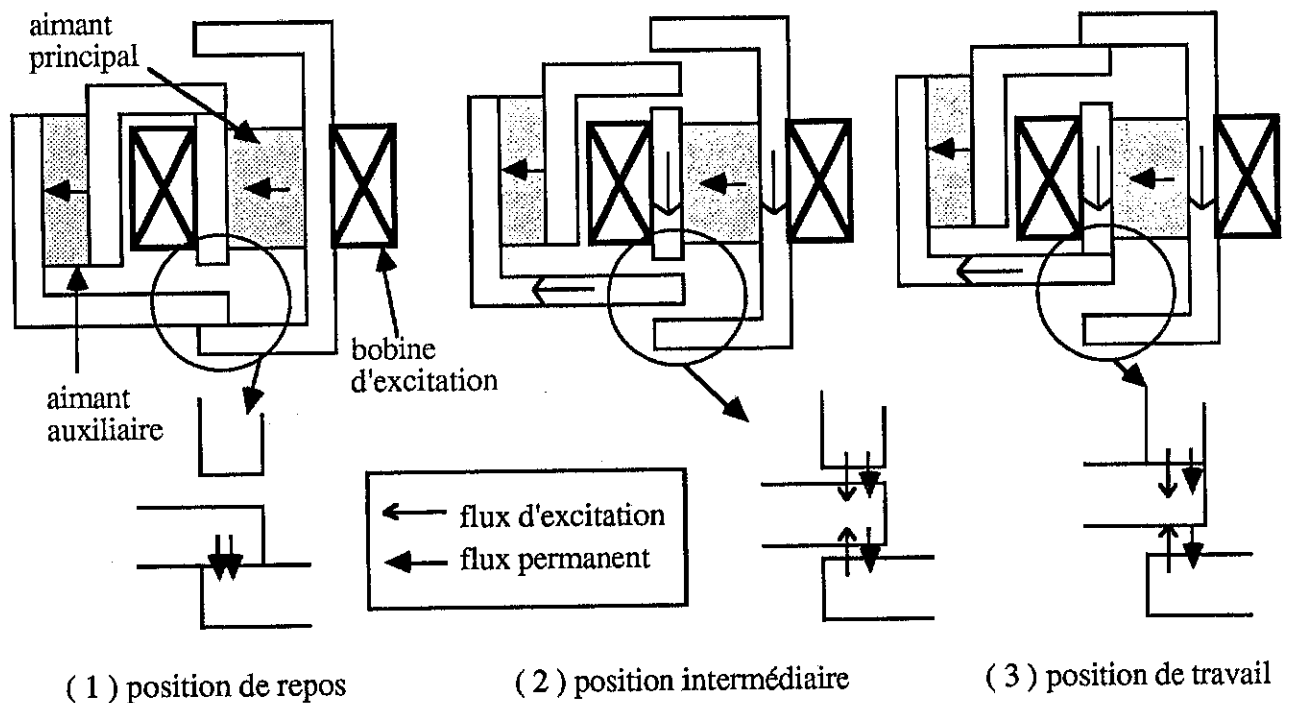


Figure III - 2 : Monostable à aimant auxiliaire

En l'absence d'excitation, le fonctionnement des deux aimants permet le rappel en position de repos (1). En effet, l'aimant auxiliaire tend à s'opposer à l'aimant principal dans les entrefers de travail et à renforcer son action dans les entrefers de repos. Le système revient donc dans sa position

initiale même à partir de la position de travail (3).

D'autre part, la bobine tend à renforcer le flux permanent principal dans les entrefers de travail et à s'y opposer dans les entrefers de repos, tout au long de la course du système (2). Son action permet à la partie mobile de gagner sa position de travail.

Le principal inconvénient de ce dispositif réside dans le fait que le flux de la bobine traverse l'aimant auxiliaire. Cet aimant constitue donc un entrefer inactif supplémentaire qui diminue notablement l'efficacité de l'excitation. De plus compte tenu des sens respectifs des flux de la bobine et de l'aimant auxiliaire il y a un risque important de désaimantation irréversible de cet aimant.

II - 3 Monostable à quadripôle [3]

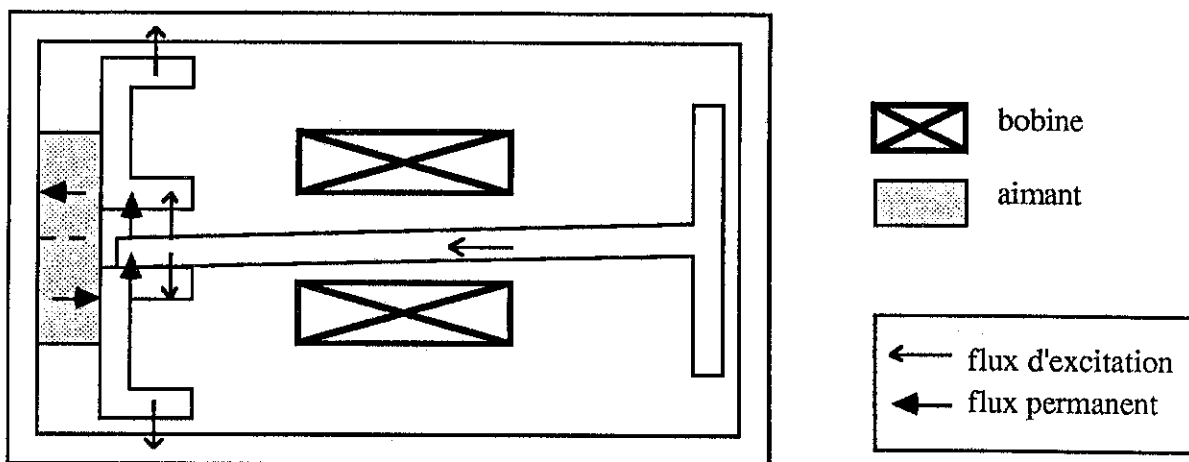


Figure III - 3 : Monostable à quadripôle en position de repos.

Le quadripôle peut être assimilé à deux aimants mis côte à côte mais d'aimantation opposée. Quelle que soit la position du système le flux de chaque aimant passe principalement dans l'un des entrefers qui lui est ainsi associé (cf Figure III - 3).

La bobine joue quant à elle, un rôle habituel de renforcement du flux dans l'entrefer de travail et de diminution dans l'entrefer de repos.

Si les deux aimants sont identiques, (ce qui correspond à un quadripôle symétrique), le système sera bistable. En effet, compte tenu des fuites inhérentes à tout circuit magnétique, la force créée par l'un des aimants dans l'entrefer fermé sera supérieure à la force créée par l'autre aimant dans l'entrefer ouvert.

Pour rendre ce système monostable, on dissymétrise le quadripôle, ce qui revient à augmenter la section de l'aimant de repos et à diminuer celle de l'aimant de travail. Dans ce cas, la différence entre les flux crée un déséquilibre entre les forces permanentes, ce qui permet le rappel en position de repos [4].

L'inconvénient de ce système est qu'il présente lui aussi des entrefers parasites qui diminuent son efficacité (cf Figure III - 4).

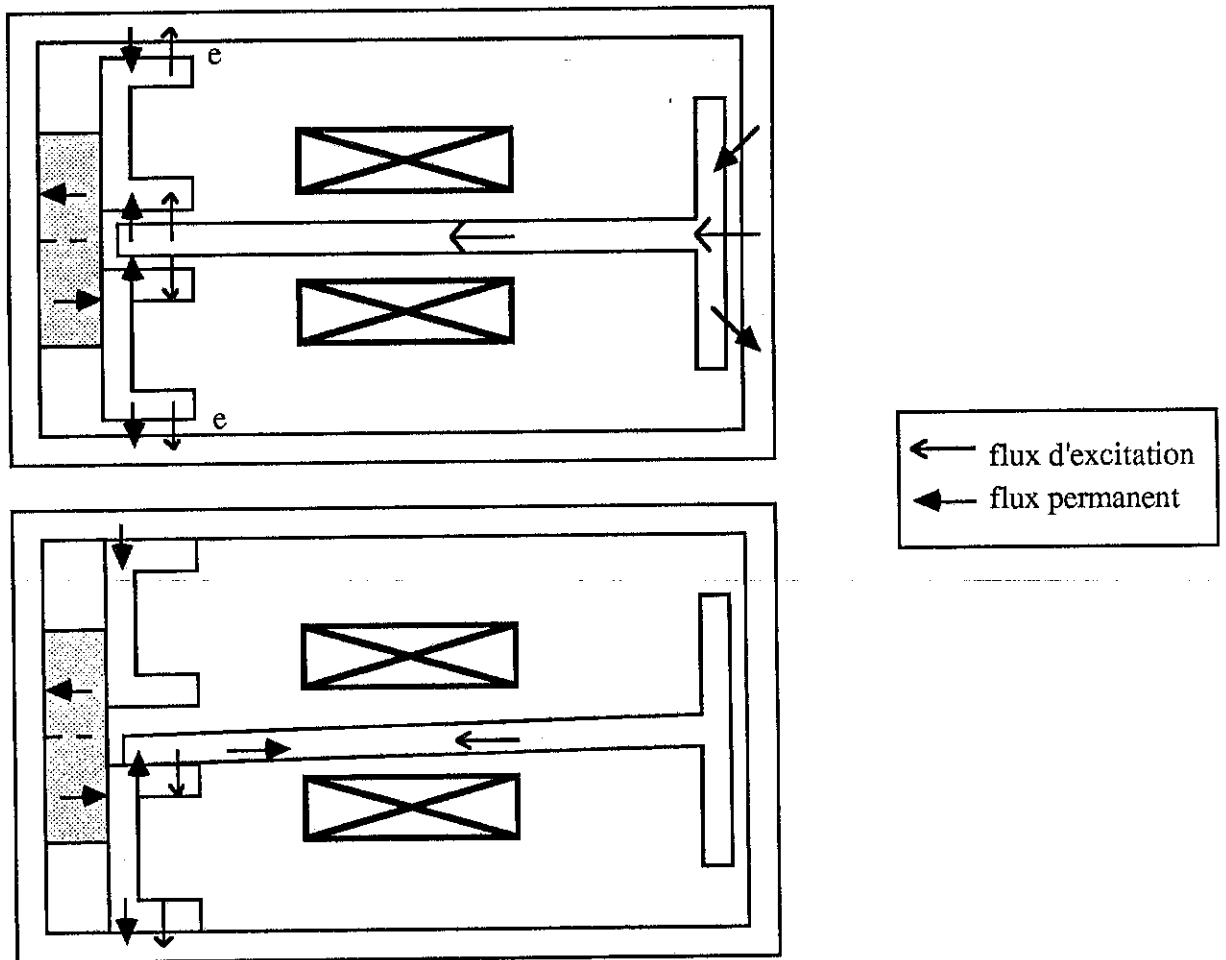


Figure III - 4 : Influence des entrefers parasites.

En effet, en l'absence d'entrefers e , en position de repos basse, les flux de la bobine et de l'aimant supérieur voient un circuit magnétique fermé et donc ne peuvent pas agir dans l'entrefer de travail, ce qui interdit le fonctionnement du système.

Des entrefers parasites dans le circuit de la bobine sont donc indispensables pour la bonne marche du dispositif.

II - 4 Monostable associé à un circuit intégré [5]

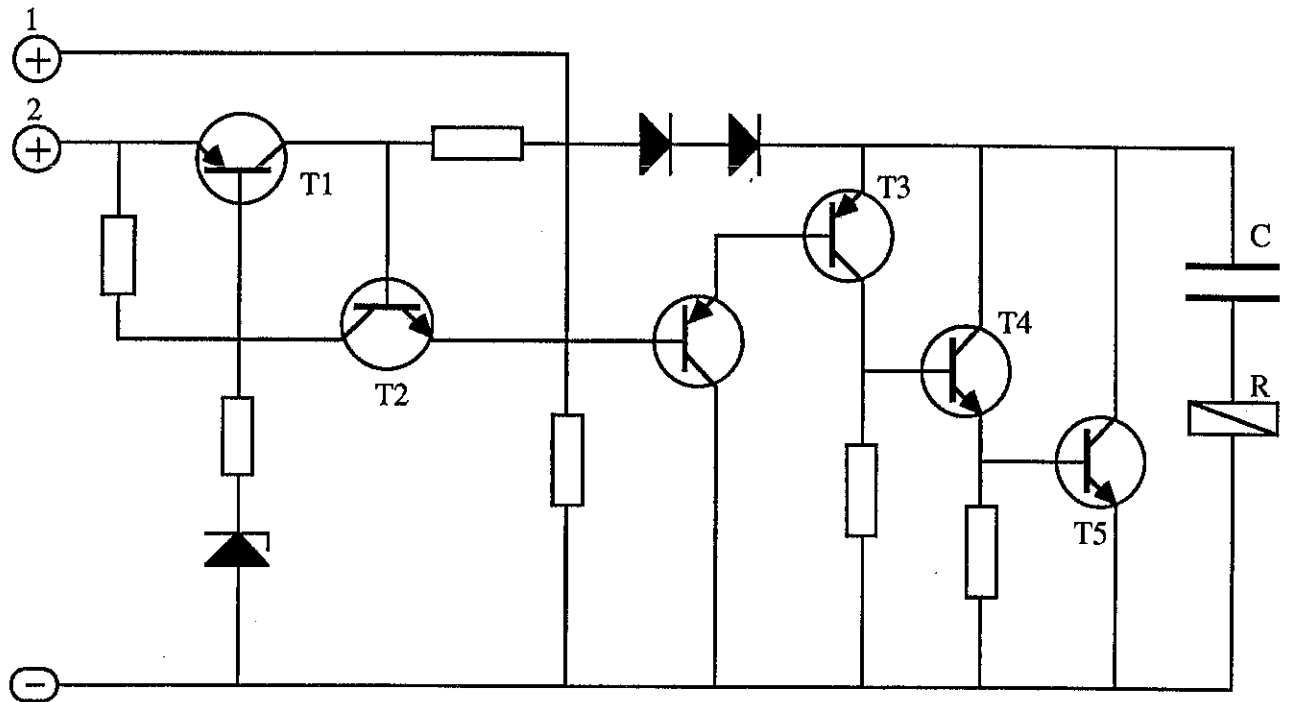


Figure III-5 : Monostable associé à un circuit intégré.

On dispose un relais bistable polarisé R en série avec une capacité C dont la valeur est définie selon les caractéristiques du relais. On alimente cet ensemble par l'intermédiaire d'un circuit électronique représenté en Figure III-5.

Deux entrées sont possibles :

- L'entrée (1) est utilisée lorsque l'on dispose d'une source de tension à flancs de montée très raides.
- Dans le cas contraire, l'entrée (2) permet de ne pas alimenter le système tant que la tension n'atteint pas une certaine valeur imposée par la diode Zener.

Lorsque l'ensemble R-C est sous tension, la capacité se charge et le relais commute ; le système est alors maintenu par l'aimant permanent jusqu'à ce qu'une tension inverse soit appliquée aux bornes du relais. C'est ce qui se produit à la coupure de l'alimentation principale. La capacité se met alors en parallèle par l'intermédiaire du circuit électronique sur le relais qui revient ainsi en position de repos [6].

La valeur de la capacité varie de 3 μF pour un relais consommant 0,1 W environ, à 500 μF pour un autre consommant 0,5 W (sous tension d'alimentation 12 V).

Ce dernier exemple utilise une technologie très différente de nos axes de recherche. Mais il montre

la variété des dispositifs utilisés pour obtenir un système monostable polarisé.

III - CONCLUSIONS

Ces quatre exemples donnent un aperçu des contraintes que posent les systèmes polarisés monostables.

La diversité des solutions envisagées montre bien que ce problème est loin d'être résolu. Par contre la polarisation est en général de type "parallèle" (avec quelques variantes).

CHAPITRE IV

COMPARAISON

THEORIQUE ET EXPERIMENTALE

DE DEUX CONFIGURATIONS

POLARISEES ELEMENTAIRES

I - INTRODUCTION

Pour confirmer les résultats précédents de manière à la fois théorique et pratique, nous avons choisi d'étudier et de tester expérimentalement deux systèmes polarisés élémentaires, sur lesquels nous évaluerons et mesurerons les forces électromagnétiques mises en jeu.

Pour les mêmes raisons que dans le chapitre II (difficulté d'évaluer les fuites, la non-uniformité du champ magnétique, et l'influence de la saturation), l'étude sera effectuée dans le cadre d'hypothèses simplificatrices :

- circuit ferromagnétique parfait de perméabilité infinie
- contribution du flux de fuites négligeable dans le calcul de la force magnétique

II - POLARISATION DITE "SERIE"

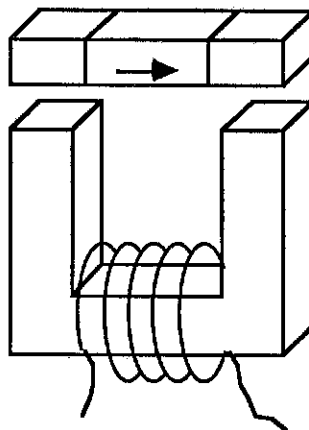


Figure IV - 1 : Système à polarisation série.

Dans un tel système, les circuits magnétiques vus par l'aimant et la bobine sont les mêmes. Les deux sources magnétiques sont dites "en série".

L'une des principales caractéristiques de la polarisation série réside dans le fait que l'aimant est situé dans le circuit magnétique de la bobine. Il constitue donc un entrefer supplémentaire qui diminue l'efficacité de l'excitation. Nous verrons ainsi que la longueur de l'aimant joue un rôle important pour le bon fonctionnement du système. En effet, si l'aimant est trop long, la bobine voit un entrefer trop important et n'est plus efficace ; par contre si l'aimant est très court, son point de fonctionnement va beaucoup varier avec l'entrefer, les fuites seront également plus importantes. De ce fait, la polarisation ne sera plus efficace.

II - 1 Etude théorique simplifiée

II-1.a Première approche

Comme nous travaillons en régime supposé linéaire, nous pouvons appliquer le principe de

superposition des états d'équilibre et calculer séparément les inductions et les champs magnétiques créés par les deux sources, l'aimant et la bobine.

Les cartes de flux obtenues dans chaque cas sont représentées en figure IV - 2.

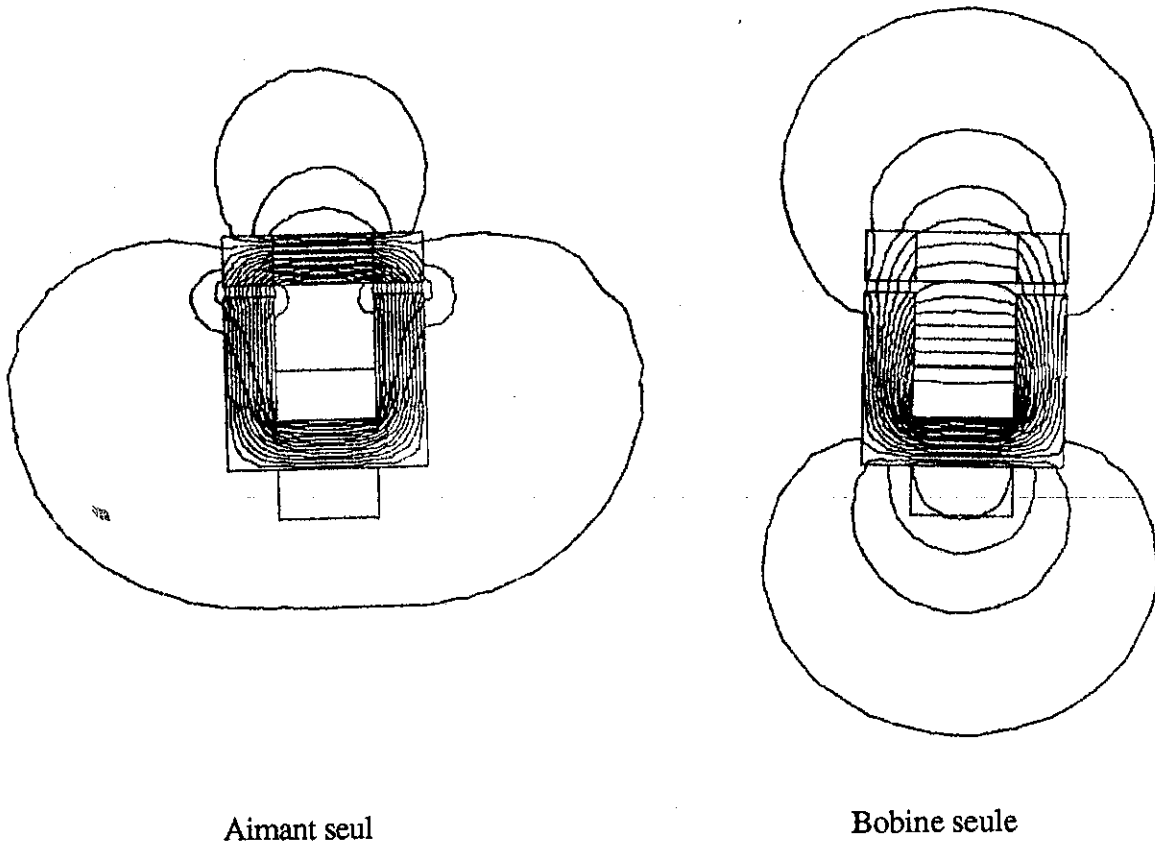


Figure IV - 2 : Cartes de flux obtenue pour chaque source.

Ces deux figures nous montrent les difficultés de mise en équations de ce type de systèmes, en particulier en ce qui concerne les fuites magnétiques.

En effet, les champs magnétiques sont créés par deux sources différentes placées en deux endroits différents du circuit magnétique. La répartition des flux se fait donc de manière également différente.

Examinons par exemple ce qui se passe autour de l'aimant :

- Du point de vue de la bobine, celui-ci constitue un entrefer comme un autre dans lequel les lignes de flux tendent à s'écarter. Celles-ci se resserrent ensuite dans la partie ferromagnétique.
- Par contre, le flux permanent créé par l'aimant soit passe dans les entrefers principaux et la majeure partie du circuit ferromagnétique, soit se referme directement autour de l'aimant sans passer dans le circuit principal.

Le comportement de ces deux flux est donc totalement différent et ne peut être représenté simplement si l'on veut utiliser les mêmes coefficients de fuite.

II-1.b Modèle utilisé

Nous utiliserons :

- d'une part le modèle ampérien pour représenter la masse aimantée de l'aimant.

Si cet aimant a une aimantation J et une longueur La , il est équivalent à une certaine distribution de courant fournissant des ampères-tours équivalents à $J La / \mu_0$ (cf figure IV - 3).

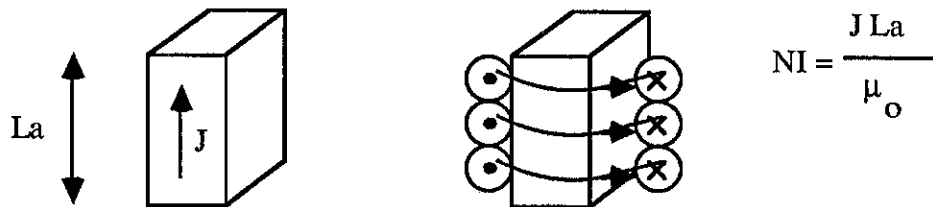


Figure IV - 3 : Représentation Ampérienne des volumes aimantés.

Ce modèle général s'applique particulièrement bien dans le cas où l'aimantation J est rigide. Dans le cas contraire (si par exemple l'aimant a une perméabilité relative différente de 1), l'aimantation varie en fonction du circuit magnétique vu par l'aimant, et il faut intégrer cette composante dans le calcul global.

- d'autre part, l'analogie circuit magnétique-circuit électrique. Ceci peut être fait puisque l'on suppose être en régime linéaire.

Ceci nous permettra de représenter les fuites par des réluctances équivalentes. Nous pourrons alors résoudre notre problème en calculant les flux magnétiques (équivalents aux courants électriques) dans les différentes branches du circuit.

Dans le cadre de ces modèles, nous pouvons représenter le schéma équivalent de notre circuit magnétique (en supposant que les parties ferromagnétiques ont une perméabilité infinie) :

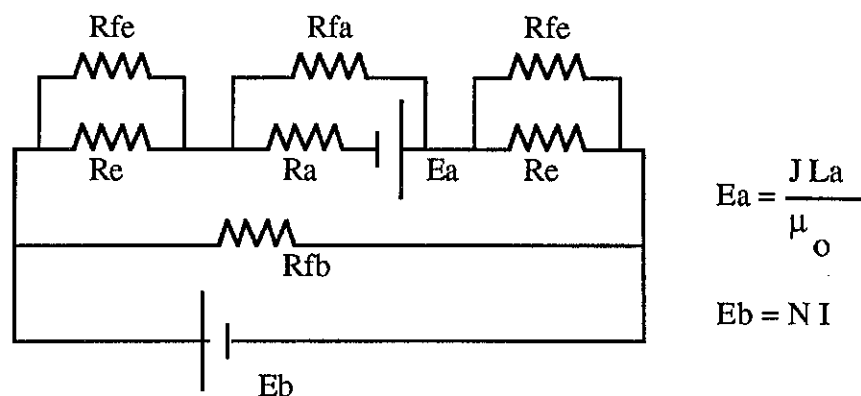


Figure IV - 4 : Schéma électrique équivalent.

avec :

$$R_e = e / \mu_0 S$$

S, e : section et valeur de l'entrefer.

$$R_a = L_a / \mu_0 S_a$$

S_a, L_a : section et longueur de l'aimant.

R_{fe} : réluctance équivalente aux fuites autour de l'entrefer.

R_{fa} : réluctance équivalente aux fuites autour de l'aimant.

R_{fb} : réluctance équivalente aux fuites entre les branches du circuit magnétique.

Evaluation de R_{fe} en fonction de R_e :

Le coefficient de fuites σ_e est défini comme suit :

$$\sigma_e = \Phi_{\text{tot}} / \Phi_e$$

avec Φ_{tot} : flux total

Φ_e : flux passant effectivement dans l'entrefer (cf figure IV - 5).

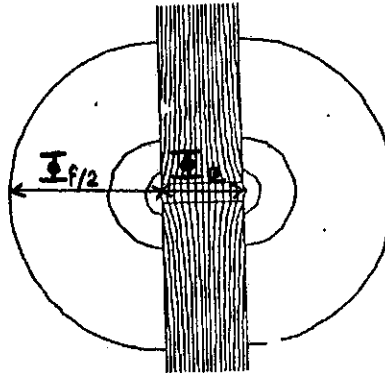


Figure IV - 5 : Répartition du flux dans un entrefer.

On peut également écrire que :

$$\Phi_e R_e = \Phi_f R_{fe}$$

$$\text{avec } \Phi_f = \Phi_{\text{tot}} - \Phi_e$$

$$\Phi_f = \Phi_e (\sigma_e - 1)$$

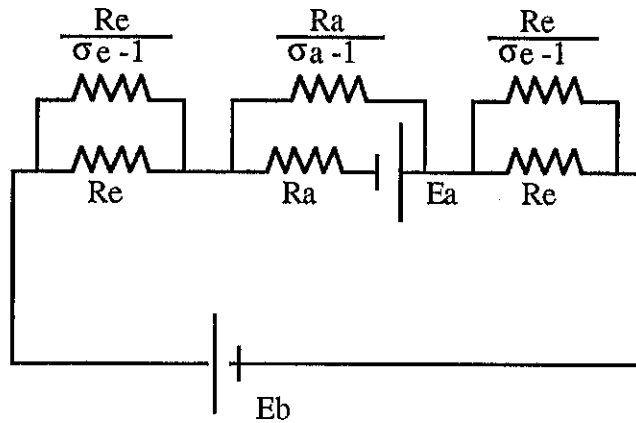
$$\text{d'où } R_{fe} = R_e / (\sigma_e - 1)$$

$$\text{De même } R_{fa} = R_a / (\sigma_a - 1)$$

On peut également ne pas tenir compte des fuites entre branches du circuit magnétique. En effet, du point de vue de l'aimant, tout le flux magnétique passe dans le circuit ferromagnétique (cf Figure IV - 2). La représentation de cette réluctance est donc inutile. D'autre part, la bobine impose aux

bornes des entrefers une ddp magnétique constante qu'il y ait des fuites ou non. Si l'on enlève cette réluctance, cela ne modifie en rien les flux magnétiques dans les autres parties du circuit magnétique.

Le nouveau schéma équivalent devient donc :



$$E_a = \frac{J L_a}{\mu_o}$$

$$E_b = N I$$

La résolution de ce système figure en Annexe II. Elle nous donne :

Induction dans les entrefers :

$$B_e = \frac{(B_r \frac{L_a}{\sigma_a} + \mu_o N I)}{2e + \frac{L_a \sigma_e}{\sigma_a}}$$

Le terme $\mu_o N I / [2e + L_a (\sigma_e / \sigma_a)]$ correspond à l'induction d'excitation créée par les ampères tours NI dans un circuit magnétique comportant un entrefer équivalent à $2e + L_a (\sigma_e / \sigma_a)$.

Le terme $(B_r L_a / \sigma_a) / [2e + L_a (\sigma_e / \sigma_a)]$ correspond à l'induction permanente créée par l'aimant de longueur L_a dans un entrefer $2e$. Il donne ainsi la variation du point de fonctionnement de l'aimant sur sa courbe d'aimantation en fonction de l'entrefer et des coefficients de fuites.

Force électromagnétique :

$$F = \frac{S}{\mu_o \left(2e + \frac{L_a \sigma_e}{\sigma_a}\right)^2} \left(B_r^2 \frac{L_a^2}{\sigma_a} + 2 B_r \mu_o N I \frac{L_a}{\sigma_a} + (\mu_o N I)^2 \right)$$

Nous constatons donc qu'il y a trois termes dans l'expression de la force électromagnétique :

- un terme représentant la force permanente en l'absence d'excitation

$$F_{\text{perm}} = \frac{S}{\mu_0 \left(2e + \frac{L_a \sigma_e}{\sigma_a} \right)^2} \left(B_r^2 \frac{L_a^2}{\sigma_a} \right)$$

- un terme dépendant uniquement de l'excitation

$$F_{\text{exc}} = \frac{S (\mu_0 NI)^2}{\mu_0 \left(2e + \frac{L_a \sigma_e}{\sigma_a} \right)^2}$$

- un terme dit de "polarisation" faisant intervenir les deux sources

$$F_{\text{pol}} = \frac{S}{\left(2e + \frac{L_a \sigma_e}{\sigma_a} \right)^2} \left(2 B_r NI \frac{L_a}{\sigma_a} \right)$$

Ces deux derniers termes nous intéresseront plus particulièrement car ils correspondent à la force apparaissant sous excitation. Celle-ci est alors directement comparable avec la force créée dans un système non polarisé classique. Dans notre cas, ce système non polarisé peut être obtenu en enlevant l'aimant du système et en imposant $L_a = 0$ dans les équations précédentes.

Néanmoins, la force permanente joue un rôle important dans le fonctionnement du système. En effet, elle tend à rapprocher la partie mobile de la partie fixe. Si l'on veut un fonctionnement monostable, il faut donc compenser cette force le long de la course du système, aussi parfaitement que possible pour ne pas diminuer l'efficacité du système sous excitation.

Pour l'instant, nous étudions l'efficacité du système sous excitation, aussi ne conserverons nous que les termes de la force dépendant de celle-ci.

II - 2 Importance de la longueur de l'aimant

Un tel système ne peut fonctionner correctement qu'avec une longueur d'aimant bien choisie en fonction des caractéristiques du problème.

En effet, si l'on considère une longueur d'aimant nulle, les systèmes polarisé "série" et non polarisé

sont équivalents. Par contre, si l'aimant est très long, la bobine voit un entrefer très important et crée une induction très faible et à la limite nulle. Le système polarisé n'est alors plus performant.

II-2.a Comparaison polarisé - non polarisé

On peut évaluer la longueur de l'aimant pour laquelle les deux circuits donnent des résultats équivalents. Nous avons dans ce cas

$$F_{\text{pol}} = F_{\text{npol}}$$

Soit

$$\frac{\mu_o (NI)^2 S + 2B_r \frac{L_a}{\sigma_a} NI S}{\left(2e + \frac{L_a \sigma_e}{\sigma_a}\right)^2} = \frac{\mu_o (NI)^2 S}{4e^2}$$

d'où l'on tire

$$L_a = \sigma_a \frac{4e}{\sigma_e} \left(\frac{2B_r \frac{e}{\sigma_e}}{\mu_o NI} - 1 \right)$$

Si $B_r < (\mu_o NI) / (2e / \sigma_e)$, le système non polarisé sera toujours plus performant.

II-2.b Longueur optimale de l'aimant

Celle-ci est obtenue pour $dF / dL_a = 0$, soit :

$$L_a = \sigma_a \left[2e / \sigma_e - \mu_o NI / B_r \right]$$

A chaque valeur d'entrefer correspond donc une valeur optimale pour la longueur de l'aimant. Suivant la zone de la course du système que l'on veut privilégier, on choisira la valeur de L_a .

Nous allons maintenant effectuer les mêmes calculs sur un autre type de système polarisé, puis nous comparerons l'ensemble des résultats.

III - POLARISATION "PARALLELE"

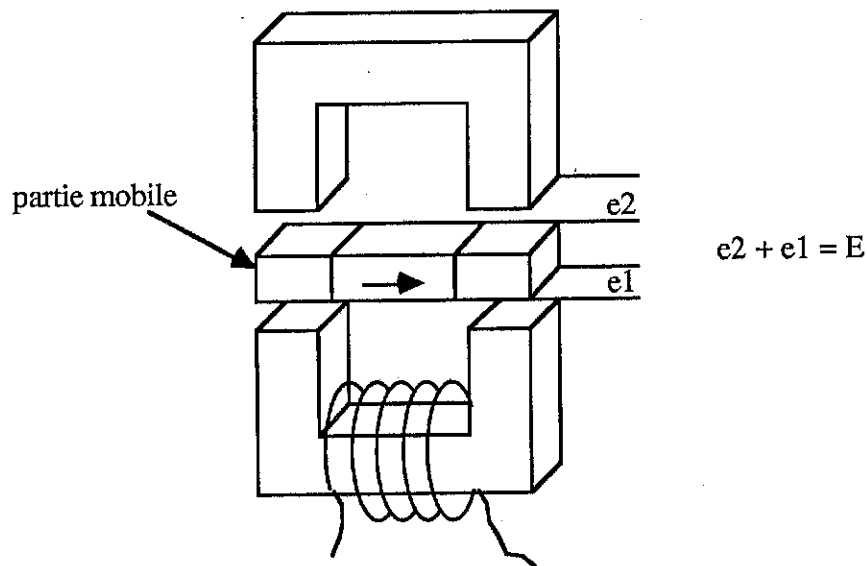


Figure IV - 6 : Système à polarisation parallèle [1].

La dénomination "polarisation parallèle" provient de la répartition particulière des flux permanent et d'excitation.

En effet, si l'on suppose (à section constante) la longueur de l'aimant L_a très supérieure à l'entrefer maximal vu par l'aimant $E/2$ (en position médiane), on peut considérer que le flux créé par la bobine ne traverse pas l'aimant. Celle-ci voit un entrefer constant valant alors $2(e_1 + e_2) = 2E$. Par contre, le flux magnétique permanent se répartit selon la position du système entre les deux paires d'entrefers e_1 et e_2 . Au cours de la course du système il y aura donc un basculement du flux permanent d'une paire d'entrefers vers l'autre.

III - 1 Fonctionnement

Principe

En l'absence d'excitation, la répartition du flux permanent dans les deux paires d'entrefers e_1 , e_2 crée des forces antagonistes de part et d'autre de la partie mobile. Ceci conduit par exemple à une position d'équilibre instable pour $e_1 = e_2 = E/2$ (dans le cas d'une géométrie symétrique).

A l'établissement du courant, le flux d'excitation parcourt l'ensemble du circuit ferromagnétique. Il tend donc à renforcer le flux permanent dans une paire d'entrefers et à le contrecarrer dans l'autre.

Plaçons-nous au repos dans la position d'équilibre médiane. L'excitation crée un déséquilibre entre les flux et donc entre les forces électromagnétiques agissant dans les entrefers antagonistes. Sous l'action de la résultante de ces forces, la partie mobile va se déplacer jusqu'au contact et atteindre sa position de travail.

Remarques

- Il faut noter que contrairement aux systèmes non polarisés, le sens du déplacement est fonction du sens du courant d'excitation.
- Ce système est naturellement bistable. Il faudra donc privilégier l'une des positions de repos par des moyens mécaniques ou autres pour obtenir un fonctionnement monostable.

III - 2 Etude théorique

Rappelons les principales hypothèses posées dans ce chapitre :

- Circuit ferromagnétique parfait de perméabilité infinie (donc pas de saturation)
- Aimantation rigide de l'aimant
- La section du système sera supposée constante.

Nous utiliserons également le modèle ampérien et l'analogie circuit électrique-circuit magnétique pour calculer les flux magnétiques dans notre système (cf figures IV - 7 et 8).

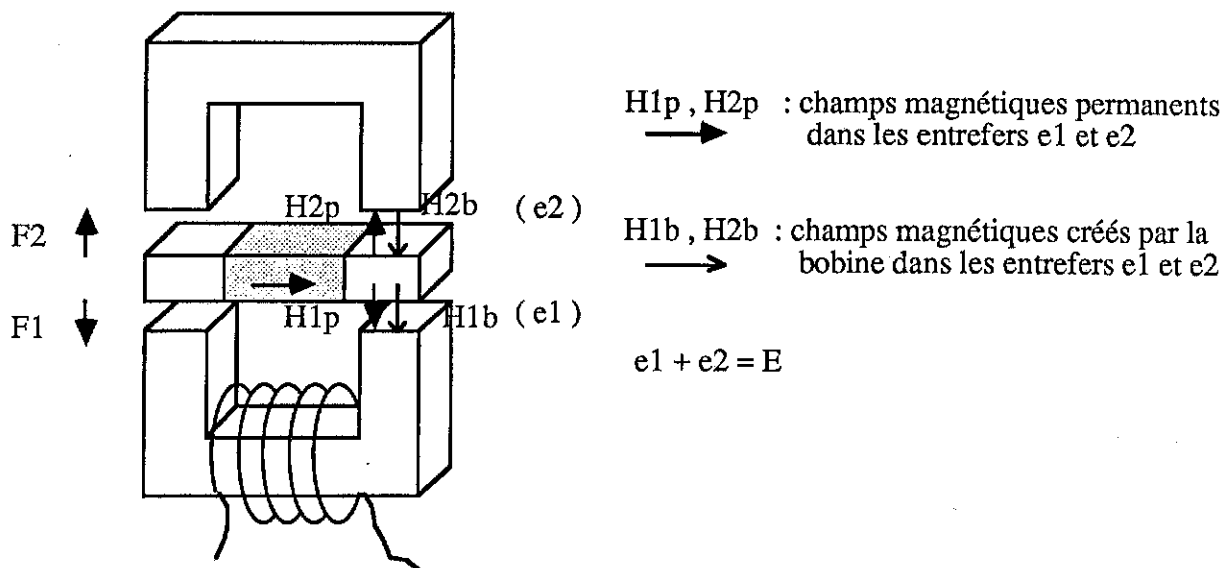
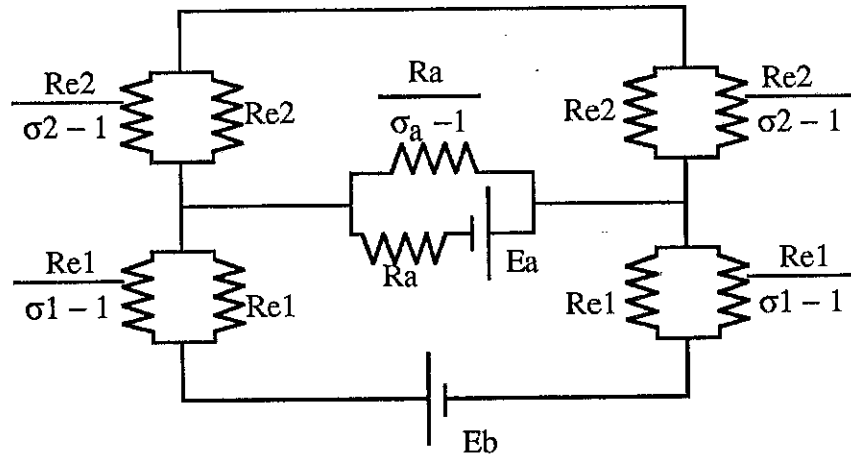


Figure IV - 7 : Répartition des flux magnétiques dans un système polarisé parallèle.



$$E_a = \frac{J L_a}{\mu_o}$$

$$E_b = N I$$

Figure IV - 8 : Schéma équivalent.

La résolution de ce système figure en Annexe III. On trouve :

Inductions magnétiques dans les entrefers

$$B_{e1} = \frac{2 e_2 \frac{L_a}{\sigma_a} B_r + \left(\frac{L_a \sigma_2}{\sigma_a} + 2 e_2 \right) \mu_o N I}{2 \left((e_1 \sigma_2 + e_2 \sigma_1) \frac{L_a}{\sigma_a} + 2 e_1 e_2 \right)}$$

$$B_{e2} = \frac{2 e_1 \frac{L_a}{\sigma_a} B_r - \frac{L_a \sigma_1}{\sigma_a} \mu_o N I}{2 \left((e_1 \sigma_2 + e_2 \sigma_1) \frac{L_a}{\sigma_a} + 2 e_1 e_2 \right)}$$

Force électromagnétique totale

$$F = \frac{S}{\mu_o} \frac{B_r^2 \frac{L_a^2}{2} E (e_2 - e_1) + B_r \mu_o N I \frac{L_a}{\sigma_a} \left(\frac{L_a}{\sigma_a} (e_2 \sigma_2 + e_1 \sigma_1) + 2 e_2^2 \right)}{\left((e_1 \sigma_2 + e_2 \sigma_1) \frac{L_a}{\sigma_a} + 2 e_1 e_2 \right)^2} + \frac{S}{4 \mu_o} \frac{(\mu_o N I)^2 \left(\frac{L_a}{\sigma_a} (\sigma_2 - \sigma_1) + 2 e_2 \right) \left(\frac{L_a}{\sigma_a} (\sigma_2 + \sigma_1) + 2 e_2 \right)}{\left((e_1 \sigma_2 + e_2 \sigma_1) \frac{L_a}{\sigma_a} + 2 e_1 e_2 \right)^2}$$

Nous obtenons donc

la force permanente

$$F_{\text{perm}} = \frac{S}{\mu_0} \frac{B_r^2 \frac{L_a^2}{2} E (e_2 - e_1)}{\left((e_1 \sigma_2 + e_2 \sigma_1) \frac{L_a}{\sigma_a} + 2 e_1 e_2 \right)^2}$$

la force de polarisation

$$F_{\text{pol}} = \frac{S B_r N I \frac{L_a}{\sigma_a} \left(\frac{L_a}{\sigma_a} (e_2 \sigma_2 + e_1 \sigma_1) + 2 e_2^2 \right)}{\left((e_1 \sigma_2 + e_2 \sigma_1) \frac{L_a}{\sigma_a} + 2 e_1 e_2 \right)^2}$$

la force d'excitation pure

$$F_{\text{exc}} = \frac{S}{4 \mu_0} \frac{(\mu_0 N I)^2 \left(\frac{L_a}{\sigma_a} (\sigma_2 - \sigma_1) + 2 e_2 \right) \left(\frac{L_a}{\sigma_a} (\sigma_2 + \sigma_1) + 2 e_2 \right)}{\left((e_1 \sigma_2 + e_2 \sigma_1) \frac{L_a}{\sigma_a} + 2 e_1 e_2 \right)^2}$$

Ces expressions sont donc relativement complexes.

Nous allons maintenant comparer les performances de ces deux systèmes polarisés et du système non polarisé sur une géométrie particulière dans laquelle on peut négliger les phénomènes complexes des fuites.

IV - COMPARAISON THEORIQUE DES PERFORMANCES

Nous prendrons les caractéristiques communes suivantes :

$$S = 25 * 25 = 625 \text{ mm}^2$$

$$e_{\text{initial}} = 5 \text{ mm} , e_{\text{final}} = 0,5 \text{ mm}$$

$$B_r = 0,5 \text{ T}$$

$$NI = 400 \text{ At}$$

Nous considérons un entrefer final non nul car sinon il y aurait une saturation du système non polarisé et les résultats ne seraient plus corrects.

Les fuites les plus importantes seront obtenues pour le système à polarisation série en phase de décollement. Dans ce cas, il y a un rapport 5 entre la valeur de l'entrefer et chaque dimension de la surface ce qui suffira pour négliger les fuites autour des entrefers.

Pour le système polarisé série, la longueur théorique optimale de l'aimant en phase de décollement vaut 9 mm (en supposant $\sigma_a = 1$). Nous prendrons $L_a = 10$ mm.

Dans le cas de la polarisation parallèle, nous prendrons une longueur d'aimant suffisamment grande pour que l'on puisse considérer que le point de fonctionnement de celui-ci ne varie pas avec la position du système.

Les figures IV - 9, IV - 10, IV - 11 montrent les forces surfaciques totales, permanentes et d'excitation obtenues dans les différents systèmes le long de la course d'excitation.

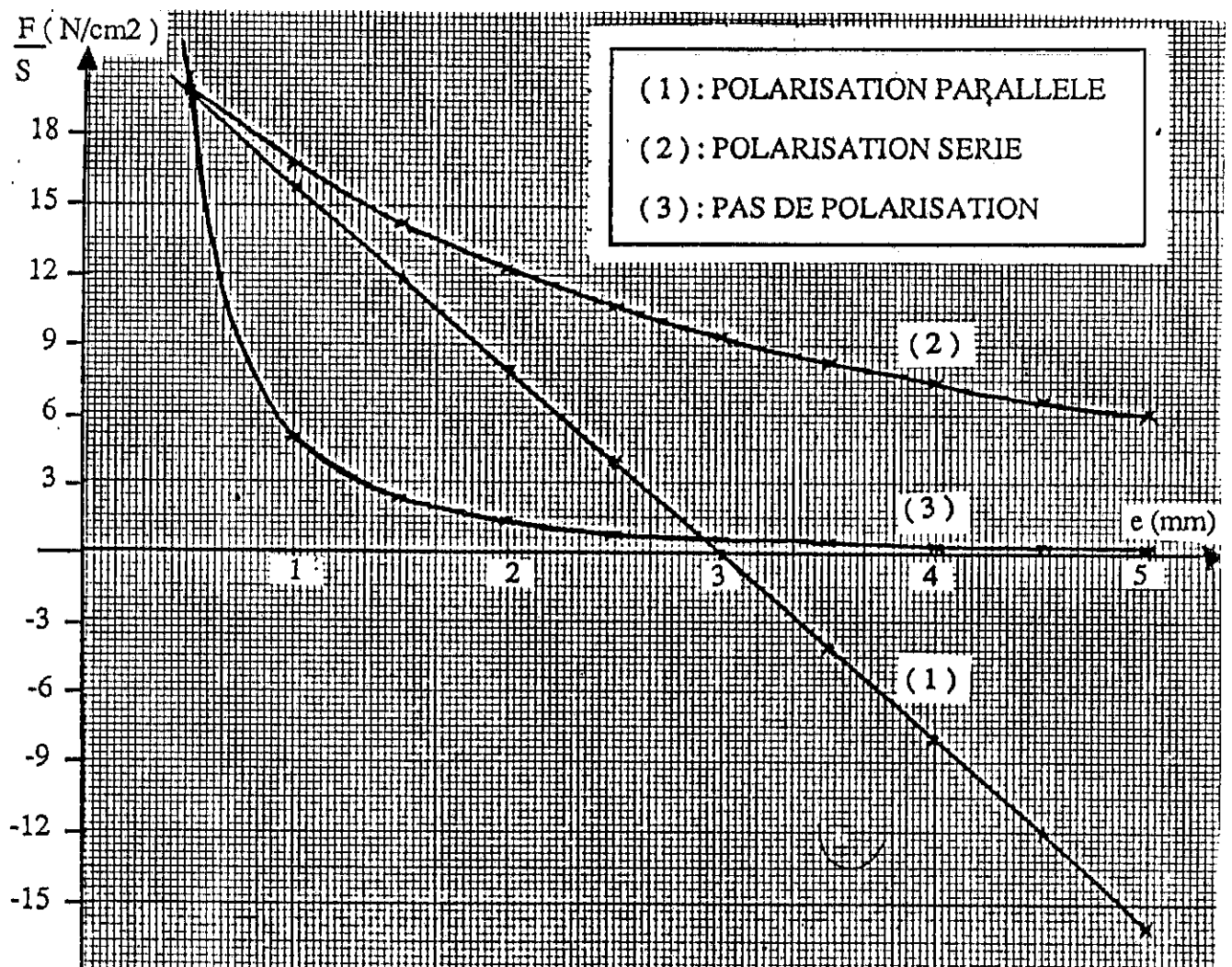


Figure IV - 9 : Force totale pour les différents systèmes.

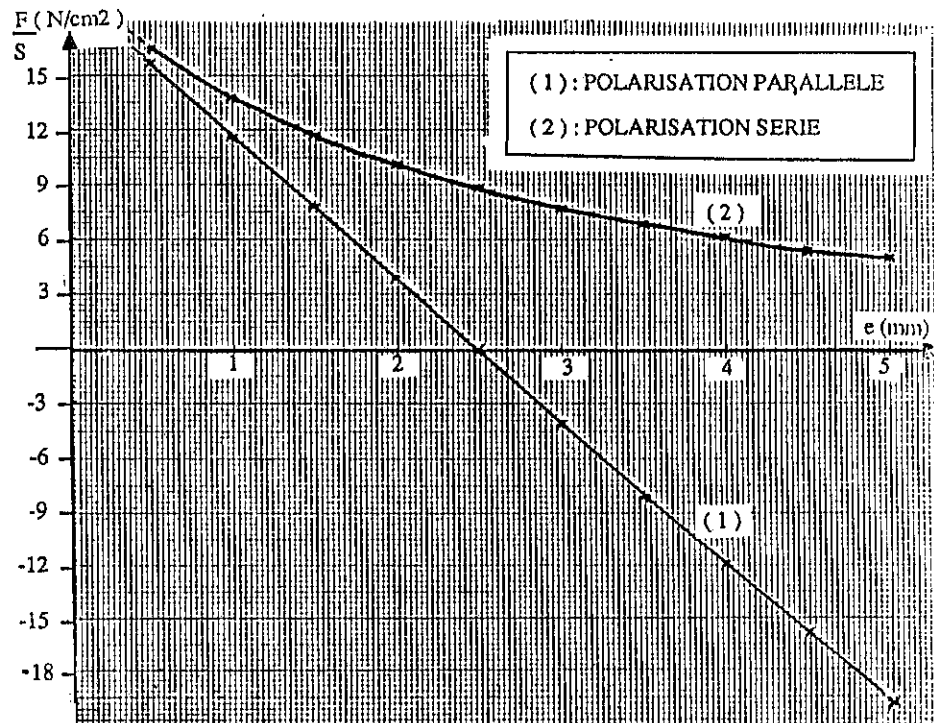


Figure IV - 10 : Force permanente pour les différents systèmes polarisés.

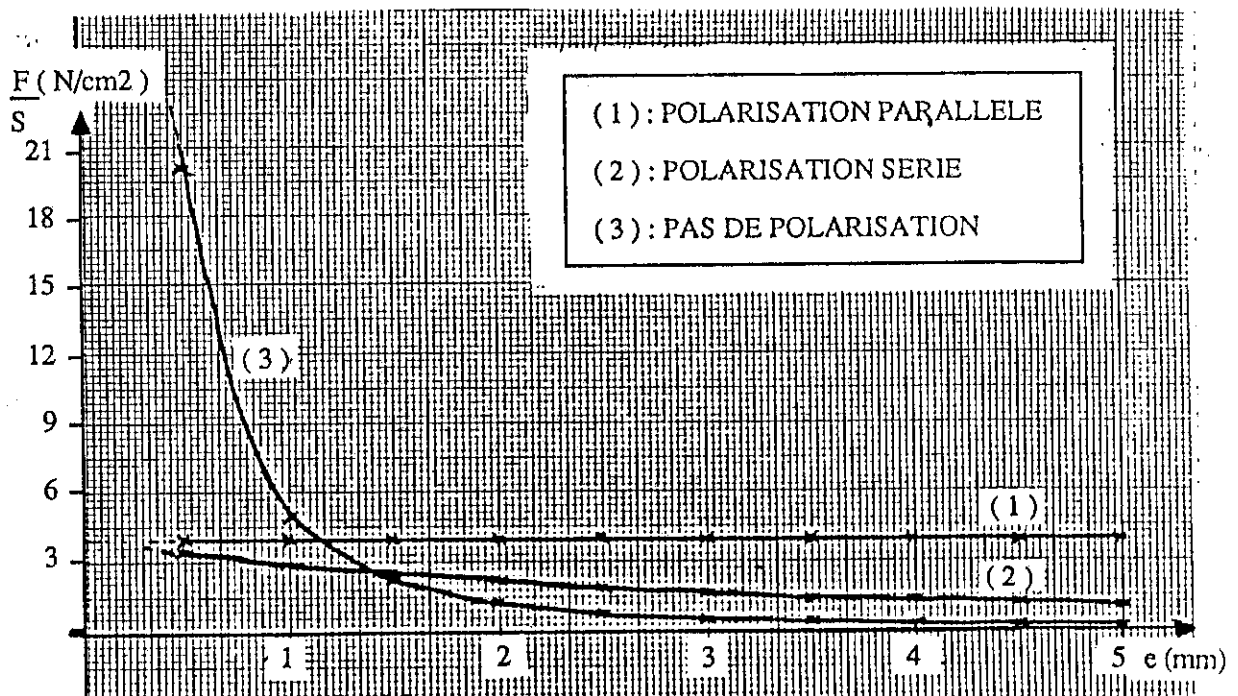


Figure IV - 11 : Force d'excitation pour les différents systèmes.

Ces courbes nous permettent de constater deux phénomènes :

- 1 - En phase de décollement, la force d'excitation créée par les systèmes polarisés (et notamment le système "polarisation parallèle") est très supérieure à celle créée par le système non polarisé. Ceci est

particulièrement intéressant compte tenu de nos axes de recherche.

Par contre à entrefer faible, le système non polarisé est plus performant. En effet, dans ce cas l'induction magnétique est inversement proportionnelle au carré de l'entrefer et donc théoriquement infinie à entrefer nul. En pratique, cette induction est limitée par la saturation des tôles ferromagnétiques, mais atteint cependant une valeur bien supérieure à celle obtenue dans les systèmes polarisés.

2 - Ces résultats mettent également en évidence l'importance de la force permanente souvent élevée par rapport à la force d'excitation.

Dans le cas du système polarisé série, cette force est fortement non-linéaire et sera difficilement compensable mécaniquement. Par contre, la linéarité de la force permanente dans le système polarisé parallèle permet d'envisager un rappel mécanique assez aisé.

Pour confirmer ces phénomènes, nous avons effectué des mesures pratiques sur prototypes.

V - COMPARAISON PRATIQUE DES SYSTEMES POLARISES ET NON POLARISES

Nous avons réalisé des prototypes représentant chaque système, et nous avons mesuré la force le long de la course de la partie mobile. Les caractéristiques des prototypes ont été choisies aussi voisines que possible pour permettre la comparaison.

V - 1 Dispositif de mesure

Le dispositif de mesures de forces est schématisé en figure IV-12. Il est constitué d'un capteur de forces équipé de jauges piézorésistives. Il peut mesurer des forces jusqu'à 5N avec une précision meilleure que 5%.

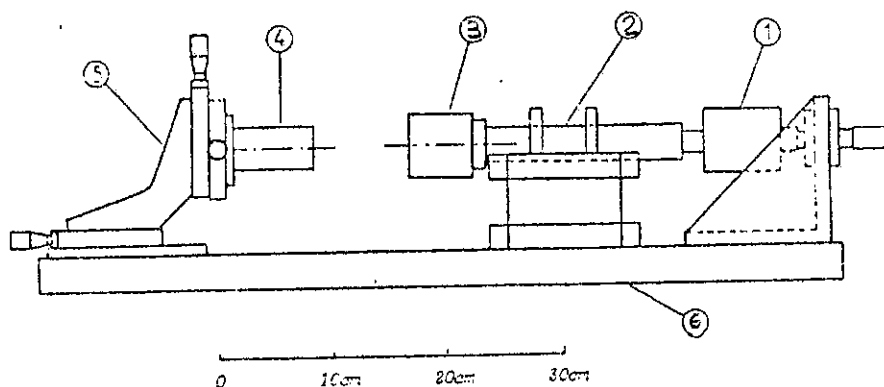


Figure IV - 12 : Dispositif de mesure de forces.

- 1 : Capteur de force
- 2 : Dispositif n'autorisant qu'un seul sens de déplacement

- 3 : Support fixe
- 4 : Support mobile
- 5 : Table micrométrique XYZ
- 6 : Socle.

Compte tenu des limitations de ce dispositif certaines mesures notamment à faible entrefer avec excitation n'ont pu être effectuées.

V - 2 Caractéristiques géométriques et magnétiques des prototypes

Circuit magnétique

- Section des entrefers $S = 10 * 17 = 170 \text{ mm}^2$
- $e_{\text{max}} = 5 \text{ mm}$

Aimant

- Ferrite : $B_r = 0,37 \text{ T}$
- $S_a = 10 * 17 \text{ mm} = S_{\text{entrefer}}$
- $L_a = 0 ; 5 ; 10 ; 15 ; 20 \text{ mm}$ (le cas $L_a = 0 \text{ mm}$ correspond au système non polarisé).

Bobine

- $NI = 400 \text{ At}$

V - 3 Résultats des mesures et comparaison des performances

Nous avons particulièrement étudié l'influence de la longueur de l'aimant sur les performances de chaque système polarisé.

V-3.a Système à polarisation série

Pour diminuer les fuites dans le circuit magnétique, nous avons disposé les aimants en bout de branche comme le montre la figure IV - 13.

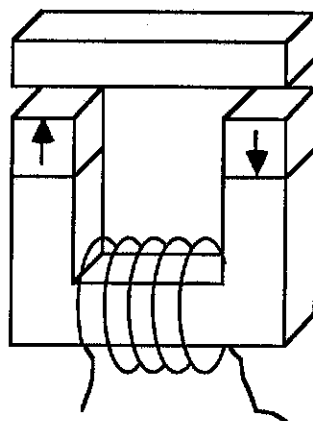


Figure IV-13 : Système polarisé série avec aimants disposés en bout de branche.

Pour des raisons de symétrie, seules deux valeurs de la longueur totale L_a de l'aimant ont pu être testées : $L_a = 10$ mm et $L_a = 20$ mm.

Les forces obtenues dans les différents cas sont représentées figures IV - 14 et IV - 15.

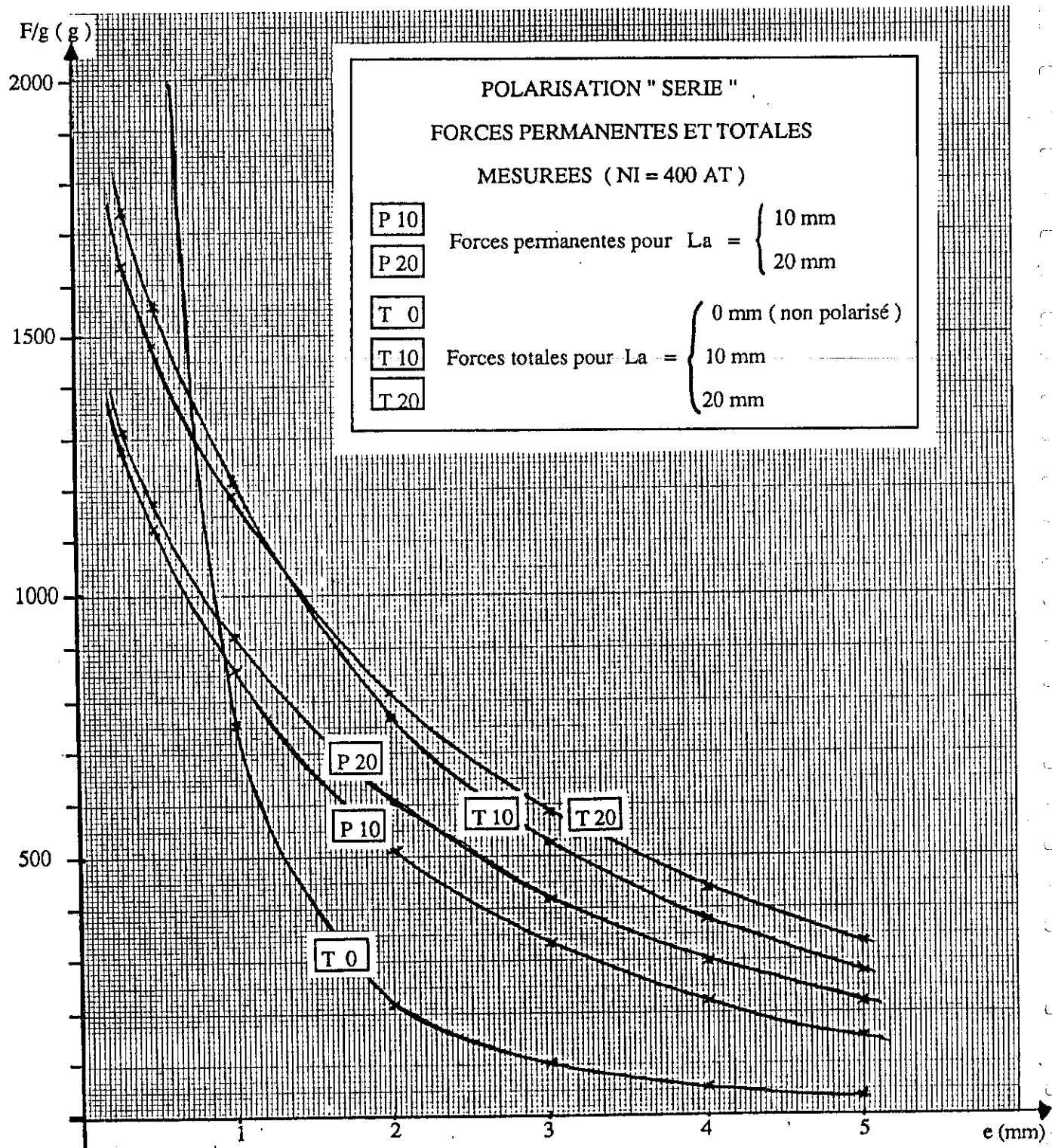


Figure IV - 14 : Force permanente et force totale pour 400 At en fonction de l'entrefer.

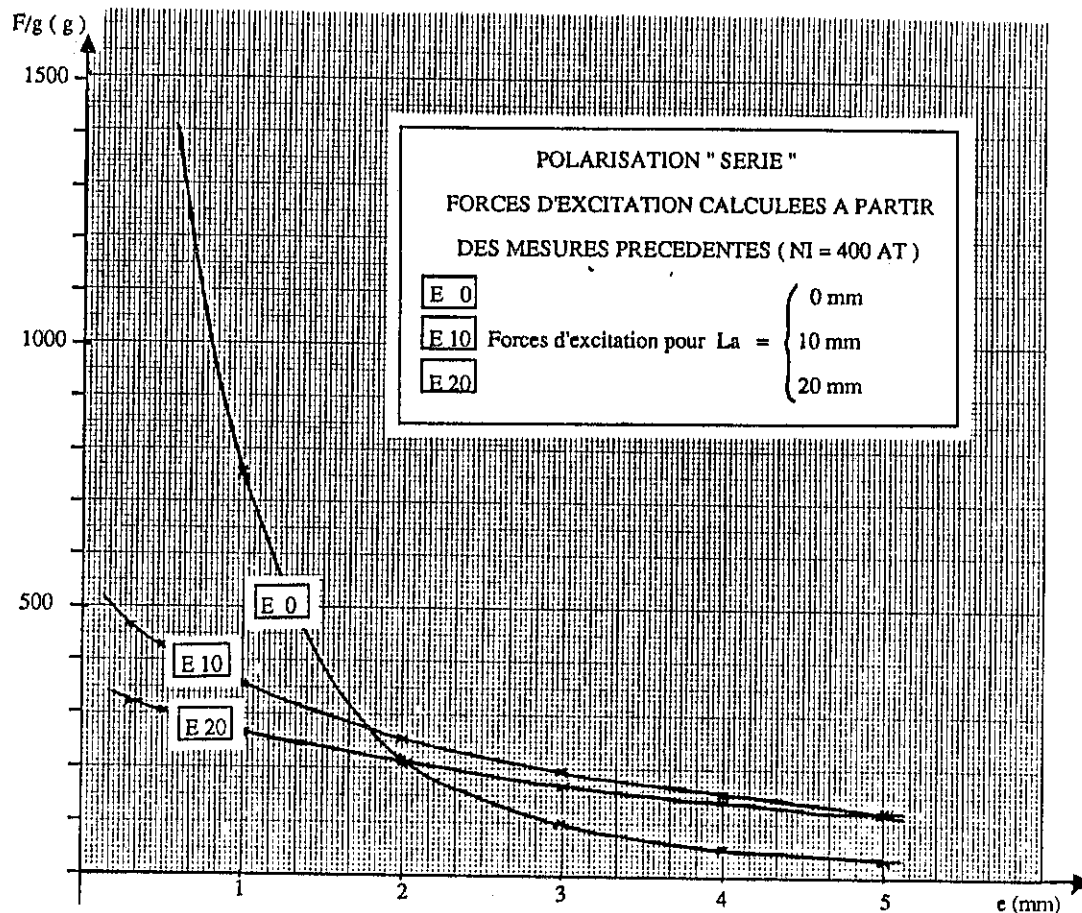


Figure IV - 15 : Force d'excitation obtenue en faisant la différence entre les deux forces précédentes.

Ceci nous permet de confirmer :

- l'existence d'une longueur optimale, puisque les meilleurs résultats sont obtenus avec une longueur d'aimant intermédiaire $L_a = 10 \text{ mm}$.
- les avantages des systèmes polarisés série à grand entrefer.

Mais aussi :

- la faiblesse de tels systèmes à faible entrefer par rapport au système non polarisé.
- l'importance de la force permanente et sa non -linéarité très marquée qui rend extrêmement difficile une compensation mécanique.

V-3.b Système à polarisation parallèle

Les courbes figures IV - 16, IV - 17, IV - 18 donnent la variation des différentes forces en fonction de l'entrefer pour plusieurs valeurs de L_a .

On retrouve ainsi :

- La symétrie de la force permanente par rapport à la position d'équilibre médiane.

L'incurvation de la courbe provient de deux phénomènes non pris en compte dans le modèle

théorique simplifié :

- * les fuites dans le circuit magnétique et notamment dans les entrefers.
 - * la variation du point de fonctionnement de l'aimant avec le déplacement de la partie mobile.
- le bon comportement du système pour les grandes comme pour les faibles valeurs d'entrefer.
 - une efficacité croissante avec la longueur de l'aimant.

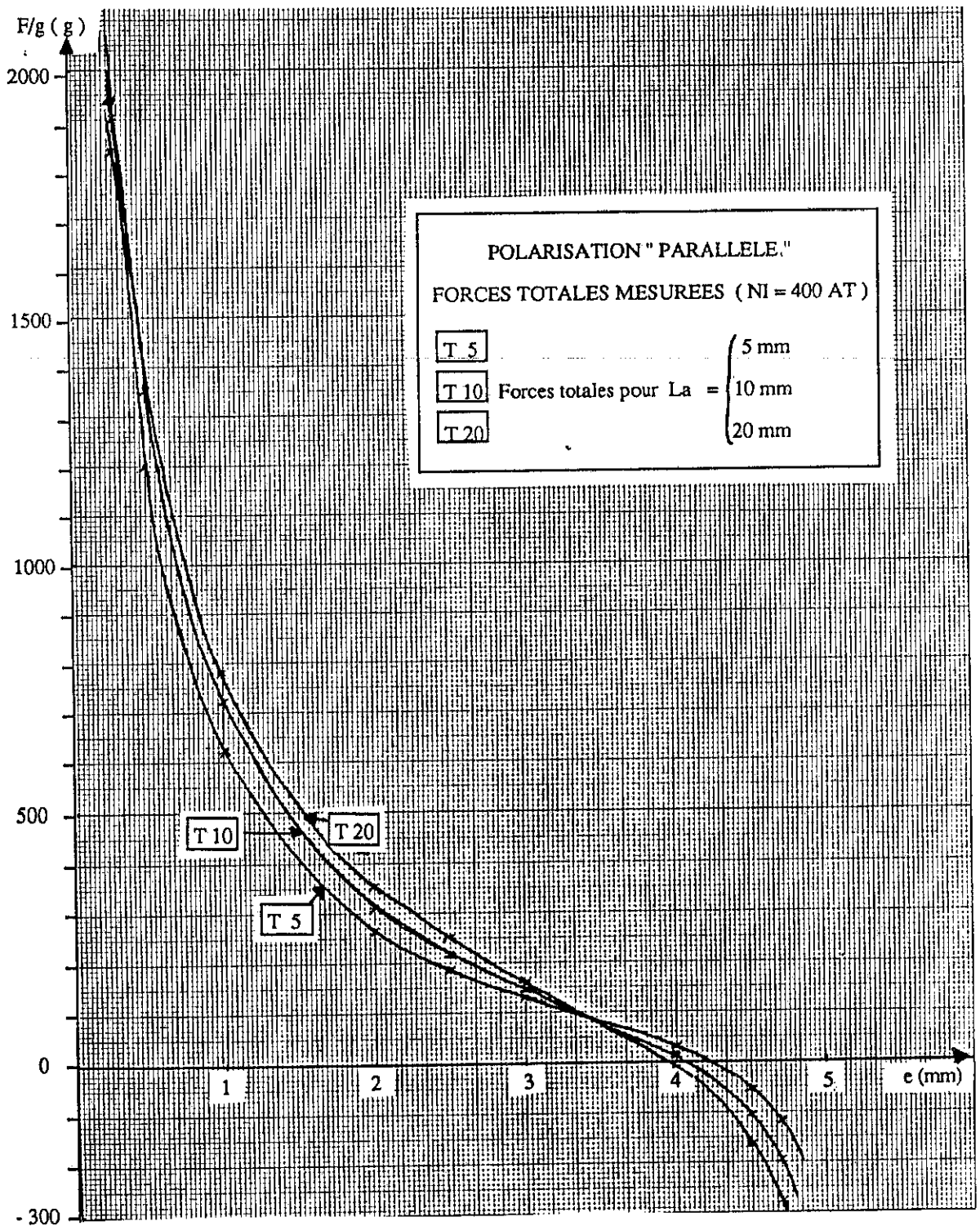


Figure IV-16 : Force totale en fonction de l'entrefer pour différentes valeur de L_a .

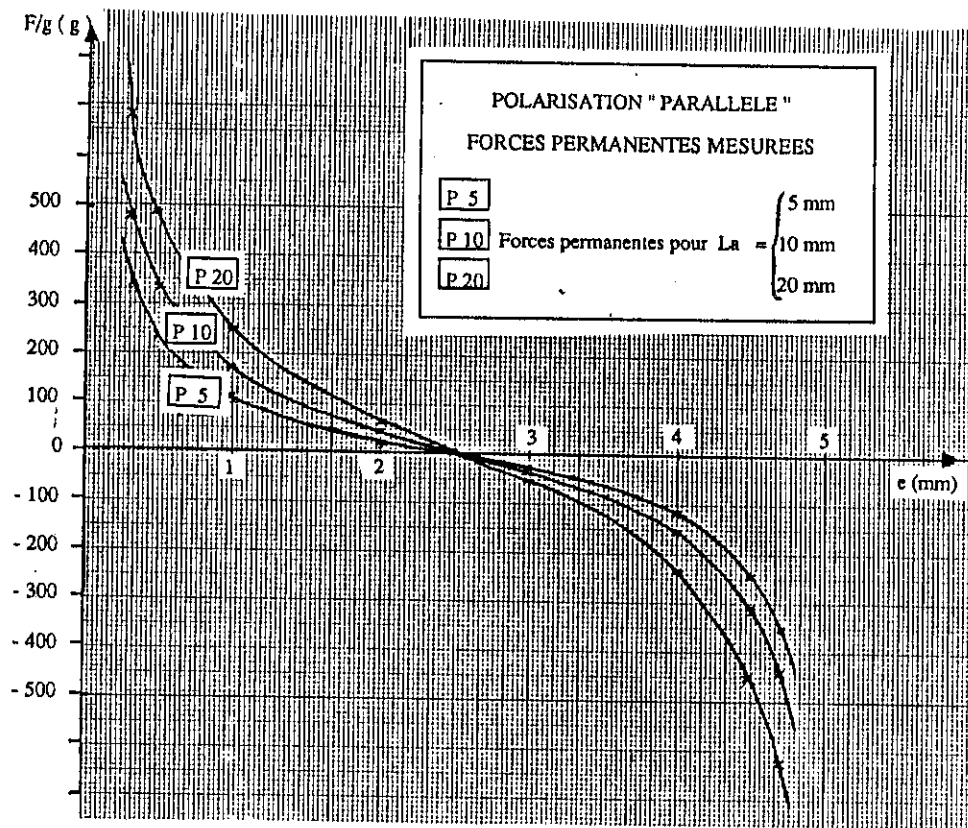
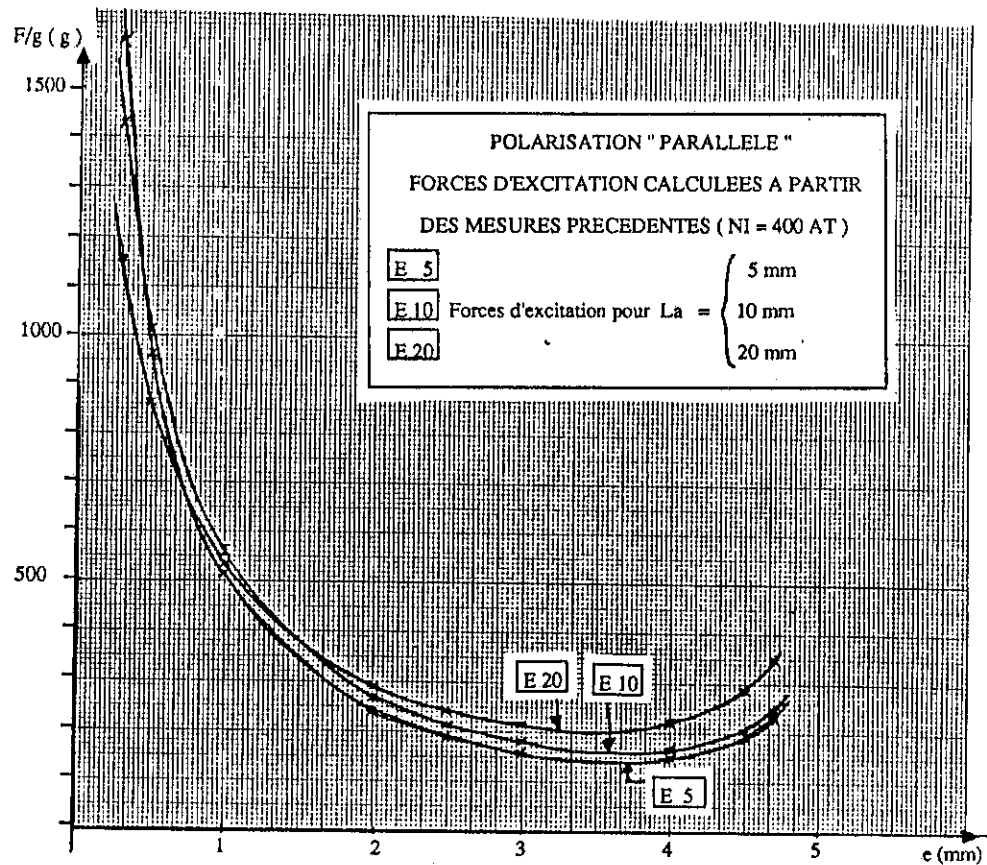
Figure IV-17 : Force permanente en fonction de l'entrefer pour différentes valeurs de L_a .

Figure IV-18 : Force d'excitation calculée à partir de la différence entre les deux courbes précédentes.

Nous avons rassemblé figure IV - 19 les forces d'excitation obtenues avec les trois systèmes étudiés dans ce chapitre. Nous avons pris la longueur d'aimant la plus performante pour chaque système polarisé.

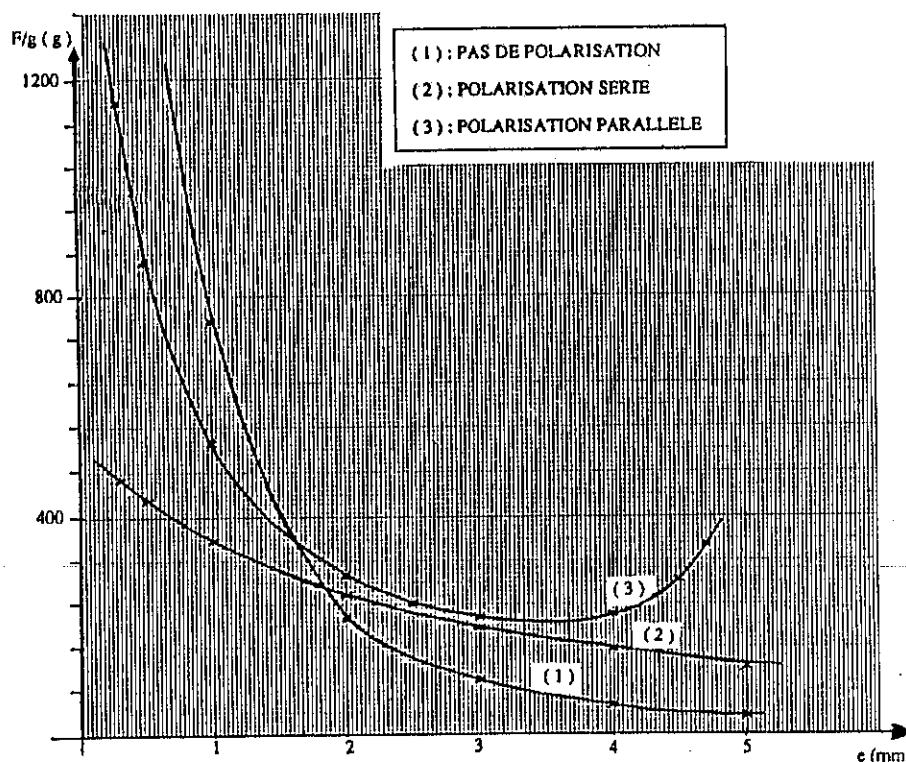


Figure IV - 19 : Comparaison entre les forces d'excitation obtenues avec les différents systèmes.

On constate ainsi nettement les avantages des systèmes polarisés notamment à grand entrefer.

De plus, la structure polarisée "parallèle" permet d'avoir également des forces importantes à faible entrefer.

Le système polarisé série sera plus difficile à compenser. De plus, la présence de l'aimant dans le circuit de la bobine réduit notablement son efficacité. Ce système sera donc moins utilisé.

La structure "parallèle" a enfin pour avantage de présenter une force sans excitation symétrique et à peu près linéaire. On pourra donc appliquer à ce système un rappel mécanique monostable assez simple sans trop pénaliser son efficacité globale.

VI - CONCLUSIONS

Nous avons mis en évidence de manière théorique et pratique les avantages des systèmes polarisés sur des systèmes non polarisés. Parmi les structures polarisées, certaines sont plus performantes pour le type d'application que l'on recherche.

Dans le chapitre qui va suivre, nous allons donc définir une méthodologie théorique permettant de mettre en lumière les structures polarisées les plus performantes en fonction de nos objectifs.

CHAPITRE V

RECHERCHE

DE NOUVELLES CONFIGURATIONS

INTRODUCTION

Nous avons montré dans les chapitres précédents que les solutions actuellement adoptées pour les systèmes monostables présentaient de nombreux inconvénients (entrefers parasites, mauvaise utilisation de l'aimant).

Dans ce chapitre, nous allons essayer d'établir de manière systématique l'ensemble des configurations possibles et de déterminer quelles sont les plus performantes.

I- ROLE ET FONCTIONNEMENT D'UN ACTIONNEUR ELECTROMAGNETIQUE

Par définition, un actionneur électromagnétique est un dispositif fournissant une force mécanique à partir d'énergie électrique par l'intermédiaire d'un champ magnétique.

Le système étudié utilise le champ créé par une bobine et / ou des aimants permanents dans un circuit magnétique comportant des entrefers variables. Cette solution conduit à de bonnes performances pour le type de fonctionnement recherché (force importante sur un déplacement relativement faible).

D'autres solutions existent, même si elles sont moins performantes pour notre application (actionneur de type haut-parleur, aimant dans un gradient de champ).

Nous avons établi dans le chapitre II le bilan énergétique d'un système non polarisé. Nous avons notamment mis en évidence les deux niveaux de fonctionnement d'un tel système :

- le niveau électromagnétique
- le niveau mécanique.

Cette décomposition reste valable pour les systèmes polarisés.

I - 1 Fonctionnement magnétique

Les forces résultent de l'induction magnétique créée par des sources dans des entrefers. Il existe donc deux groupes de paramètres magnétiques : les sources magnétiques (bobines, aimants) et le circuit magnétique proprement dit (parties ferromagnétiques et entrefers).

Pour une position donnée, l'ensemble de ces paramètres permet de déterminer l'induction magnétique dans chaque partie du système et donc l'intensité de la force magnétique créée dans chaque entrefer.

Certains de ces paramètres peuvent varier en fonction de la position du système. La saturation par exemple, se traduira par la variation locale de la perméabilité relative μ_r des parties ferromagnétiques.

Mais, le fonctionnement global du système sera principalement lié à l'évolution des entrefers et donc au déplacement de la partie mobile déterminé par le fonctionnement mécanique.

I - 2 Fonctionnement mécanique

Les phénomènes déterminant le fonctionnement mécanique d'un actionneur peuvent être de deux sortes :

- soit des phénomènes totalement indépendants des effets magnétiques
 - * action des ressorts
 - * influence de la masse de la partie mobile
 - * frottements
 - * ...

que l'on rassemblera sous la dénomination F_{ext} .

- soit des phénomènes en relation avec les paramètres magnétiques décrits plus haut.

En effet, ces paramètres magnétiques nous donnent l'état du système pour une position donnée mais ne déterminent pas le mouvement de la partie mobile. Celui-ci est lié à l'évolution des entrefers choisie par le concepteur. Pour un état magnétique donné, plusieurs déplacements peuvent être envisagés, comme par exemple pour le dispositif de la figure V - 1.

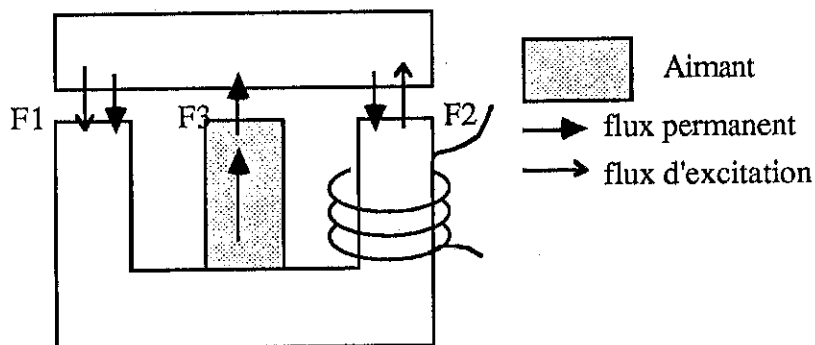


Figure V - 1 : Exemple de configuration magnétique.

Pour un circuit magnétique et des sources magnétiques donnés, les flux magnétiques se répartissent de la façon indiquée sur le dessin. On connaît alors l'intensité des forces dans chaque entrefer F_1 , F_2 , F_3 .

A partir de cet état magnétique, on peut proposer plusieurs fonctionnements mécaniques suivant l'évolution choisie pour les entrefers.

Les Figures V-2 et V-3 en donnent deux exemples.

- Dans le premier cas, le mouvement de la partie mobile sera déterminé par la force totale s'exerçant sur elle :

$$F_{tot} = F_1 + F_2 + F_3$$

- Dans le deuxième cas, ce mouvement sera déterminé par le couple total :

$$\Gamma = (F_1 - F_2) * d/2 \quad \text{où } d \text{ représente la distance entre les entrefers.}$$

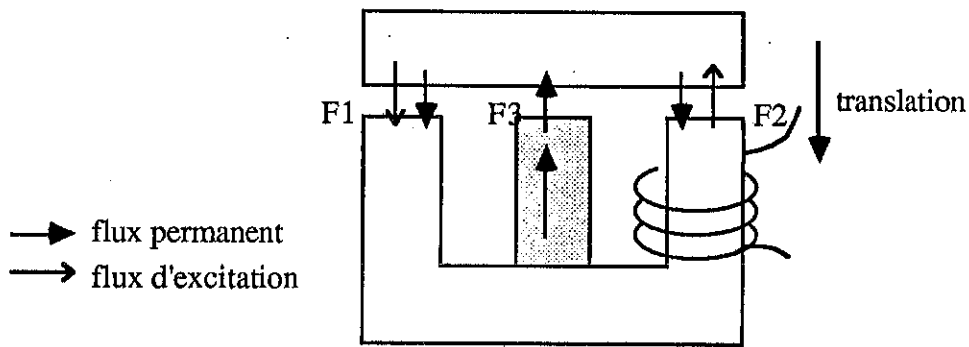


Figure V - 2 : Exemple de fonctionnement mécanique en translation.

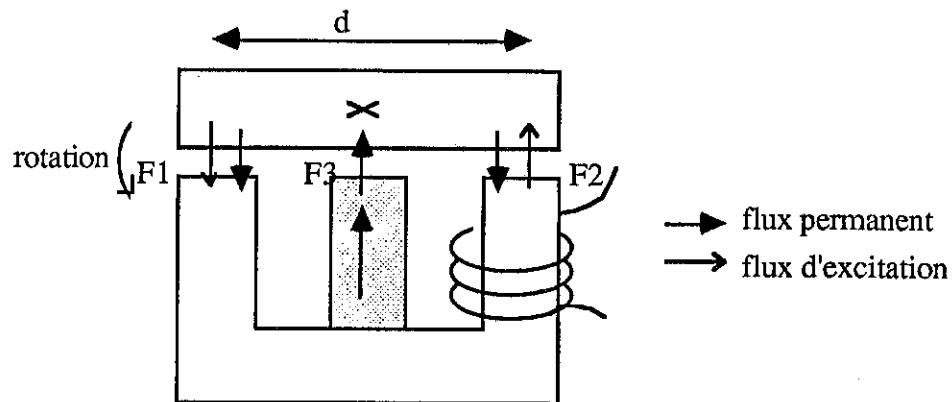


Figure V - 3 : Exemple de fonctionnement mécanique en rotation.

De façon plus générale, nous placerons dans la deuxième catégorie de phénomènes mécaniques

- le choix du rôle des entrefers entre
 - * entrefer de repos
 - * entrefer de travail
 - * entrefer constant.
- le choix de l'évolution des entrefers
 - * longueur de l'entrefer variable
 - * et/ou section de l'entrefer variable
 - * entrefer constant.

On déterminera ainsi le type de mouvement choisi, translation ou rotation (ce dernier faisant également intervenir la position de l'axe dans le calcul du couple).

En tenant compte

- des phénomènes purement magnétiques (arrangement des sources vis à vis du circuit magnétique et détermination pour une position donnée des inductions et des forces magnétiques dans chaque

entrefer)

- des phénomènes purement mécaniques (forces extérieures)
- des phénomènes mixtes "magnéto-mécaniques" (évolution des entrefers)

nous disposons alors de tous les éléments pour calculer la force globale exercée sur la partie mobile et déterminer l'évolution du système.

I - 3 Limitations de la méthode

La méthode de description que nous venons de présenter permet de recenser tous les paramètres d'un système électromagnétique polarisé ou non. Une méthode similaire mais plus simplifiée a déjà été appliquée aux systèmes non polarisés [1].

En théorie, nous pouvons décrire toutes les configurations en faisant varier les paramètres les uns après les autres. Cependant, le nombre de ces paramètres est trop élevé pour que l'on puisse raisonnablement envisager l'exploitation de toutes les possibilités. Aussi, en partant des performances recherchées, nous n'allons considérer que les paramètres magnétiques, puis en déduire pour chaque configuration les différents fonctionnements mécaniques possibles.

Cette étude sera effectuée sur des cas simples, comportant un nombre réduit d'entrefer. Mais les cas étudiés sont les plus intéressants car ils constituent des systèmes élémentaires à la base de toute configuration plus complexe.

II - RECHERCHE DE CONFIGURATIONS

II - 1 Performances recherchées

Dans cette étude, nous nous intéressons aux contraintes magnétiques qui sont essentiellement de deux ordres :

1) Nous désirons obtenir un système développant un travail maximal pour une puissance électrique minimale. Ceci impose que la bobine ait un rendement optimal, ce qui revient à dire qu'elle ait un rôle actif dans chaque entrefer et que l'entrefer global vu par elle soit minimum (notamment en position de travail).

Dans cette optique, nous étudierons particulièrement deux possibilités pour le circuit magnétique :

- la bobine travaille à somme d'entrefer constante
- la bobine travaille à entrefer nul en position de travail.

Dans tous les cas, l'exigence d'un entrefer minimum interdit que l'on dispose le ou les aimants permanents dans les circuits de la bobine comme dans le système à polarisation série présenté au chapitre précédent.

2) Nous désirons également que sans excitation le système revienne en position de repos, et que dans cette position, la force résultante soit faible (cf figure V - 4).

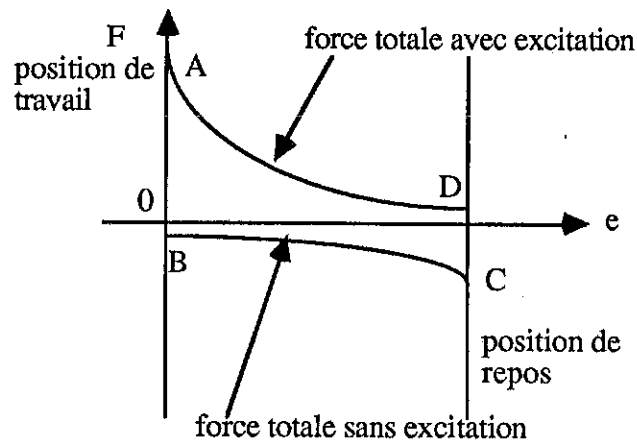


Figure V - 4 : Exemple de variations des forces en fonction de la position et de l'excitation.

Cette figure nous montre les variations des forces que l'on désire obtenir en fonction de la position.

En position de travail, sous excitation la force totale est positive (point A) et maintient le système.

Quand on coupe l'excitation, elle devient négative (point B) et tend à ramener la partie mobile en position de repos (point C).

Dans cette position, cette force doit bien sûr rester négative pour maintenir le dispositif en place mais également faible. En effet, la force totale peut se décomposer de la façon suivante :

$$F_{\text{totale}} = F_{\text{créée par l'excitation}} + F_{\text{sans excitation}}$$

$$> 0 \qquad \qquad \qquad < 0$$

Si l'on a une force sans excitation très négative, il faudra créer une force avec excitation opposée et tout aussi importante pour que le système puisse décoller de sa position de repos (point D). Ceci implique alors une consommation d'énergie électrique élevée.

Il est donc important que la force résultante sans excitation en position de repos soit faible pour qu'une faible énergie électrique suffise à faire basculer le système.

Or, sans excitation, il ne reste que deux types de forces en présence : les forces extérieures (par exemple, les forces de rappel mécaniques), et les forces magnétiques permanentes dues à l'aimant.

Deux solutions sont possibles :

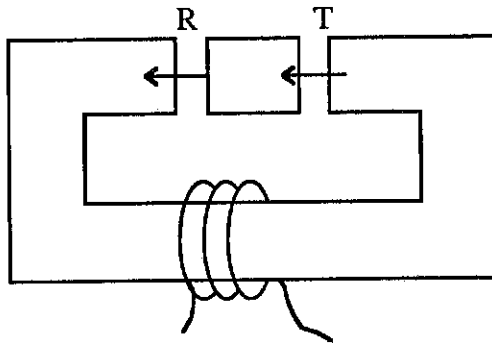
- soit le fonctionnement de l'aimant seul permet le rappel en position de repos (on n'a donc pas besoin de ressort de rappel)
- soit on utilise un ressort pour ramener le système en position initiale.

II - 2 Représentation des systèmes répondant aux contraintes magnétiques

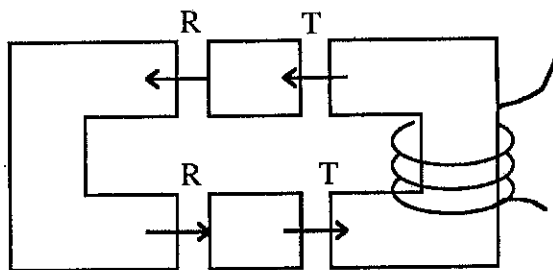
II-2.a Position de la bobine

- Systèmes à somme d'entrefers constante

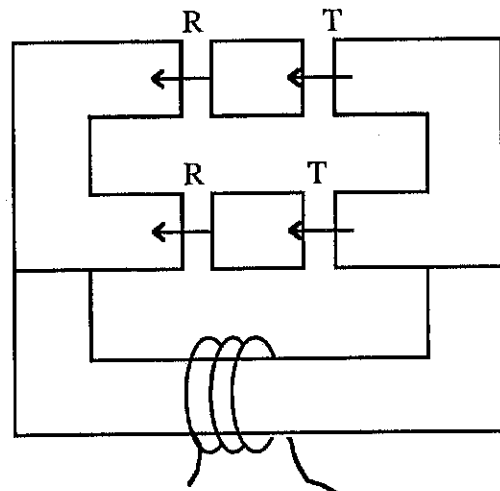
Le système élémentaire est le suivant :



Mais il se décompose en deux sous-systèmes :



entrefer en série



entrefer en parallèle

Dans ce type de systèmes, un mouvement de translation pour la partie mobile centrale tend à diminuer une paire d'entrefer tout en agrandissant l'autre paire. Ceci explique notamment la dénomination "système à somme d'entrefer constante".

Certains de ces entrefer seront ouverts en position de repos et fermés en position de travail. Il seront donc appelés "entrefer de travail" (T) car les forces dont ils sont le siège agissent dans ce sens. Réciproquement, les entrefer fermés en position de repos et ouverts en position de travail seront appelés "entrefer de repos" (R).

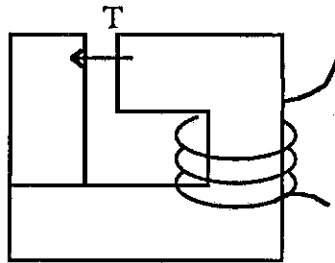
Le choix entre entrefer de repos (R) ou entrefer de travail (T) est pour l'instant arbitraire. Il dépend bien sûr de la combinaison des flux permanent et d'excitation.

Selon les systèmes, ces entrefer de repos peuvent ne pas exister. On peut citer par exemple le cas

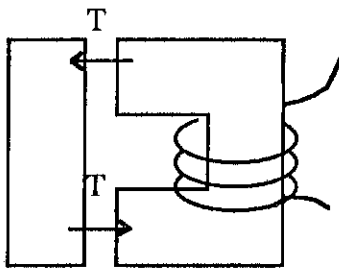
du système polarisé "série" du chapitre précédent où le rappel en position initiale est assuré par un ressort.

- Systèmes à entrefer nul en position de travail

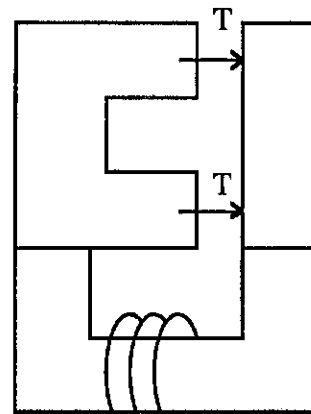
* Systèmes sans entrefer de repos



Système élémentaire qui se décompose en :

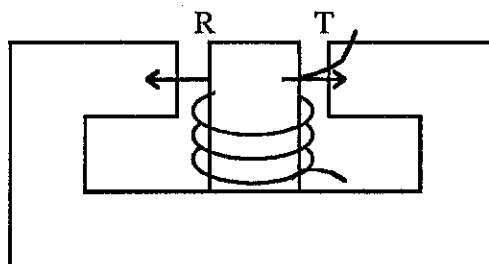


entrefers en série

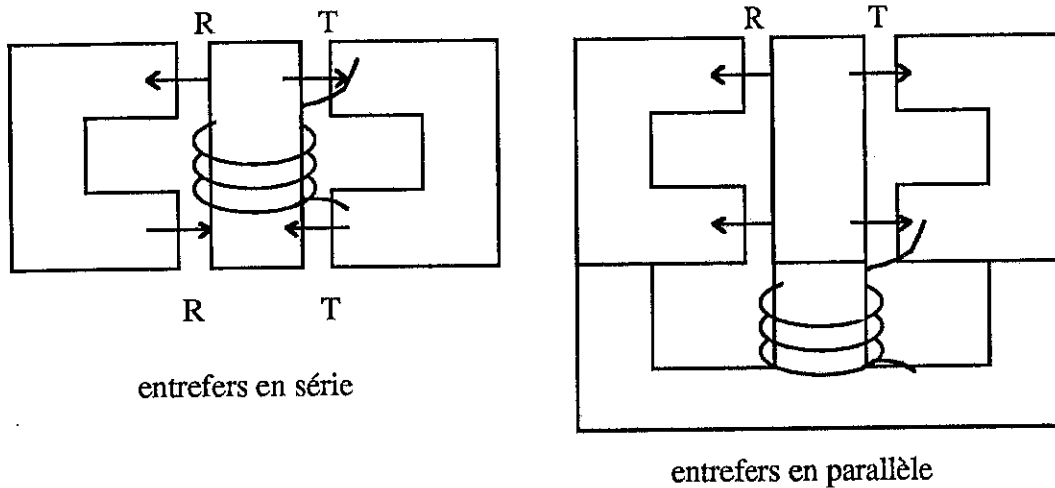


entrefers en parallèle

* Systèmes avec entrefers de repos



Système élémentaire qui se décompose en :



II-2.b Positions de l'aimant

- Rappel par aimant seul

Si l'on veut que l'aimant permette seul le rappel en position de repos, et que dans cette position la force résultante soit faible, il faut établir une polarisation à peu près constante dans le système, de telle manière qu'il soit constamment proche d'un état d'équilibre.

Il faut donc équilibrer, les forces permanentes entre les entrefers de repos et de travail, et en conséquence les inductions permanentes. Pour cela, la seule possibilité, c'est que les entrefers de repos R et de travail T soient disposés en série dans le circuit magnétique vu par l'aimant (cf Figure V - 5).

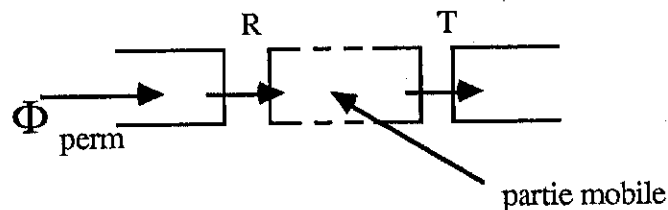


Figure V - 5 : Polarisation constante.

- Rappel extérieur

Il est généralement réalisé par un ressort qui crée une force linéaire le long de la course du système.

Si l'on veut une force totale sans excitation faible, il faut que la force du ressort puisse compenser aussi bien que possible les forces magnétiques permanentes dues à l'aimant. Celles-ci doivent être également à peu près linéaires en fonction de la position du système.

La représentation la plus simple de ce type de fonctionnement consiste à disposer l'aimant en parallèle sur les entrefers de repos et de travail (Figure V - 6).

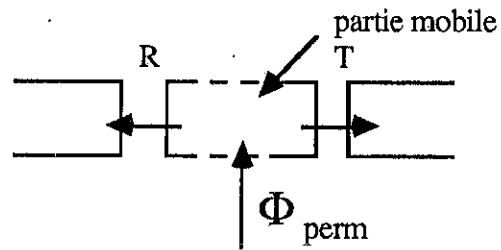


Figure V - 6 : Polarisation donnant une force permanente linéaire symétrique.

Si l'on suppose ce dispositif sans fuites, la force permanente en fonction de l'entrefer se représente ainsi (Figure V - 7) :

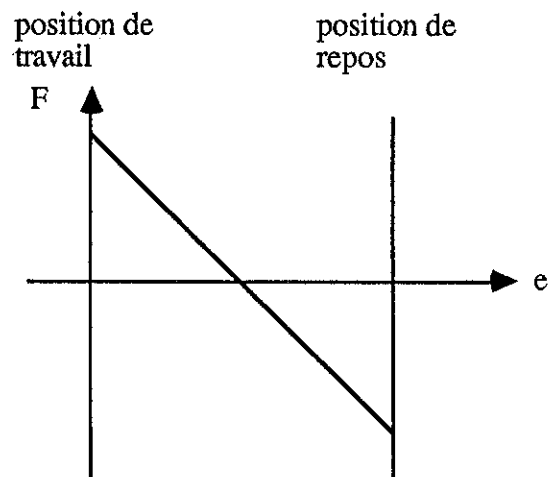


Figure V - 7 : Force permanente du dispositif.

L'utilisation d'un ressort n'est cependant pas la solution idéale, et l'on pourrait être tenté d'utiliser ce dispositif couplé avec un entrefer de repos supplémentaire dans lequel le flux de l'aimant créerait une force permanente annexe : cette force pourrait alors être suffisante pour ramener le système en position de repos (cf Figure V - 8) :

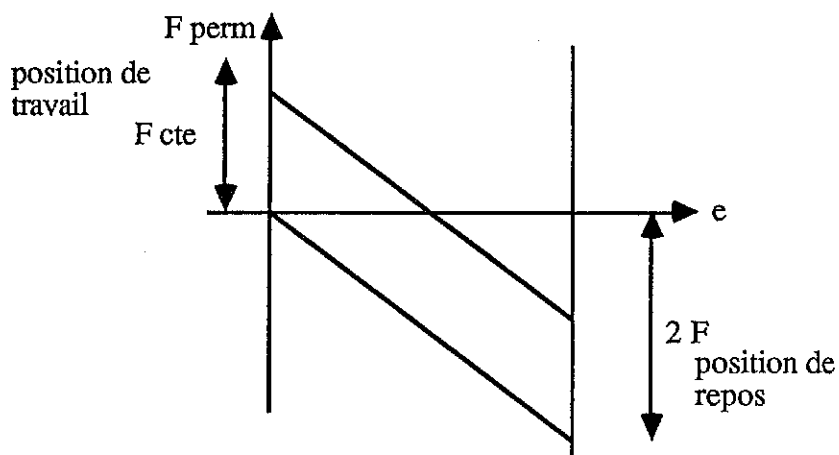


Figure V - 8 : Force permanente linéaire associée à une force constante.

Mais l'on constate alors que l'on a une force permanente deux fois plus importante en phase de décollement ce qui anihile l'efficacité de la bobine dans cette zone.

Cette solution ne peut donc pas être utilisée.

Nous allons maintenant essayer de coupler chaque configuration du circuit magnétique vu par la bobine avec chaque configuration du circuit magnétique vu par l'aimant. Nous établirons ainsi différentes solutions possibles.

II - 3 Etude des diverses solutions

II-3.a Somme d'entrefer constante pour la bobine et rappel par aimant seul

Les deux circuits magnétiques de l'aimant et de la bobine sont très proches l'un de l'autre puisque les deux sources voient les entrefers de repos et de travail en série.

Quatre solutions sont possibles (Figure V - 9).

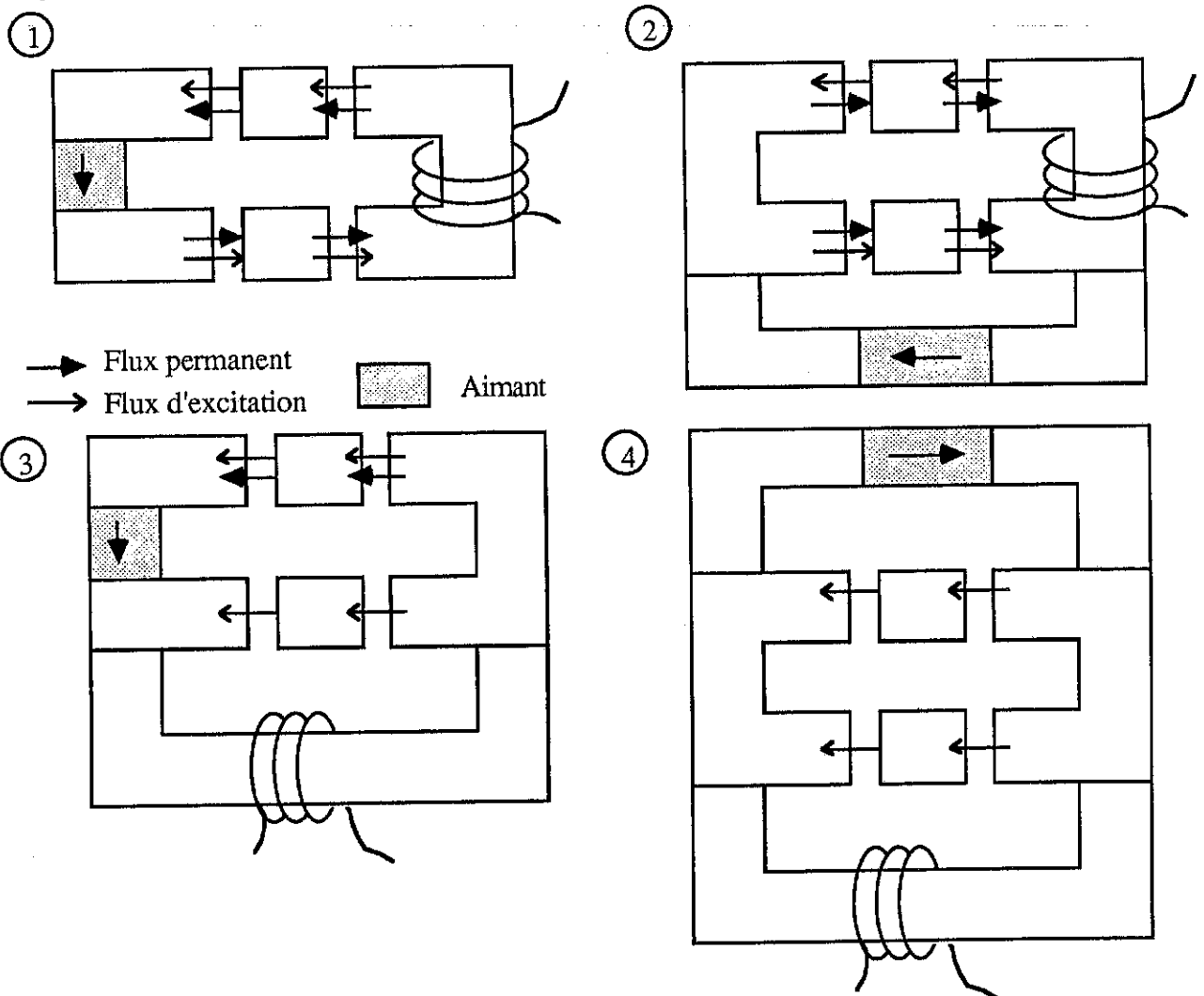


Figure V - 9 : Configurations présentant une somme d'entrefer constante pour la bobine et une polarisation constante du circuit magnétique par l'aimant.

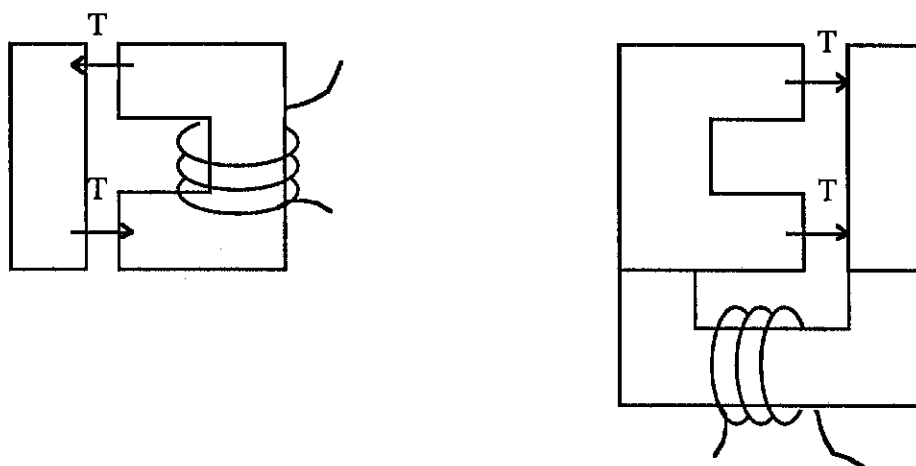
Quelle que soit la configuration envisagée, il est impossible de travailler efficacement à somme d'entrefer constante pour la bobine en ayant un rappel par aimant seul pour différentes raisons

- forces identiques de part et d'autre de la partie mobile (systèmes 1 et 2).
- court-circuit du flux de l'aimant par la branche supplémentaire (systèmes 3 et 4).

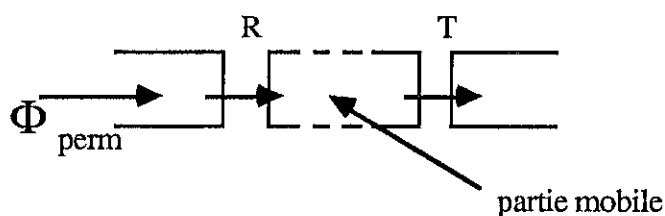
Aucun de ces systèmes ne peut donc être utilisé.

II-3.b Entrefer nul en position de travail pour la bobine et rappel par aimant seul

- Systèmes sans entrefer de repos pour la bobine



Pour avoir un rappel par aimant seul, il faut créer une polarisation constante dans le circuit magnétique. Il faut donc créer obligatoirement un entrefer de repos, disposé en série avec les entrefers de travail au point de vue de l'aimant.



Si l'on veut que la bobine voie un entrefer fermé en position de travail, il faut refermer le flux d'excitation autour de ces entrefers (Figure V - 10).

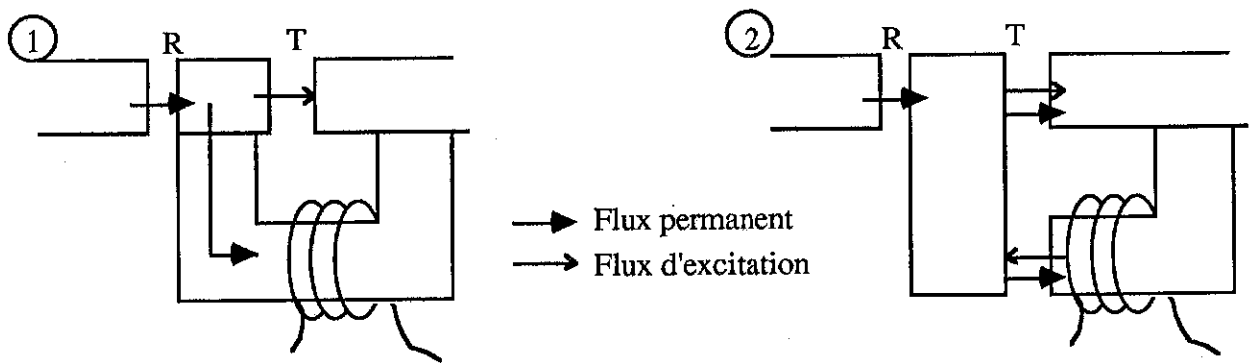


Figure V - 10 : Systèmes présentant un entrefer nul en position de travail pour la bobine et un rappel par aimant seul.

Ces deux solutions ne sont pas efficaces :

- La première présente de manière évidente un court-circuit pour le flux de l'aimant.
- En ce qui concerne la seconde, on constate que les flux sont en opposition dans l'un des entrefers. A première vue, cette solution offre cependant quelques possibilités puisqu'on a quand même des forces agissant dans le sens du travail et une polarisation constante permettant d'envisager un rappel par aimant seul assez facile.

Cependant, si l'on regarde de plus près ce système on constate que compte tenu de la répartition des flux, les forces de polarisation dues à l'interaction bobine-aimant sont égales en module et opposées dans les deux entrefers.

Globalement, cette force n'a donc aucun effet sur la partie mobile, et il ne reste que les forces d'excitation pure. L'intérêt des aimants est donc dans ce cas très limité.

On pourrait essayer de modifier les surfaces d'échange. Mais la répartition des flux magnétiques se fait de telle manière que les forces de polarisation sont toujours globalement nulles.

- Systèmes avec entrefer de repos pour la bobine

Les deux possibilités sont représentées en Figure V - 11.

Mais, ces deux solutions ne sont pas utilisables (flux en opposition, ou court-circuit).

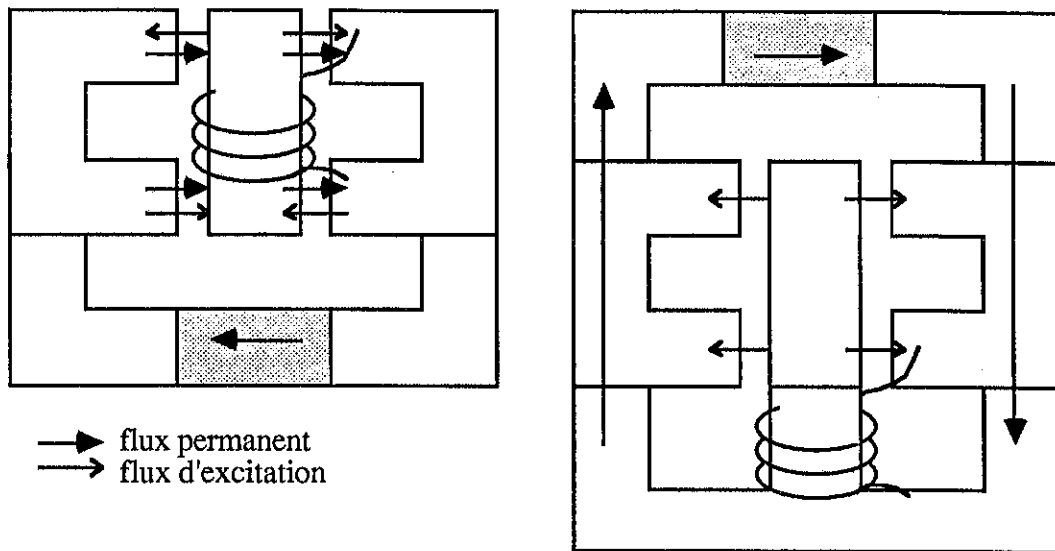


Figure V-11: Systèmes à entrefer nul pour la bobine en position de travail avec rappel par aimant seul.

Conclusions

Ce type de configurations conduit donc à des systèmes polarisés aussi performants que des systèmes non polarisés. Ils présentent donc très peu d'intérêt.

Plus généralement, le début de cette étude montre que le rappel par aimant seul est incompatible avec l'exigence d'une efficacité maximum pour la bobine.

II-3.c Somme d'entrefer constante pour la bobine et force permanente linéaire

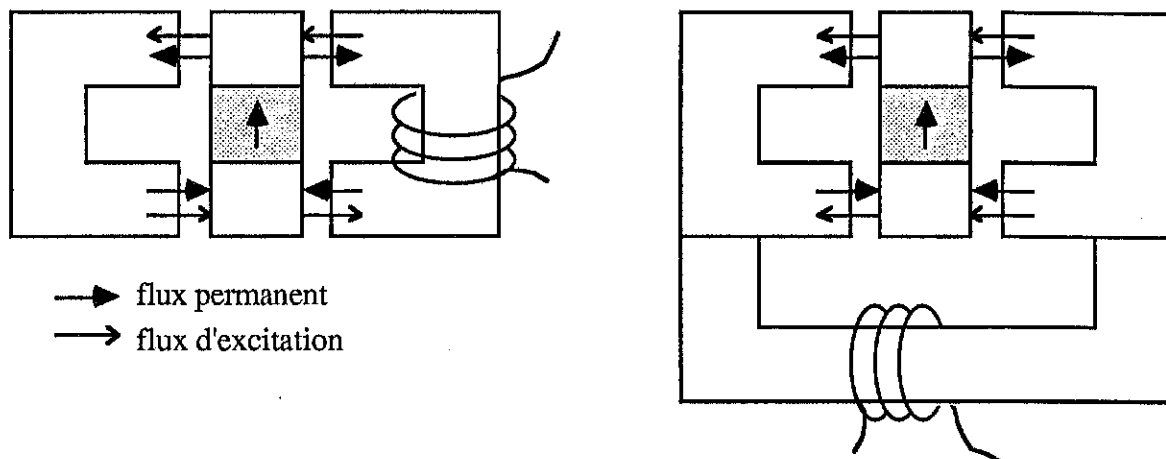


Figure V - 12 : Système à somme d'entrefer constante pour la bobine et à force permanente linéaire.

Le premier système a déjà été rencontré et étudié. Il répond aux exigences imposées sur la bobine et sur l'aimant.

Le deuxième système est une configuration équivalente où serait privilégié un mouvement de rotation.

A cette catégorie, appartient de même bon nombre des configurations précédentes pour lesquelles on adopterait un fonctionnement mécanique autre que celui imposé par la polarisation constante.

On pourrait également envisager de disposer un ou deux aimants entre une partie fixe et la partie mobile. Mais dans ce cas, la composition des flux ne conduit plus à une utilisation optimale de la polarisation.

Conclusions

Ces systèmes présentent un intérêt certain car ils répondent aux critères que nous nous étions imposés. Il s'agit d'ailleurs d'une configuration de base déjà présentée au chapitre IV.

II-3.d Entrefer fermé en position de travail pour la bobine et force permanente linéaire.

Si l'on veut un rappel linéaire, il faut que les entrefers de repos existent. Ceci élimine la première catégorie de configuration sans entrefers de repos.

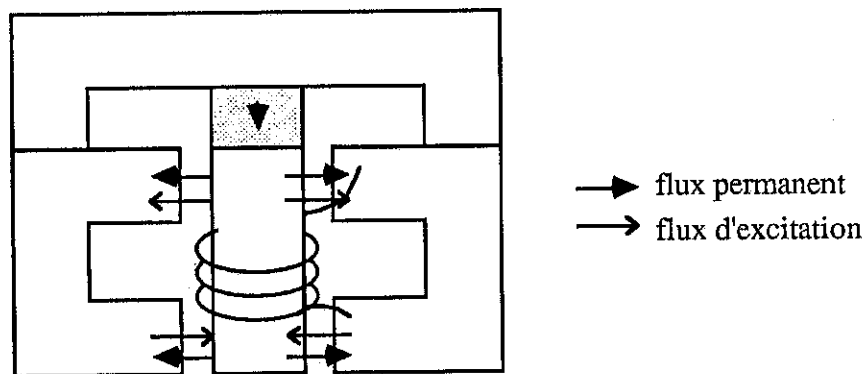


Figure V - 13 : Système à entrefer fermé en position de travail pour la bobine et force permanente linéaire.

Comme précédemment, le système tend à avoir un mouvement de rotation. Mais dans ce cas, la bobine ne voit plus un entrefer fermé en position de travail. Cette configuration appartient alors à la catégorie précédente.

Les autres possibilités d'arrangement des sources entre elles donnent lieu soit à un système également de type précédent soit à un court-circuit magnétique qui le rend inefficace.

Conclusions

Cette catégorie de configurations donnent donc lieu soit à des systèmes du type précédent soit à des solutions inefficaces.

III - REMARQUE

A la suite de ce chapitre, on pourra être tenté de se dire que tout n'a pas été exploré et d'essayer de découvrir une configuration meilleure et encore inconnue.

Nous avons également eu cette approche, et nous avons systématiquement mis à jour l'une ou l'autre des configurations déjà décrites ci-dessus.

IV - CONCLUSIONS

Nous avons mis en évidence quatre types de systèmes donnant à priori les solutions les plus performantes. Parmi ces quatre solutions :

- deux conduisent à des systèmes totalement inefficaces
- une autre donne un système équivalent à un système non polarisé
- la dernière donne lieu par contre à des systèmes performants que nous avons d'ailleurs évoqués précédemment.

Par conséquent, pour notre dispositif, nous utiliserons un système agissant à somme d'entrefers constante pour la bobine et à polarisation parallèle pour l'aimant ce qui suppose un rappel extérieur. Cette étude a d'ailleurs également montré que si l'on veut utiliser la bobine de manière optimale, on ne peut pas envisager un rappel par aimant seul.

Dans la suite, nous allons donc étudier la géométrie d'un tel dispositif, et optimiser notre système sous cet aspect.

CHAPITRE VI

INFLUENCE DES PARAMETRES
GEOMETRIQUES POUR LES SYSTEMES
A POLARISATION PARALLELE

INTRODUCTION

Dans le chapitre précédent, nous avons montré que la meilleure configuration d'un point de vue magnétique était la configuration dite "à polarisation parallèle". Le but de ce chapitre VI est de déterminer la géométrie la plus efficace pour ce type de configuration. Pour cela, nous allons étudier l'influence de la géométrie sur les performances et ces contraintes sur chaque élément (aimant, bobine, entrefer).

I - GEOMETRIE DE L'AIMANT ET DE SON CIRCUIT MAGNETIQUE

Nous avons vu que l'un des principaux intérêts de la polarisation parallèle réside dans le fait que l'on peut obtenir une force permanente à peu près linéaire le long de la course de la partie mobile. Ainsi, cette force permanente est facilement compensable mécaniquement et l'on pourra avoir un fonctionnement monostable assez aisément.

Cependant, ces résultats théoriques ont été obtenus pour des modèles simplifiés où les fuites et la variation du point de fonctionnement de l'aimant ont été négligés.

Si l'on considère des formes géométriques plus réalistes, ces deux phénomènes conduisent à une courbe de force permanente toujours symétrique mais incurvée (cf chapitre IV) donc plus difficile à compenser.

Nous allons donc essayer de réduire l'influence de ces phénomènes.

I - 1 Réduction des fuites magnétiques

Nous allons distinguer deux types de fuites :

- les fuites magnétiques autour des entrefers
- les fuites magnétiques dans le reste du circuit

et essayer de les traiter séparément.

I-1.a Fuites autour des entrefers (cf figure VI - 1)

Ces fuites se caractérisent par un coefficient σ déterminé par

$$\sigma = \Phi_{\text{tot}} / \Phi_e = 1 + \Phi_f / \Phi_e$$

- Φ_{tot} : flux magnétique total
- Φ_e : flux dans l'entrefer
- Φ_f : flux de fuites.

Ce coefficient n'est fonction que de la géométrie du système et éventuellement de la saturation.

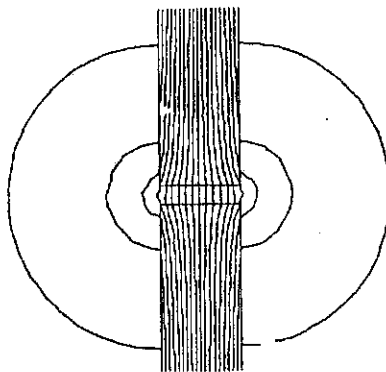


Figure VI - 1 : Lignes de fuites autour d'un entrefer.

Dans la mesure où l'on s'impose un entrefer donné sur une section donnée, on peut modifier uniquement la géométrie des pièces polaires ferromagnétiques. La solution la plus simple consiste à agir de la façon suivante (cf figure VI - 2) :



Figure VI - 2 : Réduction des fuites autour de l'entrefer.

De cette manière, on augmente la réluctance de fuites en agissant sur l'angle α donné aux pièces polaires.

Cette méthode a cependant un inconvénient important :

En effet, plus l'angle α est élevé, plus les fuites sont réduites, mais plus le risque de saturation dans les pièces ferromagnétiques est grand.

Il semble donc difficile de réduire les fuites magnétiques dans les entrefers.

I-1.b Fuites dans le reste du circuit magnétique

Considérons un circuit magnétique simple dans lequel figurent un aimant et un entrefer (cf figure VI - 3) .

Remarque : En l'absence d'entrefer, le circuit magnétique se refermerait presque parfaitement autour de l'aimant et il n'y aurait donc pas de fuites.

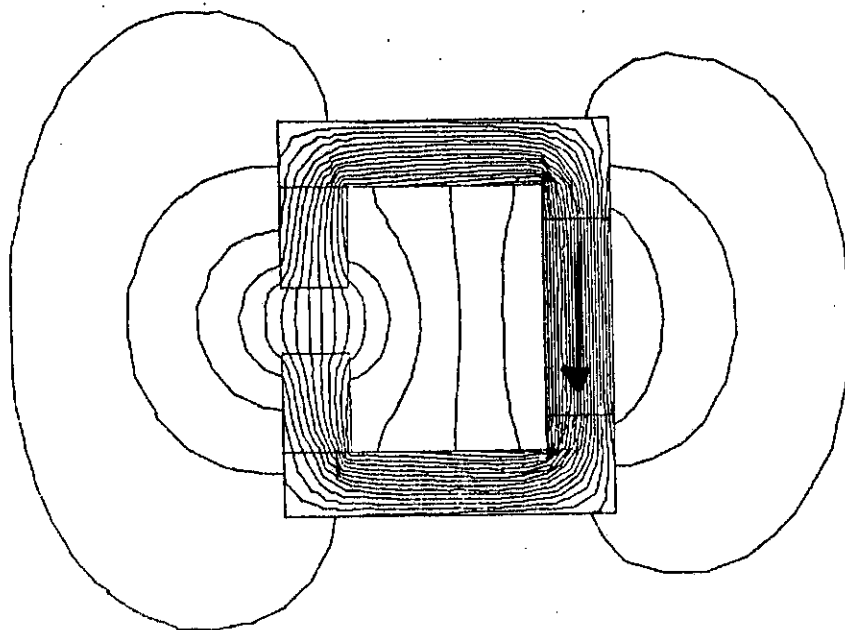


Figure VI - 3 : Répartition du flux magnétique dans un circuit simple.

Nous constatons que, outre les fuites autour de l'entrefer, une partie importante du flux évite complètement celui-ci et se referme entre les pièces ferromagnétiques.

Pour obtenir un flux aussi grand que possible dans l'entrefer, une méthode classique consiste à rapprocher l'aimant de celui-ci. A titre d'exemple, nous pouvons comparer les deux dispositifs de la figure VI - 4.

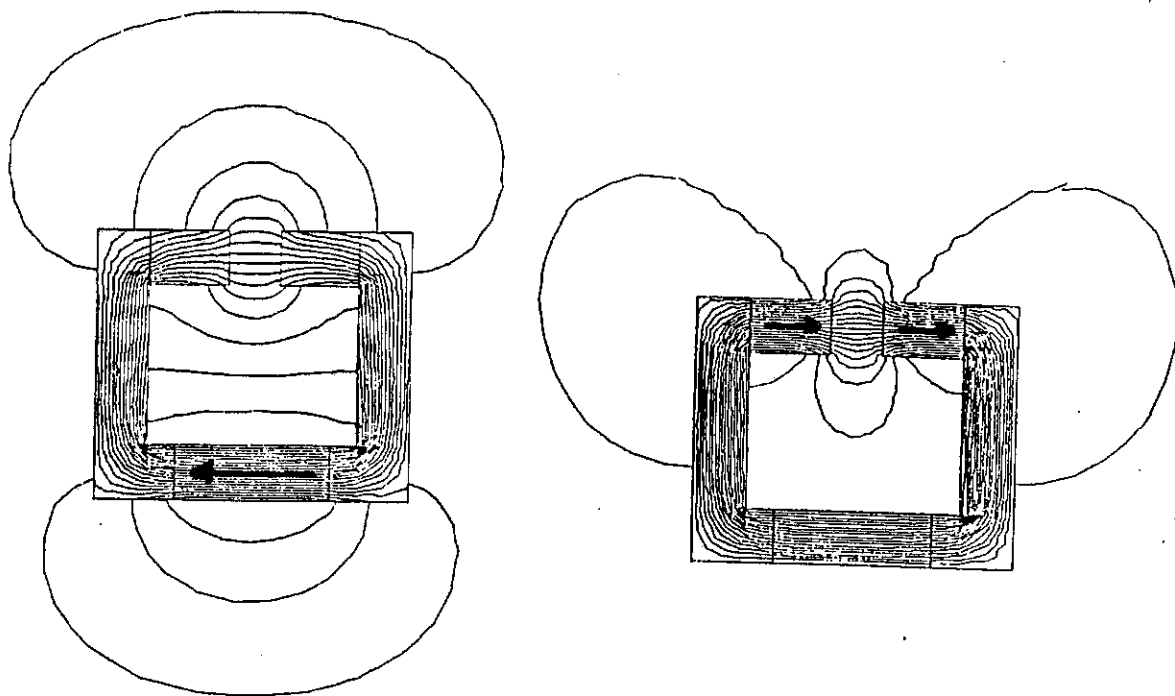


Figure VI - 4 : Influence de la position de l'aimant sur les fuites

On constate ainsi que les fuites sont nettement réduites dans le deuxième cas. Ainsi, pour un aimant présentant une aimantation de 1T, l'induction magnétique au centre de l'entrefer vaut 0,25 T dans le 1er cas et 0,51 T dans le second.

Ceci constitue donc l'une des améliorations importantes que nous intégrerons dans notre dispositif.

I - 2 Variation du point de fonctionnement de l'aimant

La courbe de fonctionnement d'un aimant quelconque est représentée en figure VI - 5.

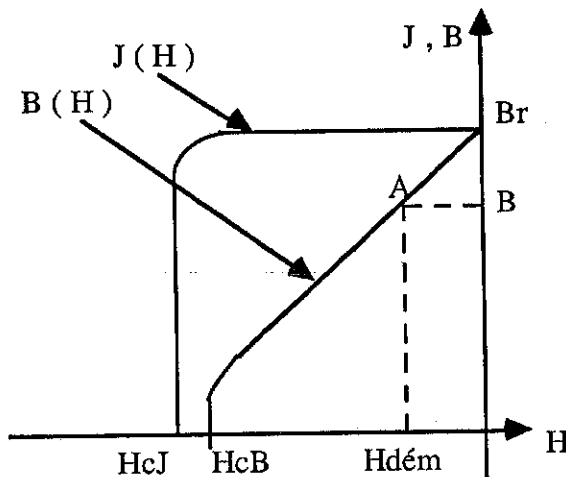


Figure VI - 5 : Courbe d'aimantation d'un aimant classique (avec $\mu_r = 1$).

Au point de fonctionnement A de l'aimant, correspond une certaine induction B et un certain champ démagnétisant $H_{dém}$. Dans le cas où il n'y a pas de sources extérieures, celui-ci est directement lié au circuit magnétique vu par l'aimant.

Quand celui-ci ne comporte pas d'entrefers :

- $H_{dém} \approx 0$ (en négligeant le champ démagnétisant dans le fer)
- $B \approx B_r$

Si le circuit magnétique comporte un entrefer, et dans le cas où l'on peut négliger les fuites on peut exprimer simplement l'induction magnétique créé par l'aimant :

$$B = \frac{R_a}{(R_a + R_e)} B_r$$

$$R_a = \frac{L_a}{\mu_0 \mu_r S_a} : \text{réductance de l'aimant}$$

$$R_e = \frac{e}{\mu_0 S_e} : \text{réductance de l'entrefer équivalent.}$$

$$B = \frac{1}{(1 + R_e/R_a)} B_r$$

La variation du point de fonctionnement de l'aimant dépend donc du rapport entre les réluctances de l'aimant et de l'entrefer.

$$R_e / R_a = e / L_a * S_a / S_e$$

Dans la mesure où les sections d'aimant et d'entrefers sont généralement imposées, nous constatons que plus l'aimant sera long par rapport à l'entrefer, moins le point de fonctionnement de l'aimant variera (résultats déjà pressentis au chapitre IV).

A titre d'exemple, si l'on veut obtenir une variation maximum de 10 % de l'induction créée par l'aimant cela revient à utiliser un aimant 9 fois plus long que l'entrefer maximum (dans le cas où les sections sont égales).

Dans notre dispositif, nous utiliserons donc une longueur d'aimant suffisante pour ne pas trop affecter le point de fonctionnement de l'aimant.

I - 3 Conclusions

Cette première partie nous a permis d'établir qu'il fallait :

- 1 - disposer le ou les aimants le plus près possible des entrefers
- 2 - utiliser un aimant suffisamment long pour que son point de fonctionnement varie peu.

II - GEOMETRIE DE LA BOBINE ET DE SON CIRCUIT MAGNETIQUE

Nous avons déterminé la structure magnétique de notre système pour que la bobine ait une efficacité maximum pour une puissance d'alimentation minimum.

La détermination d'une géométrie optimale doit également prendre en compte cet objectif. Aussi, nous allons étudier particulièrement trois axes d'améliorations :

- 1 - Utilisation optimale des ampères tours dans le circuit magnétique
- 2 - Dimensionnement de la bobine - utilisation optimale de la puissance électrique
- 3 - Influence des fuites magnétiques.

II - 1 Utilisation optimale des ampères-tours dans le circuit magnétique

Nous avons adopté pour notre système une structure à somme d'entrefer constante pour la bobine (cf chapitre V).

En particulier, nous avons mis en évidence deux sous-structures (cf figure VI - 6).

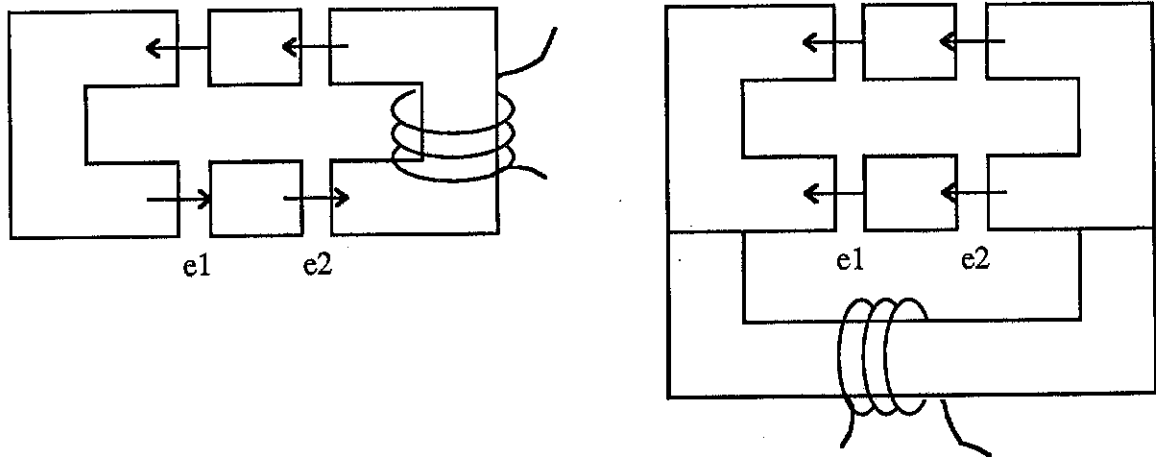


Figure VI - 6 : Sous-structures de la configuration à somme d'entrefers constante pour la bobine.

Etudions l'efficacité des ampères tours dans chacun de ces systèmes :

Soit E l'entrefer constant $E = e_1 + e_2$.

Dans l'hypothèse simplificatrice où la réluctance du circuit ferromagnétique est négligeable et où l'on ne tient pas compte des fuites :

- dans le 1er cas, la bobine voit un entrefer égal à $2E$ et produit une induction ΔB dans les entrefers.
- dans le 2ème cas, la bobine voit deux entrefers E en parallèle ce qui équivaut à un entrefer égal à $E / 2$. Elle produit donc une induction valant $4 \Delta B$ qui se répartit entre chaque branche. Dans chaque entrefer, il règnera donc une induction égale à $2 \Delta B$.

Cette deuxième configuration permet donc d'utiliser au mieux les ampères-tours créés par la bobine. Elle correspond cependant à un volume plus important du fait de la branche supplémentaire.

II - 2 Dimensionnement de la bobine. Utilisation optimale de la puissance électrique

Nous allons étudier ici quel type de géométrie adopter pour la bobine.

Prenons par exemple les deux bobines représentées en figure VI - 7.

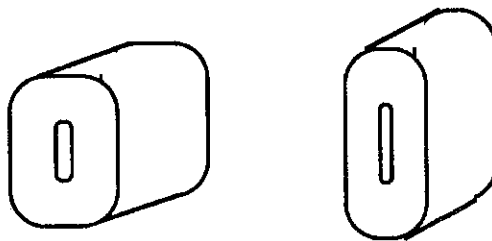


Figure VI - 7 : Exemple de deux bobines de géométrie différente.

Même si elles peuvent fournir les mêmes ampères-tours NI , leurs résistances sont bien différentes et elles ne consomment pas la même puissance électrique.

Posons :

- N : nombre de spires de la bobine
- I : courant dans une spire
- J : densité de courant dans une spire
- r : résistance moyenne d'une spire
- R : résistance totale de la bobine.
- s : section d'une spire
- S : section totale de la bobine
- l : longueur moyenne d'une spire
- ρ : résistivité du cuivre

La puissance d'alimentation P s'exprime simplement par :

$$P = R I^2 \quad \text{que l'on peut mettre sous la forme}$$

$$P = NI * r J s$$

$$\text{or } r = \rho l / s.$$

$$\text{d'où : } P = NI \rho J l \quad \text{soit} \quad NI / P = 1 / \rho J l$$

Pour obtenir un rapport NI / P maximal, il faut donc travailler avec des densités de courant plutôt faibles dans une bobine relativement plate (pour avoir une longueur moyenne faible).

Ceci revient donc à surdimensionner la bobine ce qui pourra poser quelques problèmes dans la mesure où l'on désire que le dispositif occupe un volume plutôt faible.

II - 3 Influence des fuites magnétiques

Sans oublier les phénomènes propres aux entrefers, le circuit magnétique vu par la bobine présente également des fuites.

En particulier on peut se demander si il ne faut pas, comme dans le cas de l'aimant, disposer la bobine le plus près possible des entrefers.

Considérons le système à somme d'entrefers constante que nous avons retenu au II - 1.

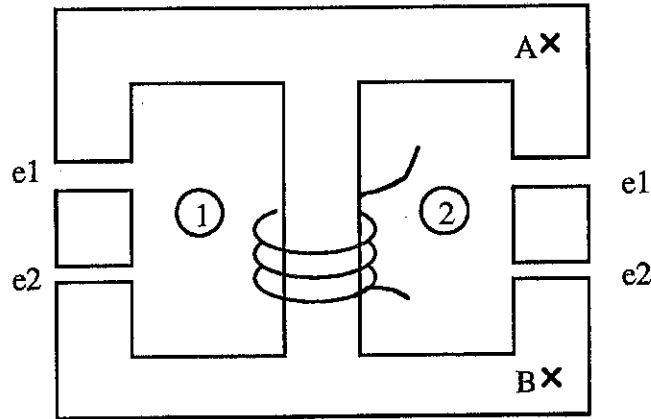


Figure VI - 8 : Système à somme d'entrefers constante retenu

Ce système présente des fuites magnétiques qui peuvent être importantes dans les zones 1 et 2.

Cependant, la ddp magnétique entre les points A et B reste la même puisqu'elle est imposée directement par la bobine. Par conséquent, le champ magnétique et donc l'induction dans l'entrefer ne sont pas affectés par ces fuites. La différence se produit dans le noyau de la bobine où passe un flux magnétique plus important.

Ceci reste donc valable tant que l'on n'atteint pas la saturation dans cette zone.

II - 4 Conclusions

Nous employerons donc des bobines avec une faible densité de courant, donc surdimensionnées.

Nous essayerons également d'utiliser au mieux les Ampères-tours fournis par ces bobines dans le circuit magnétique de nos dispositifs.

III - GEOMETRIE DES ENTREFERS

Jusqu'à présent, nous avons travaillé sur des entrefers de section perpendiculaire aux lignes de flux incidentes. Une possibilité d'amélioration couramment utilisée dans les dispositifs non polarisés consiste à incliner les sections d'échanges d'un certain angle α (cf figure VI - 9).



Figure VI - 9 : Inclinaison des surfaces d'échange.

Nous allons étudier si cette modification conduit également à des améliorations dans le cas des systèmes polarisés parallèles.

Remarque : Il s'agit ici d'une étude qualitative permettant d'appréhender rapidement l'influence d'un paramètre sur le fonctionnement du système. Or nous avons vu précédemment que le calcul général de la force dans un système parallèle conduisait à un résultat complexe même dans le cas $\alpha = 0$.

Ici, pour des raisons de simplification et de clarté, nous supposons être dans le cadre des hypothèses simplificatives suivantes :

- pas de fuites
- point de fonctionnement de l'aimant invariable.

Et l'on considérera uniquement une paire d'entrefers (cf figure VI-10).

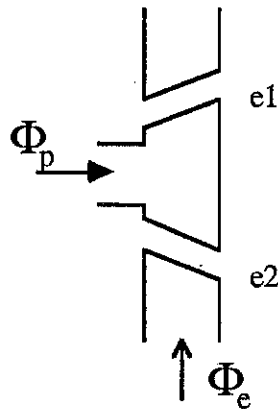


Figure VI - 10 : Système d'entrefers considéré.

III - 1 Modification des entrefers

Si l'on considère un entrefer incliné comme précédemment, la valeur de l'entrefer réel et de la section d'échange dépend de α (cf figure VI - 11).

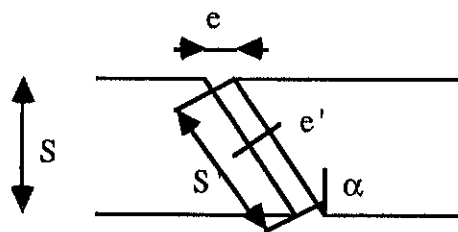


Figure VI - 11 : Influence de l'angle α sur la géométrie de l'entrefer.

On aura donc :

$$e' = e \cos \alpha \quad \text{et} \quad S' = S / \cos \alpha \quad (\text{en négligeant les extrémités})$$

Dans le cas du système figure VI-10, nous aurons en particulier

$$e_1' = e_1 \cos \alpha$$

$$e_2' = e_2 \cos \alpha$$

$$S' = S / \cos \alpha$$

$$\text{et} \quad e_1' + e_2' = E \cos \alpha$$

III - 2 Modification des flux magnétiques

III-2.a Flux d'excitation

Pour $\alpha = 0$ $\Phi_e = k S / E$ k constante dépendant de l'excitation

$$\alpha \neq 0 \quad \Phi'_e = k S' / E'$$

$$\Phi'_e = k S / E \cos^2 \alpha = \Phi_e / \cos^2 \alpha$$

L'inclinaison des surfaces permet donc d'augmenter l'efficacité de la bobine.

III-2.b Flux permanent

La répartition du flux permanent entre les deux entrefers dépend de leurs valeurs respectives, or :

$$e'_1 / e'_2 = (e_1 \cos \alpha) / (e_2 \cos \alpha) = e_1 / e_2$$

La répartition du flux magnétique est donc inchangée. Comme la valeur de ce flux est imposée par la source permanente, les flux magnétiques permanents sont inchangés.

III - 3 Modification des forces

Nous n'allons considérer qu'un seul entrefer, puisque les phénomènes sont identiques. Seule la composante axiale $F_{//}$ est utile (cf figure VI - 12).

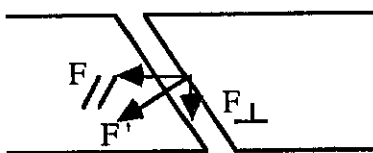


Figure VI - 12 : Décomposition de la force exercée dans un entrefer incliné.

$$F'_{//} = F' \cos \alpha$$

Dans le cadre des hypothèses précédentes on peut écrire :

$$F' = (\Phi'_p \pm \Phi'_e)^2 / K S' \quad K \text{ constante } (K = 1 / 2 \mu_0)$$

$$F' = \frac{\left(\Phi_p \pm \frac{\Phi_e}{\cos^2 \alpha} \right)^2}{K \frac{S}{\cos \alpha}}$$

$$F' = \frac{\Phi_p^2}{KS} \cos \alpha \pm \frac{2 \Phi_p \Phi_e}{K \cos \alpha S} + \frac{\Phi_e^2}{KS \cos^3 \alpha}$$

$$F_{//} = \frac{\Phi_p^2 \cos^2 \alpha}{KS} \pm \frac{2 \Phi_p \Phi_e}{KS} + \frac{\Phi_e^2}{KS \cos^2 \alpha}$$

Toujours sous les hypothèses très simplificatives émises plus haut, on peut considérer que le fait d'incliner les surfaces permet de :

- diminuer la force permanente
- conserver la force de polarisation mixte
- augmenter la force d'excitation prévue.

Dans le cas de systèmes plus réalistes, on peut s'attendre à ce que ces résultats soient moins simples. En particulier, l'inclinaison des surfaces diminue la réluctance de l'entrefer et cela a une conséquence certaine sur le point de fonctionnement de l'aimant.

Néanmoins, cette modification semble conduire à des améliorations notables, puisque nous désirons particulièrement privilégier les termes de la force dépendant de l'excitation par rapport à la force permanente, sans modifier le volume total du système.

IV - EXEMPLES DE GEOMETRIE REpondant A CES CRITERES

Nous avons recherché des configurations répondant à l'exemple de ces critères. Nous en avons sélectionné deux qui correspondent à peu près à cet objectif mais présentant néanmoins chacune leurs inconvénients.

IV - 1 Configuration avec l'aimant à l'intérieur de la bobine

Ce dispositif est représenté en figure VI - 13. Pour cette configuration et la suivante, nous avons représenté le système avec les section d'entrefers droites pour plus de clarté.

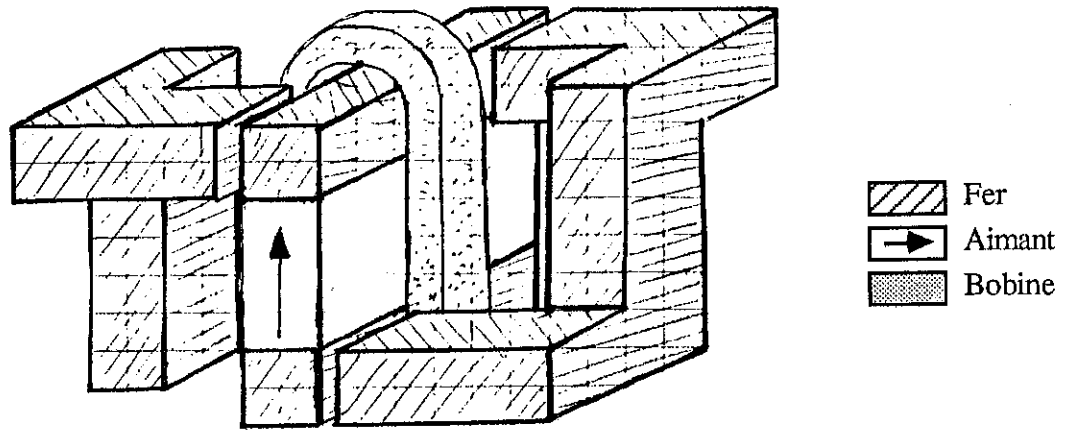


Figure VI - 13 : Dispositif avec l'aimant à l'intérieur de la bobine.

Ce système se comporte particulièrement bien du point de vue de l'aimant (proximité des entrefers, peu de fuites).

Par contre, comme l'aimant est situé à l'intérieur de la bobine, la longueur moyenne d'une spire de celle-ci est beaucoup plus importante que dans le cas d'un noyau purement ferromagnétique. Ce système nécessitera donc une puissance d'alimentation plus élevée.

Cette configuration sera néanmoins la base de la majeure partie des prototypes testés.

IV-2 Configuration avec les aimants à l'extérieur de la bobine

Celle-ci est représentée en figure VI - 14.

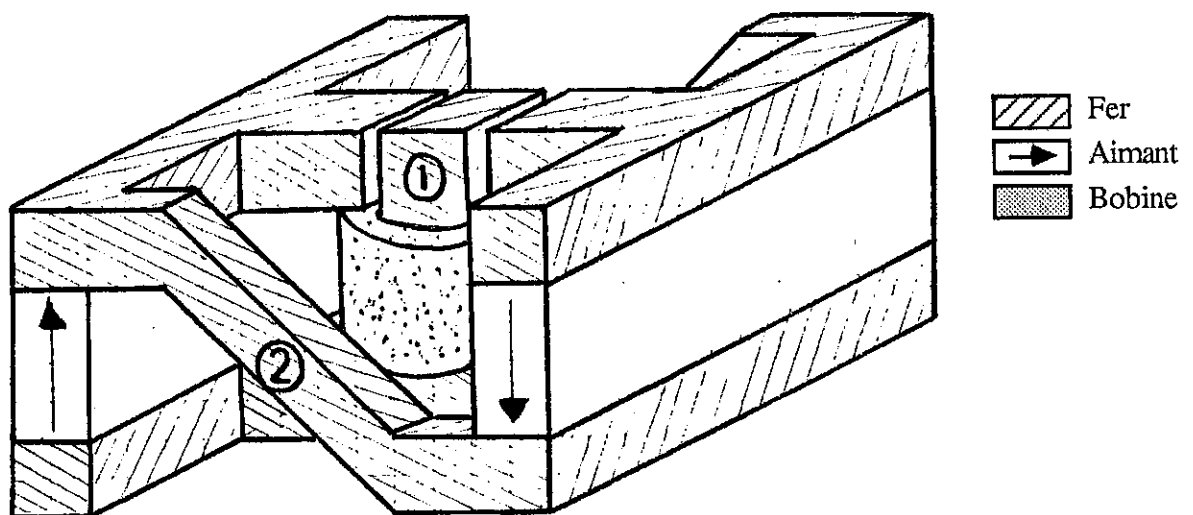


Figure VI - 14 : Dispositif avec aimants extérieurs.

Ce système permet d'avoir une bobine beaucoup plus économique car à noyau purement ferromagnétique.

Par contre, les flux de fuites entre par exemple les parties 1 et 2 sur la figure VI - 14 sont plus importants.

Il faut noter également que ces dispositifs ont une géométrie assez complexe qui rend difficile leur représentation en deux dimensions. Nous verrons que ceci nous posera des problèmes dans la phase d'optimisation par CAO.

V - CONCLUSIONS

A partir des objectifs de l'étude, nous avons établi les principaux aspects géométriques de notre système. Nous avons notamment mis en évidence deux configurations dont l'une va vous servir de support pour l'optimisation par CAO et les essais sur prototype.

CHAPITRE VII

UTILISATION DES TECHNIQUES DE CAO

[illegible]

I - INTRODUCTION

Depuis une vingtaine d'années, les techniques de conception tant mécanique que magnétique, thermique ou électrique ont été révolutionnées par l'arrivée des méthodes de CAO mises en œuvre sur des ordinateurs de plus en plus puissants.

En particulier en électromagnétisme, des logiciels existent qui permettent de modéliser les systèmes magnétiques et de les simuler afin d'obtenir les grandeurs intéressant l'utilisateur : potentiel, champ, induction, force ... magnétiques, ceci en 2D ou en 3D.

Le Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble développe ainsi depuis de nombreuses années plusieurs logiciels de ce type tels que FLUX2D et FLUX3D (ou FLUXLAB en version recherche).

Ces logiciels peuvent prendre en compte de phénomènes complexes tels que la saturation ou les courants de Foucault, et disposent d'une grande souplesse d'utilisation et d'exploitation. Ils font également appel à des méthodes numériques très élaborées qui permettent d'obtenir une approximation particulièrement fine de la solution exacte.

Ces travaux font l'objet de nombreuses publications, mais on peut avoir une approche générale des méthodes de CAO utilisées en électrotechnique en consultant la référence [1] .

II - PRINCIPALES METHODES UTILISEES

Nous n'allons exposer ici que les méthodes que nous avons utilisées, permettant d'obtenir les grandeurs magnétiques dans un problème magnétostatique.

II - 1 Méthode des éléments finis [2]

II-1.a Aspect géométrique

Le système magnétique est placé à l'intérieur d'une " boîte d'air " dont les côtés représentent l'infini (cf Figure VII - 1.a).

Puis on découpe l'ensemble en domaines élémentaires (cf Figure VII - 1.b).

Ces domaines élémentaires sont le plus souvent des triangles ou des quadrilatères en 2D (respectivement des tétraèdres ou des briques parallélépipédiques en 3D)

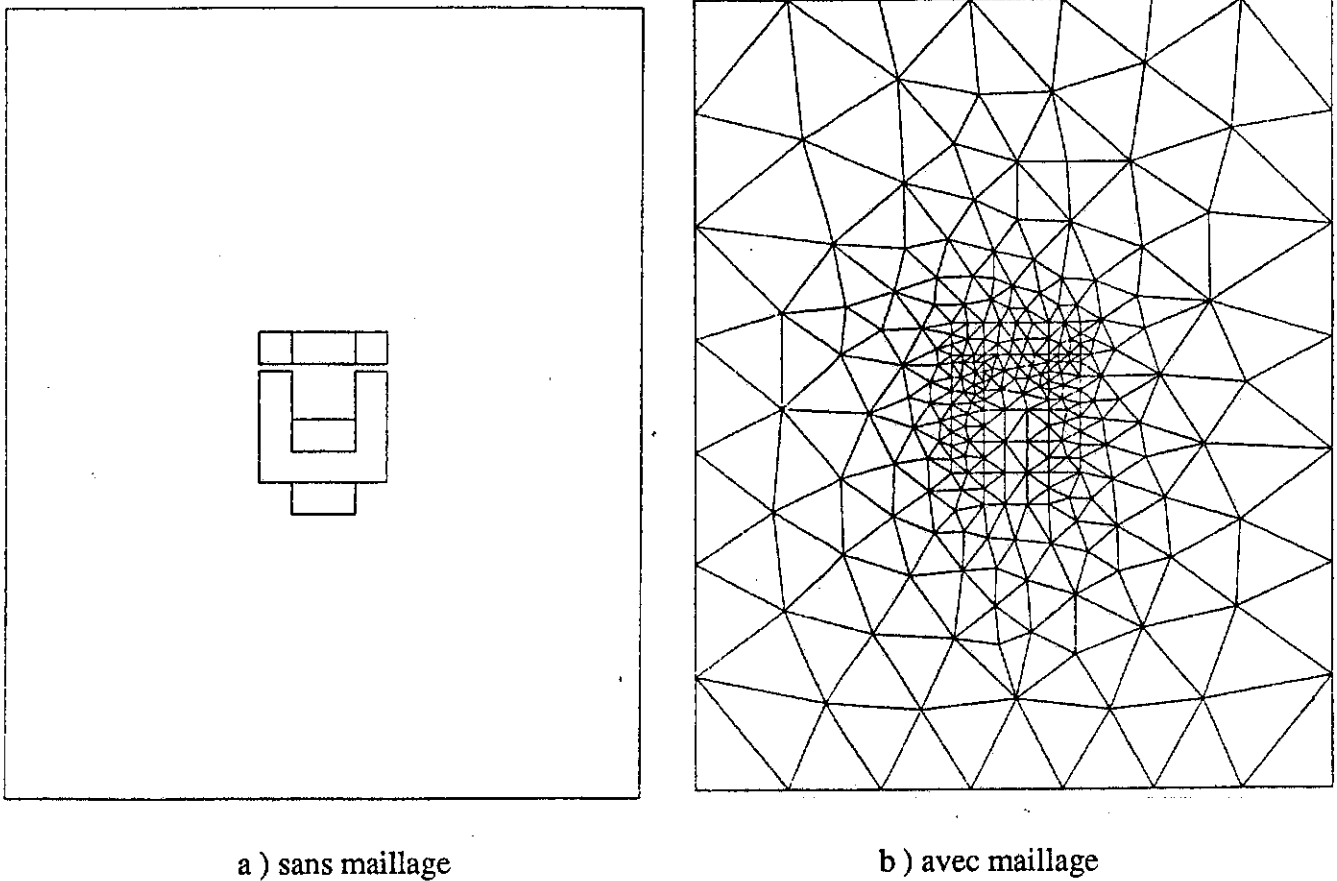


Figure VII - 1 : Exemple de géométrie en éléments finis

II-1.b Aspect physique

Les deux méthodes principalement employées utilisent

- soit le potentiel scalaire V tel que $H = - \text{grad } V$
- soit le potentiel vecteur A tel que $B = \text{rot } A$.

Ce dernier a dans le cas général trois composantes A_x, A_y, A_z .

En 2D, seule la composante A_z n'est pas nulle. Ces deux méthodes conduisent alors à une précision et des temps de calcul comparables.

En 3D par contre, les trois composantes du potentiel vecteur sont non nulles ce qui augmente considérablement la taille et le temps des calculs mais aussi l'imprécision de la solution.

On utilisera donc principalement le potentiel vecteur dans le cas des systèmes présentant des sources de courant pour lesquels la formulation en potentiel scalaire n'est pas adaptée.

II-1.c Détermination de la solution

On impose des conditions limites au potentiel utilisé sur les frontières du domaine.

Dans notre cas, nous utilisons deux conditions correspondant à deux phénomènes principaux :

- le champ et l'induction magnétiques sont nuls à l'infini
- le champ et l'induction sont normaux à la frontière (par exemple dans le cas où l'on utilise les symétries d'un circuit pour n'en représenter qu'une partie).

A partir de ces conditions, on peut calculer la valeur du potentiel aux nœuds du maillage. Puis pour calculer cette valeur en tout point du domaine, on considère chaque élément séparément et l'on interpole la valeur du potentiel en un point de cet élément par un polynôme à partir des valeurs du potentiel aux nœuds.

Cette interpolation sur le potentiel est le plus souvent linéaire (ordre 1), ou quadratique (ordre 2).

Lorsque l'on connaît la valeur du potentiel en tout point du domaine, on obtient alors facilement les valeurs approchées de l'induction et du champ magnétiques.

- Dans le cas d'une interpolation linéaire, ils sont constants par élément
 - Dans le cas d'une interpolation quadratique, ils sont linéaires par élément.
- Cette deuxième méthode est donc plus précise.

La "qualité" de la solution dépend tout particulièrement de deux conditions :

- la qualité du maillage

L'utilisateur doit pouvoir concentrer son maillage dans les zones cruciales pour affiner la solution (par exemple dans notre cas les entrefers).

- l'influence de la boîte d'air

Les flux magnétiques dans l'air tendent à se disperser de manière importante. Il est donc primordial que les frontières modélisant l'infini ne soient pas situées trop près du système à étudier et ainsi ne perturbent pas trop la solution.

II - 2 Détermination de la force magnétique - Méthode des travaux virtuels

Pour déterminer la force magnétique créée dans un dispositif (en l'absence de courants induits), les logiciels utilisés au Laboratoire font appel à la méthode dite des travaux virtuels [3], [4].

Principe :

On sépare le système magnétique en une partie fixe et une partie mobile susceptible de se déplacer sous l'action de la force à calculer. Ceci suppose qu'il existe un contour dans l'air englobant totalement cette partie mobile.

Si l'on appelle W l'énergie magnétique de ce domaine, on peut évaluer les trois composantes de cette force F (en 3D) :

$$F_x = - \partial W / \partial x \quad F_y = - \partial W / \partial y \quad F_z = - \partial W / \partial z$$

On suppose un déplacement " virtuel " suivant chacune des directions , et on évalue la dérivée de l'énergie en fonction de ce déplacement. Ceci nous permet ensuite de calculer la force.

Cette méthode donne d'excellents résultats. Son inconvénient majeur réside dans le fait qu'il faut que la partie mobile soit entièrement séparée de la partie fixe pour autoriser les trois déplacements. Ceci interdit par exemple, le calcul de la force exercée au contact entre les deux parties.

III - PROBLEMES RENCONTRES

Nous avons voulu également soulever deux aspects de cette modélisation qui nous concernent particulièrement.

III - 1 Modélisation des aimants

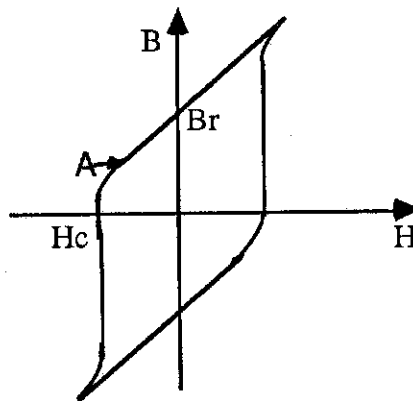


Figure VII - 2 : Cycle d'hystérésis d'un aimant classique

La Figure VII - 2 montre le cycle d'hystérésis d'un aimant. Le point A correspond au début de la désaimantation.

Le champ coercitif H_c constitue l'une des principales caractéristiques d'un aimant. Il peut être relativement faible dans le cas des aimants AlNiCo (de l'ordre de 50 à 160 k A/m) , ou élevé pour les Ferrites ou les SmCo (respectivement 200 à 300 kA/m et 700 à 800 kA/m) .

Dans le cas des logiciels FLUX2D ou FLUX3D, ce champ maximum n'est pas pris en compte. On modélise la variation du point de fonctionnement de l'aimant de la façon suivante (cf Figure VII - 3) :

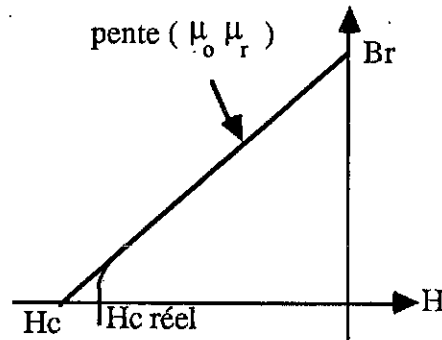


Figure VII - 3 : Modélisation du cycle d'hystérésis d'un aimant

On considère que ce point de fonctionnement se déplace suivant une droite de pente $\mu_0\mu_r$ et passant par l'induction rémanente B_r à l'origine. Ceci nous donne alors un champ coercitif approché différent du champ coercitif réel.

Ce modèle reste donc valable tant que l'aimant n'est pas désaimanté (ce qui sera le cas la plupart du temps en ce qui nous concerne).

A fortiori, il ne tient pas compte des cycles mineurs d'hystérésis qui dépendent de l'historique de l'aimant.

Des modèles théoriques existent qui prennent en compte tous ces phénomènes liés à l'hystérésis. l'un des plus classique est celui de Preisach repris par Mayergoyz [5].

Cependant, ces modèles mis en œuvre numériquement conduisent à des résolutions de systèmes non linéaires et donc à des tailles et des temps de calculs beaucoup plus importants.

Ce sujet donne toujours lieu à de nombreux travaux de recherche.

III - 2 Précision de la modélisation en 2D

Quand on traite un dispositif par une modélisation en 2D, cela revient à supposer que sa longueur est infinie suivant la 3ème dimension, ou encore que l'on néglige les effets de bords.

Ceci est bien adapté au cas des moteurs électriques où la valeur de l'entrefer reste petite devant la longueur des machines.

Cependant dans notre cas nous étudions des dispositifs comportant des entrefers de section à peu près carrée, et où la largeur est loin d'être négligeable. Pour étudier la limite de validation de la modélisation 2D, nous avons étudié et comparé les forces créées entre deux aimants parallélépipédiques (cf Figure VII - 4). Ces forces sont connues analytiquement en 2D et en 3D et nous avons modélisé ce dispositif sous les deux approches.

Nous avons ainsi montré , [6], qu'il fallait que le système ait une longueur très importante suivant la troisième dimension (ici suivant Y) pour que le modèle 2D (dans le plan XZ) soit applicable, notamment pour le calcul de la force axiale F_z sur la Figure VII - 4 .

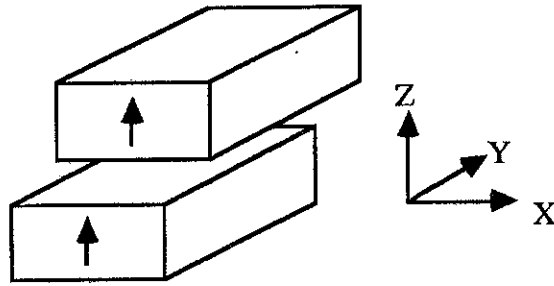


Figure VII - 4 : Dispositif étudié

Nous avons également pu constater la très bonne précision des logiciels pour un maillage moyennement dense :

- moins de 5% d'erreur par rapport au modèle 2D pour FLUXLAB2D
- moins de 10% d'erreur par rapport au modèle 3D pour FLUXLAB3D

Ceci confirme donc que les logiciels 3D ont leur place dans la panoplie des concepteurs de systèmes électromagnétiques.

Leurs inconvénients majeurs résident cependant dans l'accroissement très important de la taille et de la durée des calculs qu'ils impliquent.

IV - UTILISATION DE LA CAO POUR NOS DISPOSITIFS

IV - 1. Outils et matériel utilisés

Conscients de l'intérêt des systèmes de CAO, nous avons essayé d'utiliser autant que possible les outils logiciels dont nous pouvions disposer.

Nous avons pu utiliser les logiciels FLUXLAB 2D et 3D dans leur version standard avec maillage triangulaire (ou tétraédriques) et résolution par la méthode des éléments finis , mais aussi dans des versions présentant un meilleur maillage 3D ou des méthodes de résolution avec couplage éléments finis et équations intégrales de frontière.

Ces logiciels furent disponibles successivement sur :

- Norsk Data - Matra 500
- un réseau de stations de travail Apollo
- un calculateur vectoriel Alliant - DSP 9000

Il faut également noter que le Laboratoire dispose de bibliothèques de dialogue et de tracé de courbes que nous avons utilisées.

IV - 2 Modélisation de nos dispositifs

Nous avons vu dans le Chapitre VI les configurations que nous avons adoptées. Ce sont des

géométries où il n'existe pas d'axe ou de plan de symétrie permettant de les traiter en 2D.

Nous avons donc utilisé :

- les outils 2D pour toutes la première partie de notre travail (visualisation des flux dans les systèmes non polarisés, polarisés série et polarisés parallèle des chapîtres II et IV).
- les outils 3D pour l'optimisation des systèmes 3D retenus.

Pour vérifier numériquement les résultats obtenus au chapitre VI , nous avons travaillé en particulier sur deux systèmes.

Le premier pour étudier l'influence de la position de l'aimant sur la forme de la force permanente en fonction de l'entrefer.

Le deuxième, plus élaboré, pour voir l'influence de l'inclinaison des surfaces sur les différents termes de la force.

IV-2.a Etude de la force permanente

La Figure VII - 5 nous montre le système étudié.

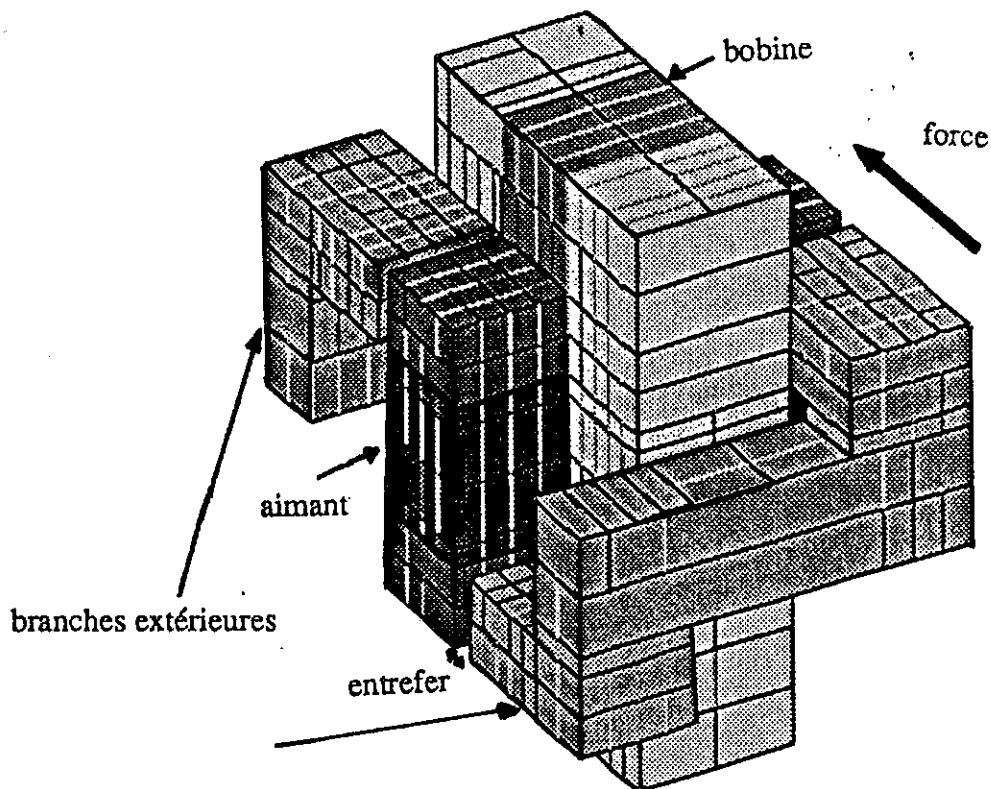


Figure VII - 5 : Premier système modélisé

Il s'agit de la configuration décrite au Chapitre VI, dans laquelle l'aimant est placé à l'intérieur de la bobine. La partie mobile est constituée par les deux branches extérieures qui permettent aux flux magnétiques de se refermer.

Nous avons donc étudié la variation de la force permanente suivant la position du système (cf Figure VII - 5).

Comme le système ne comporte pas de surfaces inclinées nous avons pu utiliser un mailleur brique. Ce mailleur est plus simple d'utilisation et présente moins de contraintes sur la forme des éléments que le mailleur tétraédrique.

Il permet de plus de paramétrer la géométrie et donc de la faire varier très facilement. Ceci est particulièrement utile dans notre cas, puisque nous voulons étudier la force pour différentes valeurs de l'entrefer.

Nous comparerons résultats numériques et expérimentaux dans le Chapitre suivant.

Il faut cependant noter que par exemple pour un entrefer de 1,5 mm le maillage en éléments finis a duré environ 1h de temps CPU, et la résolution en potentiel scalaire environ 40 mm, sur le réseau de stations de travail APOLLO.

D'autre part la matrice de travail comportait 7666 lignes avec 50 termes en moyenne.

Il s'agit donc de temps et de taille de calcul déjà importants qui laissent augurer des problèmes que nous rencontrerons pour le deuxième dispositif plus complexe.

IV-2.b Inclinaison des surfaces

Le dispositif est représenté en Figure VII - 6.

Le principe de fonctionnement est le même que le précédent, mais les surfaces d'échange sont inclinées. Le dispositif occupe également un volume global plus faible.

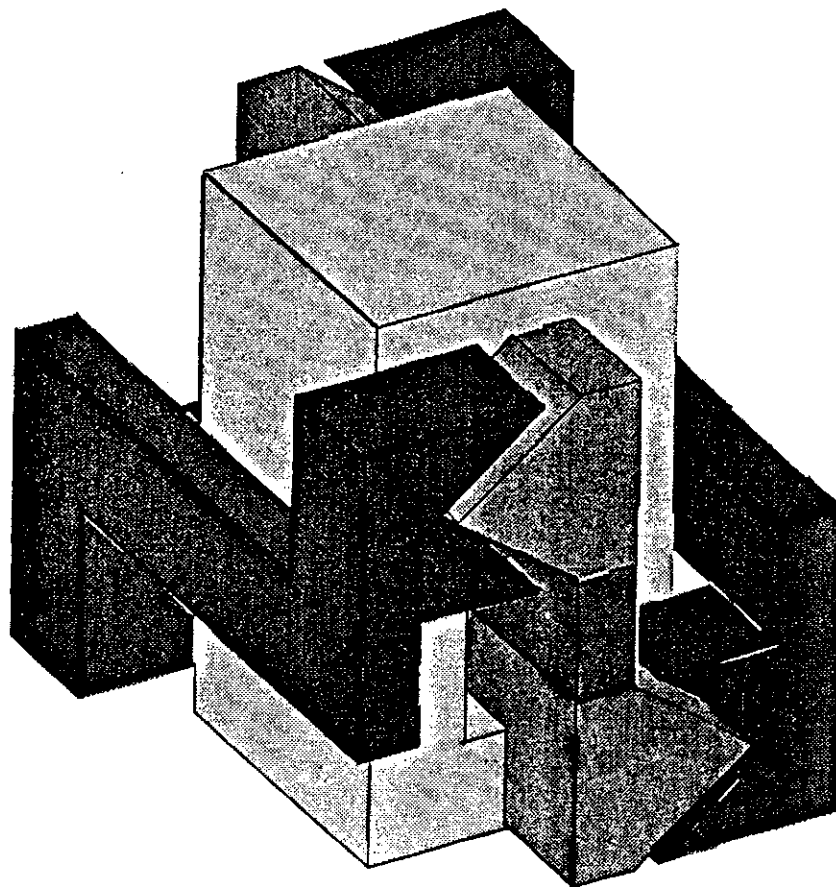


Figure VII - 6 : Deuxième dispositif modélisé

Nous avons dû utiliser un mailleur tétraédrique dans ce cas.

Ce deuxième dispositif est beaucoup plus complexe à modéliser correctement que le précédent. En effet :

- les surfaces inclinées tendent à réduire l'entrefer. On doit donc modéliser deux surfaces importantes très proches l'une de l'autre, ce qui ne peut être fait que par un maillage très fin de l'entrefer.

- Comme nous avons des sources de courant, nous devons utiliser le potentiel vecteur ce qui multiplie par trois le nombre d'inconnues.

De plus, pour avoir une précision comparable à celle du potentiel scalaire, il faut également mailler beaucoup plus finement le domaine.

Ceci fait que l'on obtient des matrices de travail extrêmement importantes qui nous ont même obligé à surdimensionner les tailles pourtant déjà élevées des tableaux utilisés dans les logiciels.

Les temps de calcul sont pour les mêmes raisons très longs.

Ce type d'optimisation n'était donc pas possible sur le matériel disponible (réseau Apollo), il était totalement exclu d'espérer obtenir un jeu de résultats exploitables. Nous avons donc réalisé des essais sur prototypes qui feront l'objet du Chapitre suivant.

Ceci pourra être remis en question avec l'arrivée d'ordinateurs vectoriels tels que l'Alliant ayant une mémoire plus importante et étant surtout beaucoup plus rapides.

IV - 3 Logiciels d'aide à la conception

En prévision de ce type de problème, et pendant la phase de recherche de configuration, nous avons réalisé un outil permettant de visualiser rapidement l'influence d'un paramètre sur la force magnétique créée dans un système.

Nous utilisons le modèle Ampérien et l'analogie circuit magnétique - circuit électrique décrits au chapitre IV pour calculer la force en fonction de l'ensemble des paramètres d'un système.

On peut alors fixer la valeur d'un certain nombre de ces paramètres et faire varier la valeur de la force en fonction d'un autre (par exemple l'entrefer).

Ce logiciel nous permet de visualiser rapidement les variations souvent complexes de la force magnétique.

Il a cependant quelques inconvénients :

- Il ne permet que de détecter la saturation mais ne peut la traiter puisque le modèle n'est alors plus valable.
- Plus la géométrie est complexe, plus il est difficile d'évaluer les coefficients et les réluctances de fuite dans un circuit.

Le "bon sens" magnétique de l'utilisateur prend alors une place prépondérante.

Ce logiciel constitue néanmoins un outil auxiliaire d'aide à la conception assez précis mais surtout rapide.

V - CONCLUSIONS

Les outils de CAO classiques pourtant nombreux et performants au Laboratoire se sont révélés peu adaptés à nos problèmes.

En effet, les géométries complexes que nous étudions conduisent actuellement à des temps et des tailles de calcul incompatibles avec la démarche d'une optimisation par CAO.

Cependant, l'arrivée d'ordinateurs plus puissants peut permettre de dépasser ce problème et ainsi de traiter des géométries complexes en 3D.

CHAPITRE VIII

ETUDE EXPERIMENTALE
D'ELECTRO-AIMANTS POLARISES

INTRODUCTION

Nous allons présenter ici les essais effectués sur les prototypes présentés au chapitre VI. Les mesures des forces ont été réalisées sur le banc de mesures déjà décrit au Chapitre IV.

Nous avons tout d'abord vérifié expérimentalement sur le premier prototype les résultats du Chapitre VI concernant l'optimisation géométrique du système (influence de la longueur de l'aimant, influence des fuites, inclinaison des surfaces).

Le deuxième prototype rassemble les innovations précédentes dans un volume plus réduit correspondant aux puissances électriques recherchées.

I - RAPPEL DES DISPOSITIFS ETUDIES

Les prototypes que nous allons tester dérivent tous de la même configuration représentée en Figure VIII - 1 :

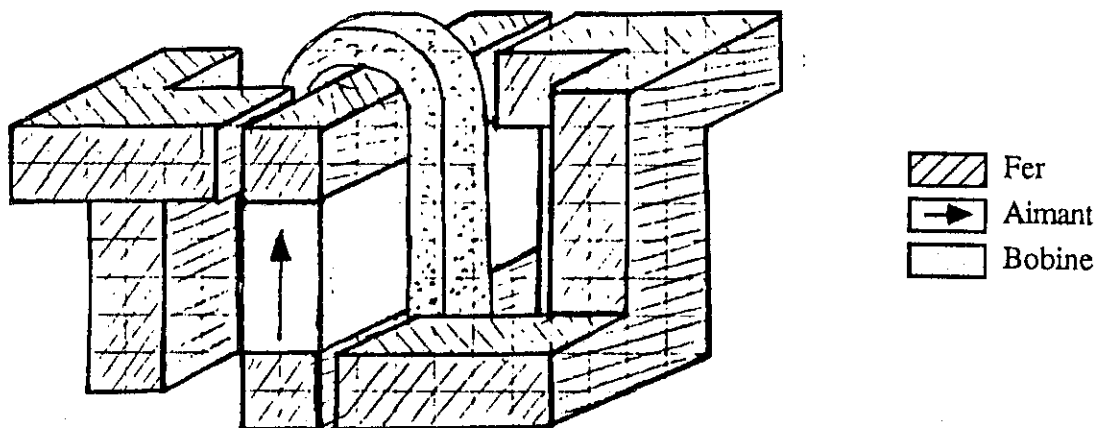


Figure VIII - 1 : Dispositif avec l'aimant à l'intérieur de la bobine

Dans ce système, l'aimant est particulièrement bien disposé. Il est en effet proche des entrefers et présente ainsi peu de fuites magnétiques. Ceci permet alors de compenser plus facilement la force magnétique permanente due à l'aimant.

D'autre part, le circuit magnétique parcouru par le flux d'excitation passe deux fois à l'intérieur de la bobine. Les Ampères-Tours de celle-ci sont donc plus efficaces.

Par contre, comme la bobine entoure l'aimant et une partie du circuit ferromagnétique, elle occupe un volume important et donc nécessite une puissance d'alimentation plus élevée.

Nous allons vérifier ces résultats sur les deux prototypes étudiés.

II - ETUDE DU PREMIER DISPOSITIF

II - 1 Caractéristiques

Dans un premier temps, nous n'avons pas cherché à optimiser le volume du système, notamment en ce qui concerne la bobine. Ceci nous a permis en particulier de tester plusieurs formes pour l'aimant et ses pièces polaires.

Les principales caractéristiques du système sont les suivantes :

Aimant :

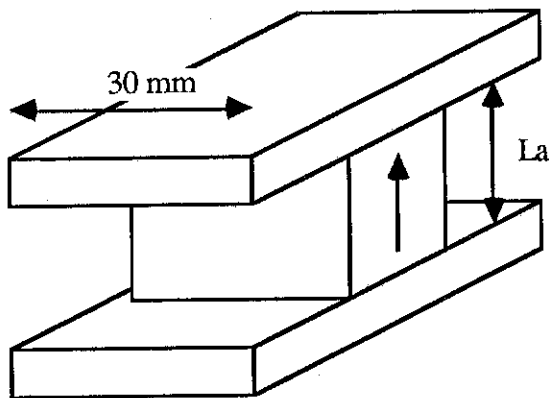
Ferriflex F3 (caoutchouc magnétique) $B_r = 0,22 \text{ T}$

Section $S_a = 750 \text{ mm}^2$ selon deux géométries (cf Figure VIII - 2):

1^{ère} géométrie

$$S_a = 30 * 25 \text{ mm}$$

$$L_a = 10, 15, 20 \text{ mm}$$



2^{ème} géométrie

$$S_a = 50 * 15 \text{ mm}$$

$$L_a = 20 \text{ mm}$$

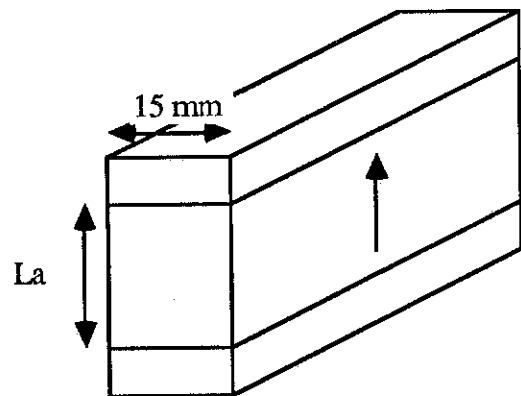
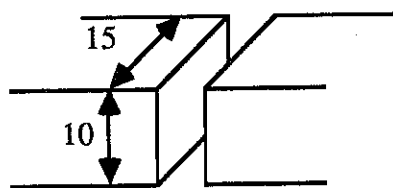


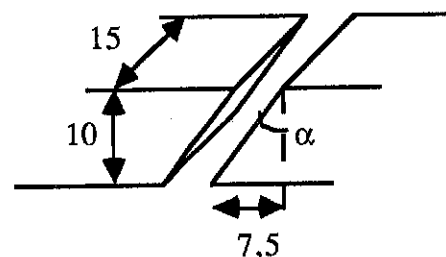
Figure VIII - 2 : Représentation des géométries utilisées pour l'aimant

La première géométrie présente a priori plus de fuites que la deuxième.

Entrefers :



$$\alpha = 0$$



$$\cos \alpha = 0,8$$

Figure VIII - 3 : Géométrie des surfaces

Entrefer total : $E = 5 \text{ mm}$

Section droite d'entrefer : $S_e = 10 * 15 \text{ mm}$ (aussi égale à la section des parties ferromagnétiques)

Inclinaison des surfaces : $\alpha = 0$ ou $\alpha \approx 30^\circ$ (cf Figure VIII - 3)

Bobine :

Ampères-tours : $NI = 800 \text{ At}$

On peut évaluer assez rapidement l'induction maximum dans les entrefers. Celle-ci est obtenue dans les entrefers de travail lorsque ceux-ci sont fermés. (On ne tiendra pas compte des fuites)

Dans le cas des sections droites , on obtient :

Induction due à l'aimant : $1,1 \text{ T}$

Induction due à la bobine : $0,2 \text{ T}$ (environ)

Soit une induction totale maximale d'à peu près $1,3 \text{ T}$

Dans le cas des sections inclinées :

Induction due à l'aimant : $1,375 \text{ T}$

Induction due à la bobine : $0,25 \text{ T}$ (environ)

Soit une induction totale maximale d'à peu près $1,63 \text{ T}$. Nous sommes donc dans ce cas en début de saturation. Dans la pratique, les phénomènes non pris en compte dans le calcul conduisent à affaiblir cette valeur et l'on pourra considérer que l'on reste toujours en régime linéaire.

II - 2 Comparaison entre résultats numériques et expérimentaux

Ces essais ont été réalisés avec la deuxième géométrie dans le cas où $L_a = 20 \text{ mm}$. Nous avons étudié la force permanente pour différentes valeurs de l'entrefer (cf Chapitre VII). La Figure VIII - 4 représente la comparaison entre les résultats de la modélisation et des essais sur prototype.

La parfaite symétrie des résultats numériques s'explique par le fait que le mailleur brique utilisé permet d'obtenir des maillages très réguliers et donc une géométrie totalement symétrique.

On constate qu'il y a un écart d'environ 20% entre ces résultats. Compte tenu des conditions expérimentales dans lesquelles ont été faites les mesures sur prototypes, ce résultat est tout à fait correct. On peut regretter cependant que compte tenu des difficultés de modélisation déjà évoquées au Chapitre VII, nous n'ayons pas pu traiter numériquement l'ensemble des essais qui vont suivre.

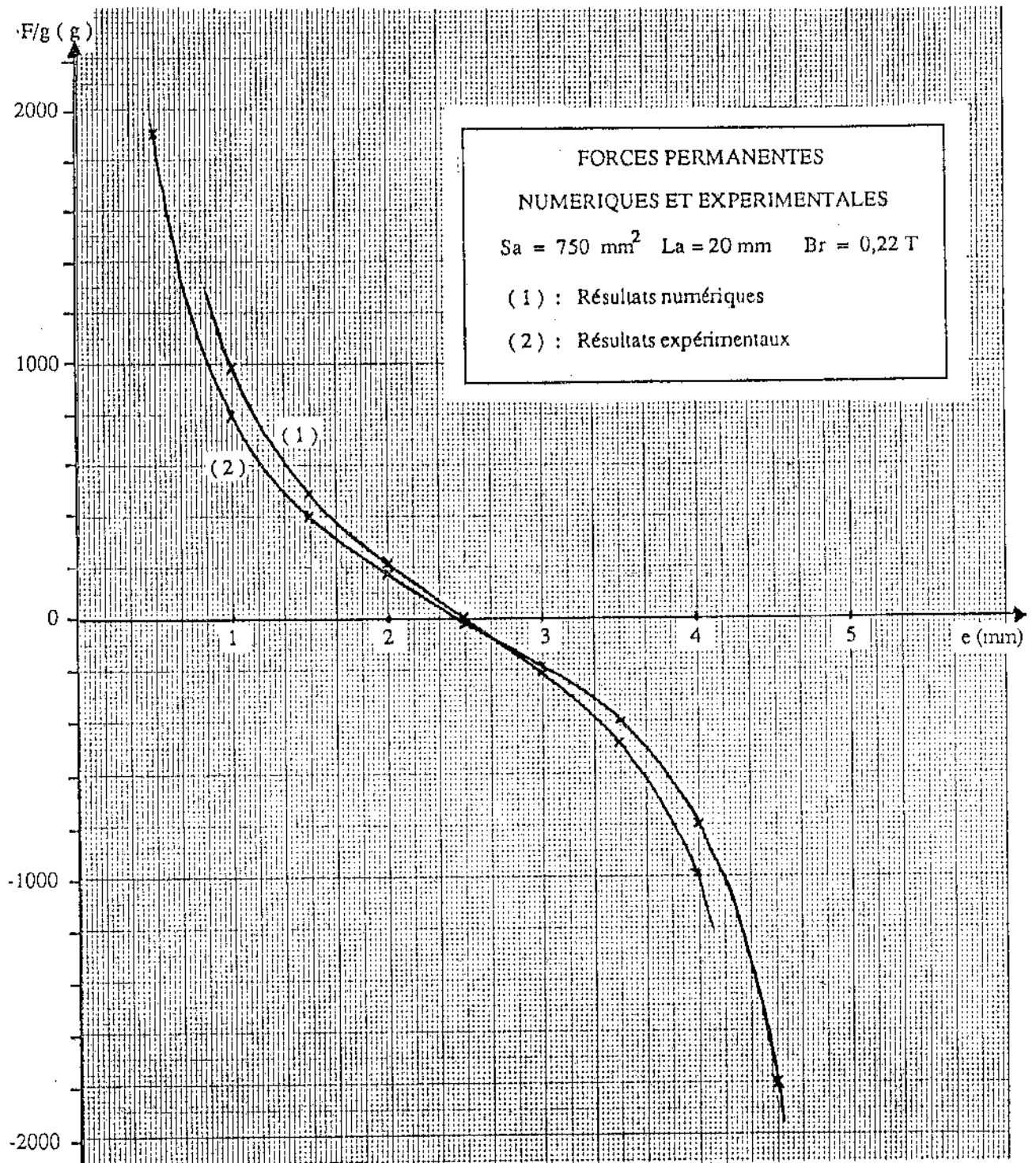


Figure VIII - 4 : Comparaison entre résultats numériques et expérimentaux

II - 3 Influence de la longueur de l'aimant

Ces essais ont été réalisés avec la première géométrie d'aimant et des sections d'entrefer droites. Nous avons considéré trois longueurs d'aimant : $L_a = 10$, 15 et 20 mm .

Les Figures VIII - 5, VIII - 6 et VIII - 7 montrent les forces permanentes (sans courant), totales (avec courant) et d'excitation mesurées dans les trois cas.

Rappelons que la force d'excitation est calculée à partir de la différence des deux courbes précédentes.

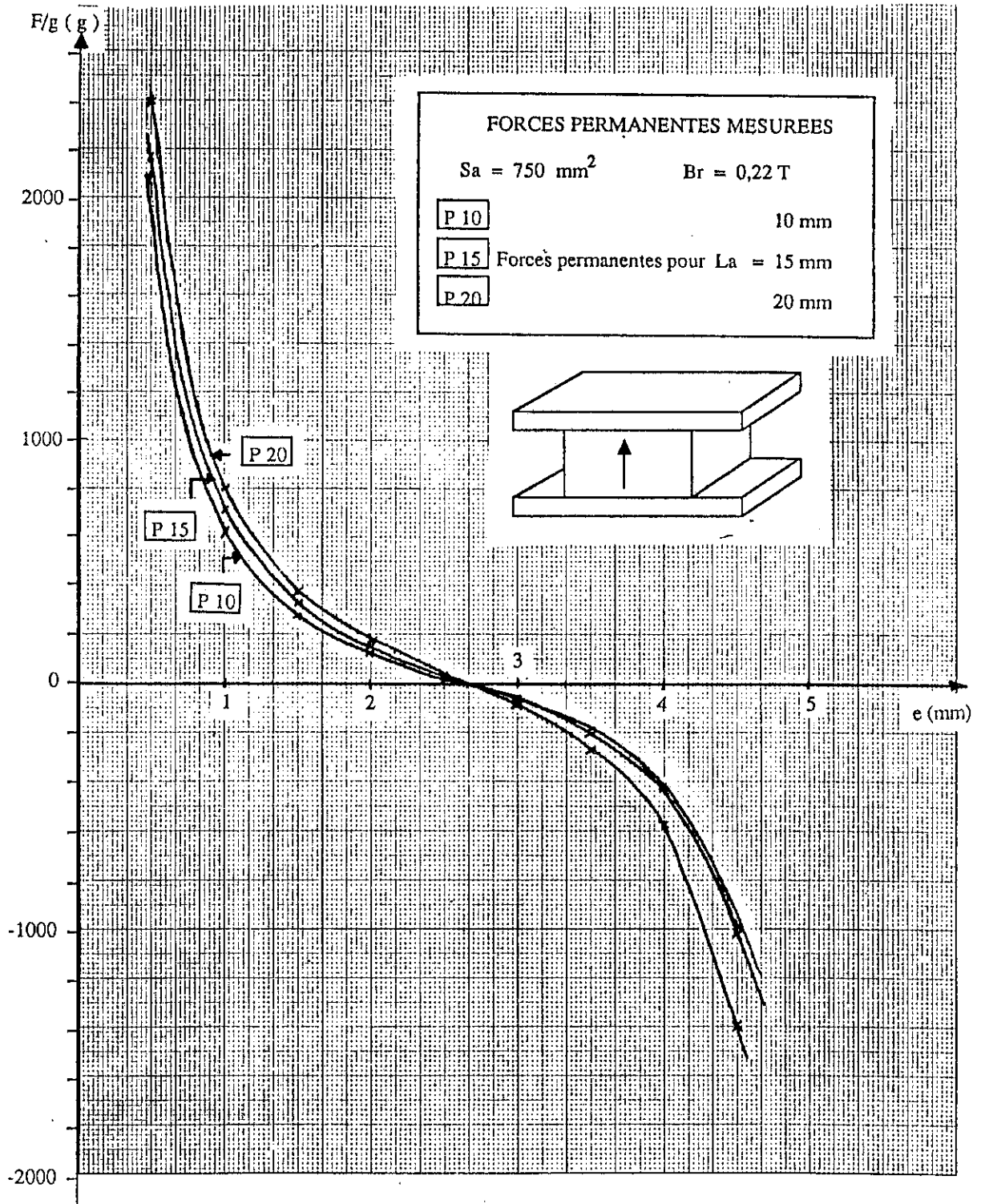
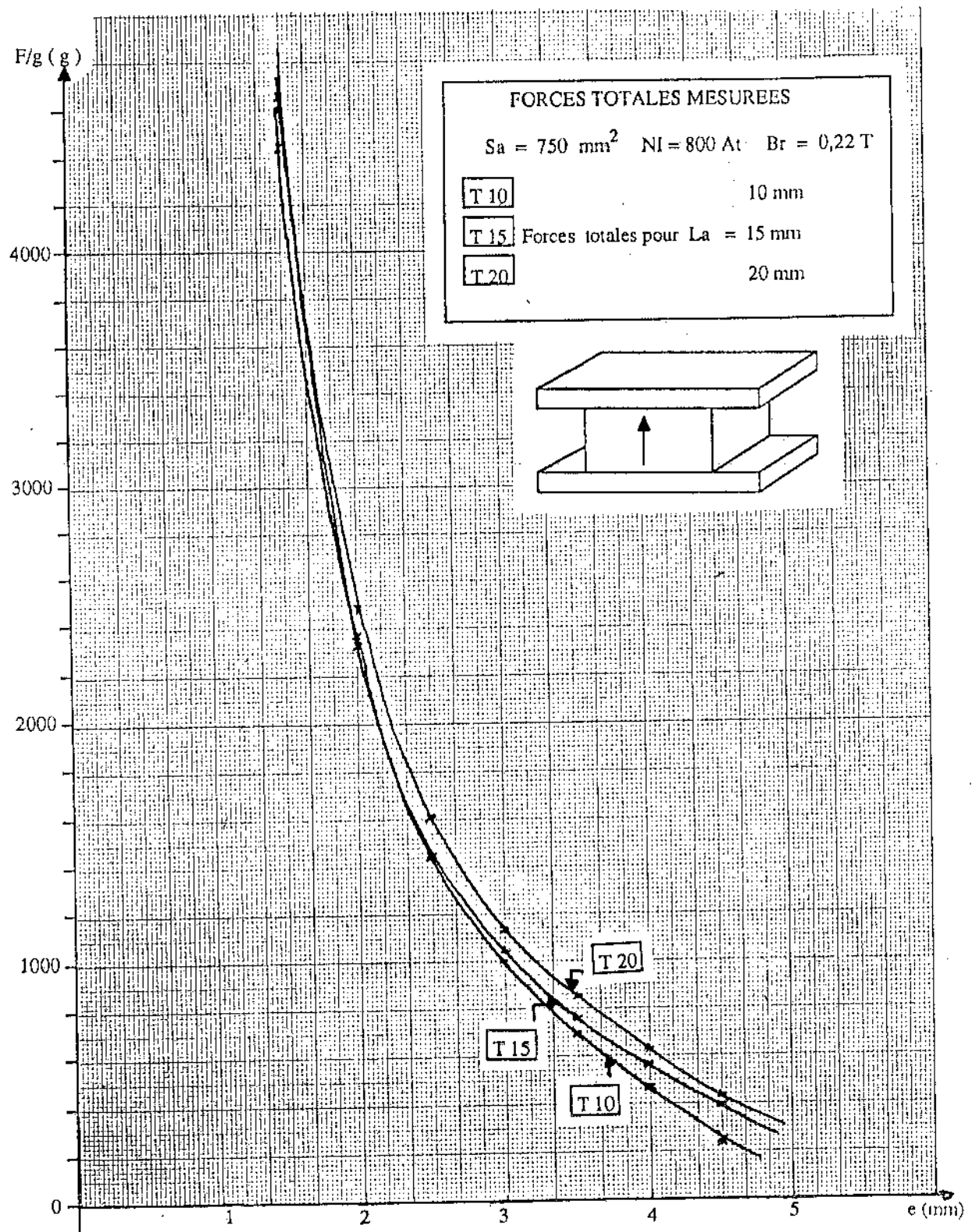


Figure VIII - 5 : Force permanente mesurée pour différentes longueurs de L_a

Figure VIII - 6 : Force totale mesurée pour différentes longueurs de L_a

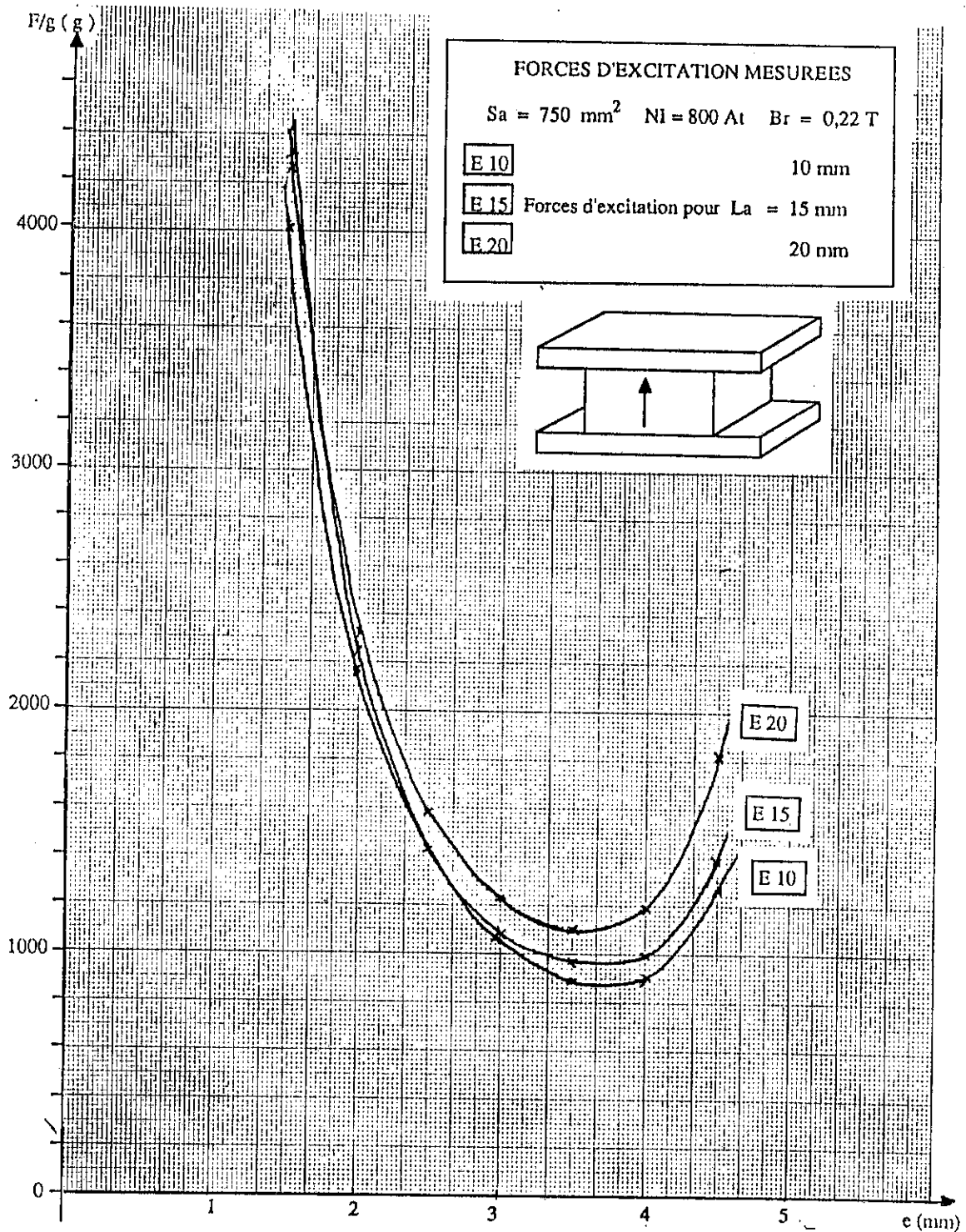


Figure VIII - 7 : Force d'excitation mesurée pour différentes longueurs de L_a

On constate que les courbes sont relativement voisines les unes des autres sauf dans la zone où l'entrefer est important dans laquelle elles tendent à s'écarter. Des essais supplémentaires ont montré que 10 mm est une longueur minimale pour l'aimant si l'on ne veut pas trop pénaliser les performances du système.

Cette dimension est d'autant plus importante qu'elle détermine d'une part le volume total du

système et d'autre part la puissance consommée par l'intermédiaire de la longueur du bobinage.

II - 4 Influence des fuites

Les différentes forces obtenues pour les deux géométries étudiées sont représentées en Figures VIII - 8, VIII - 9 et VIII - 10.

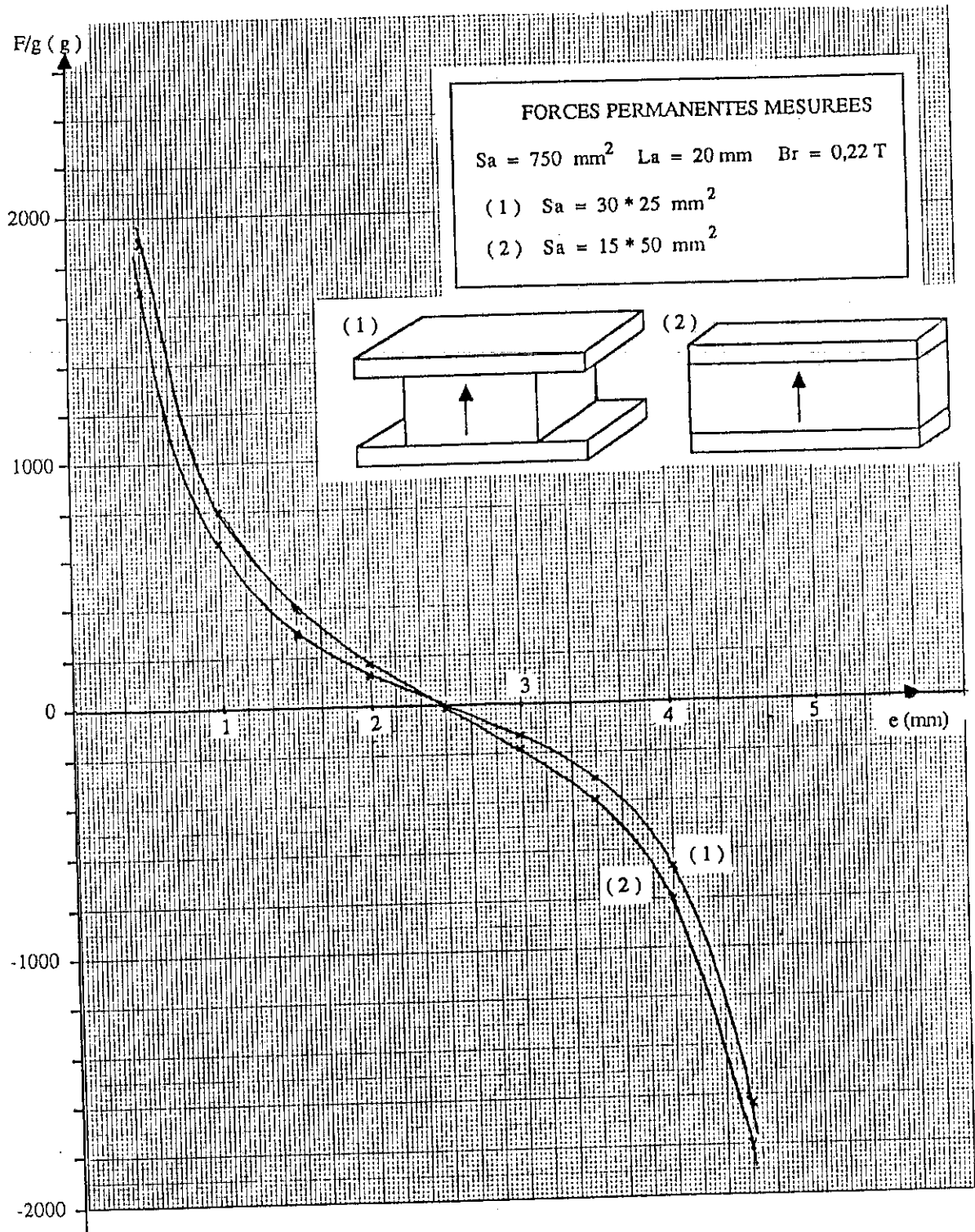


Figure VIII - 8 : Force permanente obtenue pour les deux géométries

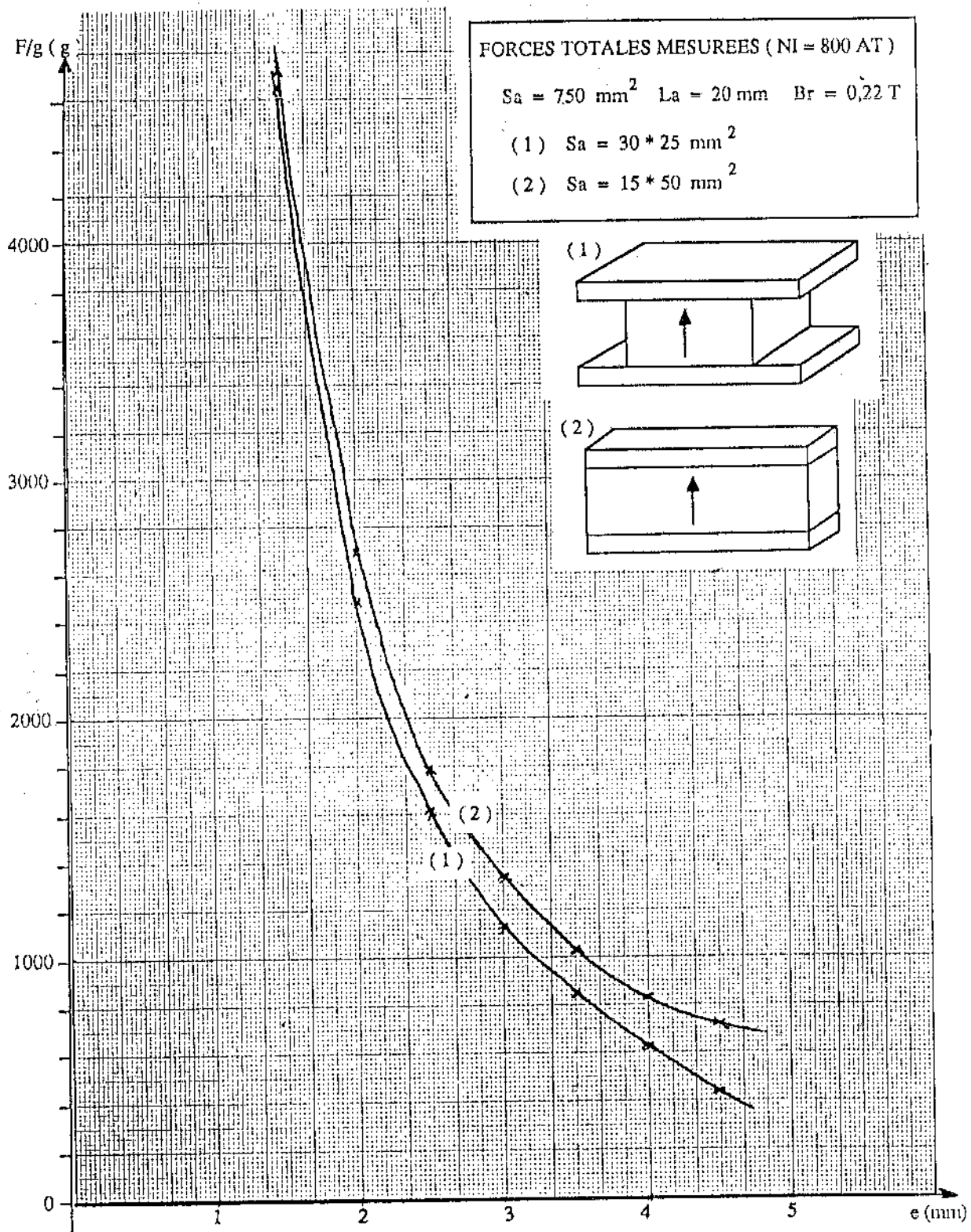


Figure VIII - 9 : Force totale pour les deux systèmes

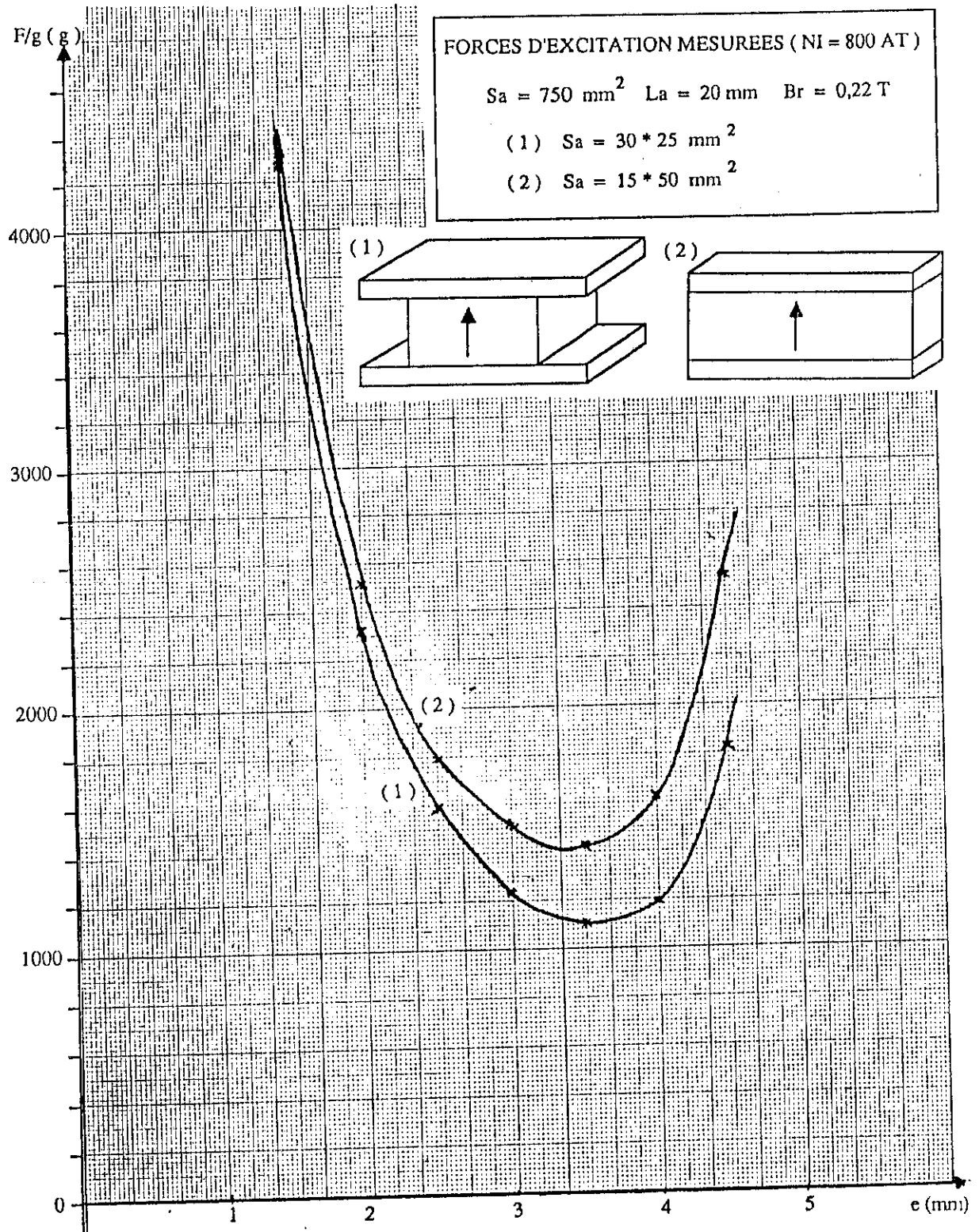


Figure VIII - 10 : Force d'excitation pour les deux systèmes

On peut constater que la courbe du système (2) est légèrement moins incurvée. Ceci confirme la réduction des fuites dans ce cas.

L'influence de la géométrie se fait surtout sentir à entrefer ouvert sous excitation. On obtient alors des forces nettement plus importantes dans le cas du prototype sans fuites.

Ceci confirme donc les résultats escomptés et ainsi l'intérêt de mettre l'aimant le plus près possible des entrefers.

II - 5 Essais sur les sections inclinées

Nous avons également testé une géométrie avec surfaces inclinées ($\alpha \approx 30^\circ$).

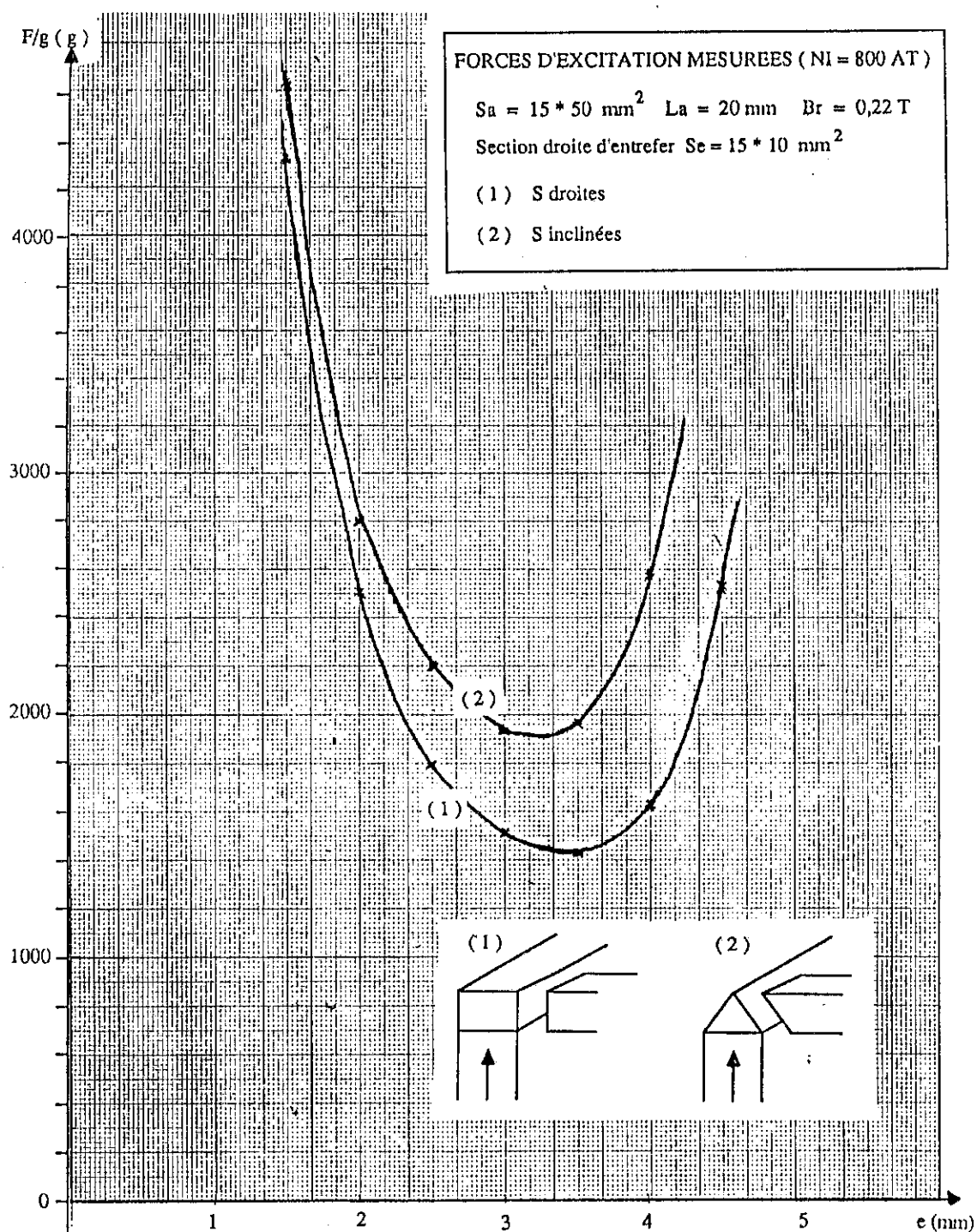


Figure VIII - 11 : Force d'excitation pour les deux systèmes

Les résultats se sont révélés très prometteurs comme le montre la Figure VIII - 11 où sont représentées les forces d'excitation obtenues pour les deux géométries. On constate notamment à entrefer de repos les améliorations apportées par l'inclinaison des surfaces.

II - 6 Conclusions

L'ensemble de ces résultats confirme donc les résultats pressentis au Chapitre VI :

- nécessité de disposer l'aimant près des entrefers
- améliorations apportées par l'inclinaison des surfaces

Ces résultats auraient peut-être pu être améliorés si certains problèmes inhérents à la réalisation expérimentale n'avaient pas été rencontrés :

- Entrefers parasites

Pour pouvoir effectuer les mesures pour les diverses géométries avec la même base de prototype, nous avons utilisé des petits éléments additionnels que l'on peut adapter sur le montage. Ceci ne peut se faire sans laisser un entrefer parasite qui au total peut atteindre quelques dixièmes de mm. Ceci est loin d'être négligeable et a contribué certainement à réduire l'efficacité de la bobine.

Dans le même ordre d'idées, l'aimant de 20 mm est en fait constitué de quatre aimants de 5 mm superposés. Entre chaque aimant, il subsiste également un entrefer parasite qui joue un peu sur le point de fonctionnement de l'aimant global.

- Difficultés de mesure à entrefer faible

Le banc de mesures dont nous disposons ne permet pas de mesurer des forces supérieures à 5 kg. Ceci explique pourquoi nous n'avons pu obtenir que des mesures sur la force permanente pour des entrefers inférieurs ou égaux à 1 mm.

De plus il est très difficile d'évaluer les positions extrêmes. Ceci est particulièrement vrai dans le cas où l'on utilise des surfaces inclinées où le positionnement est encore plus délicat.

Nous allons maintenant appliquer ces résultats à un prototype de volume plus réduit correspondant mieux aux puissances électriques désirées.

III - ETUDE DU DEUXIEME DISPOSITIF

III - 1 Caractéristiques

Aimant

Ferriflex F3	:	$B_r = 0,22 \text{ T}$
Section	:	$S_a = 5 * 50 = 250 \text{ mm}^2$
Longueur	:	$L_a = 10 \text{ mm}$

Entrefer

Longueur : $E = 5 \text{ mm}$

Section droite : $S_e = 10 * 15 = 150 \text{ mm}^2$

Inclinaison des surfaces : $\alpha = 0 \quad \alpha = 30^\circ \quad \alpha = 60^\circ$

Bobine

Ampères-tours : $NI = 200 \text{ At}$

Nombre de spires : $N = 5000$

Diamètre du fil : $\phi = 0,2 \text{ mm}$ ($J \approx 1,3 \text{ A/mm}^2$)

Section extérieure : $S \approx 25 * 8,5 \text{ mm}$

Puissance électrique : $P \approx 0,5 \text{ W}$

III - 2 Influence des sections inclinées

Les Figures VIII - 12 , VIII - 13 et VIII - 14 pages suivantes rassemblent les forces obtenues pour les différents angles.

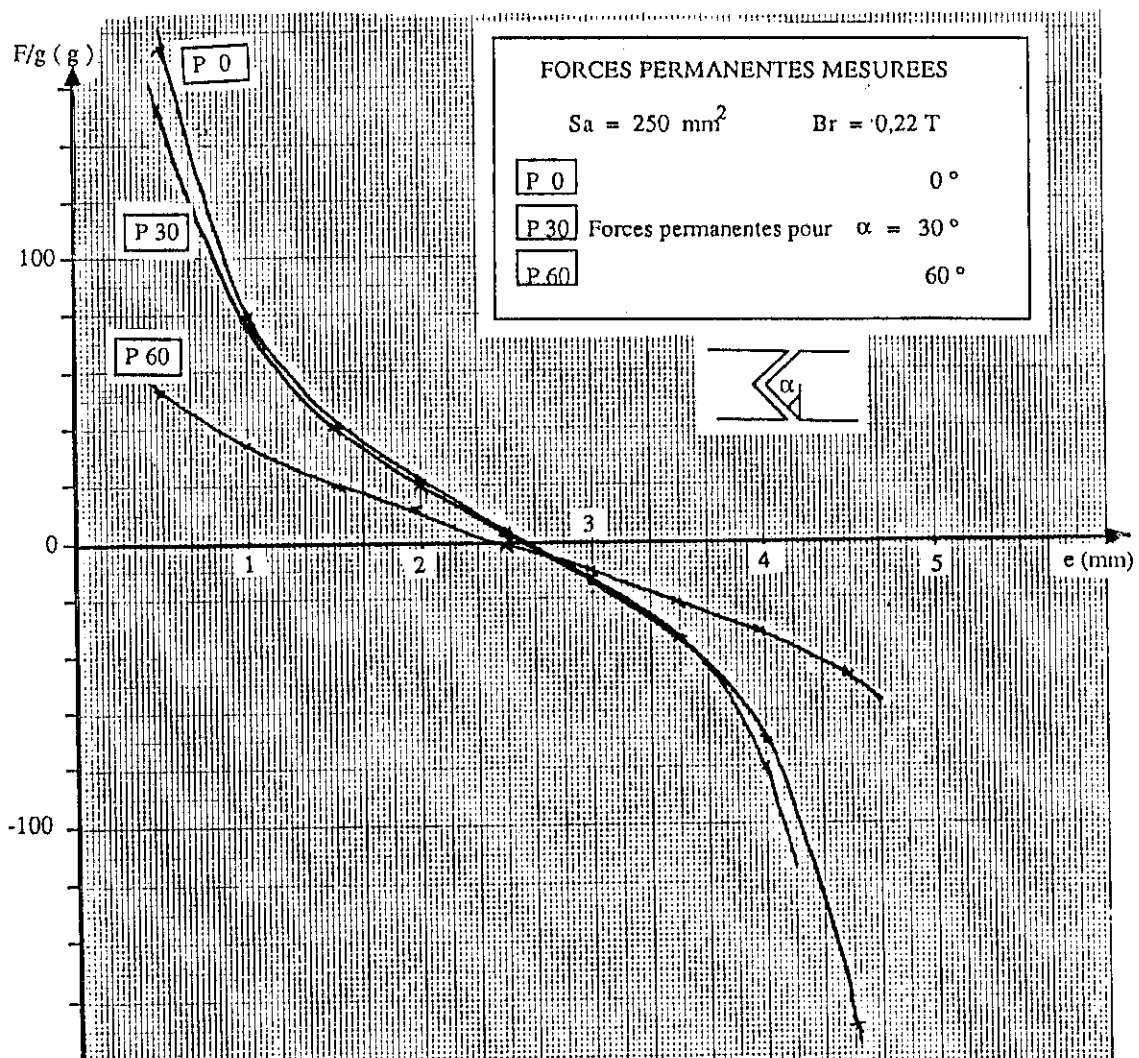


Figure VIII - 12 : Force permanente obtenue pour les différentes géométries

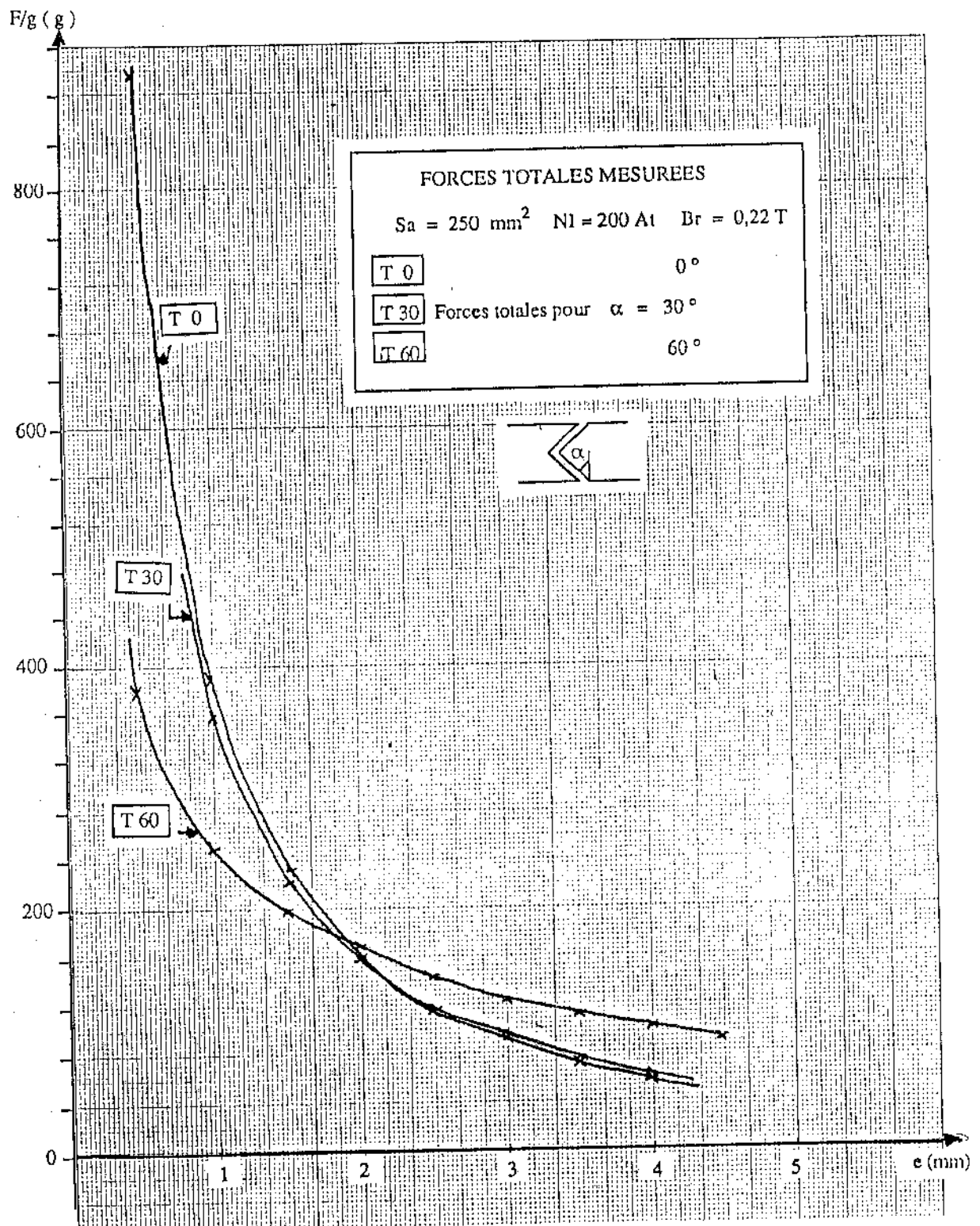


Figure VIII - 13 : Force totale obtenue pour les différentes géométries

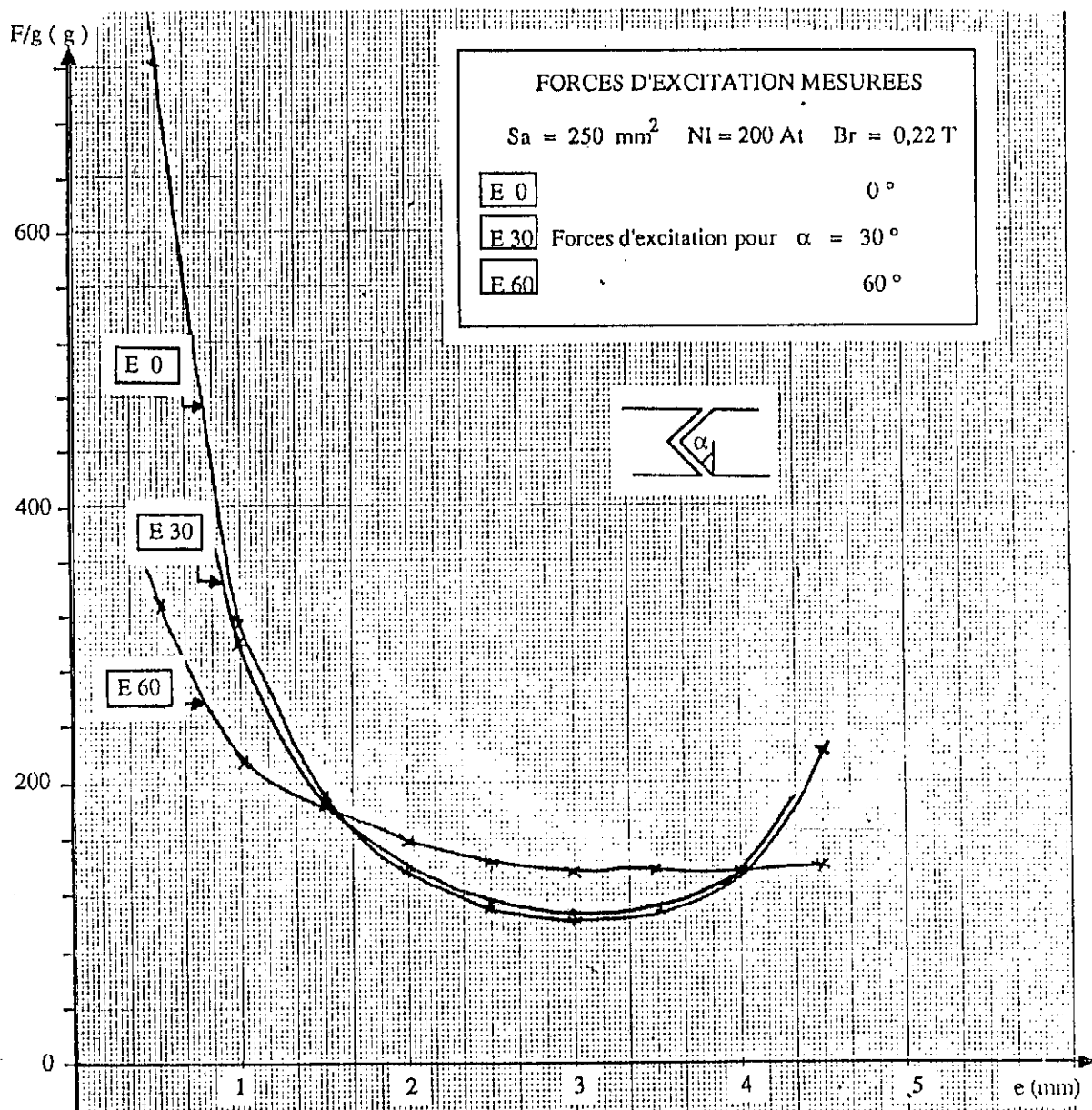


Figure VIII - 14 : Force d'excitation obtenue pour les différentes géométries

On constate ainsi que les courbes pour $\alpha = 0$ et $\alpha = 30^\circ$ sont très voisines. Cela indique que l'influence des surfaces inclinées tendant à réduire les forces permanentes est compensée par la diminution des fuites et la remontée du point de fonctionnement de l'aimant.

Par contre, la courbe pour $\alpha = 60^\circ$ se démarque très nettement des deux autres.

Il y a sans doute deux raisons à cela :

- l'inclinaison des surfaces devient prépondérante. Cela se remarque notamment dans la zone médiane où la force permanente est plus faible et les forces d'excitation plus élevées.

- Dans les positions proches des extrêmes, l'inclinaison des surfaces fait que la saturation est très marquée et limite les forces obtenues notamment en position de travail (cf Figures VIII - 12 et VIII - 13). Ces phénomènes de saturation proviennent directement des dimensions adoptées pour les parties ferromagnétiques. Malheureusement, celles-ci conditionnent d'une part le volume du système

et d'autre part la puissance consommée par la bobine. Elles ne peuvent donc guère être augmentées.

III - 3 Influence de la disposition des sections inclinées

Nous avons également étudié l'influence de la position relative des sections (cf Figure VIII - 15).

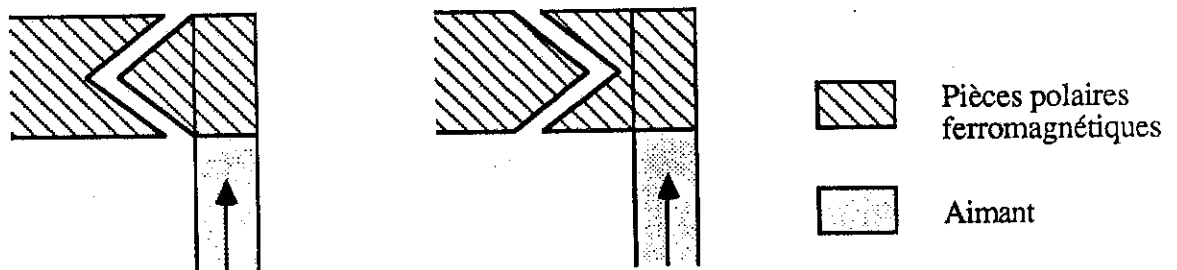


Figure VIII - 15 : Différents cas de dispositions des sections inclinées

Dans le premier cas, les surfaces polaires côté aimant offrent a priori moins de fuites que dans le deuxième cas.

C'est ce que nous avons vérifié dans le cas où $\alpha = 30^\circ$ (cf Figures VIII - 16 et VIII - 17).

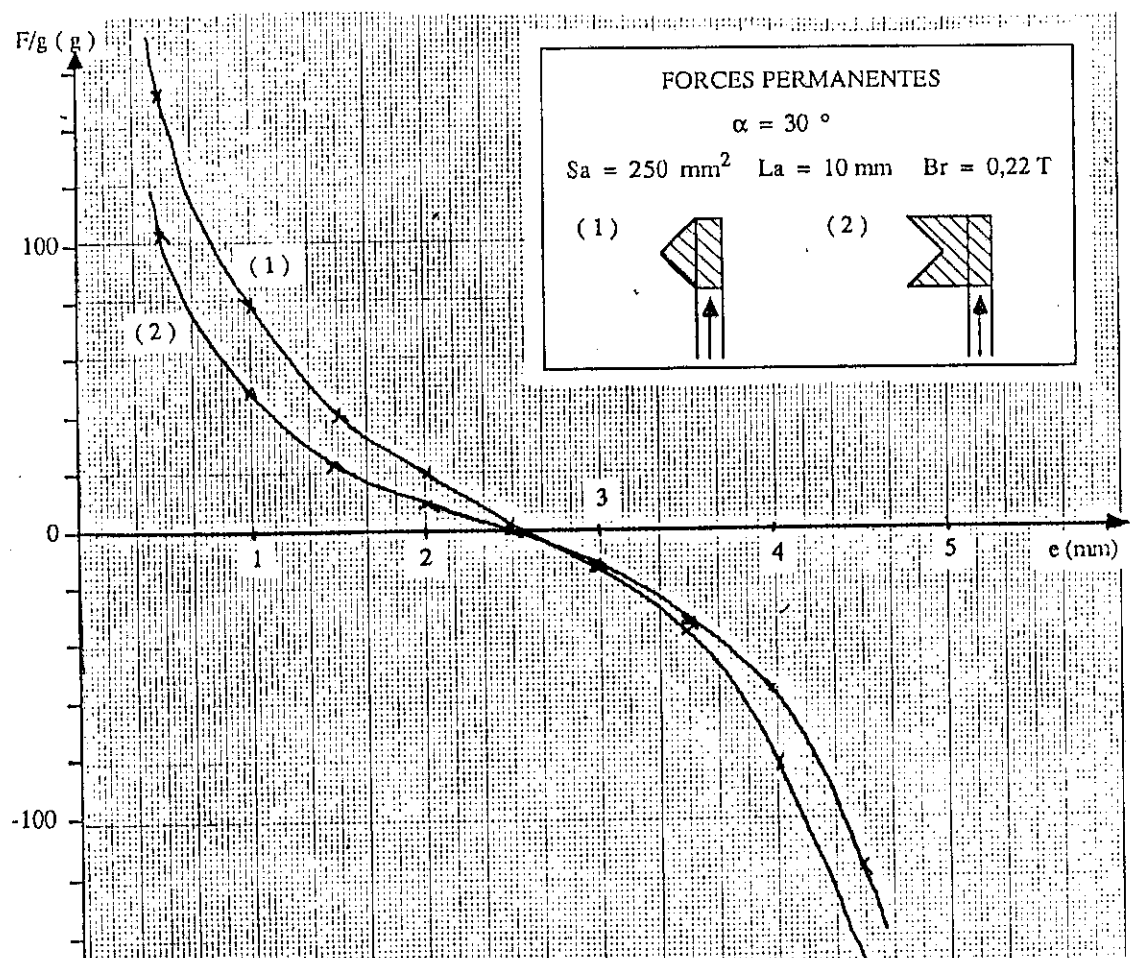


Figure VIII - 16 : Force permanente pour les deux dispositions

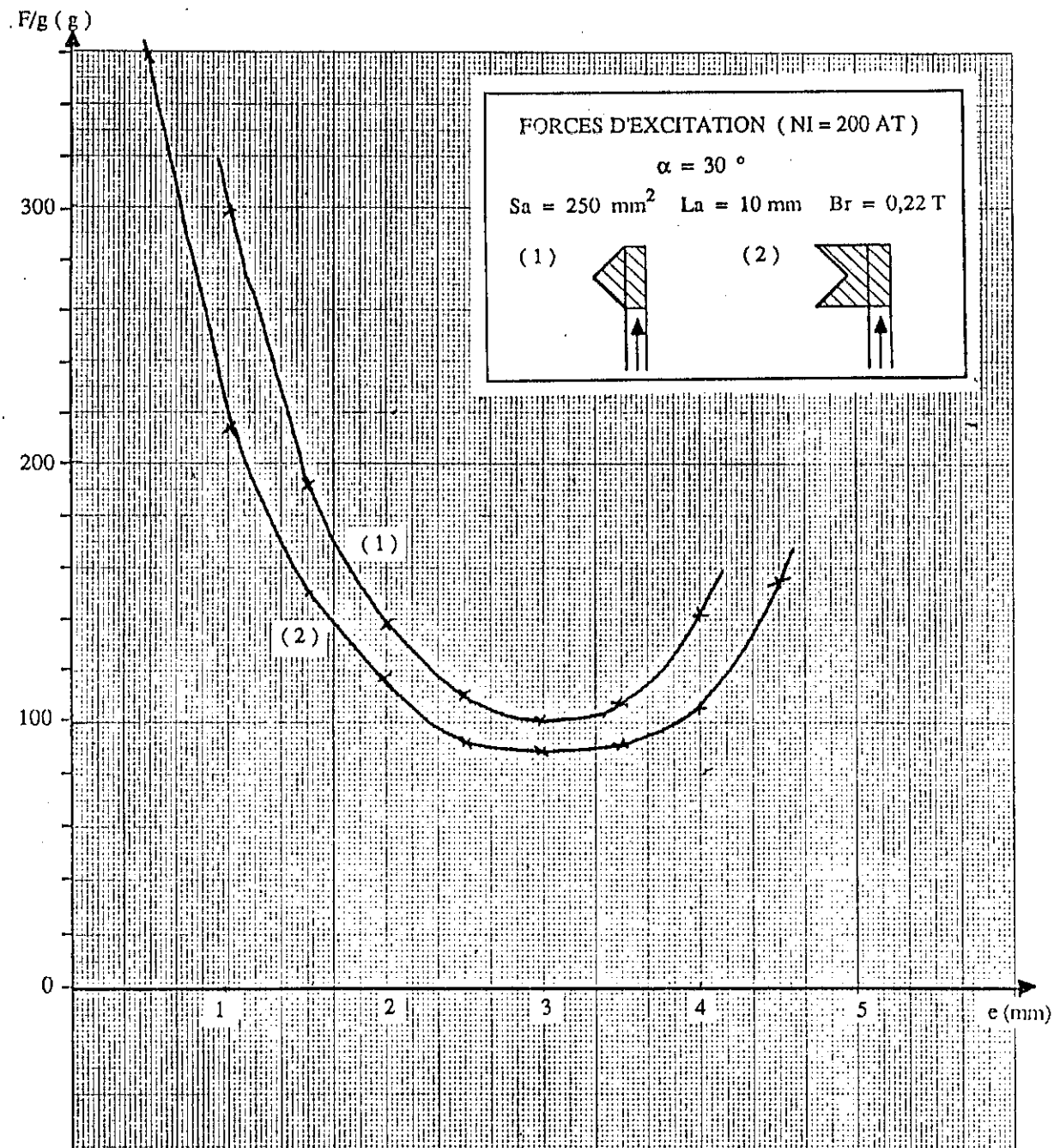


Figure VIII - 17 : Force d'excitation pour les deux dispositions

On constate que la différence entre les deux géométries est particulièrement nette.

Ce genre de modification bien qu'extrêmement simple conduit ainsi à des améliorations importantes.

IV - CONCLUSIONS

Ces essais nous ont permis de mettre en évidence et de confirmer plusieurs points :

- Les systèmes polarisés que nous avons conçus présentent des performances tout à fait intéressantes en particulier dans la phase de décollement qui est la plus critique.

- Par contre, il semble également acquis que en position de travail, les performances des systèmes non polarisés restent supérieures. En effet, dans ce cas la bobine voit un entrefer quasi-nul et la force magnétique est uniquement limitée par la saturation. Les systèmes polarisés où la bobine voit un entrefer constant ne peuvent donc pas rivaliser avec eux, dans cette position extrême en tout cas.

Plus généralement, on peut dire que les systèmes polarisés sont plus performants que les systèmes non polarisés dès que l'induction permanente créée par l'aimant est supérieure à l'induction d'excitation créée par la bobine. Comme celle-ci est inversement proportionnelle à l'entrefer, on retrouve le comportement décrit plus haut.

- Pour la structure "parallèle" que nous avons adoptée, les modifications envisagées ont conduit à une amélioration effective des performances :

- * disposition des aimants proches des entrefers
- * inclinaison des surfaces d'échange
- * dimensionnement approprié de la bobine

L'ensemble de ces résultats expérimentaux permet donc de confirmer et de valider toutes les études théoriques précédentes, à la fois sur les structures magnétiques mais aussi sur les configurations géométriques adoptées.

CONCLUSION

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 91 92 93 94 95 96 97 98 99 100 101 102 103 104 105 106 107 108 109 110 111 112 113 114 115 116 117 118 119 120 121 122 123 124 125 126 127 128 129 130 131 132 133 134 135 136 137 138 139 140 141 142 143 144 145 146 147 148 149 150 151 152 153 154 155 156 157 158 159 160 161 162 163 164 165 166 167 168 169 170 171 172 173 174 175 176 177 178 179 180 181 182 183 184 185 186 187 188 189 190 191 192 193 194 195 196 197 198 199 200 201 202 203 204 205 206 207 208 209 210 211 212 213 214 215 216 217 218 219 220 221 222 223 224 225 226 227 228 229 230 231 232 233 234 235 236 237 238 239 240 241 242 243 244 245 246 247 248 249 250 251 252 253 254 255 256 257 258 259 260 261 262 263 264 265 266 267 268 269 270 271 272 273 274 275 276 277 278 279 280 281 282 283 284 285 286 287 288 289 290 291 292 293 294 295 296 297 298 299 300 301 302 303 304 305 306 307 308 309 310 311 312 313 314 315 316 317 318 319 320 321 322 323 324 325 326 327 328 329 330 331 332 333 334 335 336 337 338 339 340 341 342 343 344 345 346 347 348 349 350 351 352 353 354 355 356 357 358 359 360 361 362 363 364 365 366 367 368 369 370 371 372 373 374 375 376 377 378 379 380 381 382 383 384 385 386 387 388 389 390 391 392 393 394 395 396 397 398 399 400 401 402 403 404 405 406 407 408 409 410 411 412 413 414 415 416 417 418 419 420 421 422 423 424 425 426 427 428 429 430 431 432 433 434 435 436 437 438 439 440 441 442 443 444 445 446 447 448 449 450 451 452 453 454 455 456 457 458 459 460 461 462 463 464 465 466 467 468 469 470 471 472 473 474 475 476 477 478 479 480 481 482 483 484 485 486 487 488 489 490 491 492 493 494 495 496 497 498 499 500 501 502 503 504 505 506 507 508 509 510 511 512 513 514 515 516 517 518 519 520 521 522 523 524 525 526 527 528 529 530 531 532 533 534 535 536 537 538 539 540 541 542 543 544 545 546 547 548 549 550 551 552 553 554 555 556 557 558 559 560 561 562 563 564 565 566 567 568 569 570 571 572 573 574 575 576 577 578 579 580 581 582 583 584 585 586 587 588 589 590 591 592 593 594 595 596 597 598 599 600 601 602 603 604 605 606 607 608 609 610 611 612 613 614 615 616 617 618 619 620 621 622 623 624 625 626 627 628 629 630 631 632 633 634 635 636 637 638 639 640 641 642 643 644 645 646 647 648 649 650 651 652 653 654 655 656 657 658 659 660 661 662 663 664 665 666 667 668 669 670 671 672 673 674 675 676 677 678 679 680 681 682 683 684 685 686 687 688 689 690 691 692 693 694 695 696 697 698 699 700 701 702 703 704 705 706 707 708 709 710 711 712 713 714 715 716 717 718 719 720 721 722 723 724 725 726 727 728 729 730 731 732 733 734 735 736 737 738 739 740 741 742 743 744 745 746 747 748 749 750 751 752 753 754 755 756 757 758 759 760 761 762 763 764 765 766 767 768 769 770 771 772 773 774 775 776 777 778 779 780 781 782 783 784 785 786 787 788 789 790 791 792 793 794 795 796 797 798 799 800 801 802 803 804 805 806 807 808 809 810 811 812 813 814 815 816 817 818 819 820 821 822 823 824 825 826 827 828 829 830 831 832 833 834 835 836 837 838 839 840 841 842 843 844 845 846 847 848 849 850 851 852 853 854 855 856 857 858 859 860 861 862 863 864 865 866 867 868 869 870 871 872 873 874 875 876 877 878 879 880 881 882 883 884 885 886 887 888 889 890 891 892 893 894 895 896 897 898 899 900 901 902 903 904 905 906 907 908 909 910 911 912 913 914 915 916 917 918 919 920 921 922 923 924 925 926 927 928 929 930 931 932 933 934 935 936 937 938 939 940 941 942 943 944 945 946 947 948 949 950 951 952 953 954 955 956 957 958 959 960 961 962 963 964 965 966 967 968 969 970 971 972 973 974 975 976 977 978 979 980 981 982 983 984 985 986 987 988 989 990 991 992 993 994 995 996 997 998 999 1000 1001 1002 1003 1004 1005 1006 1007 1008 1009 1010 1011 1012 1013 1014 1015 1016 1017 1018 1019 1020 1021 1022 1023 1024 1025 1026 1027 1028 1029 1030 1031 1032 1033 1034 1035 1036 1037 1038 1039 1040 1

CONCLUSION

Le but de ces travaux était d'étudier l'intérêt de la polarisation dans le circuit magnétique des contacteurs électromagnétiques. Ceux-ci devaient avoir pour principales caractéristiques :

- un fonctionnement monostable
- une faible consommation électrique
- une force magnétique aussi importante que possible.

Sur des exemples simples, nous avons montré que les aimants permanents permettent d'obtenir en phase de décollement des forces sous excitation plus importantes que dans le cas des systèmes polarisés. Par contre, en position de travail, ces derniers sont plus efficaces car ils permettent d'obtenir une induction magnétique importante, uniquement limitée par la saturation des matériaux ferromagnétiques.

Les aimants permanents sont également à l'origine de forces permanentes importantes qui peuvent contrarier le fonctionnement du système. Pour pouvoir utiliser au mieux les avantages des électro-aimants polarisés, il faudra donc compenser aussi bien que possible ces forces permanentes.

Nous avons également mis en évidence la structure magnétique polarisée qui semble la plus adaptée à notre problème.

Il s'agit d'une configuration relativement originale par rapport aux systèmes existants. En effet, elle permet entre autres d'utiliser de manière optimale les Ampères-Tours créés par la bobine. Cependant, compte tenu du principe de fonctionnement adopté pour l'aimant, elle suppose un rappel en position de repos par des moyens extérieurs.

Puis, nous avons étudié l'influence de différents paramètres géométriques (géométries de l'aimant, de la bobine, des entrefers , inclinaison des surfaces d'échange) sur le fonctionnement de ce système et nous avons proposé deux prototypes répondant à nos exigences.

L'un d'entre eux a été modélisé par CAO et a fait l'objet d'essais expérimentaux qui ont permis de valider notre étude.

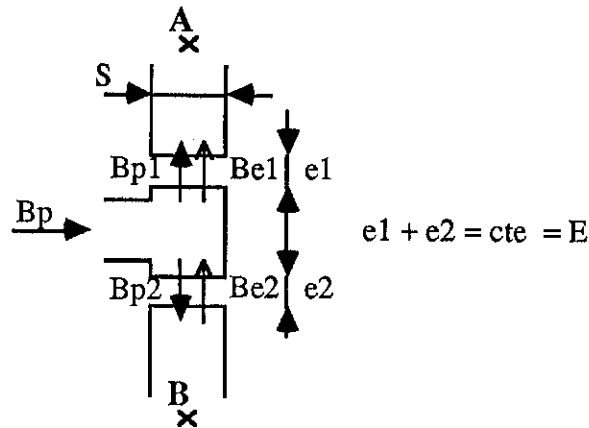
A la suite de ces travaux, il nous semble que désormais les principales réflexions doivent porter

sur l'étude de nos dispositifs dans une optique plus industrielle. Il faudra ainsi prendre en compte plus précisément les contraintes réelles de fonctionnement, et intégrer les autres aspects de la mise au point d'un tel produit , en particulier les aspects dynamique, thermique et économique.

ANNEXES

ANNEXE II

DETERMINATION DES INDUCTIONS ET DES FORCES MAGNETIQUES DANS UN SYSTEME DE DEUX ENTREFERS POLARISES A SOMME CONSTANTE



I - HYPOTHESES

- L'induction permanente B_p est constante (fonctionnement à flux constant)
- Le système est non saturé
- Les flux magnétiques permanent et d'excitation ne voient pas d'autres entrefers et se referment parfaitement
- la contribution du flux de fuites à la force magnétique dans un entrefer est négligeable

II - NOTATIONS

- e_1, e_2 : paire d'entrefers à somme constante ($e_1 + e_2 = E$)
- S : section du système supposée constante
- σ_1, σ_2 : coefficients de fuites associés aux entrefers e_1, e_2
- B_p : induction permanente totale supposée constante
- B_{p1}, B_{p2} : inductions permanentes dans les entrefers e_1, e_2
- H_{p1}, H_{p2} : champs magnétiques permanents dans les entrefers e_1, e_2
- NI : ddp magnétique créée par l'excitation entre les points A et B (cf Figure ci-dessus)
- B_{e1}, B_{e2} : inductions d'excitation dans les entrefers e_1, e_2
- H_{e1}, H_{e2} : champs magnétiques d'excitation dans les entrefers e_1, e_2

III - CALCUL DES GRANDEURS MAGNETIQUES

III - 1 Inductions permanentes

Théorème d'Ampère

$$H_{p1} e_1 = H_{p2} e_2 \quad (P1)$$

Conservation des flux

$$B_p = \sigma_1 B_{p1} + \sigma_2 B_{p2} \quad (P2)$$

Equations des milieux magnétiques

$$B_{p1} = \mu_0 H_{p1} \quad (P3 - a)$$

$$B_{p2} = \mu_0 H_{p2} \quad (P3 - b)$$

En combinant ces équations, on obtient :

$$B_{p1} = \frac{B_p e_2}{\sigma_1 e_2 + \sigma_2 e_1} \quad (P5)$$

$$B_{p2} = \frac{B_p e_1}{\sigma_1 e_2 + \sigma_2 e_1}$$

III - 2 Inductions d'excitation

Théorème d'Ampère

$$H_{e1} e_1 + H_{e2} e_2 = NI \quad (E1)$$

Conservation des flux

$$\sigma_1 B_{e1} = \sigma_2 B_{e2} \quad (E2)$$

Equations des milieux magnétiques

$$B_{e1} = \mu_0 H_{e1} \quad (E3 - a)$$

$$B_{e2} = \mu_0 H_{e2} \quad (E3 - b)$$

En combinant de même ces équations, on obtient :

$$B_{e1} = \frac{\mu_0 NI \sigma_2}{\sigma_1 e_2 + \sigma_2 e_1} \quad (E5)$$

$$B_{e2} = \frac{\mu_0 NI \sigma_1}{\sigma_1 e_2 + \sigma_2 e_1}$$

III - 2 Force magnétique totale

La force magnétique totale créée sur la partie centrale peut s'exprimer sous la forme :

$$F = \frac{(Bp_1 + Be_1)^2 S}{2 \mu_0} - \frac{(Bp_2 - Be_2)^2 S}{2 \mu_0} \quad (F1)$$

En remplaçant les inductions par leur valeur, on obtient :

$$F = \frac{S}{(\sigma_2 e_1 + \sigma_1 e_2)^2} \left[\frac{Bp^2 (e_2^2 - e_1^2)}{2 \mu_0} + Bp NI (e_2 \sigma_2 + e_1 \sigma_1) + \frac{\mu_0}{2} (NI)^2 (\sigma_2^2 - \sigma_1^2) \right] \quad (F2)$$

Pour exprimer cette force uniquement en fonction des variables du problème (Bp , I , e₁), on pose :

$$b = \frac{\mu_0 N}{2} \quad f = \frac{b^2 S}{\mu_0} = \frac{\mu_0 N^2 S}{2}$$

$$A = \sigma_2 - \sigma_1 \quad B = \sigma_1 E$$

et $f_1 = \sigma_2^2 - \sigma_1^2 \quad f_2 = -A \quad f_3 = \sigma_2 E$

et en remplaçant e₂ par E - e₁ dans (F2), on trouve alors :

$$F = \frac{1}{(A e_1 + B)^2} \left[\frac{Bp^2 S E (E - 2 e_1)}{2 \mu_0} + f \left(f_1 I^2 + \frac{2 Bp I}{b} (f_2 e_1 + f_3) \right) \right]$$

IV - CONCLUSIONS

On retrouve les trois termes caractéristiques de la force magnétique créée dans un système polarisé:

- la force permanente
- la force de polarisation
- la force d'excitation

Néanmoins, l'expression relativement complexe de ces forces ne permet pas d'évaluer au premier abord leurs variations en fonction des paramètres du système.

Il faudra donc se placer dans certains cas particuliers où cette étude sera plus aisée.

1
 2
 3
 4
 5
 6
 7
 8
 9
 10
 11
 12
 13
 14
 15
 16
 17
 18
 19
 20
 21
 22
 23
 24
 25
 26
 27
 28
 29
 30
 31
 32
 33
 34
 35
 36
 37
 38
 39
 40
 41
 42
 43
 44
 45
 46
 47
 48
 49
 50
 51
 52
 53
 54
 55
 56
 57
 58
 59
 60
 61
 62
 63
 64
 65
 66
 67
 68
 69
 70
 71
 72
 73
 74
 75
 76
 77
 78
 79
 80
 81
 82
 83
 84
 85
 86
 87
 88
 89
 90
 91
 92
 93
 94
 95
 96
 97
 98
 99
 100
 101
 102
 103
 104
 105
 106
 107
 108
 109
 110
 111
 112
 113
 114
 115
 116
 117
 118
 119
 120
 121
 122
 123
 124
 125
 126
 127
 128
 129
 130
 131
 132
 133
 134
 135
 136
 137
 138
 139
 140
 141
 142
 143
 144
 145
 146
 147
 148
 149
 150
 151
 152
 153
 154
 155
 156
 157
 158
 159
 160
 161
 162
 163
 164
 165
 166
 167
 168
 169
 170
 171
 172
 173
 174
 175
 176
 177
 178
 179
 180
 181
 182
 183
 184
 185
 186
 187
 188
 189
 190
 191
 192
 193
 194
 195
 196
 197
 198
 199
 200
 201
 202
 203
 204
 205
 206
 207
 208
 209
 210
 211
 212
 213
 214
 215
 216
 217
 218
 219
 220
 221
 222
 223
 224
 225
 226
 227
 228
 229
 230
 231
 232
 233
 234
 235
 236
 237
 238
 239
 240
 241
 242
 243
 244
 245
 246
 247
 248
 249
 250
 251
 252
 253
 254
 255
 256
 257
 258
 259
 260
 261
 262
 263
 264
 265
 266
 267
 268
 269
 270
 271
 272
 273
 274
 275
 276
 277
 278
 279
 280
 281
 282
 283
 284
 285
 286
 287
 288
 289
 290
 291
 292
 293
 294
 295
 296
 297
 298
 299
 300
 301
 302
 303
 304
 305
 306
 307
 308
 309
 310
 311
 312
 313
 314
 315
 316
 317
 318
 319
 320
 321
 322
 323
 324
 325
 326
 327
 328
 329
 330
 331
 332
 333
 334
 335
 336
 337
 338
 339
 340
 341
 342
 343
 344
 345
 346
 347
 348
 349
 350
 351
 352
 353
 354
 355
 356
 357
 358
 359
 360
 361
 362
 363
 364
 365
 366
 367
 368
 369
 370
 371
 372
 373
 374
 375
 376
 377
 378
 379
 380
 381
 382
 383
 384
 385
 386
 387
 388
 389
 390
 391
 392
 393
 394
 395
 396
 397
 398
 399
 400
 401
 402
 403
 404
 405
 406
 407
 408
 409
 410
 411
 412
 413
 414
 415
 416
 417
 418
 419
 420
 421
 422
 423
 424
 425
 426
 427
 428
 429
 430
 431
 432
 433
 434
 435
 436
 437
 438
 439
 440
 441
 442
 443
 444
 445
 446
 447
 448
 449
 450
 451
 452
 453
 454
 455
 456
 457
 458
 459
 460
 461
 462
 463
 464
 465
 466
 467
 468
 469
 470
 471
 472
 473
 474
 475
 476
 477
 478
 479
 480
 481
 482
 483
 484
 485
 486
 487
 488
 489
 490
 491
 492
 493
 494
 495
 496
 497
 498
 499
 500
 501
 502
 503
 504
 505
 506
 507
 508
 509
 510
 511
 512
 513
 514
 515
 516
 517
 518
 519
 520
 521
 522
 523
 524
 525

ANNEXE III

DETERMINATION DES GRANDEURS MAGNETIQUES DANS UN CIRCUIT POLARISE SERIE A PARTIR DE SON SCHEMA ELECTRIQUE EQUIVALENT

I - RAPPEL

Pour représenter un dispositif électromagnétique, on peut utiliser la représentation Ampérienne décrite au Chapitre IV, paragraphe II - 1 . b.

Ceci nous permet d'assimiler un circuit magnétique à un circuit électrique dans le cas où on considère que le circuit magnétique n'est pas saturé. L'analogie se fait de la manière suivante :

circuit magnétique	↔	circuit électrique
ddp magnétique		ddp électrique
Flux magnétique		Courant électrique
Réductance		Résistance
Ampères-Tours NI		Source de tension NI
Aimant de longueur L_a , d'aimantation J		Source de tension $J L_a / \mu_0$
Théorème d'Ampère		Loi des mailles
Conservation des flux		Loi des noeuds

II - SYSTEME POLARISE SERIE

Le système polarisé série représenté Figure AII - 1 est alors équivalent au circuit électrique en Figure AII - 2.

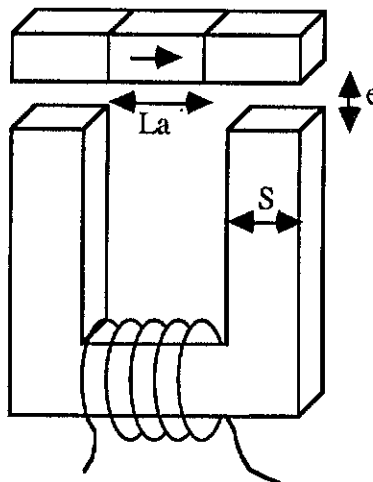
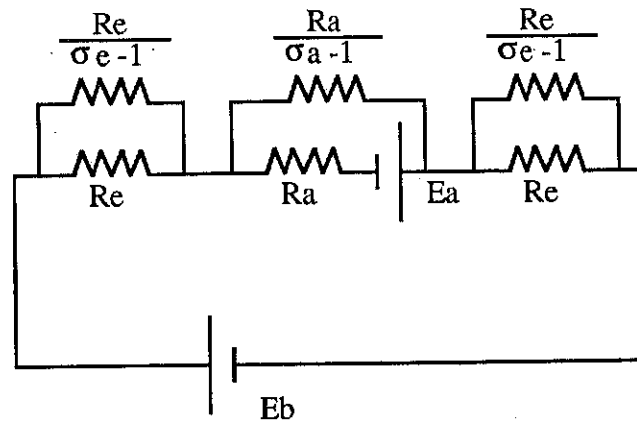


Figure AII - 1 : Système polarisé série



$$E_a = \frac{J L_a}{\mu_0}$$

$$E_b = N I$$

Figure AII - 2 : Schéma équivalent

$R_e = e / \mu_0 S$: Réductance d'un entrefer

$R_a = L_a / \mu_0 S_a$: Réductance de l'aimant

σ_e, σ_a : Coefficients de fuites autour d'un entrefer et de l'aimant

Nous voulons calculer les inductions ou les flux magnétiques dans les réductances R_e . Compte tenu de la symétrie du système, celles-ci sont identiques dans les deux entrefers.

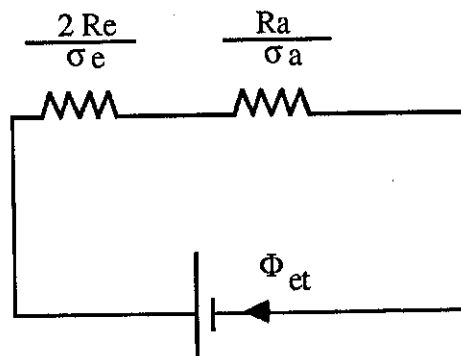
Nous allons maintenant appliquer le principe de superposition (on suppose être en régime linéaire), et calculer la contribution de chaque source séparément.

II - 1 Flux d'excitation

R_e en parallèle avec $R_e / (\sigma_e - 1)$ est équivalent à :

$$\frac{R_e \frac{R_e}{\sigma_e - 1}}{R_e + \frac{R_e}{\sigma_e - 1}} = \frac{R_e}{\sigma_e}$$

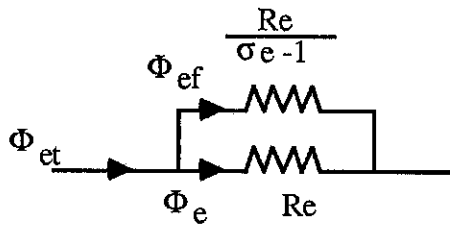
Le circuit équivalent devient alors :



Le flux d'excitation total vaut donc :

$$\Phi_{et} = \frac{NI}{\frac{2 Re}{\sigma_e} + \frac{Ra}{\sigma_a}}$$

Répartition du flux dans l'entrefer :



$$\Phi_e Re = \Phi_{ef} Re / (\sigma_e - 1)$$

$$\Phi_e + \Phi_{ef} = \Phi_{et}$$

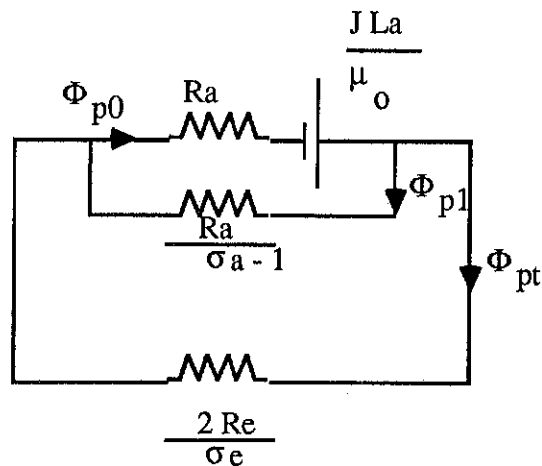
d'où l'on tire $\Phi_e = \Phi_{et} / \sigma_e$

soit :

$$\Phi_e = \frac{NI}{2 Re + \frac{Ra \sigma_e}{\sigma_a}}$$

II - 2 Flux permanent

Le schéma équivalent devient :



$$\Phi_{pt} \frac{2 Re}{\sigma_e} = \Phi_{p1} \frac{Ra}{(\sigma_a - 1)} = -\Phi_{p0} Ra + JLa / \mu_0 \quad (P1-a) \text{ et } (P1-b)$$

$$\Phi_{pt} = \Phi_{p0} - \Phi_{p1} \quad (P2)$$

Des équations (P1) on tire :

$$\Phi_{p1} = \Phi_{pt} \left(\frac{2 Re \sigma_a - 1}{\sigma_e Ra} \right)$$

$$\Phi_{p0} = \frac{J \frac{La}{\mu_o} - \Phi_{pt} \frac{2 Re}{\sigma_e}}{Ra}$$

en remplaçant dans (P2):

$$\Phi_{pt} = \frac{J \frac{La}{\mu_o}}{Ra + \frac{2 Re \sigma_a}{\sigma_e}}$$

Dans chaque entrefer Re on aura donc un flux permanent :

$$\Phi_p = \frac{\Phi_{pt}}{\sigma_e} = \frac{J \frac{La}{\mu_o \sigma_a}}{2 Re + \frac{Ra \sigma_e}{\sigma_a}}$$

Le flux total dans un entrefer est égal à la somme des flux permanent et d'excitation.

$$\Phi_t = \frac{NI + J \frac{La}{\mu_o \sigma_a}}{2 Re + \frac{Ra \sigma_e}{\sigma_a}}$$

II - 3 Calcul de la force magnétique

En négligeant toujours la contribution du flux de fuites à la force magnétique.

Cette force totale peut s'exprimer sous la forme :

$$F = \frac{(\Phi_p + \Phi_e)^2}{\mu_o Se}$$

soit

$$F = \frac{1}{\left(Ra \frac{\sigma_e}{\sigma_a} + 2 Re \right)^2 \mu_o Se} \left(J \frac{La}{\mu_o \sigma_a} + NI \right)^2$$

si on suppose que la section du système est constante ($S_a = S_e = S$) :

$$F = \frac{\mu_o S}{\left(La \frac{\sigma_e}{\sigma_a} + 2 e \right)^2} \left(J \frac{La}{\mu_o \sigma_a} + NI \right)^2$$

Dans la mesure où l'on considère que l'aimantation de l'aimant est rigide, on peut dire alors que

$J = Br$ où Br représente l'induction rémanente de l'aimant.

d'où il vient :

$$F = \frac{S}{\left(La \frac{\sigma_e}{\sigma_a} + 2 e \right)^2} \left[\frac{1}{\mu_o} \left(Br \frac{La}{\sigma_a} \right)^2 + 2 Br NI \frac{La}{\sigma_a} + \mu_o (NI)^2 \right]$$

III - CONCLUSIONS

On retrouve également les trois termes de la force magnétique caractéristiques des systèmes polarisés .

On constate enfin que tenir compte des fuites autour de l'aimant revient à considérer que sa longueur est réduite d'un coefficient $1 / \sigma_a$.

ANNEXE III

DETERMINATION DES GRANDEURS MAGNETIQUES DANS UN CIRCUIT POLARISE PARALLELE A PARTIR DE SON SCHEMA ELECTRIQUE EQUIVALENT

I - RAPPEL

Comme dans l'annexe II, nous utilisons la représentation Ampérienne des volumes aimantés pour l'aimant permanent, ainsi que l'analogie circuit magnétique - circuit électrique classique. Celle-ci peut être utilisée car nous supposons que le circuit magnétique n'est pas saturé. Rappelons les principales correspondances de cette analogie :

circuit magnétique



circuit électrique

ddp magnétique

ddp électrique

Flux magnétique

Courant électrique

Réductance

Résistance

Ampères-Tours NI

Source de tension NI

Aimant de longueur L_a , d'aimantation J Source de tension $J L_a / \mu_0$

Théorème d'Ampère

Loi des mailles

Conservation des flux

Loi des noeuds

II - SYSTEME POLARISE PARALLELE

Le système polarisé parallèle représenté Figure AIII - 1 est alors équivalent au circuit électrique en Figure AIII - 2.

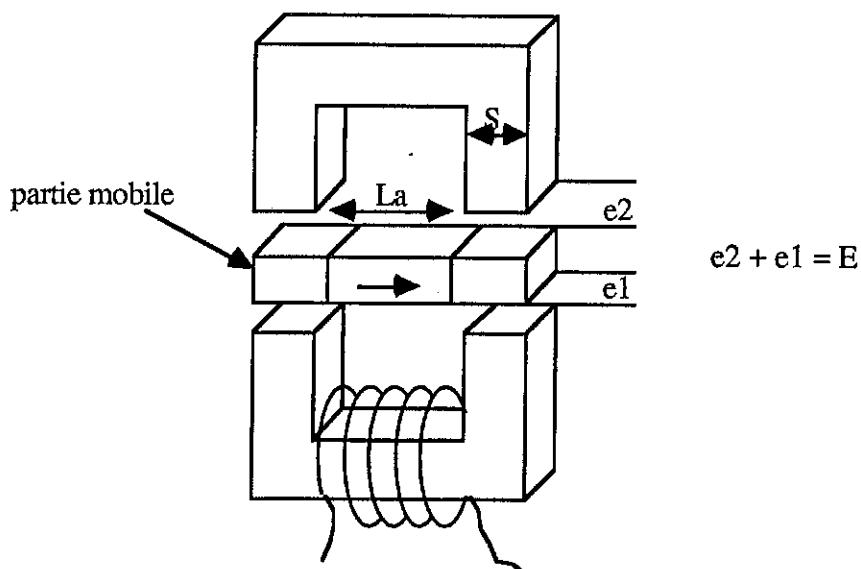


Figure AIII - 1 : Système polarisé parallèle

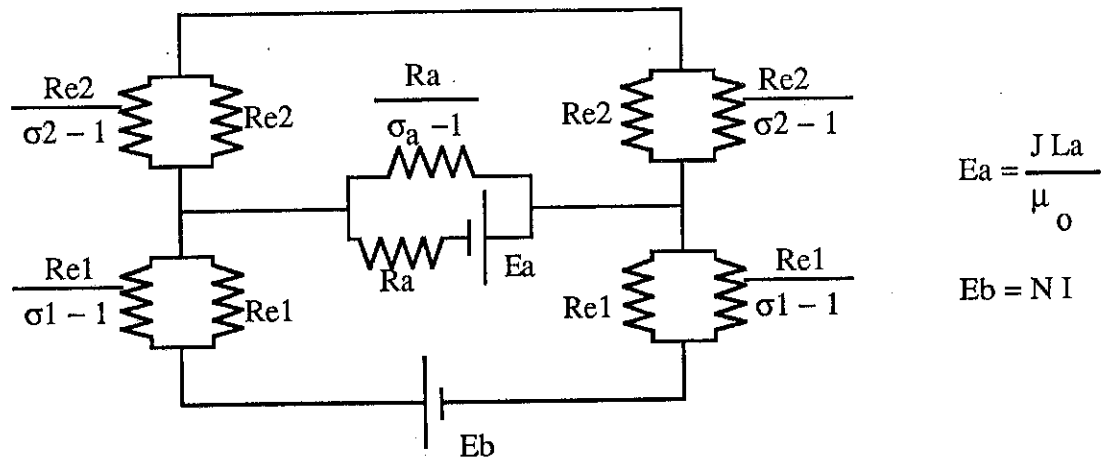


Figure AIII - 2 : Schéma équivalent

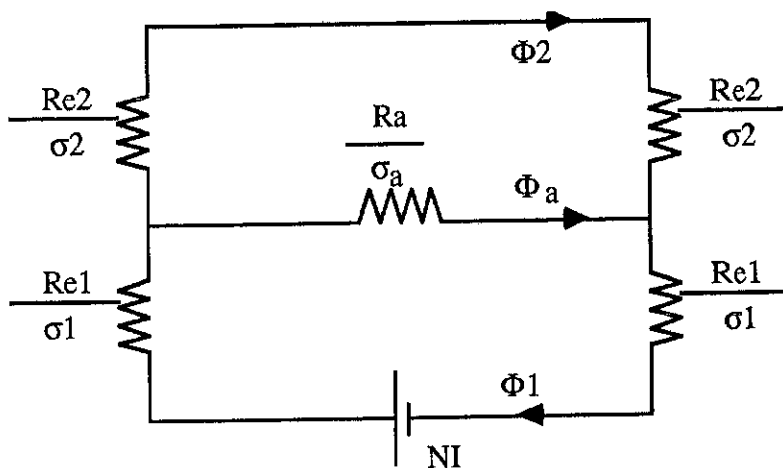
- $Re1 = e1 / \mu_o S$: Réductance d'un entrefer $e1$
 $Re2 = e2 / \mu_o S$: Réductance d'un entrefer $e2$
 $Ra = La / \mu_o Sa$: Réductance de l'aimant
 $\sigma e1, \sigma e2, \sigma a$: Coefficients de fuites autour d'un entrefer $e1, e2$ et de l'aimant

Nous voulons calculer les inductions ou les flux magnétiques dans les réductances $Re1$ et $Re2$. Compte tenu de la symétrie du système, celles-ci sont identiques dans chaque paire d'entrefers.

Nous allons maintenant appliquer le principe de superposition (applicable puisque l'on suppose être en régime linéaire), et calculer la contribution de chaque source séparément.

II - 1 Flux d'excitation

Le circuit équivalent devient alors :



$$\Phi_2 (2 Re2 / \sigma_2) = \Phi_a Ra / \sigma_a = NI - \Phi_1 (2 Re1 / \sigma_1) \quad (E1-a) \text{ et } (E1-b)$$

$$\Phi_1 = \Phi_a + \Phi_2 \quad (E2)$$

Des équations (E1) on tire :

$$\Phi_a = \frac{2 \text{ Re}2}{\sigma_2} \frac{\sigma_a}{\text{Ra}} \Phi_2$$

$$\Phi_1 = \frac{\sigma_1}{2 \text{ Re}1} \left(\text{NI} - \frac{2 \text{ Re}2}{\sigma_2} \Phi_2 \right)$$

en remplaçant dans (E2) :

$$\Phi_2 \left[1 + \frac{2 \text{ Re}2}{\sigma_2} \left(\frac{\sigma_a}{\text{Ra}} + \frac{\sigma_{e1}}{2 \text{ Re}1} \right) \right] = \text{NI} \frac{\sigma_{e1}}{2 \text{ Re}1}$$

$$\Phi_2 = \frac{\text{NI} \sigma_1 \sigma_2}{2 \text{ Re}1 \sigma_2 + 2 \text{ Re}2 \sigma_1 + 4 \text{ Re}2 \text{ Re}1 \frac{\sigma_a}{\text{Ra}}}$$

d'où :

$$\Phi_2 = \frac{\text{NI} \frac{\text{Ra}}{\sigma_a} \sigma_1 \sigma_2}{2 \left[\frac{\text{Ra}}{\sigma_a} (\text{Re}1 \sigma_2 + \text{Re}2 \sigma_1) + 2 \text{ Re}2 \text{ Re}1 \right]}$$

On suppose la section du système constante, et on peut évaluer le flux magnétique dans l'entrefer :

$$\Phi_{e2} = \frac{\Phi_2}{\sigma_2} = \frac{\mu_0 \text{NI} S \frac{\text{La}}{\sigma_a} \sigma_1}{2 \left[\frac{\text{La}}{\sigma_a} (e1 \sigma_2 + e2 \sigma_1) + 2 e2 e1 \right]}$$

$$\Phi_1 = \Phi_a + \Phi_2 \quad \text{d'où :}$$

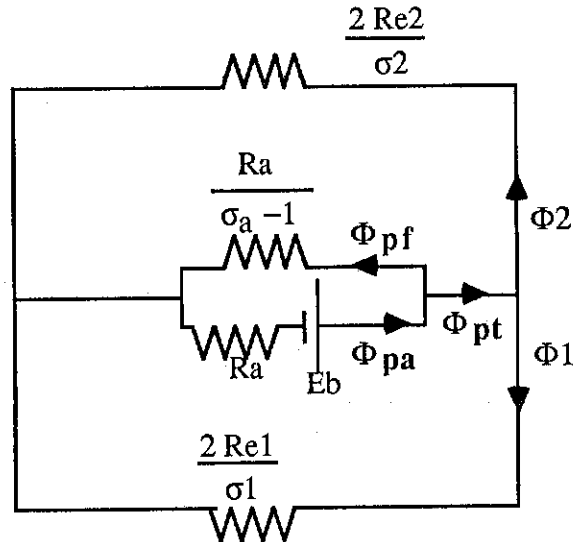
$$\Phi_1 = \frac{\sigma_1 \text{NI} \left(\frac{\text{Ra}}{\sigma_a} \sigma_2 + 2 \text{ Re}2 \right)}{2 \left[\frac{\text{Ra}}{\sigma_a} (\text{Re}1 \sigma_2 + \text{Re}2 \sigma_1) + 2 \text{ Re}2 \text{ Re}1 \right]}$$

dans chaque entrefer e1, on aura :

$$\Phi_{e1} = \frac{\Phi_1}{\sigma_1} = \frac{\mu_o N I S \left(\frac{L_a}{\sigma_a} \sigma_2 + 2 e_2 \right)}{2 \left[\frac{L_a}{\sigma_a} (e_1 \sigma_2 + e_2 \sigma_1) + 2 e_2 e_1 \right]}$$

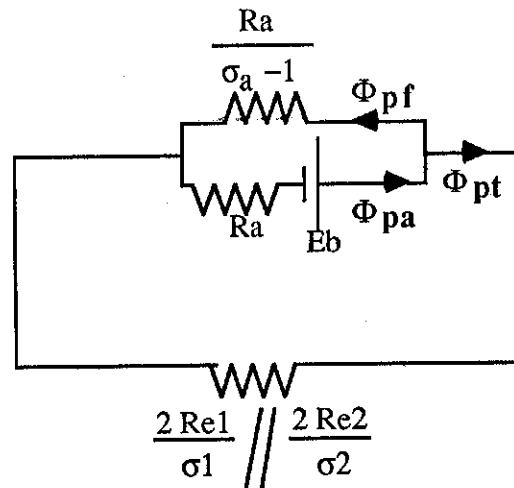
II - 2 Flux permanent

Le schéma équivalent devient :



$$E_b = \frac{J L_a}{\mu_o}$$

Ou encore :



$$E_b = \frac{J L_a}{\mu_o}$$

Le calcul est similaire à celui effectué dans l'annexe II pour le flux permanent. Par analogie, on en déduit :

$$\Phi_{pt} = \frac{\frac{J L_a}{\mu_o \sigma_a}}{\frac{R_a}{\sigma_a} + \frac{2 R_{e1} R_{e2}}{\sigma_1 R_{e2} + \sigma_2 R_{e1}}}$$

Entre les entrefers e_1 et e_2 , le rapport des flux Φ_1 et Φ_2 s'établit dans le rapport inverse des réluctances (en tenant compte des fuites). D'où :

$$\Phi_1 = \frac{Re_2 \sigma_1}{\sigma_2 Re_1 + \sigma_1 Re_2} \Phi_{pt}$$

$$\Phi_2 = \frac{Re_1 \sigma_2}{\sigma_2 Re_1 + \sigma_1 Re_2} \Phi_{pt}$$

soit

$$\Phi_1 = \frac{J \frac{La}{\mu_0 \sigma_a} Re_2 \sigma_1}{\left[\frac{Ra}{\sigma_a} (Re_1 \sigma_2 + Re_2 \sigma_1) + 2 Re_2 Re_1 \right]}$$

$$\Phi_2 = \frac{J \frac{La}{\mu_0 \sigma_a} Re_1 \sigma_2}{\left[\frac{Ra}{\sigma_a} (Re_1 \sigma_2 + Re_2 \sigma_1) + 2 Re_2 Re_1 \right]}$$

Dans chaque entrefer e1, e2 on aura donc un flux permanent :

$$\Phi_{p1} = \frac{J \frac{La}{\sigma_a} S e_2}{\left[\frac{La}{\sigma_a} (e_1 \sigma_2 + e_2 \sigma_1) + 2 e_2 e_1 \right]}$$

$$\Phi_{p2} = \frac{J \frac{La}{\sigma_a} S e_1}{\left[\frac{La}{\sigma_a} (e_1 \sigma_2 + e_2 \sigma_1) + 2 e_2 e_1 \right]}$$

II - 3 Calcul de la force magnétique

En négligeant toujours la contribution du flux de fuites à la force magnétique, la force totale peut s'exprimer sous la forme :

$$F = \frac{(\Phi_{p1} + \Phi_{e1})^2}{\mu_0 S} - \frac{(\Phi_{p2} - \Phi_{e2})^2}{\mu_0 S}$$

$$F = \frac{(\Phi_{p1}^2 - \Phi_{p2}^2) + 2(\Phi_{p1} \Phi_{e1} + \Phi_{p2} \Phi_{e2}) + (\Phi_{e1}^2 - \Phi_{e2}^2)}{\mu_0 S}$$

On posera :

$$D^2 = \frac{La}{\sigma_a} (e_1 \sigma_2 + e_2 \sigma_1) + 2 e_1 e_2$$

Comme la section du système est supposée constante ($S_a = S$), on peut mettre la force F sous la forme :

$$F = F_{\text{perm}} + F_{\text{pol}} + F_{\text{exc}}$$

avec :

$$F_{\text{perm}} = \frac{\mu_o S \left(\frac{J La}{\sigma_a} \right)^2 (e2^2 - e1^2)}{D^4}$$

$$F_{\text{pol}} = \frac{J \frac{La}{\sigma_a} S NI \left(e2 \left(\frac{\sigma_2 La}{\sigma_a} + 2 e2 \right) + e1 \left(\frac{\sigma_1 La}{\sigma_a} \right) \right)}{D^4}$$

$$F_{\text{exc}} = \frac{\mu_o (NI)^2 S \left[\left(\frac{\sigma_2 La}{\sigma_a} + 2 e2 \right)^2 - \left(\frac{\sigma_1 La}{\sigma_a} \right)^2 \right]}{4 D^4}$$

Soit, dans la mesure où l'on considère que l'aimantation de l'aimant est rigide ($J = Br$) :

$$F_{\text{perm}} = \frac{\mu_o S \left(\frac{Br La}{\sigma_a} \right)^2 E (e2 - e1)}{D^4}$$

$$F_{\text{pol}} = \frac{Br \frac{La}{\sigma_a} S NI \left(\frac{La}{\sigma_a} (e1 \sigma_1 + e2 \sigma_2) + 2 e2 \right)}{D^4}$$

$$F_{\text{exc}} = \frac{\mu_o (NI)^2 S \left[\left(\frac{La}{\sigma_a} (\sigma_2 - \sigma_1) + 2 e2 \right) \left(\frac{La}{\sigma_a} (\sigma_2 + \sigma_1) + 2 e2 \right) \right]}{4 D^4}$$

III - CONCLUSIONS

On retrouve des résultats analogues à ceux obtenus dans l'annexe II :

- La force magnétique contient également les trois termes caractéristiques des systèmes polarisés, mais ceux-ci varient de manière plus complexe en fonction des différents paramètres.
- Tenir compte des fuites autour de l'aimant revient à considérer que sa longueur est réduite d'un coefficient $1 / \sigma_a$.

BIBLIOGRAPHIE

CHAPITRE I : LES CONTACTEURS

- [1] : Documentation interne Télémécanique Electrique
- [2] : " Modern relay technology " H. Sauer, (traduit de l'allemand " Relais-Lexicon" par J-G. Naples) 2^{ème} édition, Dr Alfred Huethig Verlag GmbH, Heidelberg (1986)

CHAPITRE II : INTERET DE LA POLARISATION

- [1] : " Les processus d'aimantation " L.Brugel, Cours de formation permanente INPG, Nov 1985,. Chapitre V
- [2] : " Permanent magnets and their applications " R-J Parker and R-J Studders, John Wiley Ed., New York (1962)
- [3] : " Permanent magnets and magnetism " D. Hadfield, Illife Books Ltd Ed., London (1962)
- [4] : " Transducteurs électromécaniques " M. Jufer, Traité d'Electricité, Editions Georgi (1979) vol IX, chap 2
- [5] : " Méthodes d'asservissement d'un moteur pas à pas monophasé " L. Antognini et H-J Rémus, Compte-rendu des 2^{èmes} journées d'Etudes sur les moteurs pas à pas - Lausanne, Avril 1982 , p 111-118
- [6] : " Grundsätzliche Unterschiede zwischen gepolten und ungepolten Magnetsystemen für Relais " H. Helmrich, ETZ-A, Bd 80, H 16, Août 1959, p 536-541

CHAPITRE III : SYSTEMES POLARISES MONOSTABLES EXISTANTS

- [1] : Manumasure : Brevet francais n° 76 20988
- [2] : Télémécanique Electrique : Brevet européen n° 83 400065-5
- [3] : Documentation technique SIEMENS GmbH
- [4] : " The use of permanent magnets and adjustment principles in miniaturizing modern relays " H. Stocker, IEEE transactions on Magnetics, vol MAG 20, n°5, Septembre 1984, p 1608-1610
- [5] : Documentation technique Matsushita (représenté par SDS-Relais - France)

- [6] : " Un IC spécial donne naissance à une nouvelle génération de relais " S. Antonish, Traduction de l'article paru dans " Der Elektroniker ", Décembre 1982 (documentation SDS-Relais)

CHAPITRE IV : COMPARAISON DE DEUX CONFIGURATIONS POLARISEES ELEMENTAIRES

- [1] : " Utilisation des aimants permanents dans la construction des paliers magnétiques " T. Redarce et J-P Yonnet, Revue Générale de l'Electricité, Octobre 1984, p 648-653

CHAPITRE V : RECHERCHE DE CONFIGURATIONS

- [1] : " Systematische Ermittlung eines günstigen Gleichstrommagnetsystems unter Berücksichtigung dynamischer Forderung " K. Liedkte, Feingerätetechnik, 21 Jg, Heft 9/1972, p 412-416

CHAPITRE VII: UTILISATION DES TECHNIQUES DE CAO

- [1] : " CAO en Electrotechnique " J-L Coulomb et J-C Sabonnadière, Editions Hermès, 1985
- [2] : " Eléments finis et CAO " J-C Sabonnadière et J-L Coulomb, Editions Hermès, 1986
- [3] : " A methodology for the determination of global electromechanical quantities from a finite element analysis and its application to the evaluation of magnetic forces, torques and stiffness " J-L Coulomb, IEEE Transactions on Magnetics, vol MAG 19, n°6, Novembre 1983, p 2514-2519
- [4] : " Finite element implementation of virtual work principle for magnetic or electric force and torque computation " J-L Coulomb and G. Meunier, IEEE Transactions on Magnetics, vol MAG 20, n°5, Septembre 1984, p 1894-1896
- [5] : " Generalized Preisach Model of Hysteresis " I-D Mayergoyz and G. Friedman, IEEE Transactions on Magnetics, vol MAG 24, n°1, Janvier 1988, p 212-217
- [6] : " Comparison between 3D, 2D finite element methods and analytical calculations for electromagnetic problems " E. Logeais, J-P Yonnet, J-L Coulomb, G. Meunier and S. Gitosusastro, IEEE Transactions on Magnetics, vol MAG 24, n°1, Janvier 1988, p 66-69

A U T O R I S A T I O N de S O U T E N A N C E

VU les dispositions de l'article 15 Titre III de l'arrêté du 5 juillet 1984 relatif aux études doctorales

VU les rapports de présentation de Messieurs

. M. LAJOIE MAZENC, Directeur de recherche CNR

. J.C.L. SABONNADIÈRE, Professeur INPG

Mademoiselle LOGE AIS Elisabeth

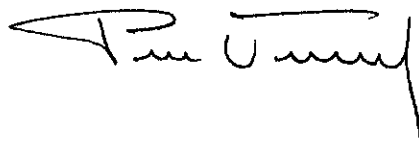
est autorisé(e) à présenter une thèse en soutenance en vue de l'obtention du diplôme de DOCTEUR de L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE, spécialité " Génie Electrique"

Fait à Grenoble, le 6 Octobre 1988

Georges LESPINARD

Président
de l'Institut National Polytechnique
de Grenoble

P.O. le Vice-Président,



RESUME

Ce travail est consacré à l'étude de circuits magnétiques polarisés, appliquée aux contacteurs. Ceux-ci ont le plus souvent un fonctionnement monostable (une seule position de repos sans excitation). Les améliorations apportées par les aimants permanents sont discutées à partir de considérations énergétiques, et constatées sur des exemples simples.

Une recherche originale de configurations a été menée tant du point de vue magnétique que géométrique. Les structures retenues ont fait l'objet d'une optimisation par CAO, puis d'essais expérimentaux sur prototypes qui ont montré la validité des choix effectués pour ces structures.

MOTS-CLES

Contacteurs, Circuits magnétiques, Aimants permanents, Polarisation, Recherche de structures magnétiques, Optimisation par CAO