



Etude de capteurs magnétiques de position angulaire

Sébastien Adenot

► To cite this version:

Sébastien Adenot. Etude de capteurs magnétiques de position angulaire. Sciences de l'ingénieur [physics]. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 1996. Français. NNT: . tel-00531702

HAL Id: tel-00531702

<https://theses.hal.science/tel-00531702>

Submitted on 3 Nov 2010

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

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

THESE

présentée par
Sébastien ADENOT
Ingénieur du CUST de
Clermont-Ferrand

pour obtenir le titre de **DOCTEUR**
de **l'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE**

(Arrêté ministériel du 30 mars 1992)

Spécialité : Génie Electrique

ETUDE DE CAPTEURS MAGNETIQUES DE POSITION ANGULAIRE

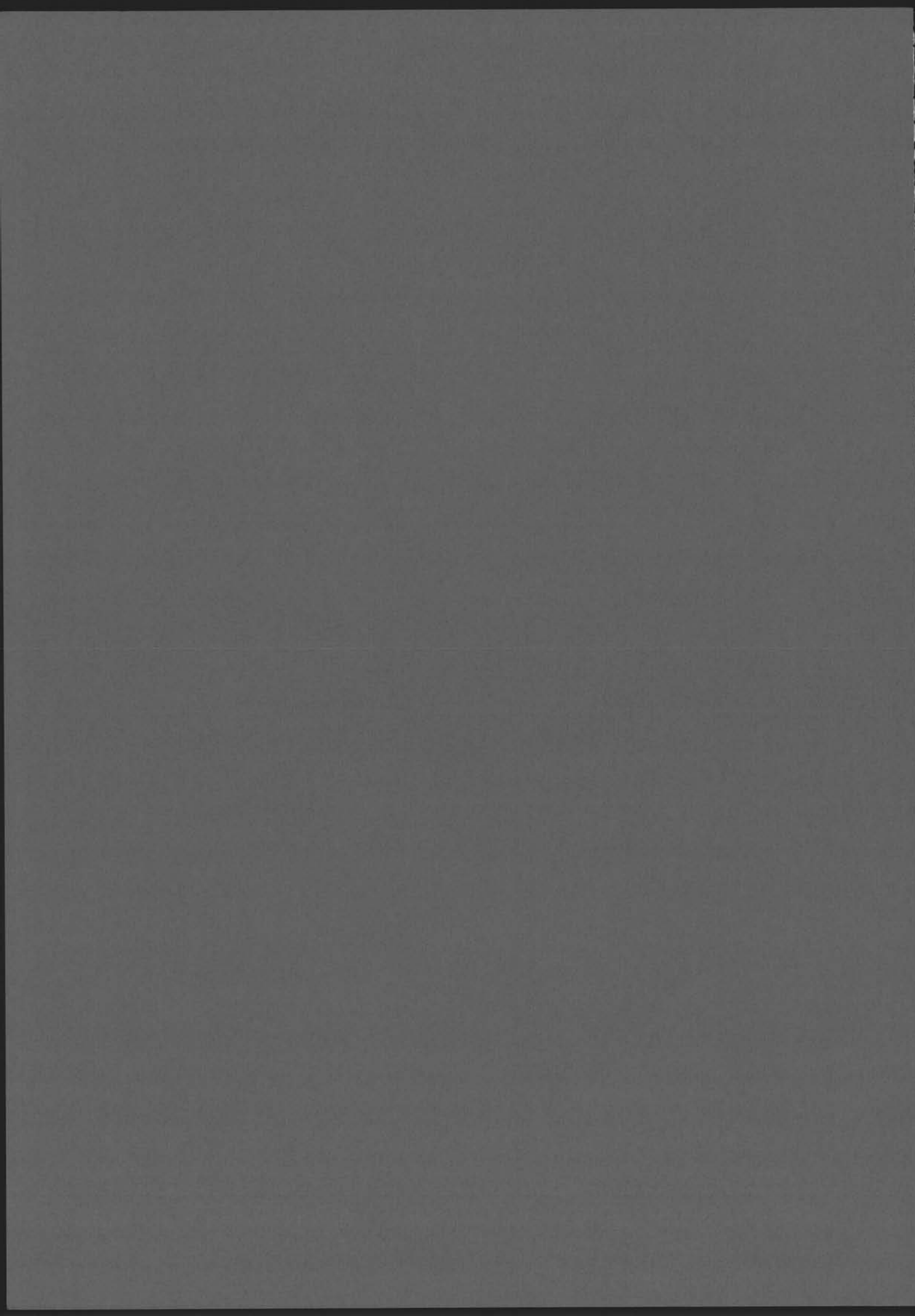
Date de soutenance : octobre 1996

Composition du jury :

Messieurs :	J.P. YONNET	Président
	S. ALLANO	Rapporteur
	B. DAVAT	Rapporteur
	A. FOGGIA	
	J. PIATON	

Thèse préparée au sein du Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble

AVANT PROPOS



Remerciements

Le travail présenté dans ce mémoire a été réalisé au Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble (L.E.G) dans le groupe Microsystèmes de l'équipe Machine Electriques, en collaboration avec la société SAGEM.SA. Il s'inscrit dans le cadre d'une étude financée par le Ministère de la Recherche et de l'Industrie.

Je tiens à exprimer mes remerciements à l'ensemble des membres du jury :

- Monsieur YONNET, Directeur de recherches au CNRS, pour m'avoir fait l'honneur d'accepter la présidence du jury.
- Monsieur ALLANO, Professeur à l'ENS cachan, qui a accepté d'être rapporteur de cette thèse.
- Monsieur DAVAT, Professeur à l'ENSEM (INPL), qui a également accepté d'être rapporteur de cette thèse.
- Monsieur FOGGIA, Professeur à l'ENSIEG (INPG), qui a dirigé ces travaux au long des trois années de thèse.
- Monsieur PIATON, Responsable du bureau d'étude Micro Machines et Capteurs du centre SAGEM.SA à Montluçon, pour l'intérêt qu'il a porté à notre étude.

Je remercie également :

- Monsieur GOURBET, Ingénieur études à la SAGEM.SA, qui fut mon interlocuteur pendant la dernière année de ce travail.
- L'ensemble des techniciens et ingénieurs du L.E.G sans lequel tous les travaux de recherche seraient impossibles.
- Monsieur FOGGIA et YONNET pour m'avoir encadré pendant ces trois années de thèse.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENErale.....	9
I. LES CAPTEURS EXISTANTS.....	13
I.1.Introduction	15
I.2.Les éléments d'un capteur magnétique de position	15
I.2.1.Quelques définitions	15
I.2.2.Le principe d'un capteur magnétique et critères de classification	17
I.2.3.Les transducteurs.....	20
I.2.4.Les conditionneurs de signaux.....	24
I.3.Les capteurs à circuit magnétique constant	27
I.3.1.Les capteurs inductifs.....	28
I.3.2.Les capteurs à aimants permanents.....	29
I.3.3.Discussion.....	31
I.4.Les capteurs avec un circuit magnétique variable	32
I.4.1.Les capteurs inductifs.....	32
I.4.2.Les capteurs à aimants permanents.....	36
I.4.3.Discussion.....	37
I.5.Conclusion	38
II. NOUVEAUX CAPTEURS A AIMANTS PERMANENTS	39
II.1.Introduction	41
II.2.Spécification.....	41
II.2.1.Entrefer variable ou glissant.....	42
II.2.2.Avec ou sans pièces polaires sur l'aimant	46
II.3.Synthèse des capteurs à aimants permanents.....	48
II.3.1.Les aimants possibles.....	49
II.3.2.Les pièces ferromagnétiques	53
II.4.Conclusion	61

III. ETUDE D'UN CAPTEUR A AIMANTS PERMANENTS.....	63
III.1.Introduction	65
III.2.Présentation du capteur	65
III.3.La modélisation	66
III.3.1.Les éléments finis	67
III.3.2.Le modèle à réluctances.....	68
III.4.Utilisation des modèles	75
III.4.1.Réponse du capteur	76
III.4.2.Sensibilité du capteur aux défauts	78
III.5.Les mesures (SAGEM)	82
III.5.1.Validation des modèles	82
III.6.Conclusion	88
 CONCLUSION GENERALE	 89
 Bibliographie	 93
 ANNEXES	 99
Formules de Roters.....	101
Application du capteur de position pour une mesure sur 360 degrés	105
Capteur de position pour une faible plage de mesure (application au couplemètre).....	109

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Le sujet de ces travaux porte sur l'étude de capteurs magnétiques de position angulaire. Ils ont été réalisés dans le cadre d'une collaboration entre la société SAGEM de Montluçon et le Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble (LEG).

Ces capteurs sont d'un emploi très général. D'une part le contrôle des positions ou des déplacements est un élément indispensable pour le fonctionnement correct de beaucoup de systèmes mécanique automatisés. D'autre part, des grandeurs physiques sont mesurables par le déplacement qu'elles imposent à des corps d'épreuve. C'est le cas pour de nombreux capteurs de force, de couple, de pression, d'accélération, de température...

Dans le milieu industriel, les capteurs sont très utilisés. Ils sont en effet les éléments de base de tous les systèmes automatiques (machines outils, robots d'assemblage...) ou de surveillance. Plus récemment, de nouvelles applications de capteurs se développent dans les domaines grand public (domotique, automobile...). En effet, la recherche de toujours plus de confort et de sécurité font que le nombre des systèmes automatiques et de surveillance augmente. Dans l'automobile par exemple, il s'agit notamment de tous les systèmes d'aide à la conduite (suspension active, boîte automatique, direction assistée...). Parmi ces nombreux systèmes sont ceux qui utilisent des capteurs de position. Il existe donc un besoin en capteur de position fiable (problème de sécurité), ayant une durée de vie importante, et fonctionnant dans des conditions sévères.

Plusieurs technologies sont possibles pour les capteurs de position. La plus ancienne est le simple potentiomètre résistif. Son inconvénient est essentiellement d'avoir un curseur en contact avec des fils ou une piste : le frottement est source de bruit et de vieillissement du capteur. Pour une bonne précision et une durée de vie plus importante, on se tourne vers des capteurs sans contact. On distingue trois grandes technologies de capteur sans contact. La première comprend les systèmes à effet capacitif. Ils permettent d'avoir une bonne précision pour des plages de mesure faibles. Ces capteurs sont sensibles aux vibrations, à l'humidité et à d'autres paramètres. Ils sont donc peu adaptés pour nos applications. En second, on trouve les systèmes à effet optique. Ils permettent d'avoir une grande précision sur une grande plage de mesure. Les signaux qu'ils délivrent sont généralement des signaux numériques. Ils sont très utilisés sur des machines outils, mais doivent être protégés du milieu ambiant (poussière). Ils sont d'une technologie coûteuse et fragile. Enfin on trouve les capteurs magnétiques. Dans certains domaines, ils concurrencent les capteurs optiques pour les plages de mesures et la précision. De plus, leur grand avantage par rapport aux capteurs précédents est de pouvoir fonctionner en environnement sévère sans altération de leurs performances. En effet, ils sont insensibles à la présence de poussière lorsqu'elle n'est pas ferromagnétique, d'humidité, de vibration. Ils sont

particulièrement robustes.

Nous allons dans le premier chapitre faire la synthèse des différentes familles de capteurs magnétiques existants. Nous allons classer ces différents capteurs en fonction de leur principe de fonctionnement en vue d'en déduire les principales caractéristiques de chaque famille.

Dans le second chapitre, nous ferons l'étude d'une famille particulière de capteur dont les caractéristiques de précision de robustesse sont intéressantes. Nous chercherons à recenser le maximum de réalisations possibles avec cette famille de capteur.

Dans le dernier chapitre, nous ferons l'étude d'un capteur particulier de la famille précédemment étudiée. Pour cela nous développerons des modèles et des techniques d'études. Nous validerons les modèles et les principes du capteurs à l'aide de mesures.

I. LES CAPTEURS EXISTANTS

I.1. Introduction

L'objectif de ces travaux est d'étudier différentes structures de capteurs magnétiques de position. Dans la première partie de ce chapitre, nous rappellerons le principe de fonctionnement des capteurs magnétiques de position et les différents éléments les constituant. Nous en dégagerons les grandes familles de capteurs. Puis nous présenterons les éléments communs nécessaires au fonctionnement, c'est-à-dire les principaux transducteurs et traitements électroniques associés.

Dans la deuxième et troisième partie, nous illustrerons les différentes familles de capteurs par des exemples de réalisations les plus significatives. Nous en déduirons les principales caractéristiques de chaque famille.

En conclusion, nous sélectionnerons pour la suite de notre étude une famille de capteurs dont les caractéristiques sont particulièrement intéressantes.

I.2. Les éléments d'un capteur magnétique de position

I.2.1. Quelques définitions

La fonction d'un capteur est de traduire une grandeur physique appelée mesurande (température, position, déplacement...) en un signal exploitable (généralement électrique). Le signal mesuré doit être une représentation aussi exacte possible du mesurande. Nous allons dans ce paragraphe rappeler les quelques notions nécessaires pour caractériser un capteur.

1. Etendue de mesure

L'étendue de mesure ou plage de mesure est la différence algébrique des valeurs extrêmes du mesurande auquel peut être soumis le capteur. Les différentes caractéristiques du capteur sont définies pour cet intervalle.

2. La sensibilité

La sensibilité (S_i) est le quotient d'une variation du signal de sortie (ΔS) par la variation correspondante du mesurande (Δm) autour d'un point de référence (m_i). Elle s'exprime en unité de grandeur de sortie par l'unité de grandeur d'entrée.

$$S_i = \left(\frac{\Delta S}{\Delta m} \right)_{m = m_i} \quad (1.1)$$

Sur toute la plage de mesure, la connaissance de la sensibilité permet à partir d'une mesure de déduire la valeur du mesurande correspondante. Pour un capteur à réponse linéaire, la sensibilité est constante sur toute la plage de mesure.

3. L'erreur

C'est la différence entre la valeur mesurée et la valeur réelle du mesurande. Celle-ci est due en particulier aux imperfections du capteur, ou aux perturbations extérieures. Généralement, on distingue l'erreur systématique de l'erreur accidentelle.

Pour une valeur donnée du mesurande, l'erreur systématique est soit constante, soit à variation lente par rapport à la durée de la mesure. Elle peut avoir pour origine une mauvaise connaissance des caractéristiques du capteur (la sensibilité ou le zéro) suite à un mauvais étalonnage, ou une dérive lente des caractéristiques physiques d'un élément du capteur (dérive en température par exemple).

L'erreur accidentelle se caractérise par une amplitude et un signe variant de façon aléatoire dans le temps. On peut donc considérer ce type d'erreur comme un bruit se superposant à la mesure. Les origines de ce type d'erreur peuvent être des perturbations électromagnétiques, du bruit thermique dans les composants électroniques, la quantification (capteur numérique), des hystérésis (mécanique pour un ressort, magnétique pour un matériau ferromagnétique).

Par définition, l'erreur ne peut être connue, mais la conception rigoureuse du capteur permet de la réduire.

4. La fidélité

La fidélité d'un capteur permet de quantifier l'erreur accidentelle d'un capteur. Pour un ensemble de mesures consécutives sur un même mesurande, l'erreur accidentelle disperse les résultats de mesure autour d'une valeur moyenne. L'écart type de ces mesures reflétant la dispersion des résultats est une appréciation quantitative de la fidélité du capteur.

5. La justesse

La justesse d'un capteur permet de quantifier l'erreur systématique d'un capteur. Elle est définie comme la différence entre la valeur la plus probable du mesurande (valeur moyenne d'un ensemble de mesures) et de la valeur vraie du mesurande. La justesse d'un capteur peut être améliorée par un étalonnage d'un capteur.

6. La précision

La précision est la qualité d'un capteur dont l'erreur, quelles que soient ses origines (accidentelles ou systématiques) est faible. Un capteur précis est un capteur à la fois juste et fidèle. Elle est définie comme l'intervalle autour de la valeur mesurée dans lequel on est assuré de trouver la valeur vraie. Généralement, la précision est donnée en % de la pleine échelle du capteur, ou par un gabarit.

7. La résolution

C'est la plus petite variation significative de l'information de sortie délivrée par un capteur. Pour un potentiomètre bobiné, il s'agit du pas entre deux conducteurs. Dans le cas d'un potentiomètre à piste, il est fonction de la structure granulaire des pistes conductrices.

8. La finesse

C'est la spécification qui permet à l'utilisateur d'estimer l'influence de la présence du capteur et de ses liaisons sur la valeur du mesurande. Cette influence dépend du capteur, mais aussi de son environnement. Pour un capteur de position angulaire, la finesse peut être définie par un moment d'inertie, un couple résistant ou de rappel.

I.2.2. Le principe d'un capteur magnétique et critères de classification

1. Principe

Nous pouvons illustrer le principe général d'un capteur magnétique de position à l'aide du capteur proposé par V. Lemarquand [LEMA90] (Figure 1.1).

Ce capteur est constitué d'un rotor et d'un stator à pôles lisses. Un aimant permanent (solidaire du rotor) dont l'aimantation est diamétrale, deux sondes de Hall fixes et espacées de 90 degrés

sont disposés dans l'entrefer.

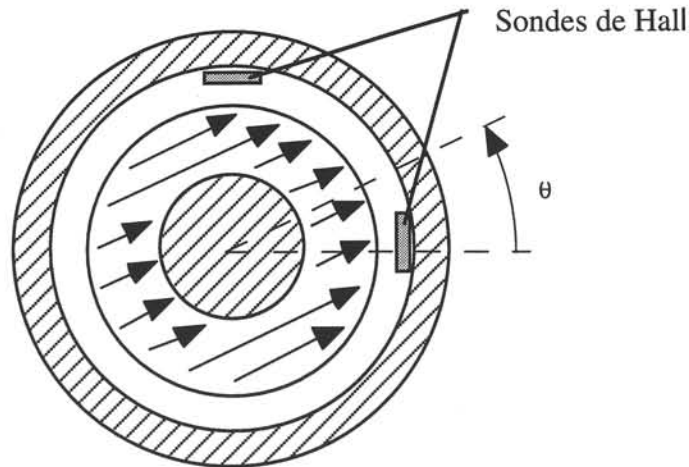


Figure 1.1 : Capteur à réponse sinusoïdale [LEMA90]

L'aimant permanent crée une induction dont la composante normale à une répartition sinusoïdale dans l'entrefer. Les deux sondes de Hall mesurent la composante normale de l'induction en deux points de l'entrefer.

Le principe général d'un capteur magnétique de position est la modulation d'un signal magnétique, ici la composante normale de l'induction en un point de l'entrefer, par un déplacement. Le signal provient d'une source magnétique constante modulée par le déplacement d'un élément du circuit magnétique (l'aimant permanent). Le signal magnétique modulé, image de la position du capteur, est converti en un signal électrique par un transducteur magnéto-électrique (sonde de Hall).

Ainsi comme pour tout système magnétique, un capteur est composé d'un circuit magnétique comprenant une source magnétique (aimant permanent ou bobine d'excitation). De plus, il comprend au moins un transducteur permettant de traduire une grandeur magnétique (induction magnétique, flux magnétique...) en une grandeur électrique (courant ou tension).

Les notions de sources magnétiques et de transducteurs sont évidentes. Par contre, la notion de circuit magnétique nécessite quelques éclaircissements. Le circuit magnétique est ce qui caractérise la forme des lignes d'induction dans le capteur. Il est constitué des pièces ferromagnétiques, des pièces conductrices pour les champs alternatifs (blindage) et des sources magnétiques (bobines parcourues par un courant et aimants permanents).

2. Classification

Nous avons vu qu'un capteur magnétique était constitué de transducteurs magnéto-électrique et d'un circuit magnétique comprenant une source magnétique. A priori, il est donc possible de classer les capteurs suivant la nature de chacun de ces éléments.

Nous ne retenons pas comme critère de classification des capteurs magnétiques la nature des transducteurs magnéto-électriques. En effet, les transducteurs ne font que la conversion d'un signal magnétique (flux, composantes de l'induction...), image de la position du capteur, en un signal électrique directement exploitable. Ils ne sont donc pas représentatifs de la structure magnétique du capteur. Nous choisissons de classer les capteurs suivant la nature de la source magnétique et du circuit magnétique.

Suivant la source magnétique, il est possible de distinguer les capteurs bobinés et les capteurs à aimants permanents. Dans les premiers, les phénomènes magnétiques sont créés par des bobines parcourues par des courants (capteurs inductifs). Dans les seconds, ils sont créés par des aimants permanents.

Suivant le circuit magnétique, nous distinguons deux familles de capteur. La première est celle des capteurs ayant un circuit magnétique constant. Dans ce type de capteur, les lignes de champ se déplacent sans se déformer avec la position. Le transducteur étant fixe, il voit une variation des grandeurs magnétiques liée au déplacement des lignes de champs. C'est le cas du capteur de la figure 1.1. Les lignes d'inductions se déplacent avec l'aimant permanent sans se déformer.

La seconde famille est celle des capteurs ayant un circuit magnétique variable en fonction de la position. La répartition des lignes de flux varie en fonction de la position: le transducteur mesure cette variation. Nous pouvons illustrer ce type de capteur à l'aide du capteur de la figure 1.2.

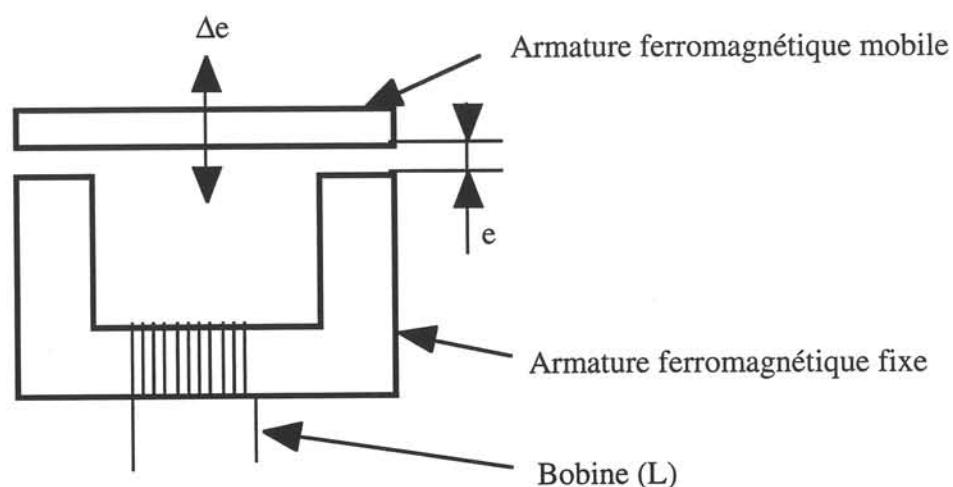


Figure 1.2 : Capteur à circuit magnétique variable (capteur inductif à réluctance variable)

Dans ce capteur, les fonctions de source magnétique et de mesure sont assurées par la bobine (L). Un déplacement (Δe) de l'armature ferromagnétique mobile modifie la longueur des entrefers, et donc la forme des lignes d'induction. Ceci se traduit par une variation de l'inductance L.

Nous pouvons récapituler les différentes structures de capteur magnétique à l'aide du tableau suivant :

	Capteurs à aimant permanent	Capteurs bobinés
Circuit magnétique constant (carte de champ invariante)	Figures 1.1, 1.8, 1.9	Figures 1.6, 1.7
Circuit magnétique variable	Figures 1.14	Figures 1.2, 1.5, 1.10, 1.11, 1.12, 1.13

Nous allons étudier les principales caractéristiques de chaque ensemble de capteurs. Les transducteurs n'intervenant pas dans la classification, ils sont présentés au paragraphe suivant.

I.2.3. Les transducteurs

L'information sous forme magnétique n'est pas directement exploitable. Il est nécessaire de la convertir en signal électrique par l'intermédiaire d'un transducteur magnétique-électrique. Il existe différents transducteurs permettant une mesure de la variation de flux magnétique ou la mesure d'une composante de l'induction.

1. Les sondes à effet Hall [ASCH91], [HERE93]

L'effet Hall se manifeste par l'apparition d'une différence de potentiel V_H perpendiculairement aux lignes de courant d'un conducteur placé dans un champ d'induction magnétique B. L'effet Hall est la conséquence de la force de Laplace qui s'exerce sur les charges électriques en mouvement. Le principe d'une sonde de Hall est illustré par la figure (1.3).

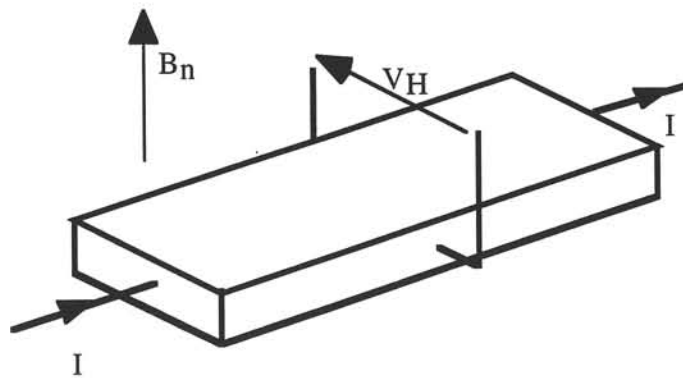


Figure 1.3 : Principe d'une sonde de Hall

I : le courant traversant la sonde de Hall.

B_n : la composante normale du champ magnétique B .

e : l'épaisseur de la sonde de Hall.

La tension V_H est donnée par la relation suivante :

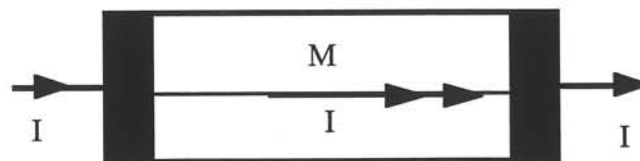
$$V_H = K_H \cdot \frac{I \cdot B_n}{e} \quad (1.2)$$

Où K_H est la constante de Hall (fonction de la densité de charge dans le matériau).

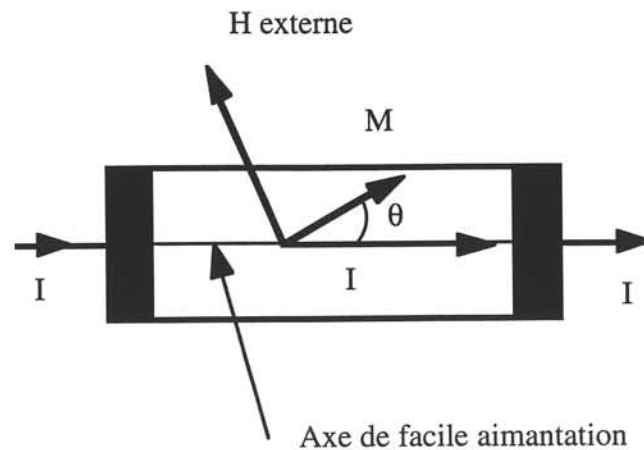
La constante de Hall K_H dépend de la température par suite de son influence sur la densité des porteurs libres. La sensibilité thermique varie en fonction du matériau et peut atteindre quelques $\%/^{\circ}\text{C}$.

2. Les magnéto-résistances [ASCH91], [HERE93]

L'effet magnétorésistif se manifeste par la variation de la résistivité d'un matériau ferromagnétique soumis à un champ magnétique. L'origine est une anisotropie de la résistivité, qui est maximale dans la direction de facile aimantation. Ce principe est utilisé pour la fabrication de transducteurs magnétique-électrique: les magnéto-résistances. Le principe d'une magnéto-résistance est résumé à l'aide de la figure (1.4).



a1 : Pas de champ magnétique H externe



a2 : Avec un champ magnétique H externe

Figure 1.4 : magnéto-résistance

Sans champ magnétique extérieur H, la différence de potentiel impose un courant dans la plaquette parallèle au vecteur d'aimantation. Alors la résistance de la plaquette est maximale. Examinons maintenant ce qui arrive lorsque l'on soumet la plaquette à un champ extérieur H perpendiculaire au vecteur aimantation M précédent. La résultante entre le champ H et le vecteur M fait alors un angle θ avec le courant I. Si l'on l'augmente la valeur de H sans changer sa direction, la résultante va devenir pratiquement perpendiculaire au courant I. L'expression de la résistance est de la forme :

$$R(H) = \left(\frac{L}{W \cdot t} \right) [\rho_{\perp} + (\rho_{\parallel} - \rho_{\perp}) \cdot \cos^2 \theta] \quad (1.3)$$

Où $\rho_{\perp}$, $\rho_{\parallel}$ sont respectivement la résistivité suivant l'axe perpendiculaire et suivant l'axe parallèle à l'axe de facile aimantation

L, W et t sont les dimensions de la magnéto-résistance.

Le matériau le plus utilisé pour les magnéto-résistances est un Fer-Nickel. Il présente une variation de résistance de 2 à 3 % pour un champ magnétique extérieur variant de 0 à 400 A/m.

3. Les bobines

Dans un capteur bobiné, une bobine peut avoir une ou deux fonctions. Ces deux fonctions sont l'excitation (fonction de source magnétique) et la mesure (transducteur). Suivant le cas, ces deux fonctions peuvent être assurées par une seule bobine, ou par deux bobines distinctes. On parle alors de bobine monofonction et de bobine bifonction.

a- *Les bobines bifonctions*

Si on considère que la fréquence d'alimentation du capteur est suffisamment basse pour négliger l'influence des capacités parasites, le comportement électrique d'une bobine est décrit par l'équation (1.4).

$$\bar{U} = (j.L(\theta).\omega + r(\theta)).\bar{I} \quad (1.4)$$

Où $L(\theta)$: inductance de la bobine (fonction de la position du capteur).

$r(\theta)$: résistance équivalente de la bobine.

ω : la pulsation (rad/s).

$r(\theta)$ est une image des pertes électriques (perte Joule dans le conducteur) et magnétiques (courant de Foucault, Hystérésis...) généralement fonction de la position. $L(\theta)$ est représentatif de la position du capteur. La mesure peut être faite de différentes façons.

La première est d'alimenter la bobine avec une tension sinusoïdale d'amplitude et de fréquence constantes, la position est déduite d'une mesure de l'amplitude du courant dans la bobine. On peut aussi alimenter la bobine avec un courant alternatif d'amplitude constante et mesurer l'amplitude de la tension à ses bornes. Ces deux solutions sont similaires. Elles nécessitent une alimentation alternative en courant ou en tension stable en amplitude. Ce type de mesure fonctionne bien à condition que la composante résistive du signal soit négligeable devant la composante inductive.

Il existe des méthodes pour réduire l'influence de la composante résistive dans la mesure. La première est de compenser les variations de celle-ci en fonction de la température par un bobinage de compensation thermique. Ce type de compensation est envisageable lorsque la composante résistive est indépendante de la position du capteur (résistance de la bobine). Une autre approche consiste à faire une démodulation synchrone du signal calé sur la quadrature du courant. Cette compensation permet de compenser la résistance interne du capteur, quelle soit constante ou variable en fonction de la position ou de tout autre paramètre (température...).

Une autre approche consiste à faire une mesure de la phase entre le courant et la tension. Dans ce type de mesure les composantes résistives et inductives du signal doivent être du même ordre de grandeur.

La dernière méthode de mesure est l'utilisation de l'inductance dans un circuit résonnant LC. La variation de l'inductance entraîne une variation de la fréquence du circuit résonnant. Dans ce type de mesure, la composante résistive de la bobine n'a aucune influence sur la fréquence. Ce type de mesure se prête bien pour un traitement numérique de l'information.

b- Les bobines monofonctions

La force électromotrice (f.é.m) d'une bobine à vide est donnée par l'expression (1.5).

$$e = \frac{d\Phi}{dt} \quad (1.5)$$

Φ étant le flux traversant la bobine

Une bobine mesure directement les variations de flux la traversant. Dans la plupart des capteurs, le flux a pour origine une autre bobine alimentée avec un courant sinusoïdal à fréquence fixe. Avec un comportement linéaire des matériaux magnétiques (pas de saturation), il est possible de déduire à partir de la f.é.m le flux traversant la bobine.

L'utilisation de deux bobines monofonctions par rapport à une bobine bifonction apporte les avantages suivants :

- un gain en tension ou en courant en fonction du rapport du nombre de spires,
- un isolement galvanique entre la mesure et l'excitation.

Le gain en tension (ou en courant) permet d'augmenter la sensibilité du capteur et de réduire le rapport entre le signal utile et le bruit. L'isolement galvanique simplifie l'électronique de traitement. De plus au niveau de la mesure, avec une électronique comportant une forte impédance d'entrée (bobine de mesure à vide), la mesure est indépendante de la résistance de la bobine de mesure. Toutefois, l'influence d'une résistance peut être présente au niveau de la bobine d'excitation.

I.2.4. Les conditionneurs de signaux

L'électronique d'un capteur regroupe plusieurs fonctions. Les premières sont les fonctions classiques de tous les systèmes électroniques traitants une information analogique: amplification, adaptation d'impédance... Un autre ensemble de fonctions est fortement lié au transducteur même. Il s'agit, par exemple, de la démodulation d'amplitude pour une bobine de mesure ou de la conversion d'une résistivité en une tension pour une magnéto-résistance. Et enfin, le dernier ensemble de fonctions concerne le traitement de signaux provenant de différents transducteurs. En effet, la grande majorité des capteurs en utilisent deux. Nous allons nous intéresser plus particulièrement à ce type de traitement.

Cette double mesure peut avoir plusieurs raisons. Une première raison est d'avoir une information redondante pour des problèmes de sécurité. La deuxième est de pouvoir déterminer

la position sur une grande plage de mesure sans ambiguïté. En effet, lorsque le capteur donne une réponse sinusoïdale en fonction de la position, l'angle est connu sans ambiguïté sur une plage 90 degrés. Pour avoir un capteur fonctionnant sur une plage supérieure, il est nécessaire de disposer une information supplémentaire. Généralement, les capteurs utilisent deux transducteurs: l'un mesurant le sinus et l'autre le cosinus. La dernière raison est la réduction des non-linéarités ou de l'influence de la température sur la mesure de la position. Ce sont ce type de traitement que nous allons développer.

1. La réduction des non-linéarités [ASCH91]

La réduction des non-linéarités est un problème important dans la plupart des capteurs. Il a pour objet de réduire les écarts de mesure (par rapport à une droite) ou à augmenter la plage de mesure pour une précision donnée. Ces non-linéarités peuvent avoir pour origine le principe même de fonctionnement du capteur (capteur à réluctance variable par variation de l'épaisseur d'un entrefer), un défaut de réalisation (tolérance mécanique), des fuites magnétiques...

Le moyen le plus fréquemment utilisé est la mesure différentielle, dont nous illustrons le principe à l'aide d'un capteur inductif à réluctance variable (Figure 1.2).

On établit facilement l'expression de l'inductance de la bobine :

$$L = \frac{\mu_0 \cdot N^2 \cdot A}{2 \cdot e} \quad (1.6)$$

Où N est le nombre de spires de la bobine, A et (e) sont respectivement la surface et l'épaisseur d'un entrefer.

Un déplacement Δe de l'armature, entraînant une variation Δe de l'entrefer, modifie la valeur de l'inductance de ΔL (1.7).

$$\Delta L = - \frac{\mu_0 \cdot N^2 \cdot A}{2 \cdot e^2} \cdot \frac{\Delta e}{1 + \frac{\Delta e}{e}} \quad (1.7)$$

En faisant un développement limité par rapport à Δe , la relation (1.7) devient :

$$\Delta L = - \frac{\mu_0 \cdot N^2 \cdot A}{2 \cdot e^2} \cdot \Delta e \cdot \left[1 - \frac{\Delta e}{e} + \left(\frac{\Delta e}{e} \right)^2 + \dots \right] \quad (1.8)$$

La sensibilité S du capteur peut s'écrire:

$$S = \frac{\Delta L}{\Delta e} = - \frac{\mu_0 \cdot N^2 \cdot A}{2 \cdot e^2} \cdot \left[1 - \frac{\Delta e}{e} + \left(\frac{\Delta e}{e} \right)^2 + \dots \right] \quad (1.9)$$

La sensibilité de ce capteur dépend de la position initiale (e) de l'armature: elle est d'autant plus

élevée que (e) est plus petit; en outre, elle ne peut être considérée comme constante que si le déplacement est très petit par rapport à (e). La sensibilité et la linéarité peuvent être améliorées si l'on associe à l'inductance précédente, un bobinage et un noyau identique placé symétriquement par rapport à l'armature mobile, et dont l'entrefer subit donc des variations opposées (figure 1.5).

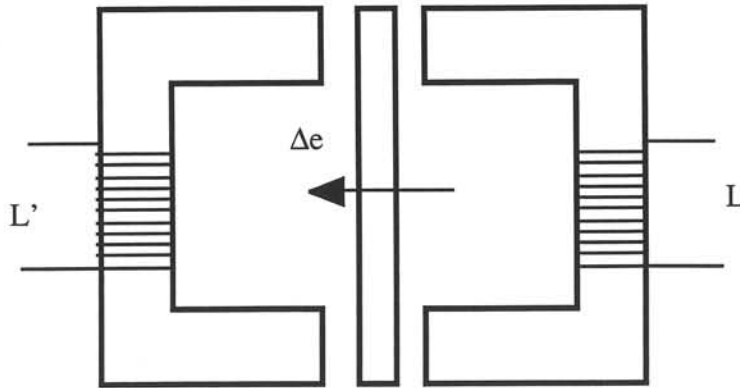


Figure 1.5: Capteur différentiel

Le calcul de la variation de la seconde inductance ($\Delta L'$) se fait de façon identique à la première.

$$\Delta' L = \frac{\mu_0 \cdot N'^2 \cdot A}{2 \cdot e^2} \cdot \Delta e \cdot \left[1 + \frac{\Delta e}{e} + \left(\frac{\Delta e}{e} \right)^2 + \dots \right] \quad (1.10)$$

Par un montage électronique adapté, il est possible d'avoir une tension de sortie du capteur proportionnelle à la différence des inductances. La sensibilité du capteur est donnée par l'expression (1.11).

$$S = \frac{2 \cdot \mu_0 \cdot N^2 \cdot A}{2 \cdot e^2} \cdot \Delta e \cdot \left[1 + \left(\frac{\Delta e}{e} \right)^2 + \dots \right] \quad (1.11)$$

La sensibilité de cette association d'inductance (1.11) est doublée par rapport à celle d'une inductance seule (1.9), mais surtout la non-linéarité est réduite au second ordre par compensation des non-linéarités du premier ordre, et d'ordre impair en général. De plus, la tension de sortie étant proportionnelle à la différence des inductances, ce type de traitement présente l'avantage de donner une réponse directe sans composante continue.

2. Compensation des dérives de la source et des sondes de mesure

Le principe de fonctionnement d'un capteur de position est la modulation d'un signal magnétique par la position relative de deux pièces. Le signal magnétique provient d'un aimant permanent ou d'une bobine alimentée par un courant. Le signal magnétique modulé est converti en un signal électrique par l'intermédiaire d'un transducteur. La mesure est donc fonction du signal porteur,

de la position par la modulation, et des caractéristiques du transducteur. Une variation au cours du temps du signal porteur ou des caractéristiques du transducteur sont source d'erreur de mesure.

Par exemple, dans un capteur à aimant permanent et à sonde de Hall, la polarisation de l'aimant et le facteur d'échelle de la sonde varient en fonction de la température.

Une solution consiste à compenser la dérive en température par une dérive inverse issu d'un composant électronique. Ce type de traitement est complexe de mise en oeuvre, car il nécessite un étalonnage en température.

Une autre approche est de disposer d'une seconde mesure. Le recoupement des deux mesures permet de normaliser les signaux des sondes, et donc de devenir indépendant des caractéristiques des transducteurs, de la valeur de la source magnétiques et de leurs variations au cours du temps.

Par exemple, les expressions (1.12) donnent les réponses des sondes de Hall du capteur Lemarquand (Figure 1.1) [LEMA90].

$$\begin{aligned}V_1 &= K \cdot B_0 \cdot \cos \theta \\V_2 &= K \cdot B_0 \cdot \sin \theta\end{aligned}\quad (1.12)$$

K est le facteur d'échelle des sondes de Hall (les deux sondes sont identiques), B_0 est l'induction maximale dans l'entrefer (directement proportionnelle à l'aimantation de l'aimant permanent), le $(\sin\theta)$ et le $(\cos\theta)$ sont les modulations. L'induction B_0 et le facteur d'échelle varient en fonction de la température. On rend le capteur insensible aux valeurs B_0 et de K (et donc de la température) en normalisant les signaux V_1 et V_2 par le terme $(V_1^2 + V_2^2)$.

Ce type de traitement peut être généralisé pour un capteur donnant une réponse linéaire.

I.3. Les capteurs à circuit magnétique constant

Nous allons présenter les principaux capteurs fonctionnant sur ce principe. Le circuit magnétique est constant quelle que soit la position. Cela signifie que les lignes de flux ont une distribution constante par rapport à la source magnétique. Si le circuit magnétique comprend des pièces ferromagnétiques (ou conductrices pour les capteurs inductifs), celles-ci sont fixes ou leur mouvement ne modifie pas la configuration géométrique par rapport à la source.

I.3.1. Les capteurs inductifs

Tous ces capteurs mesurent la position par la variation du coefficient d'induction mutuelle entre deux bobines. Le capteur se comporte comme un transformateur dont le couplage est variable en fonction de la position. Le primaire est la bobine d'excitation magnétique du capteur et le secondaire la bobine de mesure (bobines monofonctions).

Ce type de capteur est très bien illustré par le potentiomètre inductif [ASCH91]. Il est constitué d'un stator et d'un rotor portant chacun un enroulement (Figure 1.6. Le rotor, lié à l'axe dont on veut traduire la rotation, constitue le primaire. Il est alimenté par un courant sinusoïdal $I_1 \cdot \sin(\omega \cdot t)$. Ce courant crée une induction primaire qui lui est proportionnelle et qui est perpendiculaire au plan des spires primaires. L'enroulement statorique formant le secondaire est traversé par une partie du flux d'induction primaire. Il est le siège d'une f.é.m d'amplitude $E_2 = M(\theta) \cdot \omega \cdot I_1$, où θ est l'angle entre les deux enroulements et $M(\theta)$ le coefficient de mutuelle induction entre l'enroulement primaire et secondaire.

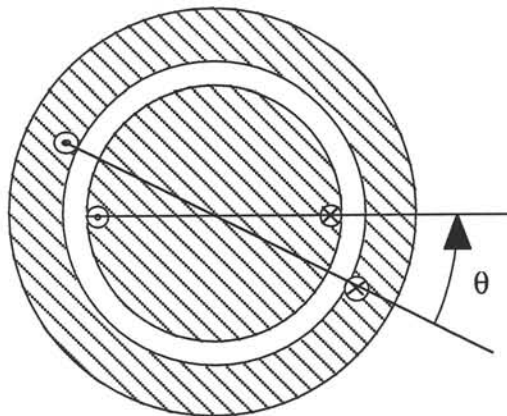


Figure 1.6: Potentiomètre inductif

Le coefficient de mutuelle inductance $M(\theta)$ varie suivant une loi triangulaire en fonction de la position. Il est maximal lorsque les bobines primaire et secondaire sont parallèles. Par contre, lorsque les deux bobines sont en quadrature, la mutuelle inductance est nulle. L'utilisation d'une deuxième bobine de mesure, placée en quadrature avec la première, permet de faire une mesure de la position sur un tour complet.

Ce type de capteur est directement inspiré des machines synchrones, le primaire étant l'inducteur et le secondaire l'induit. De nombreuses variantes possibles peuvent être directement inspirées des différentes structures de machine synchrone. Ainsi, avec une disposition sinusoïdale des conducteurs primaires et secondaires dans l'entrefer, l'amplitude de la f.é.m de la bobine secondaire varie de façon sinusoïdale en fonction de la position. Il est possible d'envisager d'autres variantes avec des pôles saillants au rotor.

Avec une répartition sinusoïdale des conducteurs, des pôles statoriques et rotoriques lisses, ce capteur est connu sous le nom de resolver.

En raison de son principe de fonctionnement, ce type de capteur utilise une bobine d'excitation mobile. Celle-ci est alimentée par l'intermédiaire d'un transformateur tournant. Toutefois, il est possible de ramener la bobine d'excitation au stator, suivant le même principe qu'un moteur synchrone à griffes. On arrive à des structures de type homopolaire (structure 3D) [MEHN94].

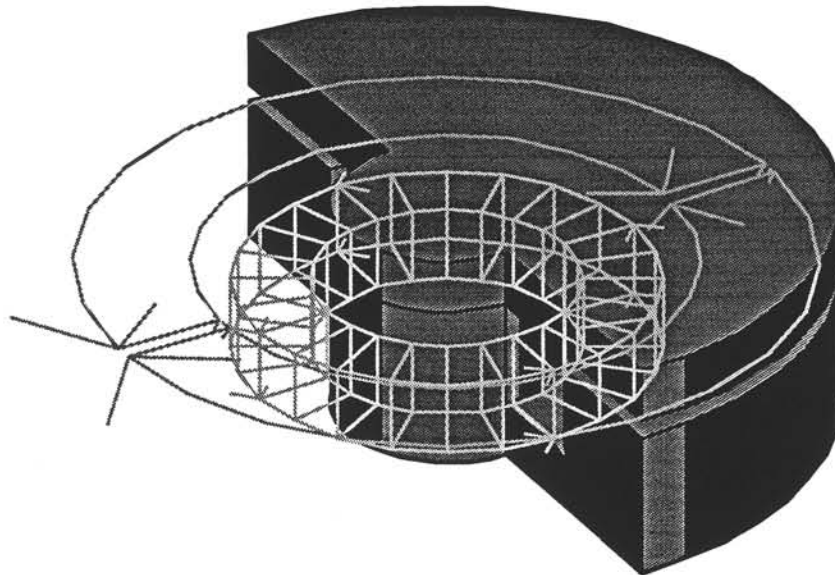


Figure 1.7: Capteur à bobines fixes [MEHN94]

Le stator est constitué d'une bobine d'excitation centrale et de deux bobines de mesures (mesure différentielle). Le rotor comprend un ensemble de pièces ferromagnétiques et non-conductrices (ferrite), définissant un entrefer. La bobine centrale, alimentée avec un courant alternatif d'amplitude constante, impose un flux magnétique d'amplitude constante dans l'entrefer. Les deux bobines mesurent chacune un flux proportionnel à leur surface comprise dans l'entrefer, donc de leur position. Dans ce capteur, il n'y a pas de mouvement relatif entre les différentes bobines. Le mouvement est un mouvement relatif entre la pièce ferromagnétique et les bobines. Ceci permet de pas avoir besoin d'un transformateur tournant pour son alimentation.

I.3.2. Les capteurs à aimants permanents

Il existe plusieurs capteurs à aimants permanents fonctionnant sur ce principe. Le principe de base est la mesure d'une direction de l'induction magnétique par un ou plusieurs transducteurs magnétiques (généralement des sondes de Hall). Nous illustrons le principe de base de ce type de capteur à l'aide du capteur proposé par V. Lemarquand [LEMA90], dont la géométrie est rappelée en figure 1.1.

Crouzet (congrès Ademis) ou Philips proposent des magnétomètres spécialement conçus pour des structures de capteurs similaires. Le fabricant japonais Nipondenso commercialise un capteur sur ce principe pour des applications automobiles.

Le point commun de tous ces capteurs est l'utilisation de deux transducteurs décalés pour deux mesures. Les deux mesures permettent d'avoir une plage de mesure supérieure à 90 degrés et par le traitement des signaux à éliminer l'influence de la polarisation de l'aimant permanent, ou des dérives des sondes de Hall en température.

Généralement, ce type de capteur a naturellement une réponse sinusoïdale. Le capteur peut être linéarisé par l'électronique de traitement des signaux des sondes de Hall. Une autre solution consiste à optimiser la forme de l'aimant permanent pour linéariser le capteur [LEMA90]. Sur ce principe, Lemarquand propose un capteur dont l'aimant permanent a une section non circulaire linéaire sur une plage de mesure de 90 degrés (Figure 1.8). L'optimisation de l'aimant permanent a été obtenue à l'aide d'une modélisation du capteur par la méthode des éléments finis. L'utilisation de deux sondes en quadrature permet de faire la mesure sur un tour complet, mais ne permet pas de compenser les variations de la polarisation de l'aimant et le facteur d'échelle des sondes. Ce capteur est donc sensible à la température.

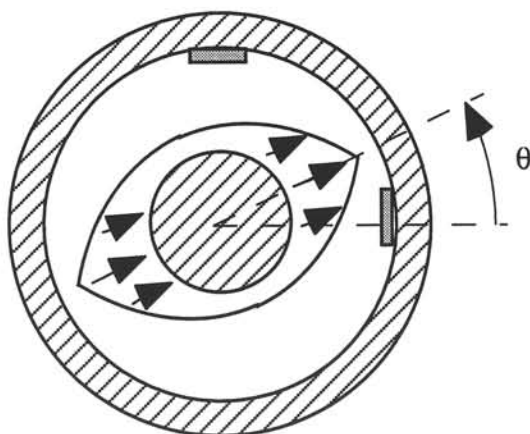


Figure 1.8 : Capteur Lemarquand à réponse linéaire [LEMA90]

Le constructeur MIDORI commercialise un capteur utilisant un principe de mesure original. Il utilise deux magnéto-résistances et fonctionne en diviseur de tension. Le schéma de principe et la réponse de ce type de capteur sont donnés en figure 1.9.

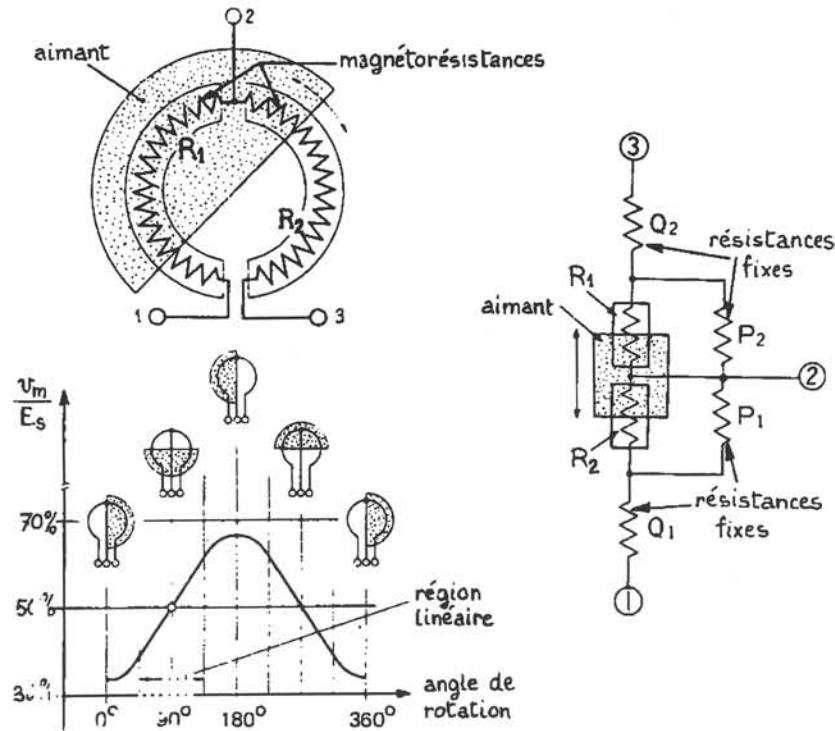


Figure 1.9 : Capteur MIDORI [ASCH91]

Il est constitué de deux magnéto-résistances R_1 et R_2 montées en série. Un aimant permanent, solidaire de l'axe de rotation, crée une induction magnétique dans une zone recouvrant une fraction des résistances R_1 et R_2 variable avec la position. L'induction magnétique provoque un accroissement important de la résistivité des parties R_1 et R_2 qui y sont soumises. La tension de sortie du capteur est directement proportionnelle à la position de l'aimant permanent et de la tension d'alimentation. Ce capteur a la particularité de donner une réponse linéaire avec des transducteurs non-linéaires avec l'induction magnétique.

A l'exception du dernier capteur présenté [ASCH91], tous ces capteurs ont, par leur principe de fonctionnement, une réponse naturellement sinusoïdale. Ils peuvent fonctionner sans déplacement relatif de pièces ferromagnétiques : ils sont donc peu sensibles à un éventuel jeu mécanique entre le rotor et le stator.

I.3.3. Discussion

Les capteurs inductifs à circuit magnétique constant ont une réponse naturellement linéaire. Par contre, la plupart utilisent comme source magnétique une bobine mobile au rotor. Leur alimentation nécessite donc un transformateur tournant, ce qui rend ce type de réalisation peu envisageable pour un capteur de faible coût. Toutefois, il existe des structures homopolaires permettant de ne pas utiliser de transformateur [MEHN94].

Les capteurs à aimants sont caractérisés par un grand entrefer magnétique (épaisseur de l'aimant permanent), ils sont donc peu sensibles aux défauts d'assemblage. A l'exception du capteur MIDORI [ASCH91], ils ont une réponse naturellement sinusoïdale en fonction de la position. L'utilisation de deux transducteurs permet de faire la mesure sans ambiguïté sur un tour complet, de compenser les dérives des sondes de Hall et de l'aimant permanent (dérive en température). Ces capteurs peuvent être linéarisés par l'optimisation de la forme d'un des éléments du circuit magnétique [LEMA90]. Dans ce cas, il n'est plus possible de compenser les dérive de l'aimant et des sondes, le capteur est alors sensible à la température.

I.4. Les capteurs avec un circuit magnétique variable

Ce sont les capteurs où la répartition des lignes de flux varie en fonction de la position. Un élément du circuit magnétique se déforme en fonction de la position.

I.4.1. Les capteurs inductifs

Le déplacement provoque une déformation du circuit magnétique du capteur. Les lignes d'induction, engendrées par une bobine source, sont modifiées en fonction de la position. La mesure de position peut être faite de deux façons différentes.

La première consiste à mesurer la variation du coefficient d'auto-induction d'une ou plusieurs bobines. Dans ce cas, le capteur utilise des bobines bifonctions : elles sont à la fois bobine d'excitation du circuit magnétique (source magnétique), et bobine de mesure. Ce sont les capteurs à inductances variables.

La deuxième méthode est identique à la mesure d'un capteur inductif à circuit magnétique constant. Le capteur utilise alors des bobines monofonctions. La fonction excitation (source magnétique) et la fonction mesure sont assurées par des bobines différentes. Ce type de capteur se comporte comme un transformateur dont la mutuelle inductance entre le primaire et le secondaire est variable. Les bobines primaire et secondaire sont respectivement les bobines d'excitation et de mesure du capteur.

Il est donc possible de classer les capteurs inductifs en capteurs à bobines monofonctions ou à bobines bifonctions. En réalité, les capteurs à bobines bifonctions sont des cas particuliers des capteurs à bobines monofonctions. En effet, tous les capteurs à bobines bifonctions peuvent être transformés en capteurs à bobines monofonctions en dissociant la bobine en deux bobines fortement couplées. Nous allons présenter les différents capteurs de façon indépendante de la

nature des bobines utilisées.

La variation du circuit magnétique peut être obtenue de différentes façons. La première consiste à déformer un élément du circuit magnétique. Sur ce principe, des capteurs fonctionnent sur la déformation de la forme de la bobine [HAUB87] [KNET86]. Ce type de capteurs présente une faible sensibilité et une mauvaise linéarité.

Une autre approche est de faire varier la surface d'un entrefer. Cette variation de surface d'entrefer entraîne une variation linéaire de la perméance du circuit magnétique et donc de l'inductance. Ceci peut être obtenu par le déplacement d'une pièce ferromagnétique et/ou conductrice. Il existe de nombreux capteurs sur ce principe : [FIOR88] [FIOR89] [DOBL91] [DOBL92].

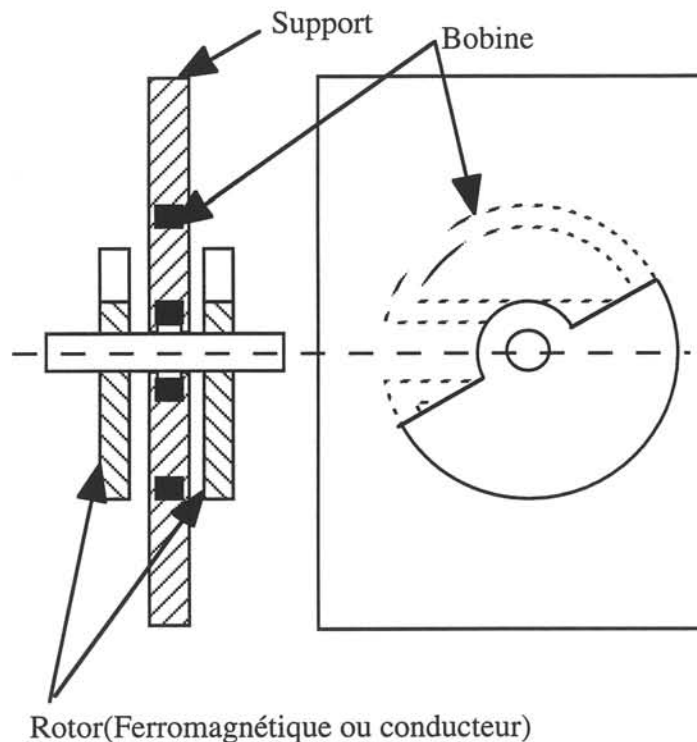


Figure 1.10: capteur à bobines planes(structure différentielle)

Il s'agit d'un capteur à inductances variables (deux pour une mesure différentielle). Il est constitué de deux bobines planes en forme d'arc. Le rotor comprend une ou deux pièces ferromagnétiques ou conductrices. Le mouvement de rotor fait que les pièces rotoriques recouvrent plus ou moins les bobines statoriques, et fait varier leur inductance. Pour des pièces polaires en matériau ferromagnétique non conducteur (ferrite par exemple), l'inductance est maximale lorsque les pièces polaires recouvrent la bobine. Inversement, pour des pièces polaires

en matériau conducteur (blindage), l'inductance est minimale lorsque les pièces recouvrent la bobine.

Ce type de capteur présente comme principal avantage sa simplicité de réalisation. Toutefois ses caractéristiques métrologiques peuvent être améliorées. Pour obtenir une meilleure linéarité et rendre le capteur insensible à son environnement magnétique, il est nécessaire de réduire les fuites magnétiques en canalisant au mieux le flux. Pour augmenter la sensibilité, il faut réduire l'épaisseur de l'entrefer et augmenter le nombre de spires des bobines. Ces améliorations peuvent être faites en utilisant une pièce ferromagnétique au stator. Les bobines ne sont plus alors directement dans l'entrefer, mais bobinées autour de pôles statoriques. Nous pouvons illustrer ce type de capteur à l'aide du capteur breveté par Rohrbach [ROHR91] (Figure 1.11).

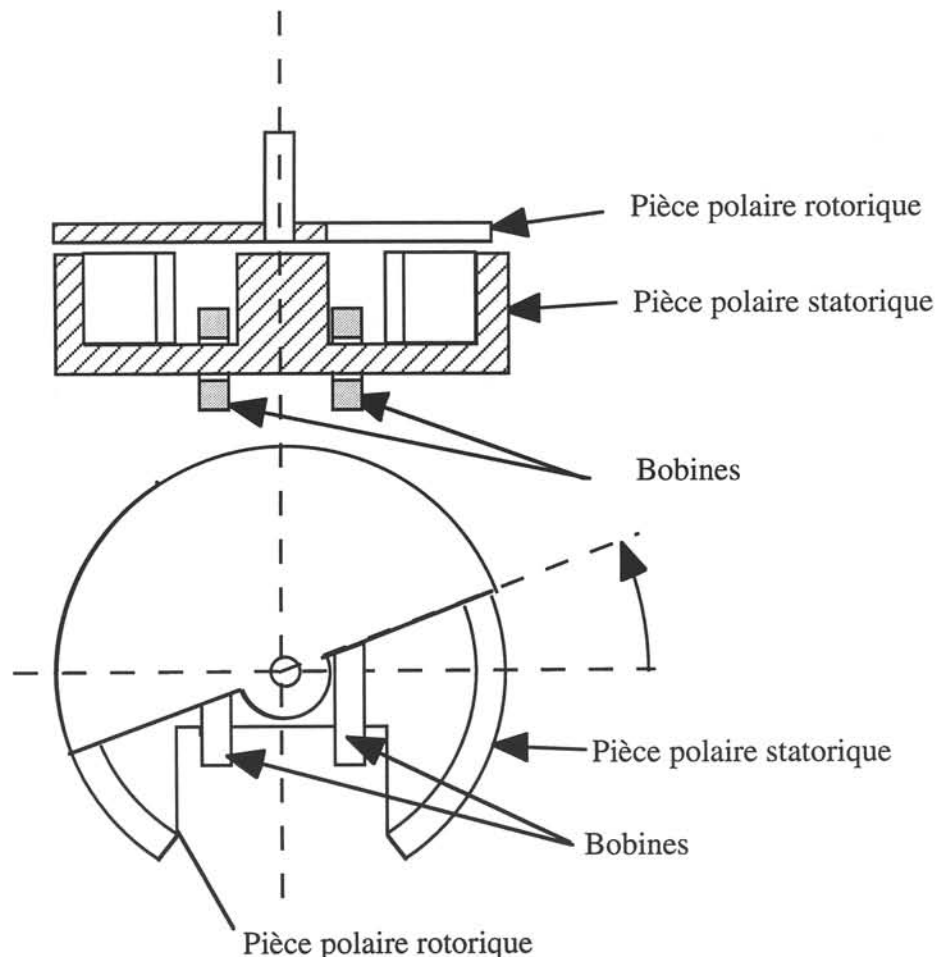


Figure 1.11: Capteur à entrefers fins [ROHR91]

Les inductances des deux bobines varient de façon linéaire proportionnellement aux surfaces en regard des pôles statoriques et rotoriques (figure 1.11). La possibilité d'avoir des bobines ayant un grand nombre de spires et une faible épaisseur d'entrefer, font que ce capteur a une bonne sensibilité. La faible épaisseur de l'entrefer permet aussi d'avoir un faible niveau de fuite, ce qui

dans le cas idéal, permet d'avoir une réponse linéaire et peu sensible à l'environnement magnétique. En revanche, par le principe même de son fonctionnement, ce capteur est sensible aux variations d'épaisseurs des entrefers, et donc à un jeu axial du rotor.

Ce type de problème peut être compensé par deux méthodes. La première est d'adopter une structure "mécanique différentielle". Dans ce type de structure, toute variation indésirable de l'épaisseur d'un entrefer est compensée par la variation d'un entrefer complémentaire (Figure 1.12).

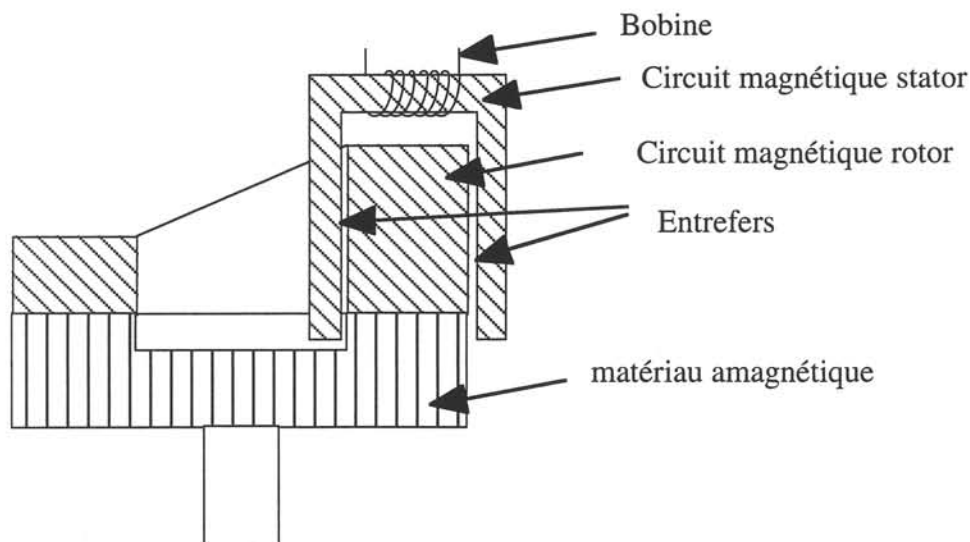


Figure 1.12: Capteur avec une structure "mécanique différentielle" [LEMA92]

Une autre approche consiste à faire varier la surface de l'entrefer sans déplacement de pièce ferromagnétique. La variation de surface, en fonction de la position, est alors faite par insertion d'une plaque conductrice entre deux surfaces polaires statoriques en regard. Des courants de Foucault se développent dans la surface de la plaque, ils s'opposent au passage du flux entre les deux pièces statoriques. L'inductance de la bobine est directement proportionnelle à la surface des pôles laissée libre par la plaque conductrice. Nous illustrons ce principe par le capteur [OLSE75] (Figure 1.13).

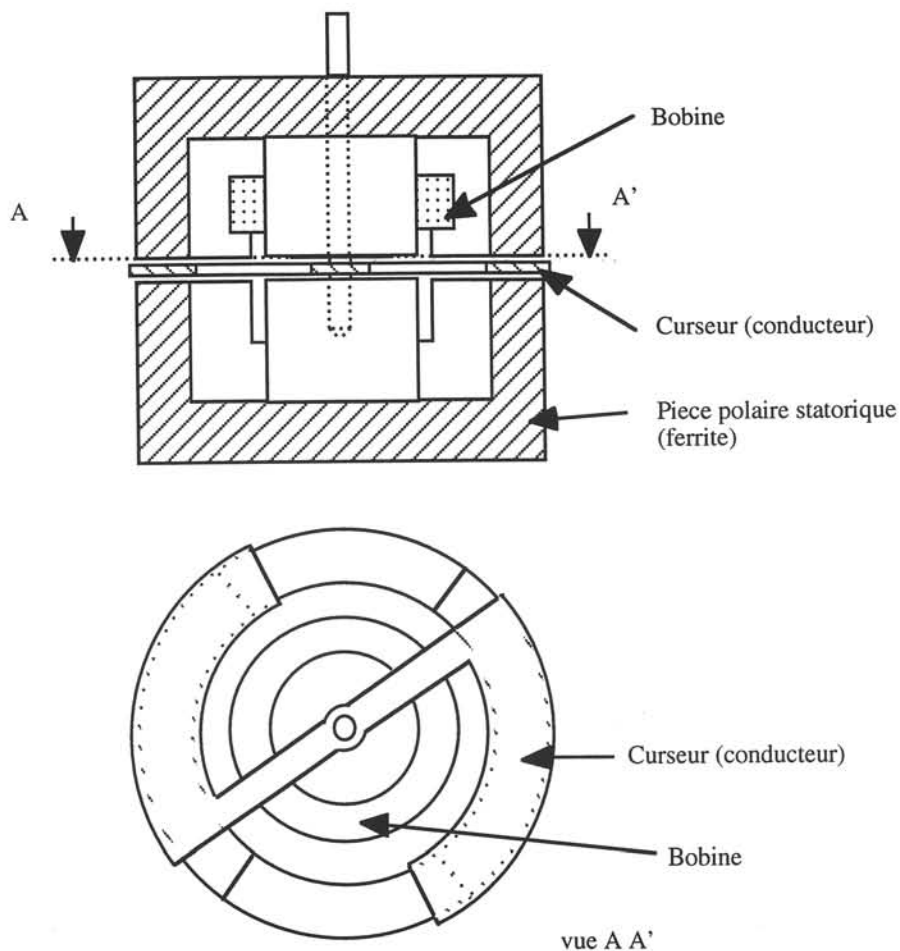


Figure 1.13: Capteur à réluctance variable par le déplacement d'un blindage [OLSE75]

Tous ces capteurs fonctionnent sur le principe de la réluctance variable. Pour obtenir une réponse linéaire en fonction de la position, le déplacement fait varier linéairement la surface d'un entrefer magnétique. L'utilisation d'un entrefer fin (pièces ferromagnétiques au stator et au rotor) permet d'avoir un capteur ayant une grande sensibilité au mesurande, une faible dépendance à l'environnement magnétique externe (présence de pièces ferromagnétique externe au capteur) et une bonne linéarité. De plus, en faisant le choix d'une structure de type "différentielle mécanique" ou à rotor conducteur, il est possible de réaliser capteur peu sensible au jeu axial du rotor par rapport au stator.

I.4.2. Les capteurs à aimants permanents

Nous ne connaissons qu'un seul capteur à aimants permanents et à circuit magnétique variable. Il s'agit du capteur breveté par Oudet avec la société MMT de Besançon [OUDE90]. Son principe de fonctionnement est illustré par la figure suivante.

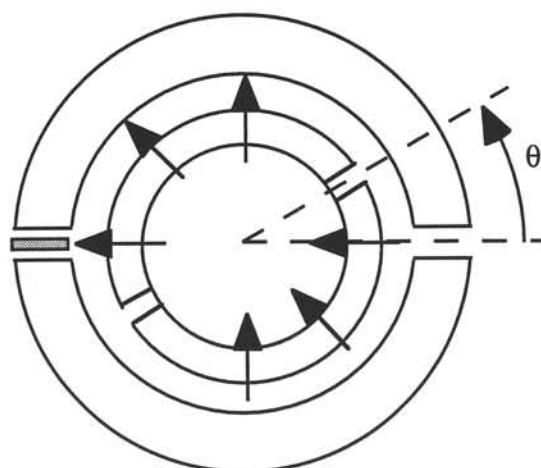


Figure 1.14 : Capteur à circuit magnétique variable et à aimants permanents [OUDE90]

Il est constitué de trois pièces polaires ferromagnétiques définissant entre elle un entrefer dans lequel peuvent se déplacer deux aimants permanents. Les aimantations sont radiales et de sens alternées. Les deux pièces ferromagnétiques externes définissent deux entrefers secondaires radiaux. Le flux traversant ces deux entrefers secondaires ont une forme triangulaire suivant la position θ des aimants permanents. Une mesure de l'induction est faite dans l'un des entrefers secondaires à l'aide d'une sonde de Hall. Quand les transitions entre les aimants sont perpendiculaires aux entrefers radiaux, les flux traversant les entrefers radiaux sont nuls. Inversement, lorsque les transitions entre les aimants sont alignées avec les entrefers radiaux, les flux traversant les entrefers radiaux sont maximaux.

Dans son brevet, Oudet présente différentes variantes de réalisations de capteurs angulaires (entrefer principal radial ou axial) ou linéaire fonctionnant sur ce principe. Ce type de capteur présente l'avantage d'avoir une réponse parfaitement linéaire sur une plage de mesure importante (180 degrés). Par sa méthode de mesure (une seule sonde), il présente le désavantage d'avoir une réponse sensible à la valeur de l'induction de l'aimant permanent et au facteur d'échelle de la sonde de Hall (et donc de la température). De ce fait, ce capteur est sensible aux variations de température.

I.4.3. Discussion

Les capteurs inductifs à circuit magnétique variable fonctionnent sur le principe de la variation de réluctance. Le nombre de réalisations de ce type de capteur est très important. Certaines réalisations ont des caractéristiques particulièrement intéressantes: réponse linéaire, peu sensible à l'environnement magnétique (entrefer fin), peu sensible au jeu mécanique ou au défaut d'alignement entre le rotor et le stator (structure différentielle magnétique, variation de réluctance

par déplacement d'une pièce conductrice)...

Ces bonnes caractéristiques ont été obtenues grâce à une bonne canalisation du flux magnétique alternatif dans le capteur. La canalisation du flux est faite par des pièces en ferrite, ce qui limite par les contraintes de réalisation les formes possibles des pièces.

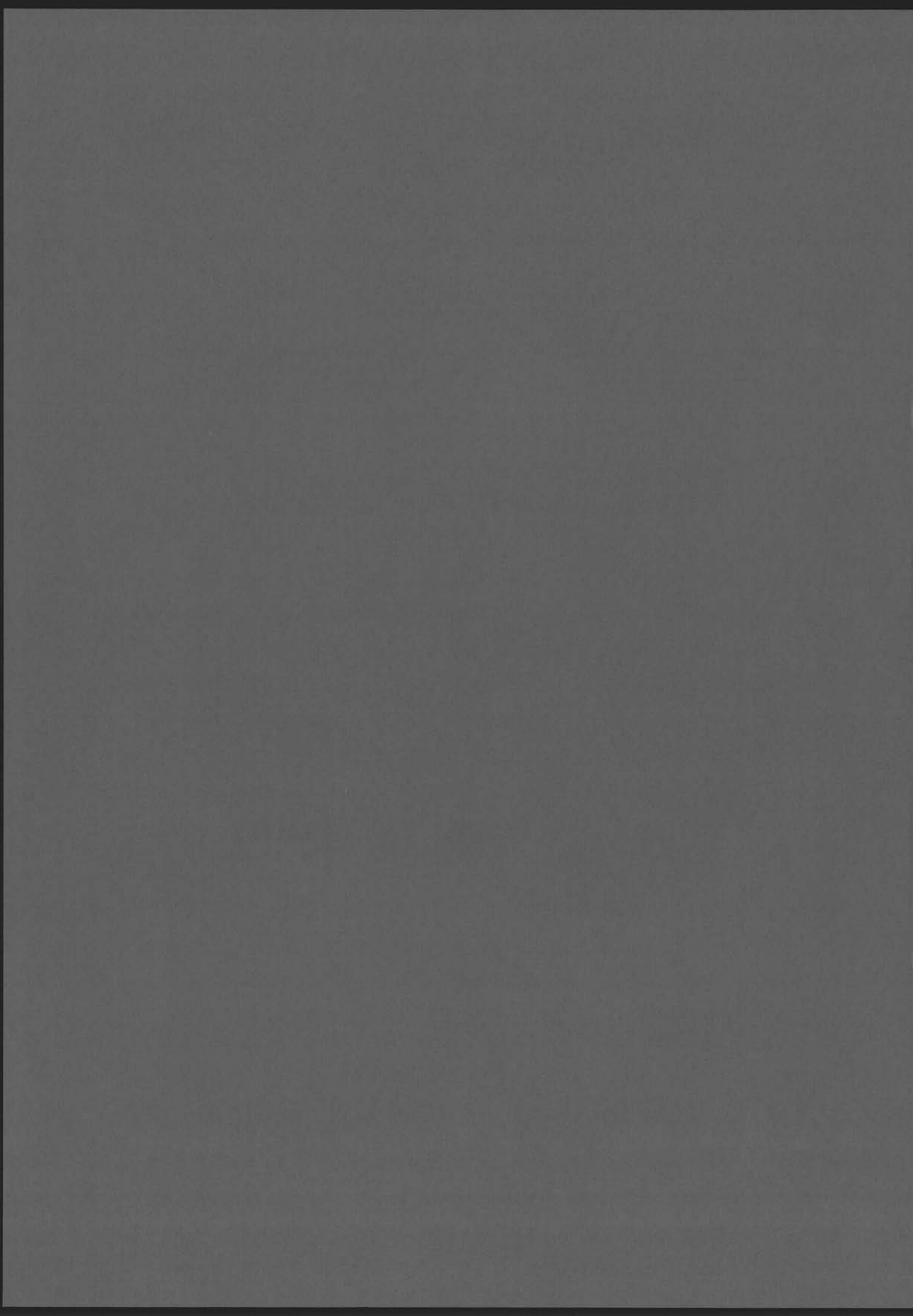
Pour les capteurs à aimants permanents et à circuit magnétique variable, nous ne connaissons que les réalisations d'Oudet [OUDE90]. Elles ont des caractéristiques intéressantes (réponse naturellement linéaire). Par contre, ces capteurs ne font qu'une mesure d'induction : il n'est donc pas possible de compenser les dérives de la sonde de mesure et de l'aimant. Ils sont donc sensibles aux variations de température. Le flux magnétique n'étant que lentement variable (avec la position), les pièces polaires peuvent être réalisées en matériau classique (Fer, Fer-Nickel). De ce fait, on dispose d'une grande liberté pour les formes des pièces polaires, la recherche de structure de capteur ayant un comportement 3D est tout à fait envisageable.

I.5. Conclusion

Nous avons classé les capteurs magnétiques en fonction de la nature du circuit magnétique (circuit magnétique constant et circuit magnétique variable) et de la nature de la source magnétique (capteur inductif et capteur à aimant permanent). A partir de cette classification, il est possible de déterminer le domaine d'étude d'autres capteurs de position.

Nous écartons en pratique tous les capteurs inductifs, car le nombre de réalisations ayant des caractéristiques intéressantes est déjà très important. C'est un domaine où il est difficile de trouver des systèmes présentant des améliorations par rapport à ce qui existe. Pour les capteurs à aimants permanents, nous retenons les structures ayant une réponse naturellement linéaire. Nous avons donc exclu les capteurs à circuit magnétique constant, car ils ont une réponse naturellement sinusoïdale. Il nous reste alors seulement les capteurs à circuit magnétique variable et à aimants permanents. Ce type de capteur a potentiellement des caractéristiques intéressantes (réponse naturellement linéaire) comme le montrent les capteurs d'Oudet [OUDE90]. De plus, les capteurs existants de cette famille peuvent être a priori améliorés vis-à-vis de la sensibilité à la température.





II.1. Introduction

Au chapitre précédent, nous avons fait le choix d'une famille de capteurs pour notre étude: les capteurs à aimants permanents et à circuit magnétique variable. Ce choix a été motivé pour plusieurs raisons. Tout d'abord, il est possible d'avoir une réponse naturellement linéaire en fonction de la position comme le montrent les capteurs existants. En second lieu, les réalisations existantes sont peu nombreuses, et peuvent être améliorées. En effets, les capteurs existants sont sensibles aux variations de température.

L'objectif est de faire une étude systématique dans cette famille. Pour cela, nous allons définir dans la première partie de ce chapitre les règles à respecter pour obtenir un capteur linéaire et peu sensible aux défauts de réalisation.

Puis dans une deuxième partie, en respectant les règles précédemment décrites, nous allons faire une synthèse systématique des structures possibles. Cette étude systématique se fera à partir des formes et des aimantations possibles des aimants permanents. Les structures des pièces polaires seront déduites dans un deuxième temps. Cette étude nous permettra de retrouver les capteurs existants (les capteurs Oudet), mais aussi de proposer de nouveaux capteurs.

II.2. Spécification

Tous ces capteurs utilisent au moins un aimant permanent et au moins une pièce ferromagnétique. Le flux des aimants est collecté par les différentes pièces polaires, puis canalisé vers des entrefers de mesure. Le déplacement relatif d'éléments du circuit magnétique par rapport à d'autres modifie la répartition des lignes d'induction dans le capteur. Des sondes de Hall mesurent la variation de l'induction dans des entrefers de mesure. Nous limiterons notre étude aux configurations permettant d'obtenir une réponse linéaire en fonction de la position.

Nous allons présenter différentes notions en les illustrant avec des exemples de capteurs de position pour un déplacement linéaire. Ces contraintes restent valables pour des capteurs de position angulaire.

II.2.1. Entrefer variable ou glissant

La variation de l'induction dans l'entrefer de mesure est obtenue par le déplacement relatif de l'aimant permanent et d'une pièce ferromagnétique. Ce mouvement peut se faire de deux façons différentes :

- par variation relative de l'épaisseur de l'entrefer par rapport à celle de l'aimant permanent.
- par variation de la surface en regard de l'aimant permanent avec celle de l'entrefer.

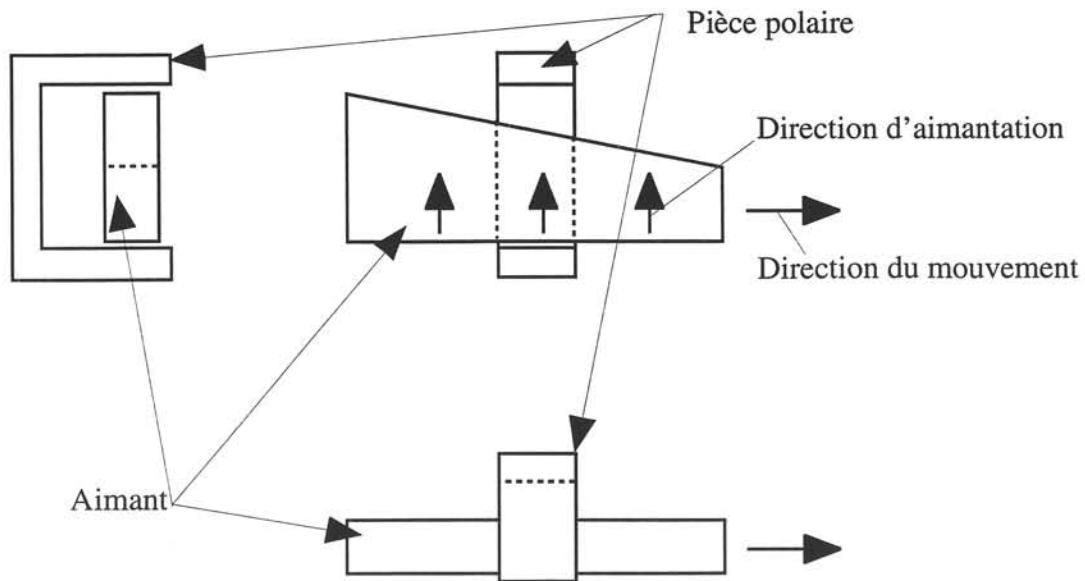
Nous allons étudier ces deux configurations de capteur.

1. Variation relative des épaisseurs (Entrefer magnétique variable)

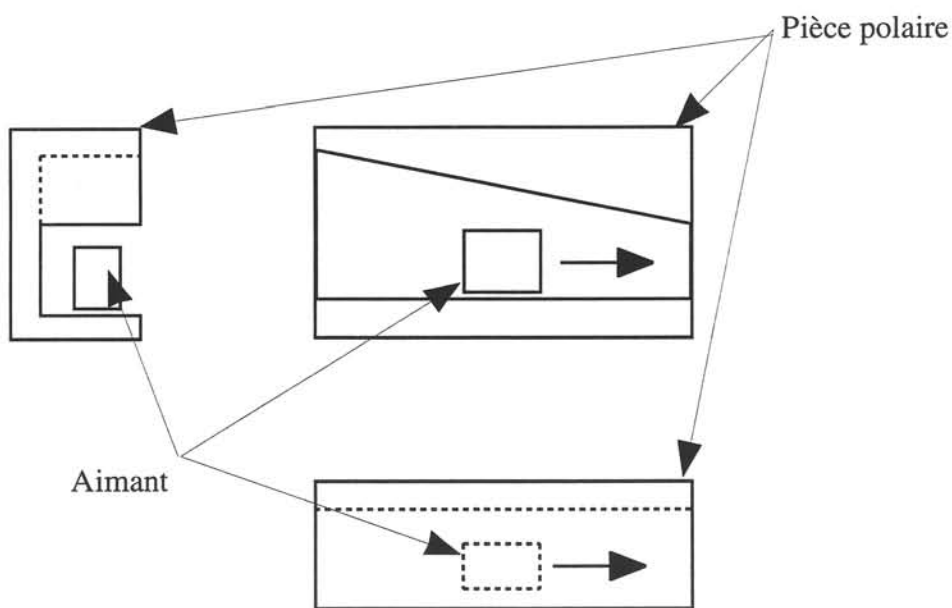
Nous illustrons ce principe de capteur à l'aide des deux capteurs décrits en figure 2.1. Dans ce type de capteur, le déplacement fait varier la hauteur relative de l'aimant permanent par rapport à celle de l'entrefer. Cette variation relative peut être obtenue de deux façons.

La première consiste à utiliser un aimant permanent dont la hauteur (distance entre les surfaces polaires) n'est pas constante suivant la direction du déplacement (Figure 2.1-a1). Les pièces polaires ferromagnétiques vont collecter un flux, fonction de la hauteur de l'aimant permanent comprise dans l'entrefer, donc de la position. Puis, elles canalisent le flux vers un entrefer de mesure (non représenté sur la figure). Un transducteur dans l'entrefer de mesure (généralement une sonde de Hall) mesure le flux collecté.

La seconde réalisation utilise un ensemble de pièces polaires définissant un entrefer dont l'épaisseur varie suivant la direction du déplacement (figure 2.1-a2). Dans cet entrefer, un aimant permanent se déplace. Les pièces polaires vont collecter un flux en fonction de la hauteur d'entrefer, et donc de la position. Comme pour le capteur précédant, le flux est canalisé par les pièces polaires jusqu'à des entrefers de mesure.



a1: Capteur à hauteur d'aimant variable



a2: Capteur à hauteur d'entrefer variable

Figure 2.1: Capteurs à variation relative de la hauteur d'entrefer

Pour ces deux capteurs, on peut considérer que les surfaces polaires de l'aimant permanent en regard avec la pièce polaire sont constantes. Pour le premier capteur, la hauteur d'entrefer est constante et la hauteur d'aimant variable. Par contre pour le second, la hauteur d'entrefer est variable et la hauteur d'aimant constante. Dans ces deux cas, il y a bien une variation relative de l'épaisseur de l'aimant permanent par rapport à celle de l'entrefer en fonction de la position.

L'étude de ces deux capteurs peut être faite sur une section (Figure 2.2).

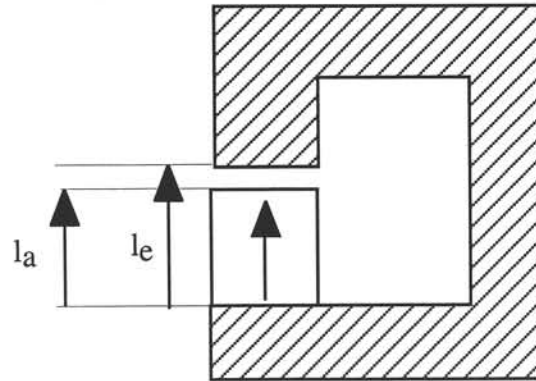


Figure 2.2 : Principe de la variation d'entrefer

Dans les deux cas, il est possible de calculer l'induction dans l'aimant en supposant les fuites nulles et une polarisation J de l'aimant permanent constante.

$$B = J \cdot \frac{l_a}{l_e} \quad (2.1)$$

Le flux dans le circuit magnétique est directement proportionnel à cette induction. Il peut être mesuré par une sonde de Hall dans le circuit magnétique.

Pour une variation de la hauteur de l'aimant permanent, il est théoriquement possible d'obtenir une réponse linéaire de l'induction. Toutefois, ce type de capteur appelle quelques commentaires. Les fuites magnétiques vont augmenter quand l'entrefer deviendra relativement plus important par rapport à la hauteur de l'aimant permanent : Ceci va être une source importante de non-linéarité. Par conséquent, ce type de mouvement est difficilement utilisable pour obtenir une réponse linéaire.

2. La variation de la surface polaire

Dans cette configuration les hauteurs d'aimants et d'entrefer restent constantes. On fait varier seulement la surface de recouvrement entre l'aimant permanent et les pièces polaires ferromagnétiques avec la position (Figure 2.3).

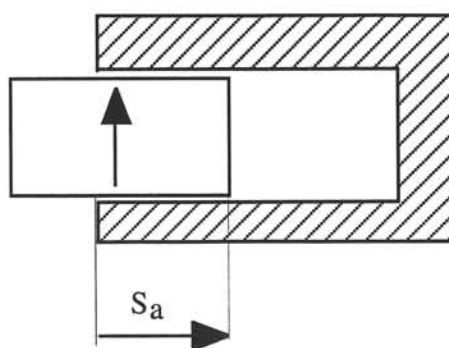


Figure 2.3: Principe de l'entrefer glissant

Dans cette configuration, la pièce polaire va collecter le flux de la partie de l'aimant permanent comprise entre les pôles. La partie droite de l'aimant permanent est magnétiquement "court-circuitée" par la pièce polaire. Alors, l'induction dans la partie droite de l'aimant est égale à la polarisation de l'aimant et indépendante de la position de l'aimant. Le flux se refermant dans les pièces polaires est alors directement proportionnel à la surface de l'aimant recouverte par les pièces polaires.

Pour la partie droite de l'aimant, la pièce polaire étant pratiquement en contact avec l'aimant, les fuites magnétiques sont faibles. Pour la partie gauche de l'aimant permanent, le flux de l'aimant permanent devant se refermer par l'air, risque de perturber la mesure. Pour éviter ce problème, il suffit de canaliser ce deuxième flux par une pièce polaire symétrique à la première (Figure 2.4).

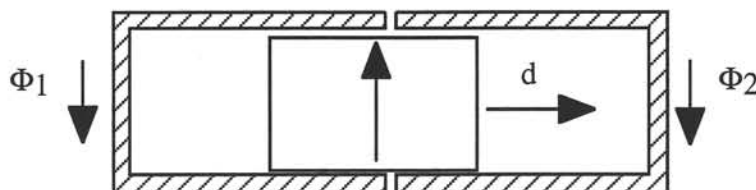


Figure 2.4 : Principe de "l'aiguillage de flux"

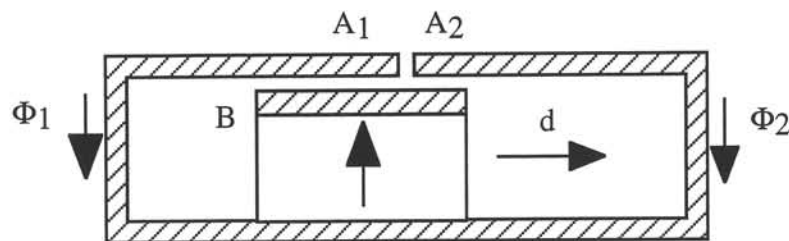
Le flux de l'aimant permanent se partage alors entre les deux circuits magnétiques parallèles en fonction de la position. Les flux Φ_1 et Φ_2 varient linéairement avec la position latérale de l'aimant d . Ils peuvent être mesurés par des sondes de Hall dans deux entrefers. Aucune transformation ou correction du signal de sortie n'est nécessaire pour obtenir une réponse linéaire en fonction de la position.

On obtient un "aiguillage du flux" et le système fonctionne globalement à flux constant. Ce résultat peut être interprété d'une autre façon. Les aimants permanents sont des sources de flux. Faire varier ce flux est difficile; il est préférable de travailler à flux constant et de partager ce flux en deux dans deux

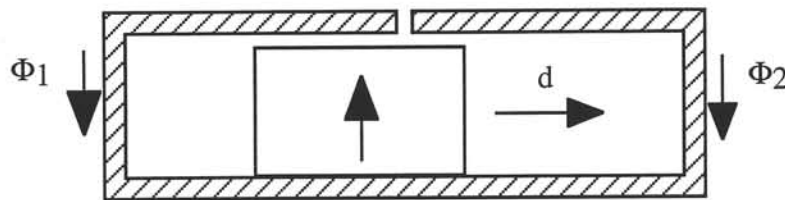
circuits parallèles. Ce principe "d'aiguillage de flux" est utilisé notamment par Oudet dans ses capteurs.

II.2.2. Avec ou sans pièces polaires sur l'aimant

Au niveau des entrefers variables, on peut utiliser une pièce polaire de part et d'autre de l'entrefer glissant, ou bien mettre directement l'aimant dans l'entrefer (figure 2.5).



a1 : Aimant avec pièce polaire dans l'entrefer



a2 : Aimant sans pièce polaire

Figure 2.5 : Nature de l'entrefer actif

Dans ces deux configurations de capteur, le flux de l'aimant permanent va se partager en deux flux Φ_1 et Φ_2 dans les deux circuits magnétiques parallèles. Même si les structures de ces deux capteurs sont très proches, leurs principes de fonctionnement sont très différents.

1. Aimant avec pièce polaire

La pièce polaire liée à l'aimant permanent (pièce B) et la pièce polaire statorique sont des équipotentielles magnétiques. Le flux de l'aimant permanent va se répartir entre les deux pièces polaires (1 et 2) au prorata des perméances d'entrefer (P_1 et P_2) des deux circuits magnétiques parallèles (Figure 2.5-a1).

En considérant les pièces polaires parfaitement parallèles et les effets d'extrémité négligeables (bords des pièces polaires), il est possible de calculer les perméances des deux entrefers en fonctions des surfaces en regard (A_1 et A_2) et des hauteurs des entrefers (E_1 et E_2). Les différentes grandeurs sont définies à l'aide la figure 2.6.

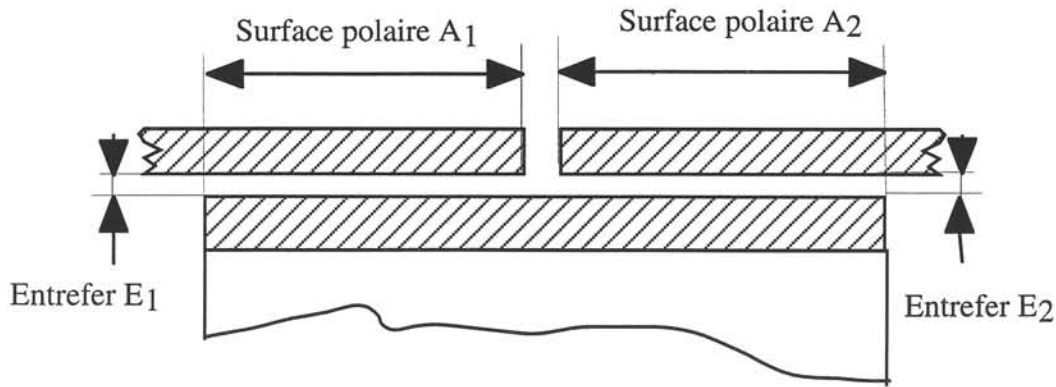


Figure 2.6: Entrefer glissant avec pièces polaires de part et d'autre de l'entrefer

Les perméances sont alors :

$$P_1 = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{A_1}{E_1} \quad P_2 = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{A_2}{E_2} \quad (2.2)$$

Si l'entrefer glissant est bien constant ($E_1=E_2$), la somme des perméances est alors constante quelle que soit la position de la partie mobile: la perméance de charge de l'aimant permanent reste constante. Dans ce cas l'aimant fonctionne à flux constant, les flux Φ_1 et Φ_2 varient linéairement avec la position "d" du capteur.

Par contre, lorsque pour des raisons pratiques, les deux entrefers ne sont pas parfaitement identiques ($E_1 \neq E_2$), la somme des perméances varie avec la position et le partage du flux n'est plus proportionnel aux surfaces A_1 et A_2 .

Dit autrement, ce capteur est un capteur à réluctances variables (déplacement relatif de pièces ferromagnétiques). Ce capteur présente des caractéristiques similaires à celles d'un capteur inductif à réluctances variables. Ainsi, de part son principe, il est sensible à toutes les variations parasites des réluctances (tolérance d'assemblage, jeux mécaniques).

Il a pour avantage une réponse naturellement linéaire et la possibilité d'avoir une mesure différentielle relative (différence de deux signaux divisée par la somme). En revanche, par son principe de fonctionnement, une petite variation de la valeur des entrefers (dans les entrefers de travail ou dans le reste du circuit magnétique) va entraîner une variation de la répartition du flux dans les deux circuits magnétiques parallèles. Ce type de capteur est très sensible aux défauts géométriques de réalisation ou à d'éventuels jeux mécaniques.

2. Aimant sans pièce polaire

Dans le cas où l'aimant est directement dans l'entrefer (2.5-a2), les surfaces polaires de l'aimant sont des distributions uniformes de source magnétique. Le partage du flux se fera proportionnellement aux surfaces A_1 et A_2 , et de façon beaucoup moins sensible aux valeurs des entrefers que pour le cas du capteur à réluctances variables. Dans ce type de capteur, les réluctances des deux circuits magnétiques restent constantes (pas de déplacement de pièce ferromagnétique), et sont chacune soumises à une source de flux variant avec la position.

Le premier capteur (2.5-a1) utilise une source de flux constante (l'aimant permanent) alimentant deux circuits magnétiques à réluctance variable en fonction de la position (la réluctance totale est constante). Le deuxième capteur (2.5-a2) est constitué de deux circuits magnétiques constants alimentés par deux sources de flux variables en fonction de la position (la source de flux total est constante : l'aimant permanent).

Ces deux configurations de capteur fonctionnent. Mais, l'utilisation d'un aimant permanent avec des pièces polaires dans l'entrefer actif n'apporte aucune amélioration par rapport à un capteur bobiné. De plus ce type de capteur nécessite l'utilisation de capteur d'induction continu, (sonde de Hall par exemple) plus complexe de mise en oeuvre qu'une simple bobine de mesure. En effet, la sonde de Hall nécessite un entrefer supplémentaire.

Par contre, l'utilisation de l'aimant permanent directement dans l'entrefer glissant permet de réduire la sensibilité du capteur aux défauts de réalisation. C'est pourquoi nous développerons les structures où les aimants sont en contact direct avec les entrefers variables.

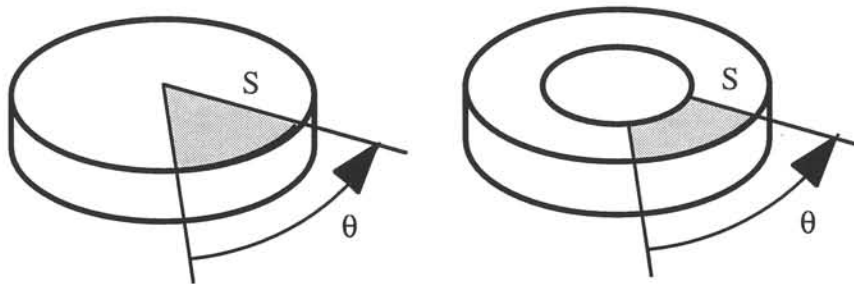
II.3. Synthèse des capteurs à aimants permanents

Nous allons faire la synthèse des capteurs utilisant les principes décrits au premier paragraphe. Ils utilisent le principe de la commutation de flux sans utiliser de pièces polaires ferromagnétiques de part et d'autre de l'entrefer glissant. Nous allons commencer par recenser les formes et les aimantations possibles pour l'aimant. Puis dans une deuxième partie, nous ferons la synthèse des formes possibles des pièces ferromagnétiques associées aux différents aimants.

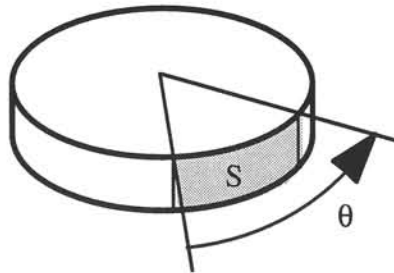
II.3.1. Les aimants possibles

Nous allons dans cette partie faire la synthèse des différentes formes d'aimants et type d'aimantations pour un capteur à "aiguillage de flux". Nous avons vu précédemment que le flux se répartit entre les deux branches du capteur de façon proportionnelle aux surfaces polaires de l'aimant en regard aux pièces polaires statoriques. Pour avoir une réponse linéaire, il faut donc que le balayage des surfaces polaires de l'aimant permanent soit proportionnel au déplacement (rotation).

A priori, toutes les formes ayant un axe de révolution sont possibles pour l'aimant permanent (sphère, cylindre, cône...). Pour des raisons évidentes de réalisation, nous allons limiter notre étude aux aimants ayant une forme cylindrique (de section circulaire) ou d'anneau. Ainsi, les deux surfaces proportionnelles à un angle sont le secteur d'un disque ou d'un anneau (2.7-a1), ou la surface externe d'un cylindre (2.7-a2).



a1 : Surfaces actives sur les faces planes du cylindre



a2 : Surfaces actives sur les faces cylindriques du cylindre

Figure 2.7 : Forme de l'aimant permanent

La surface S est proportionnelle à l'angle θ .

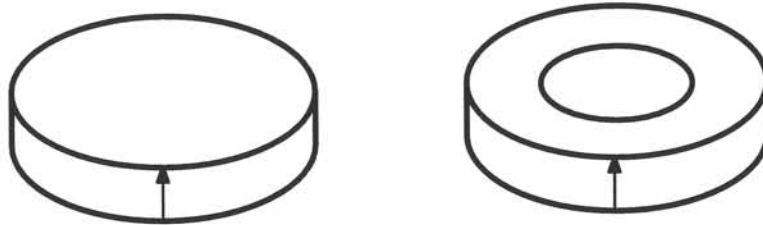
Nous allons examiner les différents types d'aimantation que l'on peut réaliser avec ces formes d'aimants.

1. Les pôles de l'aimant sur la ou les faces planes

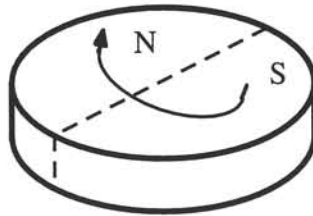
L'aimantation dipolaire axiale (2.8-a1) n'est pas utilisable, car du fait de sa symétrie, aucune variation de flux n'est créée par sa rotation.

L'aimantation dipolaire sur une face est utilisée dans les plots de fixation magnétique. L'autre face n'est pas aimantée. L'aimant doit être isotrope (2.8-a2).

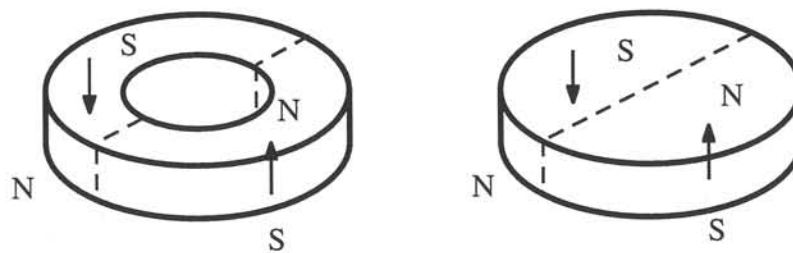
L'aimantation quadripolaire axiale est facile à réaliser. L'aimant peut être anisotrope ou isotrope. Ce type d'aimant (2.8-a3) est couramment utilisé dans les compteurs d'eau domestiques pour réaliser l'entraînement magnétique avec la turbine immergée et le totalisateur. Bien que l'aimantation soit quadripolaire, l'accouplement réalisé avec deux aimants de ce type est dipolaire.



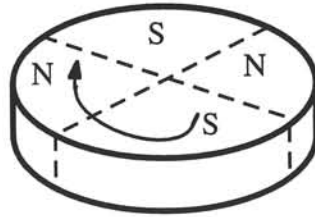
a1 : Aimantation dipolaire axiale



a2 : Aimantation dipolaire sur une face



a3 : Aimantation quadripolaire axiale



a4 : Aimantation quadripolaire sur une face

Figure 2.8 : Aimants avec pôles sur les faces planes du cylindre

L'aimantation quadripolaire sur une face (2.8-a4) n'est que la version quatre pôles de l'aimant (2.8-a2). Le passage de $+j$ à $-j$ s'effectue sur 90° .

On peut continuer cette classification en augmentant le nombre de pôles (6 pôles, 8 pôles...). Mais la variation du flux se fera sur un angle plus réduit, peu compatible avec une plage de mesure importante : la plage de mesure est imposée par l'angle d'ouverture d'un pôle de l'aimant permanent.

Pour des raisons de réalisation, l'aimant dipolaire sur une face (2.8-a2) peut être obtenu par un aimant quadripolaire axial (2.8-a3) et une culasse ferromagnétique pour refermer le flux (2.9).

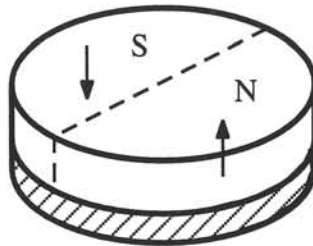


Figure 2.9 : Mode de réalisation pour un rotor dipolaire à partir d'un aimant quadripolaire

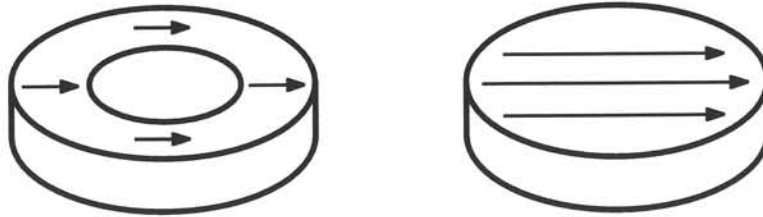
De plus on peut se limiter à un secteur seulement d'un cylindre ou d'un anneau (par exemple à 180°). A priori, toutes les aimantations décrites précédemment restent valables. Mais, la plage de mesure du capteur sera limitée par l'angle d'un pas polaire. Ainsi, seule l'aimantation dipolaire sur 180 degrés (2.10) peut être intéressante pour des capteurs ayant une plage de mesure importante (jusqu'à 180°).



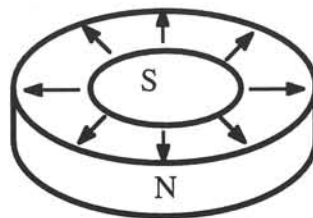
Figure 2.10 : Aimants dipolaires à aimantation axiale (sur 180°)

2. Les pôles sur les faces cylindriques de l'aimant.

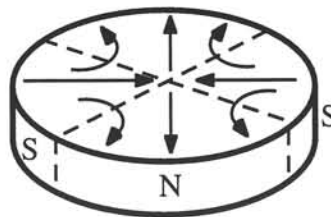
Les aimantations dipolaire diamétrale (2.11-a1), quadripolaire pseudo-diamétrale (2.11-a4) et quadripolaire classique (2.11-a3) fournissent une variation non linéaire de l'induction quand l'aimant tourne. Quant à l'aimantation dipolaire radiale (2.11-a2), elle est inutilisable, car pour des raisons de symétrie elle ne produit par rotation aucune variation.



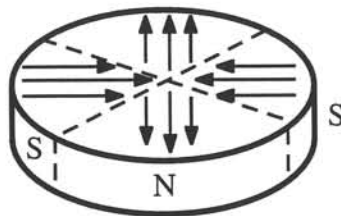
a1 : Aimantation dipolaire diamétrale



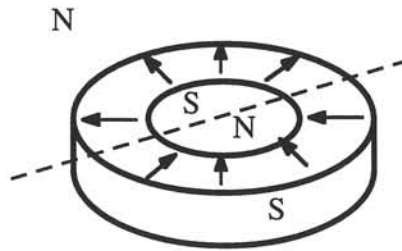
a2 : Aimantation dipolaire radiale



a3 : Aimantation quadripolaire classique



a4 : Aimantation quadripolaire pseudo-diamétrale



a5 : Aimantation quadripolaire radiale

Figure 2.11 : Aimants avec les pôles sur les faces cylindriques

Seules les aimantations radiales sont utilisables, car elles ont leurs aimantations normales à la surface active. Pour des raisons de réalisation, l'aimantation quadripolaire radiale 2.11-a5 peut être obtenue par deux aimants permanents en forme de tuile (2.12). Si la pièce centrale est en matériau ferromagnétique, elle canalise le flux entre les deux aimants : on obtient alors un rotor de type dipolaire.

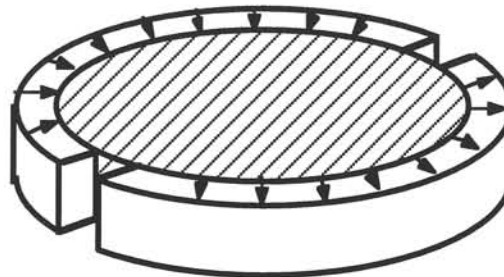


Figure 2.12 : Aimantation quadripolaire radiale réalisée par deux aimants en forme de tuile

Comme pour les aimantations axiales, il est possible de se limiter à un secteur de cylindre ou d'anneau. On peut donc ajouter dans la liste des aimants utilisables l'aimant dipolaire sur un secteur de 180° (2.13)

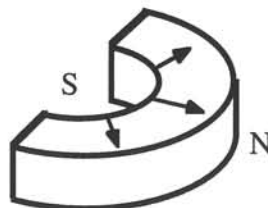


Figure 2.13 : Aimant dipolaire à aimantation radiale (sur 180°)

II.3.2. Les pièces ferromagnétiques

Nous avons recensé les différentes formes d'aimants et différents types d'aimantations pour la réalisation d'un capteur à "aiguillage de flux". Nous allons déduire les formes des pièces polaires associées à ces aimants et les mesures possibles.

Nous avons retenu a priori les aimants :

- L'aimant quadripolaire à aimantation axiale ou radiale (2.8-a3 et 2.11-a5),
- L'aimant dipolaire à aimantation axiale ou radiale sur 180° (2.10 et 2.13).
- L'aimant dipolaire sur une face plane de l'aimant (2.8-a2).

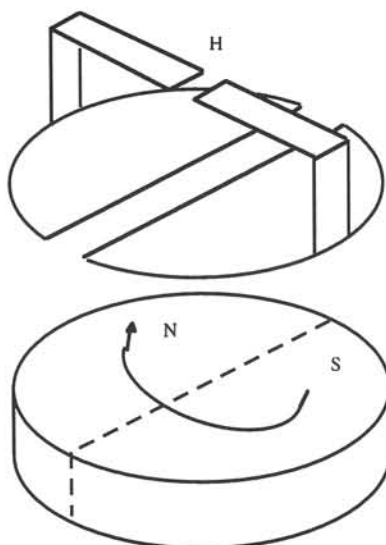
Il faut inclure aux aimantations quadripolaires, les différentes variantes possibles de réalisation de rotors dipolaires à l'aide de culasse ferromagnétique (voir les figures 2.12 et 2.9).

1. Leur fonctionnement

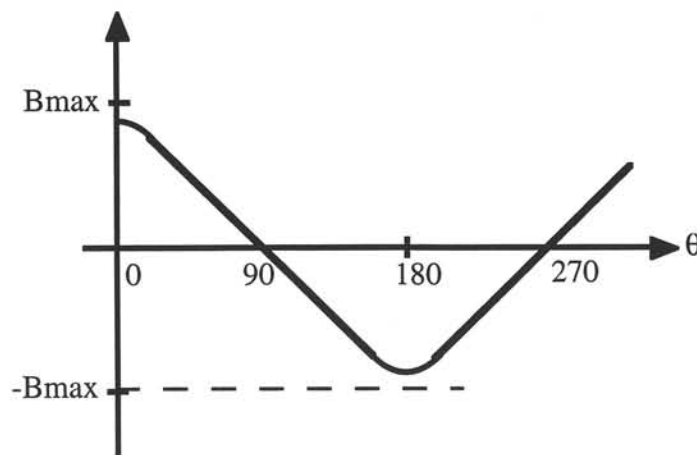
Les pièces ferromagnétiques (ou pièces polaires) ont deux fonctions. La première est de collecter le flux de l'aimant permanent en fonction de la position angulaire du capteur. La seconde est de canaliser le flux jusqu'à des entrefers de mesure (sonde de Hall).

Le cas idéal est de faire travailler l'aimant permanent en circuit fermé, et donc à flux constant. Pour cela, les différentes pièces polaires devront être le plus proche possible (voir en contact) de l'aimant et recouvrir toute la surface des pôles de l'aimant permanent. Les entrefers de mesure sont définis entre les différentes pièces polaires.

Par exemple, avec un aimant permanent dipolaire sur une face, on peut collecter le flux par deux pièces polaires en forme de demi-lune. Ces deux pièces canalisent le flux vers un entrefer où l'induction magnétique peut être mesurée par une sonde à effet Hall (notée H sur la figure 2.14).



a1 : Structure du capteur (vue éclatée)



a2 : Réponse du capteur

Figure 2.14 : Principe du circuit magnétique (aimant permanent 2.8-a2)

Le principe de fonctionnement est évident. En position initiale, l'induction en H est maximale. Si l'aimant tourne d'un quart de tour, les pièces polaires court-circuitent le flux, l'induction en H est nulle. On obtient une variation triangulaire sur un angle légèrement inférieur à 180° (figure 2.14-a2). Entre les crêtes, la variation du flux est linéaire, car elle correspond à la variation des surfaces polaires de l'aimant en regard avec les pièces polaires statoriques.

La forme du circuit magnétique est donc principalement fonction de l'aimant permanent. Les surfaces des pièces polaires en vis-à-vis avec l'aimant permanent ont la même forme que les pôles de l'aimant permanent. La séparation entre les pièces polaires statoriques reprend la forme des zones inter-polaires de l'aimant permanent.

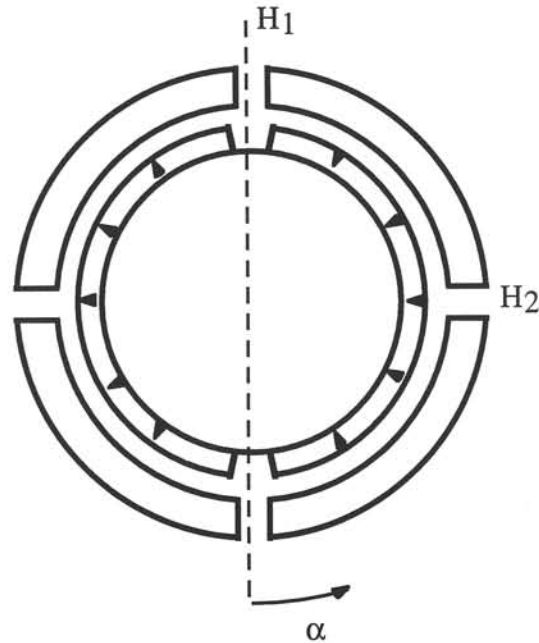
Le capteur présenté en figure (2.14-a1), basé sur l'aimant 2.8-a2, appelle toutefois quelques commentaires. Les longueurs des lignes de flux dans l'aimant ne sont pas toutes identiques quand l'aimantation est réalisée sur une face. Si l'aimant reste en circuit parfaitement fermé, l'induction en surface sera constante. Mais, il faut un petit entrefer entre les parties fixes et mobiles (jeu mécanique) et entrefer pour effectuer la mesure. Cette variation de la longueur des lignes de champ dans l'aimant va engendrer une variation de l'induction dans l'entrefer glissant. Cet effet est certainement réduit, mais va nuire à la linéarité du capteur. Il est préférable d'utiliser un aimant avec une aimantation quadripolaire axiale et une culasse pour refermer le flux sur une surface (Figure 2.9). Le résultat sera plus linéaire (même remarque pour l'aimant 2.8-a4).

Le capteur obtenu est la version à entrefer axial des capteurs décrits par Oudet dans son brevet [OUDE90]. Il est possible de retrouver la version à entrefer radial dont nous avons rappelé la structure en figure (1.14) avec le rotor dipolaire (2.12).

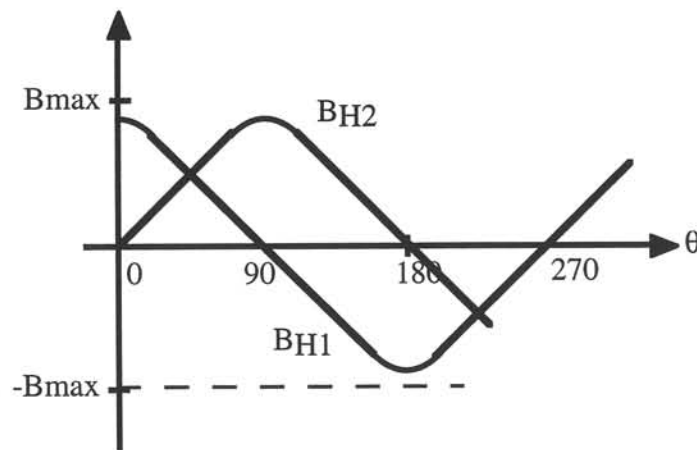
Ces structures dipolaires ne permettent de créer qu'une seule différence de potentiel magnétique entre

deux pièces polaires. Même si on utilise plusieurs entrefers de mesure entre les deux pièces polaires, ils verront la même induction. Pour cette raison, une mesure différentielle n'est pas possible. Il est donc nécessaire de compenser la dérive en température de l'aimant permanent et de la sonde de Hall.

Une variante possible est d'utiliser quatre pièces polaires au lieu de deux pour créer quatre entrefers de mesure à 90° permettant de mesurer deux signaux décalés de 90° électrique. Cette structure et sa réponse en fonction de la position sont données en figure 2.15.



a1 : Structure du capteur



a2: Réponse du capteur

Figure 2.15 : Variante possible du capteur MMT-Oudet

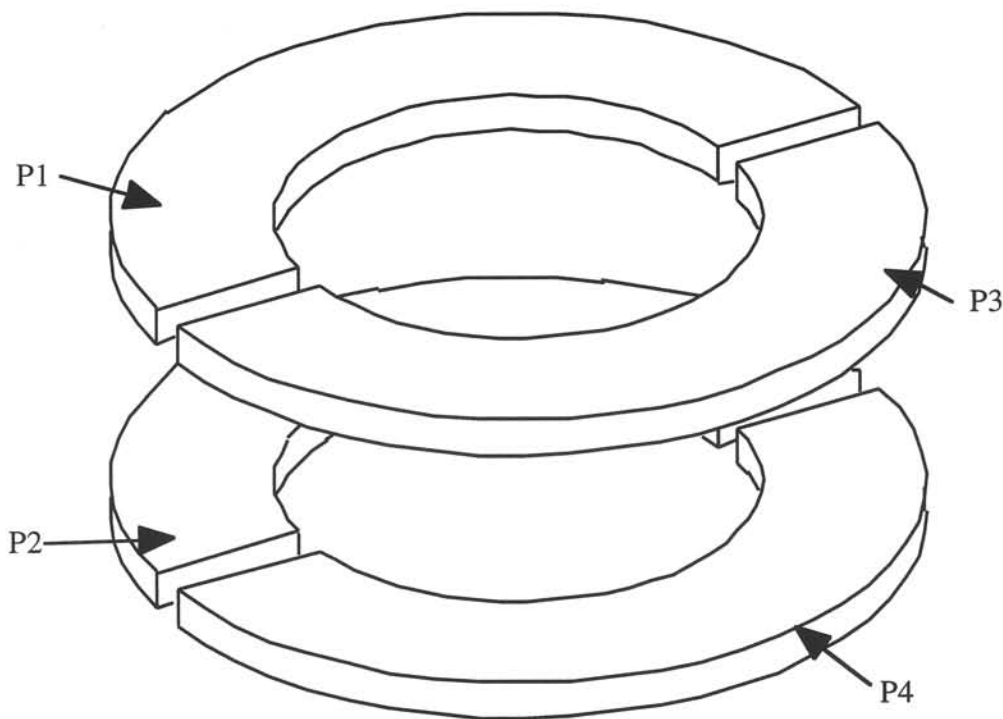
On remarque que la somme des signaux ($B_{H1} + B_{H2}$) reste constante et non nulle quelle que soit la position du capteur comprise entre 0 et 90° . Il est donc possible de faire une mesure "différentielle relative" ($(B_{H1} - B_{H2}) / (B_{H1} + B_{H2})$) sur cette plage de mesure, et ainsi de s'affranchir des dérives de la

polarisation de l'aimant permanent et du facteur d'échelle des sondes de Hall. Cette structure est intéressante pour un fonctionnement sur une plage de mesure inférieure à 90° .

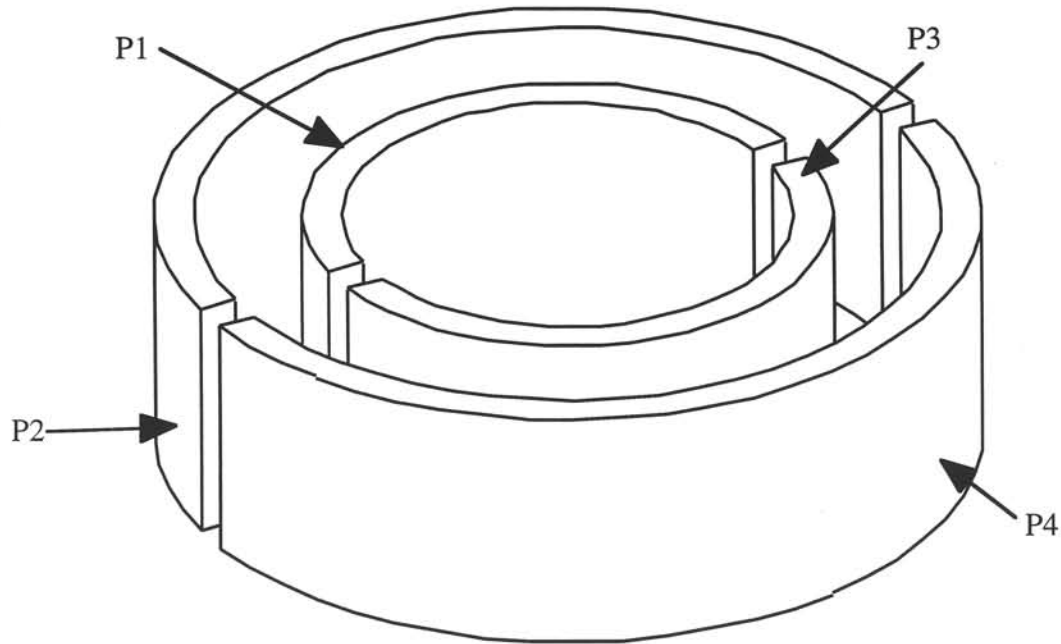
2. Circuit magnétique pour les aimants quadripolaires

L'aimantation quadripolaire radiale (2.11-a5) ou axiale (2.8-a3) permettent de réaliser des véritables systèmes à 4 pôles. A la différence des systèmes dipolaires du type MMT-Oudet, ces systèmes nécessitent a priori 4 pièces polaires correspondant aux quatre pôles de l'aimant permanent. Nous présenterons de façons parallèles les aimantations axiales et radiales : leurs fonctionnements sont identiques, seule la forme des pièces polaires change.

Comme nous l'avons vu au paragraphe précédent, pour collecter le flux il faut que les pièces polaires soient en regard avec les pôles de l'aimant permanent. Les pièces polaires sont donc cylindriques pour les aimantations radiales ou planes pour les aimantations axiales. La séparation entre les différentes pièces polaires d'un même plan reprend la forme de la zone inter-polaire de l'aimant permanent. Les formes des pièces polaires sont définies avec la figure 2.16 pour des aimants annulaires.



a1 : Pièces polaires pour aimant à aimantations axiales



a2 : Pièces polaires pour aimant à aimantations radiales

Figure 2.16 : Pièces polaires pour collecter le flux

Lorsque les pôles de l'aimant permanent sont alignés sur les pièces polaires, chacune des pièces polaires collecte le flux d'un pôle de l'aimant permanent. Les flux collectés sont tous identiques en module, ceux des pièces P1 et P3 sont de signes opposés aux flux des pièces P2 et P4. Les flux se referment par des entrefers entre les différentes pièces polaires.

Lorsque l'aimant a tourné de 90 degrés, toutes les pièces polaires sont en regard d'une surface identique de pôle Nord et pôle Sud de l'aimant. Le flux de l'aimant est "court-circuité" par les pièces polaires, il n'y a pas de flux se refermant entre les différentes pièces polaires.

Deux pièces polaires en regard ([P1, P2] ou [P3, P4]) vont collecter des flux identiques mais de signes opposés. Les deux pièces polaires d'une même surface (plane ou cylindrique) vont chacune collecter le flux de la moitié de l'aimant permanent. De part la symétrie de l'aimant, les flux collecter sont identiques en module et de signe opposé. On peut donc remarquer que les flux collectés par deux pièces opposées ([P1,P3] ou [P2,P4]) sont identiques en module et en signe. Il n'y a pas de flux se refermant entre ces pièces polaires.

Les entrefers de mesure sont définis entre les différentes pièces polaires. Donc, avec 4 pièces polaires, il est possible a priori de définir 8 entrefers de mesure. En réalité, les pièces polaires collectent deux par deux le même flux, deux pièces polaires opposées (P1 avec P4 ou P2 avec P3) voient les mêmes surfaces de pôle nord et pôles sud de l'aimant : elles sont donc au même potentiel magnétique. Ainsi,

on ne peut mesurer seulement le flux entre les pièces polaires en vis-à-vis (P1 avec P2 ou P3 avec P4) ou les pièces polaires du même plan (P1 avec P3 ou P2 avec P4). Il est possible de ramener les entrefers dans un domaine assez proche pour pouvoir placer deux sondes de Hall sur un même support (2.17).

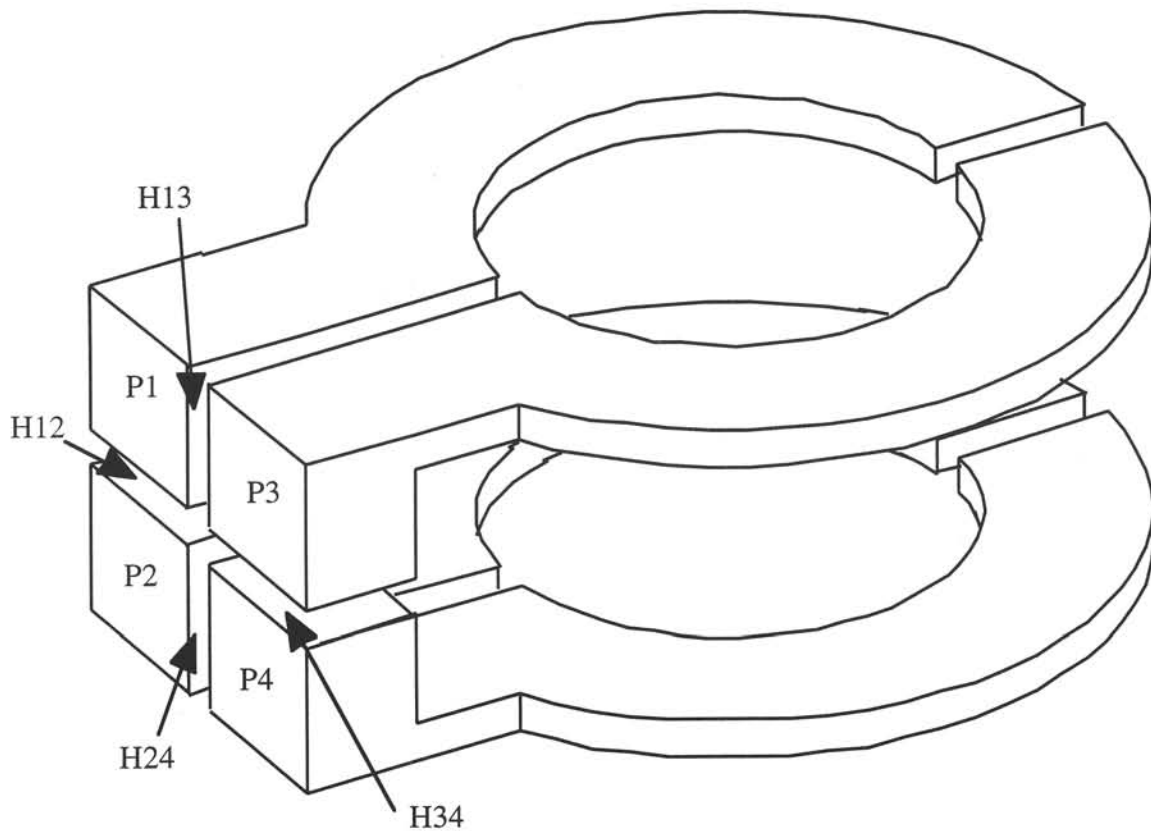


Figure 2.17 : Définition des entrefers de mesure entre les pièces polaires

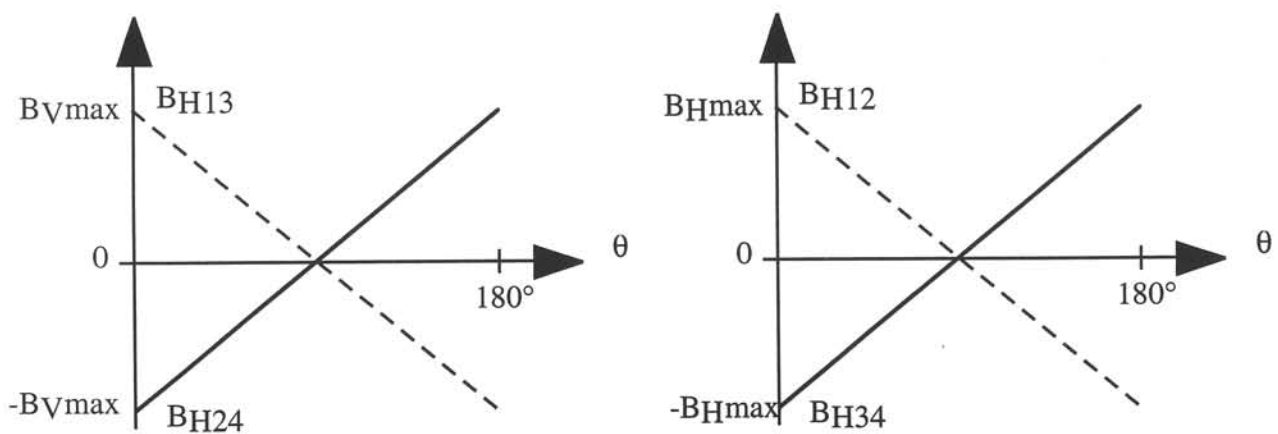


Figure 2.18 : Réponse du capteur pour un aimant quadripolaire (2.8-a3)

Les valeurs extrêmes B_{Vmax} et B_{Hmax} sont fonctions des dimensions et de l'aimantation de l'aimant permanent, mais aussi des dimensions des entrefers de mesures et des fuites magnétiques entre les

pièces polaires. De ce fait, les valeurs extrêmes de l'induction dans les entrefers verticaux et horizontaux ne sont pas forcément identiques.

On peut remarquer que la somme de B_{H12} et de B_{H34} est nulle quelle que soit la position du capteur. Il n'est donc pas possible avec cette structure de faire la différence de deux signaux divisé par la somme. L'utilisation de deux sondes dans deux entrefers de mesure pour avoir une mesure différentielle relative n'est pas possible. En effet, la somme des deux signaux représente le flux total passant entre la face supérieure et la face inférieure de l'aimant permanent. L'aimant ayant les mêmes surfaces polaires nord et sud sur chacune des faces, de façon globale, ce flux est nul.

3. Pièces polaires pour aimant dipolaire sur 180

Nous allons étudier l'aimant dipolaire sur 180 degrés à aimantation axiale. Il est possible d'obtenir les mêmes résultats à l'aide de l'aimant dipolaire sur 180 degrés à aimantation radiale. Seule la forme des pièces polaires change.

Il est possible de considérer l'aimant dipolaire axial sur 180 degrés (2.10) comme la superposition d'un aimant quadripolaire axial (2.11-a3) et d'un aimant dipolaire axial (2.11-a1). Les pièces polaires du capteur sont identiques à celles du capteur à aimant quadripolaire axial (figure 2.17). La réponse de ce capteur peut être directement déduite de la réponse du capteur à aimant quadripolaire.

De part sa symétrie, l'aimant dipolaire classique (2.11-a1) ne provoque pas de variation de flux dans les pièces polaires. Il impose dans le capteur un flux constant quelle que soit la position dans les entrefers horizontaux (H12 et H34). La réponse de ce capteur est donc la superposition de la réponse du capteur à aimant quadripolaire et un flux constant dans les entrefers Horizontaux. La réponse du capteur est donnée en figure 2.19.

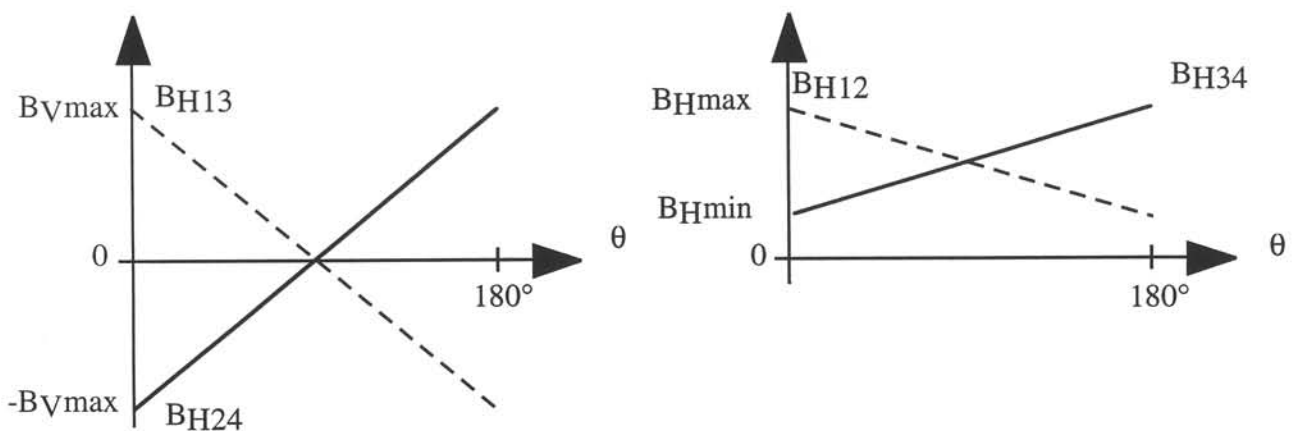


Figure 2.19 : Réponse du capteur avec un aimant dipolaire (2.9)

Dans ce cas, il est possible d'avoir une mesure du type "différence sur somme". Ceci permet d'avoir une réponse du capteur indépendante du facteur d'échelle des sondes de Hall et de la valeur de l'aimantation de l'aimant permanent. La réponse du capteur est indépendante des deux paramètres généralement sensibles aux variations de la température.

Il est important de signaler que l'on mesure seulement deux inductions dans deux entrefers. Il est donc nécessaire d'avoir deux entrefers entre trois pièces polaires. Il est donc possible de fusionner deux pièces polaires, ce qui simplifie la réalisation. Pour le système polarisé ce sont deux pièces d'une même surface pour conserver l'avantage de la polarisation. Le système obtenu est alors le suivant (figure 2.20).

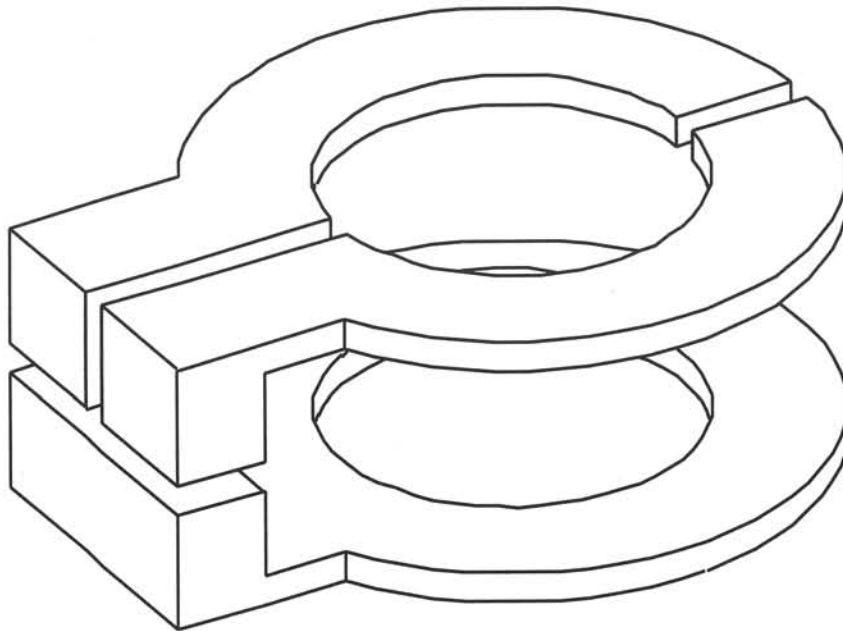


Figure 2.20: Capteur pièces polaires

Ce capteur permet une mesure différentielle relative, ce qui permet de s'affranchir des variations des facteurs d'échelle des sondes de Hall et de l'aimantation de l'aimant permanent. Il fonctionne sans déplacement de pièces ferromagnétiques, de ce fait il est peu sensible au jeu mécanique du rotor.

II.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés aux capteurs à aimants permanents et à circuit magnétique variable. Ils sont caractérisés par une réponse naturellement linéaire. De plus, l'utilisation de l'aimant permanent directement dans l'entrefer glissant permet d'avoir des entrefers magnétiques important (épaisseur de l'aimant permanent). De ce fait, ce type de capteur est peu sensible aux défauts de positionnement des pièces ferromagnétiques, au jeu mécanique entre le rotor et stator.

Une étude systématique nous a permis de retrouver les capteurs existants (capteurs du brevet [OUDE90]), et de trouver de nouvelles structures. Ces nouveaux capteurs ont les caractéristiques propres à tous les capteurs à aimants permanents et à circuit magnétique variable (linéaire, peu sensible au positionnement des pièces ferromagnétiques), ils permettent de plus une mesure du type différentielle relative. La réponse du capteur est alors indépendante de la polarisation de l'aimant permanent et du facteur d'échelle des sondes de Hall. De ce fait, la réponse de ce type capteur est peu sensible aux variations de température.

Les nouveaux capteurs à mesure différentielle relative ont fait l'objet d'un dépôt de brevet [PIAT96]. Ces capteurs sont simples à réaliser et donc bien adaptés pour des réalisations de grande série.



III.1. Introduction

Au chapitre précédent, nous avons fait la synthèse des capteurs à aimant permanent et à circuit magnétique variable. Par une étude systématique, nous avons retrouvé les capteurs existants (capteurs du brevet [OUDE90]), et mis en évidence de nouvelles structures. Ces nouveaux capteurs ont des caractéristiques similaires à celles des capteurs existants (réponse naturellement linéaire). De plus, ils permettent une mesure du type différentielle relative, et ainsi de s'affranchir des valeurs d'aimantation de l'aimant permanent et du facteur d'échelle des sondes de Hall. De ce fait, ils sont peu sensibles aux variations de température. Ces nouveaux capteurs font l'objet d'un brevet [PIAT96].

Nous allons dans ce chapitre étudier plus particulièrement une des structures proposées au chapitre précédent. Nous allons d'abord présenter la géométrie de ce capteur. Dans un deuxième temps, nous développerons les deux modèles pour l'étude de ce capteur (les éléments finis et un modèle analytique). Ces modèles nous permettront de déduire les principales caractéristiques de ce capteur (sensibilité au mesurande, aux défauts géométriques...). Dans une dernière partie, les résultats des modélisations seront comparés avec les résultats de mesure sur un prototype.

III.2. Présentation du capteur

Nous donnons ici la structure de base pour notre étude. On retrouve les 3 pièces polaires ferromagnétiques et l'aimant permanent. Les entrefers de mesure sont à la verticale entre les pièces polaires supérieures et la pièce polaire inférieure (figure 3.1).

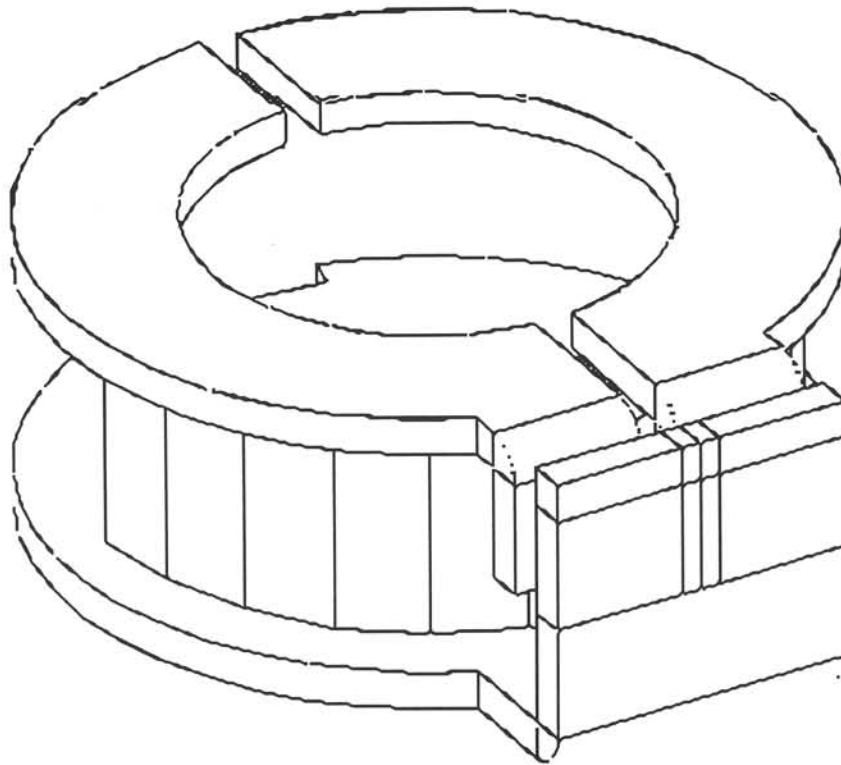


Figure 3.1 : Géométrie du capteur étudié

Au cours de notre étude, la position de l'aimant permanent est donnée soit en coordonnées réelles (θ), soit en coordonnées réduites (θ_r). Lorsque $\theta_r = 0$, l'aimant permanent se trouve en position centrale (position en figure 3.1). Lorsque $\theta_r = 0,5$ ($-0,5$) l'aimant se trouve totalement sous la pièce polaire supérieure de droite (de gauche). Cette définition est valable pour un capteur à déplacement angulaire ou pour un capteur à déplacement linéaire.

La mesure est faite par deux sondes de Hall placées dans les entrefers de mesure. Elles mesurent la composante normale de l'induction dans les entrefers. Les entrefers étant fixes (pas de déplacement de pièce ferromagnétique), la mesure de cette composante d'induction est similaire, à un coefficient près, à la mesure du flux traversant les entrefers de mesure.

III.3. La modélisation

L'étude de ce capteur va se faire en utilisant deux approches de modélisation. Une première approche purement numérique utilisera la méthode des éléments finis (logiciel FLUX3D). Une

seconde approche analytique utilisera un circuit équivalent (circuit magnétique).

Comme nous le verrons au cours de notre étude, ces deux approches ne sont équivalentes, mais complémentaires. Le modèle analytique doit nous permettre une compréhension du fonctionnement du capteur. Il nous donnera une information qualitative sur la sensibilité des caractéristiques du capteur à des paramètres géométriques ou physiques. Pour une information quantitative précise, une modélisation numérique (éléments finis) sera nécessaire.

III.3.1. Les éléments finis

Le capteur étudié est un capteur à circuit magnétique variable. Contrairement à un capteur à circuit magnétique constant, la répartition de l'induction varie en fonction de la position. Il est donc nécessaire d'effectuer un calcul éléments finis pour chacune des positions du capteur. Ainsi, il n'est pas possible de calculer de façon continue la réponse du capteur. La modélisation se fera par le calcul pour des positions successives de l'aimant permanent (incrément de 15 degrés).

La modélisation utilise une formulation de magnétostatique en potentiel scalaire total, l'infini est pris en compte à l'aide d'une transformation (boîte infinie de Flux3d). Le maillage des pièces ferromagnétiques, des entrefers de mesure, et de l'aimant permanent est donné en figure 3.2 (position $\theta_r = 0$).

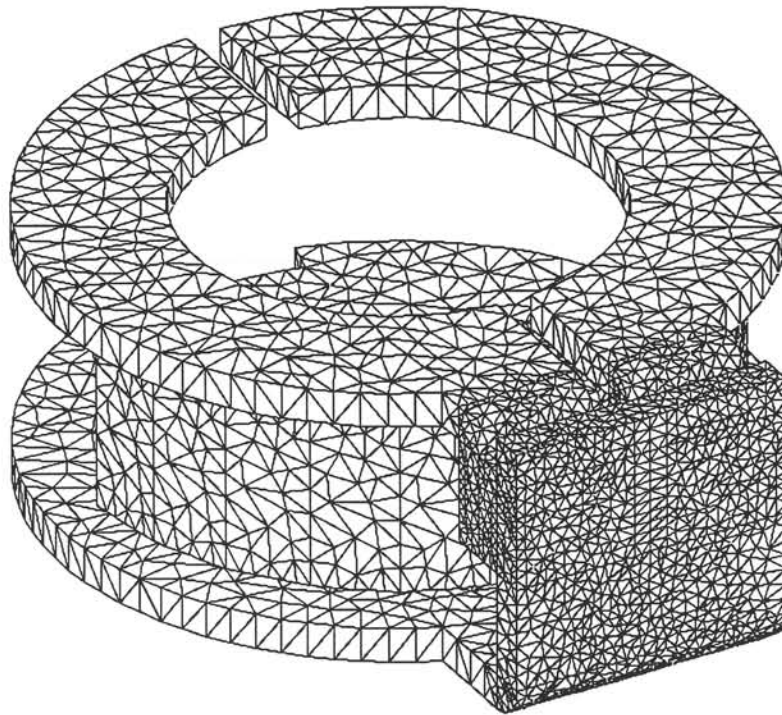


Figure 3.2 : maillage de la géométrie

On cherche à estimer les performances (erreur de linéarité notamment) d'un capteur. Il est donc nécessaire d'avoir des résultats de simulation précis, et donc de prendre un certain nombre de précautions. Le maillage doit être particulièrement soigné (éléments tétraédriques les plus réguliers possibles).

Le remaillage entre deux positions de l'aimant permanent est coûteux en temps de calcul et source de bruit numérique dans le calcul de la réponse du capteur. Pour éviter de remailler entre les différentes positions du capteur, le déplacement de l'aimant permanent sera simulé par l'affectation de volume élémentaire (secteur de 15 degrés d'un anneau) aux régions volumiques air ou aimant.

Le calcul de l'induction dans les entrefers se fera par intégration sur une surface rectangulaire plane dans une zone de l'entrefer où l'induction est uniforme. L'intégration doit permettre de faire une moyenne, et ainsi de s'affranchir en partie du bruit liée au maillage.

III.3.2. Le modèle à ré reluctances

Nous allons chercher à trouver un modèle analytique. L'exploitation pourra se faire en utilisant un logiciel de traitement mathématique (Mathcad). L'objectif de ce modèle n'est pas de donner des valeurs aussi précises que la modélisation par éléments finis, mais de donner une

information qualitative du fonctionnement du capteur. Il doit nous permettre d'identifier l'influence de certains paramètres sur les performances du capteur. Les résultats de ce modèle seront comparés à ceux obtenus à l'aide de la modélisation par éléments finis.

1. Principe du modèle

Ce modèle se caractérise par des équations sur des grandeurs globales (flux magnétiques, différence de potentiels magnétiques). Il s'appuie sur une similitude de certaines équations, des analogies peuvent être tirées entre les grandeurs associées aux circuits électriques et les grandeurs magnétiques. Ainsi, une analogie peut être faite entre le potentiel électrique et le potentiel magnétique d'une part, et le courant électrique et le flux magnétique d'autre part. Par conséquent, il est possible d'étudier un système magnétique à l'aide d'un circuit électrique équivalent. Aux lois des mailles et des noeuds correspondent respectivement le théorème d'Ampère et la loi de la conservation du flux.

2. Modèle pour capteur angulaire

Nous allons présenter le modèle pour un capteur de position à déplacement linéaire. Le modèle pour le capteur angulaire est identique. La géométrie du capteur à déplacement linéaire est donnée en figure 3.3.

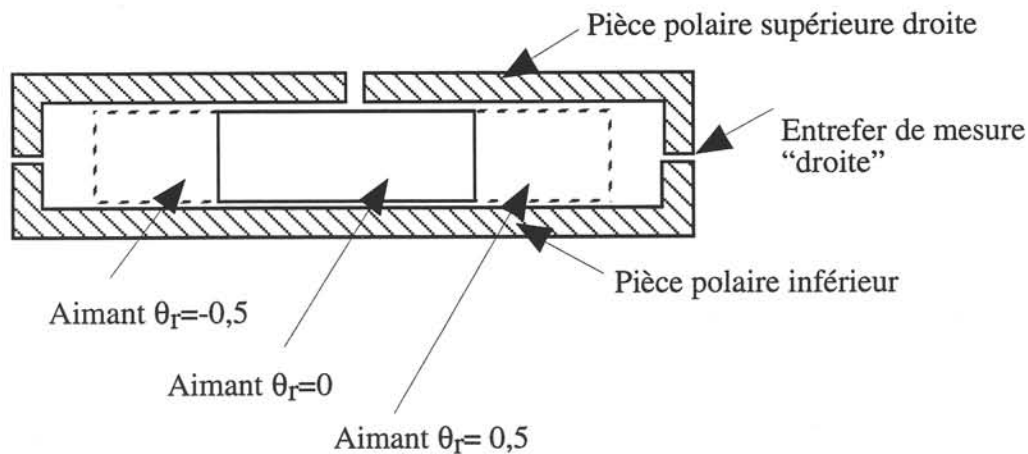


Figure 3.3 : Géométrie du capteur linéaire

Nous faisons pour notre modélisation un certain nombre d'hypothèses. Certaines de ces hypothèses sont liées à la méthode de modélisation (modèle de réluctances), d'autres à notre problème. Certaines de ces hypothèses seront rediscutées par la suite. Les hypothèses sont les suivantes :

- La perméabilité des pièces ferromagnétiques est supposée suffisamment importante pour considérer les pièces polaires comme des conducteurs magnétiques parfaits. Dit autrement, on néglige la chute de potentiel magnétique dans les pièces polaires par rapport à celle des entrefers. Les pièces polaires sont considérées comme des équipotentielles magnétiques. Ceci impose une non-saturation des pièces ferromagnétiques.

- On considère l'induction dans l'aimant permanent homogène. Cela signifie entre autres que l'on néglige les effets de bord sur l'aimant permanent. Ces effets de bords sont présents aux extrémités de l'aimant permanent (zone A sur la figure 3.4), et au niveau de l'entrefer entre les pièces polaires supérieures (zone B). En pratique, ces effets de bord n'ont pas d'influence sur la linéarité du capteur tant que ces zones restent symétriques. C'est-à-dire, lorsque l'aimant travaille dans une zone centrale. Cette plage de fonctionnement linéaire ne peut être estimée que par une modélisation par éléments finis ou par les mesures sur un prototype.

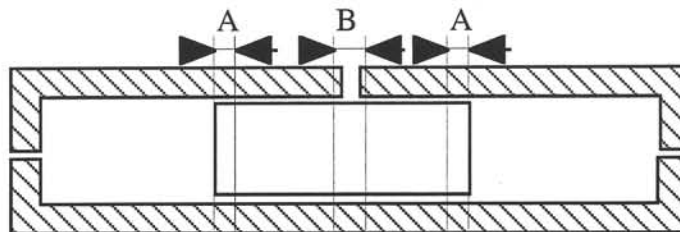


Figure 3.4 : Effet de bord sur l'aimant permanent

- on considère que la totalité du flux de l'aimant permanent est collectée par les pièces polaires. C'est-à-dire, qu'il n'y a pas de flux de fuite de l'aimant permanent.

- On considère la perméabilité relative de l'aimant permanent égale à 1.

- Dans un premier temps, on va considérer l'aimant permanent en contact direct avec les pièces polaires (pas de jeux mécaniques entre les pièces polaires et l'aimant permanent).

Il faut à cela rajouter des hypothèses liées aux principes mêmes de la modélisation par des modèles à ré reluctances.

- On considère un comportement linéaire des différents matériaux du circuit magnétique. Les points de fonctionnement des matériaux se déplacent uniquement dans les zones linéaires des caractéristiques des matériaux (aimant permanent et matériau ferromagnétique).

Le principe du modèle est de caractériser le comportement du capteur en identifiant les tubes d'induction (figure 3.5).

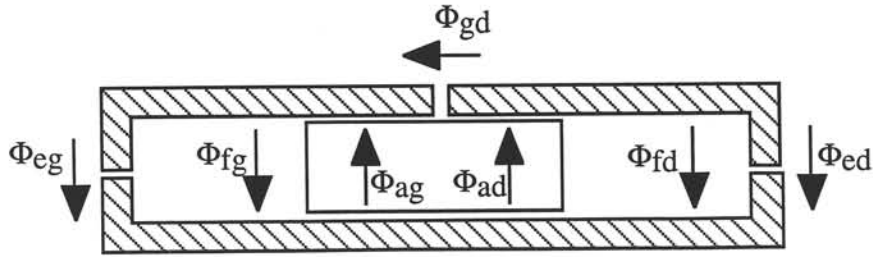


Figure 3.5: Les flux dans le capteur

Φ_{eg} et Φ_{ed} sont respectivement le flux traversant les entrefers gauche et droit du capteur. Ces entrefers étant fixes, une mesure de l'induction en un point de l'entrefer est équivalente à une mesure de flux dans l'entrefer.

Φ_{fg} et Φ_{fd} sont respectivement les flux de fuites entre les pièces polaires supérieures (gauche et droite) et la pièce polaire inférieure. Il est évident que la séparation entre le flux d'entrefer (Φ_{eg} ou Φ_{ed}) et le flux de fuite (Φ_{fg} ou Φ_{fd}) est arbitraire.

Φ_{ag} et Φ_{ad} sont respectivement les flux sortants des surfaces polaires de l'aimant en regard avec les pièces polaires de droite et gauche. Par définition, le flux total de l'aimant permanent est la somme de ces deux flux. Par la suite, l'on va de considérer l'aimant permanent comme étant deux aimants générant l'un flux Φ_{ag} collecté par la pièce polaire supérieur gauche, et l'autre Φ_{ad} collecté par la pièce polaire supérieure droite. L'aimant de droite et l'aimant de gauche ont respectivement une surface polaire S_{ag} et S_{ad} fonction de la position (Formules 3.1), et une aimantation J .

$$S_{ag} = (0,5 - \theta_r) \cdot S_a \quad (3.1)$$

$$S_{ad} = (0,5 + \theta_r) \cdot S_a$$

Le principe du modèle est d'avoir un schéma électrique équivalent au circuit magnétique. Le circuit magnétique étant constitué de trois équipotentielles magnétiques, on retrouve trois noeuds électriques. Entre ces trois noeuds, on fait correspondre aux différents flux magnétiques des mailles constituées de composants magnétiques. Pour un flux dans l'air, l'élément est une réluctance modélisée par une résistance dans le circuit électrique équivalent. Pour le flux d'un aimant permanent (aimant droit ou aimant gauche), on fait correspondre une source magnétique modélisée par une source de flux en parallèle à une réluctance interne (modèle de Norton). Les paramètres de cette source magnétique sont un flux de court-circuit et une réluctance interne de l'aimant permanent. Lorsque cette source est en court circuit, le flux sortant est égal à la polarisation de l'aimant permanent par la surface polaire de l'aimant (Formules 3.2). Le point de fonctionnement de l'aimant permanent est fonction de sa réluctance interne et de sa réluctance de

charge.

$$\Phi_{g0} = S_{ag} \cdot J = (0,5 - \theta_r) \cdot S_a \cdot J$$

$$\Phi_{d0} = S_{ad} \cdot J = (0,5 + \theta_r) \cdot S_a \cdot J \quad (3.2)$$

Le schéma équivalent est donc celui de la figure 3.6.

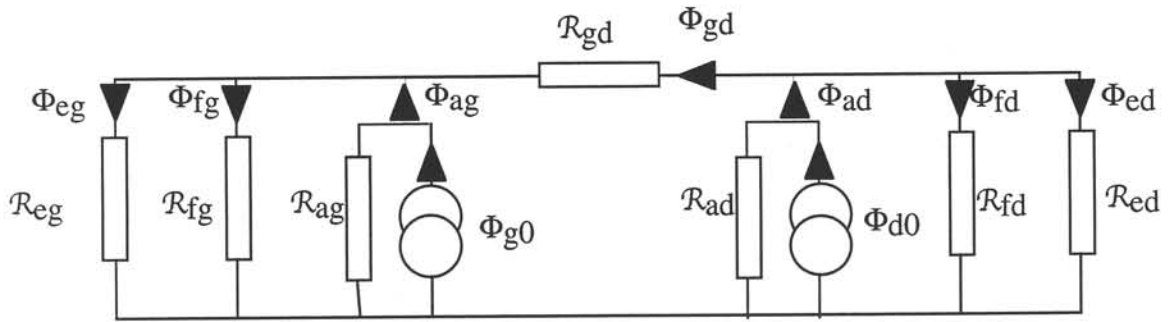


Figure 3.6: Schéma électrique équivalent au capteur

Dans ce modèle, les valeurs des sources de flux (Φ_{g0} et Φ_{d0}) et des réluctances internes des aimants (R_{ag} et R_{ad}) et de fuite (R_{fg} et R_{fd}) sont fonctions des surfaces S_{ag} et S_{ad} , et donc de la position du capteur. En effet, la surface des aimants et de passage de fuites est fonction de la position de l'aimant permanent.

Lorsque l'aimant n'est pas en contact avec les pièces polaires (pièces polaires supérieures et inférieure) la configuration est différente. Si l'on considère le flux de l'aimant sortant uniquement par les surfaces polaires (et de façon normale à la surface), on peut considérer les deux surfaces polaires des aimants permanents comme des équipotentielles. La présence de jeux mécaniques entre l'aimant permanent et les pièces polaires ajoutent des entrefers supplémentaires. On peut faire correspondre à ces entrefers des réluctances (R_{jg} et R_{jd}). On peut donc compléter le circuit de la figure 3.6, pour prendre en compte ces réluctances (Figure 3.7).

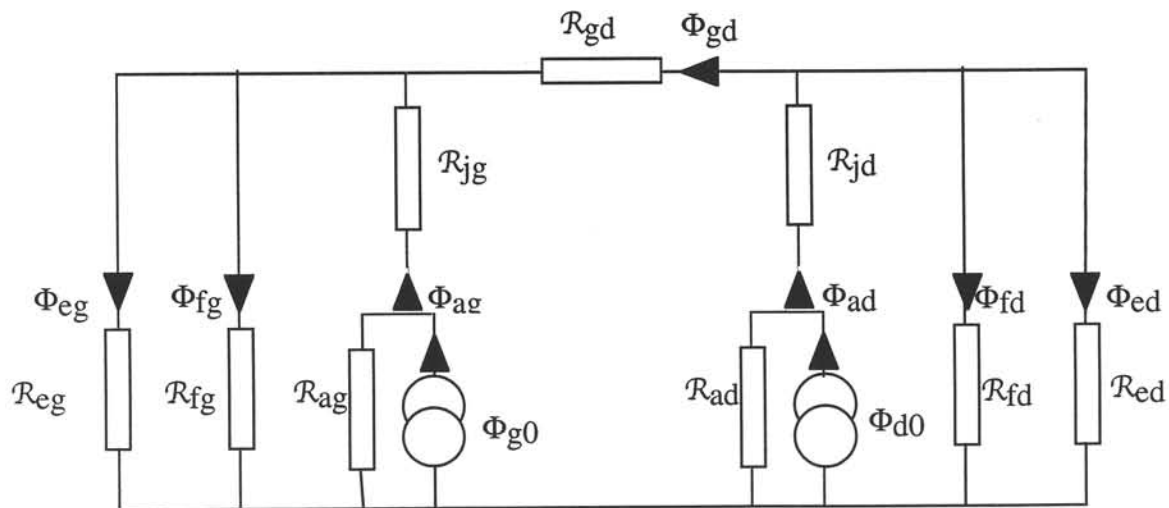


Figure 3.7 : Circuit équivalent avec un jeu mécanique entre l'aimant et les pièces polaires

Si la perméabilité relative de l'aimant permanent est égale à 1, il n'y a pas de déplacement de pièce ayant une perméabilité relative différente de 1. Cela implique que la réluctance équivalente entre les différentes pièces polaires est constante quelle que soit la position du capteur. Il est donc possible de remplacer les réluctances internes des aimants (R_{ag} et R_{ad}), de fuites (R_{fg} et R_{fd}) et les réluctances des jeux mécaniques (R_{jg} et R_{jd}) par des réluctances équivalentes R_{afg} et R_{afd} , dont leur valeur est indépendante de la position.

Le schéma électrique de la figure 3.7 peut être simplifié et devenir celui de la figure 3.8.

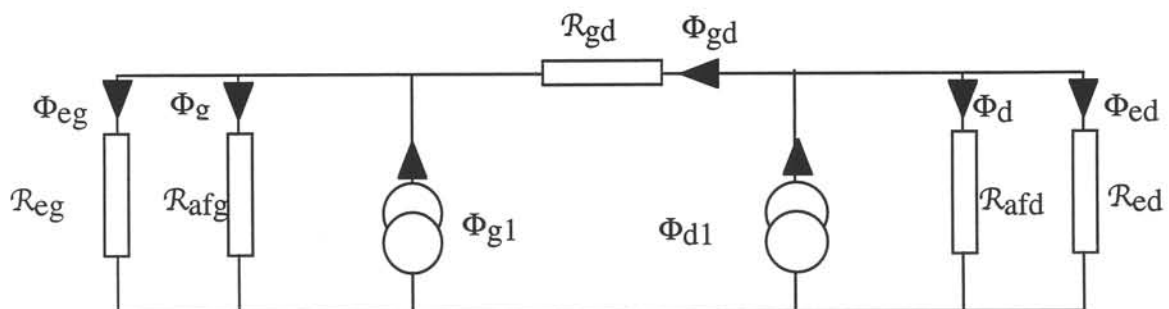


Figure 3.8 : Schéma électrique simplifié

Avec $\mathcal{R}_{\text{afg}} = (\mathcal{R}_{\text{ag}} + \mathcal{R}_{\text{jg}}) // \mathcal{R}_{\text{fg}}$

$$\mathcal{R}_{afd} = (\mathcal{R}_{ad} + \mathcal{R}_{jd}) // \mathcal{R}_{fd} \quad (3.3)$$

(Le symbole // signifie réluctances en parallèle)

$$\Phi_{g1} = \Phi_{g0} \cdot \frac{\mathcal{R}_{ag}}{\mathcal{R}_{ag} + \mathcal{R}_{jg}}$$

$$\Phi_{d1} = \Phi_{d0} \cdot \frac{\mathcal{R}_{ad}}{\mathcal{R}_{ad} + \mathcal{R}_{jd}} \quad (3.4)$$

Si l'on considère que les réluctances internes des aimants ($\mathcal{R}_{ag}$ et $\mathcal{R}_{ad}$) et les réluctances des jeux mécaniques ($\mathcal{R}_{jg}$ et $\mathcal{R}_{jd}$) sont inversement proportionnelles aux surfaces polaires (S_{ag} et S_{ad}), alors les sources de flux varient linéairement avec la position.

$$\Phi_{g1} = (0,5 - \theta_r) \cdot \Phi_a$$

$$\Phi_{d1} = (0,5 + \theta_r) \cdot \Phi_a$$

Avec $\Phi_a = \frac{\mathcal{R}_{ad}}{\mathcal{R}_{ad} + \mathcal{R}_{jd}} \cdot S_a \cdot J = \frac{\mathcal{R}_{ag}}{\mathcal{R}_{ag} + \mathcal{R}_{jg}} \cdot S_a \cdot J$ (3.6) le flux total sortant d'un pôle de l'aimant permanent.

Toutes les réluctances du circuit 3.8 sont invariantes avec la position. Il est important de signaler que la séparation de la réluctance entre les pièces polaires supérieures et la pièce polaire inférieure en deux réluctances en parallèle (réluctance d'entrefer et réluctance de fuite) est arbitraire.

3. Identification des paramètres du modèle

Nous allons identifier les paramètres du modèle. Ces paramètres sont les différentes réluctances du capteur: $\mathcal{R}_{eg}$, $\mathcal{R}_{ed}$, $\mathcal{R}_{afg}$, $\mathcal{R}_{afd}$, $\mathcal{R}_{gd}$ et le flux total de l'aimant permanent Φ_a . Nous disposons de deux méthodes pour l'identification. La première est une méthode analytique (formules de Roters). La seconde utilise la méthode des éléments finis. La méthode analytique va nous permettre d'identifier rapidement la sensibilité du capteur à des paramètres géométriques.

On utilise pour cela la méthode proposée par Roters [ROTE41]. Le principe est de décomposer l'espace d'air entre deux équipotentielles magnétiques (pièces ferromagnétiques) en des volumes élémentaires. Il propose un abaque de formule de perméance pour les principales formes de volumes élémentaires. Cette méthode est utilisable uniquement pour des pièces polaires de forme simple. Il n'est donc pas possible de l'appliquer directement pour notre capteur angulaire. Nous

avons fait le choix de travailler sur le capteur pour déplacement linéaire. Les courbures des pièces polaires supérieures et inférieure sont négligées. On néglige les arrondis de pliage des pièces ferromagnétiques (Figure 3.9).

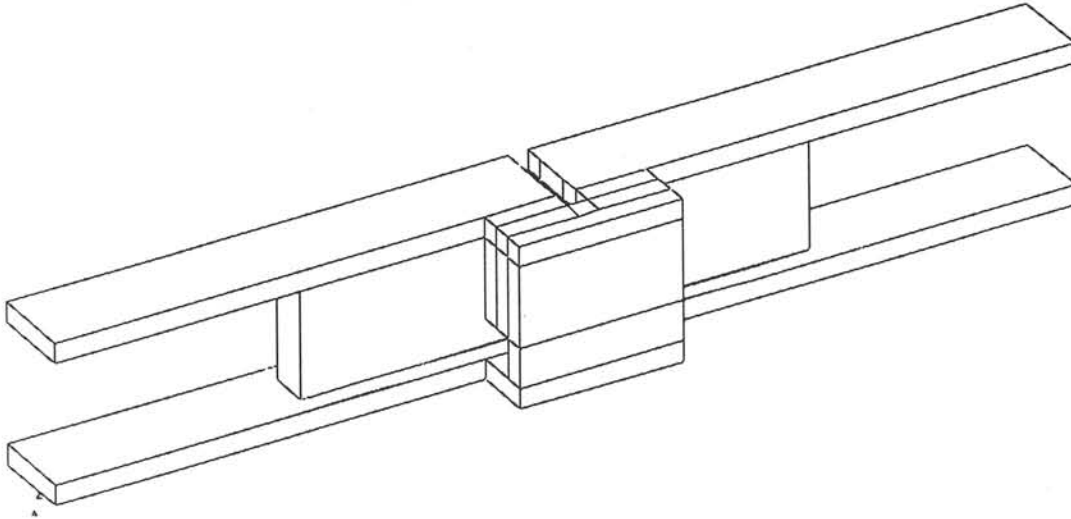


Figure 3.9 : Géométrie pour identification analytique des réluctances

Il est évident que les réluctances obtenues avec ce modèle sont des valeurs approchées à celles du capteur angulaire. Nous avons appliqué cette méthode pour notre capteur à déplacement linéaire: R_{eg} , R_{ed} , R_{afg} , R_{afd} . Nous donnons dans le tableau ci-dessous les valeurs des réluctances identifiées à l'aide de Flux3d (capteur à déplacement angulaire) et à l'aide des formules de Roters (capteur à déplacement linéaire).

	R_{eg}, R_{ed}	R_{afg}, R_{afd}	R_{gd}
Flux3d	71,5	15,8	22,2
Analytique	75,8	17,3	-

Valeur des réluctances en 10^{-6} H^{-1}

III.4. Utilisation des modèles

L'utilisation du modèle permet de faire les choix nécessaires pour optimiser les dimensions du capteur. Ces choix sont imposés par la réponse du capteur (capteur le plus sensible possible, mesure compatible avec les sondes de Hall) et la sensibilité du capteur à des défauts géométriques. Le modèle analytique permet une approche qualitative, le modèle numérique (Flux

3D) une approche quantitative.

III.4.1. Réponse du capteur

Nous allons estimer la réponse du capteur.

A partir du circuit 3.8, il est possible en utilisant les techniques classiques de calculs des circuits électriques (Thevenin, Norton) d'estimer les valeurs des flux dans les entrefers de mesures (Φ_{eg} et Φ_{ed}).

$$\Phi_{eg} = \frac{R_g}{R_{eg}} \cdot \frac{\Phi_a}{R_d + R_g + R_{gd}} \cdot [R_d + R_{dg}(0,5 - \theta_r)]$$

$$\Phi_{ed} = \frac{R_d}{R_{ed}} \cdot \frac{\Phi_a}{R_d + R_g + R_{gd}} \cdot [R_g + R_{dg}(0,5 + \theta_r)] \quad (3.7)$$

$$\text{Avec } R_d = \frac{R_{ed} \cdot R_{afd}}{R_{ed} + R_{afd}} \text{ et } R_g = \frac{R_{eg} \cdot R_{afg}}{R_{eg} + R_{afg}} \quad (3.8)$$

Sachant que la réponse du capteur est donnée par :

$$f(\theta_r) = \frac{\Phi_{ed} - \Phi_{eg}}{\Phi_{eg} + \Phi_{ed}} \quad (3.9)$$

En développant (3.9) avec (3.7) on obtient :

$$f(\theta_r) = \frac{R_d \cdot R_g \cdot (R_{ed} - R_{eg}) + R_{gd} \cdot ((0,5 - \theta_r) \cdot R_g \cdot R_{ed} - (0,5 + \theta_r) \cdot R_d \cdot R_{eg})}{R_d \cdot R_g \cdot (R_{ed} + R_{eg}) + R_{gd} \cdot ((0,5 - \theta_r) \cdot R_g \cdot R_{ed} + (0,5 + \theta_r) \cdot R_d \cdot R_{eg})} \quad (3.10)$$

En considérant le capteur parfaitement symétrique ($R_{ed} = R_{eg}$ et $R_d = R_g = R_p$), la réponse du capteur est :

$$f(\theta_r) = \frac{2 \cdot \theta_r}{1 + \frac{2 \cdot R_p}{R_{gd}}}$$

Il est intéressant de remarquer que la réponse du capteur est fonction seulement des réluctances du circuit magnétique. Il ne dépend que de la forme et de la position relative des différentes

pièces polaires : elle est indépendante de l'aimantation de l'aimant permanent.

On pose :

$$K = \frac{1}{\theta_0} = \frac{2}{1 + \frac{2 \cdot \mathcal{R}_p}{\mathcal{R}_{gd}}} \quad (3.11)$$

Où K est la sensibilité du capteur et θ_0 le facteur d'échelle.

Ces valeurs ne sont pas suffisantes pour caractériser le fonctionnement du capteur. En effet, pour le dimensionnement des sondes, on doit s'intéresser à une valeur représentative du niveau d'induction dans les entrefers de mesure. Cette valeur peut être la valeur moyenne de l'induction (capteur en position centrale). En partant d'une des équations (3.7) :

$$\Phi_{e0} = \frac{\mathcal{R}_d}{\mathcal{R}_{ed}} \cdot \frac{\Phi_a}{\mathcal{R}_d + \mathcal{R}_g + \mathcal{R}_{gd}} \cdot \left[\mathcal{R}_g + \frac{\mathcal{R}_{dg}}{2} \right]$$

$$\Phi_{e0} = \frac{\mathcal{R}_p}{\mathcal{R}_e} \cdot \frac{\Phi_a}{2} \quad (3.12)$$

En posant que $\mathcal{R}_e = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{e_m}{S_m}$

Avec e_m et S_m respectivement l'épaisseur et la surface d'un entrefer de mesure et μ_0 la perméabilité du vide.

En considérant l'induction homogène dans l'entrefer de mesure

$$B_{e0} = \frac{\Phi_{e0}}{S_m} = \frac{\mu_0}{2} \cdot \frac{\mathcal{R}_p}{e_m} \cdot \Phi_a \quad (3.13)$$

Le produit entre l'induction moyenne (B_{e0}) et le facteur d'échelle K , donne le facteur d'induction dans les entrefers de mesures. Ce facteur donne la variation de l'induction dans un des entrefers de mesure en fonction de la variation de position angulaire.

Le dimensionnement du capteur est un compromis imposé par les sondes de Hall. En pratique l'épaisseur des entrefers de mesure est imposée par l'épaisseur des sondes de Hall. Généralement, on cherche à rendre la sensibilité du capteur (K) et l'induction moyenne (B_{e0}) les plus importantes possibles. Pour avoir un niveau d'induction suffisant dans les entrefers de mesure, on cherche à réduire le niveau des fuites magnétiques entre les pièces polaires supérieures et la pièce polaire inférieure (augmenter $\mathcal{R}_p$). Pour obtenir une sensibilité suffisante, il faut réduire le quotient entre la réluctance entre les pièces polaires supérieures et la réluctance

entre une des pièces polaires supérieures et la pièce polaire inférieure. Cela impose de chercher à augmenter la réluctance entre les pièces polaires supérieures (R_{dg}).

III.4.2. Sensibilité du capteur aux défauts

L'usinage et l'assemblage des différentes pièces du capteur se font suivant des tolérances géométriques. Les pièces polaires supérieures ne peuvent pas être parfaitement symétriques, leur positionnement par rapport à la pièce polaire inférieure n'est pas identique. Nous allons chercher à comprendre et à quantifier l'influence de cette dissymétrie sur la réponse du capteur. L'objectif est de dimensionner le capteur de sorte qu'il soit le moins sensible à ces défauts.

Dans notre modèle analytique (circuit électrique équivalent donné en figure 3.8), ces défauts se traduisent par une inégalité entre les paramètres de droite et de gauche du capteur ($R_{ed} \neq R_{eg}$ et $R_{afd} \neq R_{afg}$). De plus, les points de fonctionnement entre la partie droite et la partie gauche de l'aimant permanent ne sont plus identiques.

Nous avons donné l'expression de la réponse du capteur en fonction des différentes réluctances (R_{ed} , R_{eg} , R_{afd} , R_{afg} , R_{dg}). Nous avons identifié les différentes réluctances (à l'exception de R_{dg}) en fonction des principaux paramètres géométriques. Il est donc possible de calculer en fonction des paramètres géométriques et de la réluctance R_{dg} la réponse du capteur. Ce calcul est trop lourd pour être mené de façon analytique. Seul, un logiciel de traitement mathématique (Mathcad) permet de conduire ce type de calculs

Pour comprendre l'influence d'une dissymétrie sur la réponse du capteur, nous allons estimer la sensibilité du capteur aux différentes réluctances. Ceci peut être fait en faisant le développement de la réponse du capteur aux différentes réluctances.

La réponse du capteur est donnée par l'expression $f(\theta_r, R_{eg}, R_{ed}, R_{afg}, R_{afd}, R_{gd})$ (expression 3.10). Lorsque le capteur est parfait ($R_{ed} = R_{eg}$ et $R_d = R_g = R_p$), la réponse peut se mettre sous la forme :

$$f(\theta_r) = K \cdot \theta_r$$

En faisant le développement limité au premier ordre de la réponse par rapport à une des réluctances (R_{ed} , R_{eg} , R_{afd} , R_{afg}), on montre que la réponse du capteur peut être mise sous la forme suivante :

$$f(\theta_r) = K \cdot \theta_r + K \cdot (\Delta_Z + \Delta_K \cdot \theta_r + \Delta_L \cdot \theta_r^2) \quad (3.14)$$

Donc lorsqu'il y a une dissymétrie du capteur, entraînant une dissymétrie des réluctances

d'entrefer (R_{ed} , R_{eg}) ou/et de "fuite" (R_{afd} , R_{afg}), la réponse du capteur est modifiée par rapport au capteur parfait. Le "zéro" du capteur est décalé (Δ_Z), la sensibilité du capteur change (Δ_K), et une non-linéarité du premier ordre apparaît Δ_L . Dans le tableau suivant, nous donnons les expressions des trois termes de défauts (défaut de zéro, de pente, de linéarité) pour une dissymétrie des réluctances d'entrefer et de fuite.

	$R_{ed} \neq R_{eg}$	$R_{afd} \neq R_{afg}$
Δ_Z Décalage de zéro en angle réduit	$\Delta R_e \cdot \frac{R_p}{4} \cdot \left(\frac{1}{R_{af}} + \frac{2}{R_{gd}} \right)$	$\Delta R_{af} \cdot \frac{R_p}{4 \cdot R_{af}}$
Δ_K Variation de pente en %	$\frac{R_p^2}{R_e \cdot R_{gd}} - \Delta R_e \cdot \frac{R_e \cdot R_{gd}}{\left(1 + \frac{2 \cdot R_p}{R_{gd}}\right)}$	$\frac{R_p^2}{R_{af} \cdot R_{gd}} - \Delta R_{af} \cdot \frac{R_{af} \cdot R_{gd}}{\left(1 + \frac{2 \cdot R_p}{R_{gd}}\right)}$
Δ_L Erreur de linéarité en (angle réduit) ²	$-\Delta R_e \cdot \frac{R_p}{\left(1 + \frac{2 \cdot R_p}{R_{gd}}\right)}$	$-\Delta R_{af} \cdot \frac{R_{af}}{\left(1 + \frac{2 \cdot R_p}{R_{gd}}\right)}$

Tableau : Expression du décalage de zéro, de la variation de la sensibilité, et de la non linéarité pour un capteur dissymétrique.

$$\text{Avec } \Delta R_e = \frac{R_{eg} - R_{ed}}{R_{ed}} \text{ et } \Delta R_{af} = \frac{R_{afg} - R_{afd}}{R_{afd}}$$

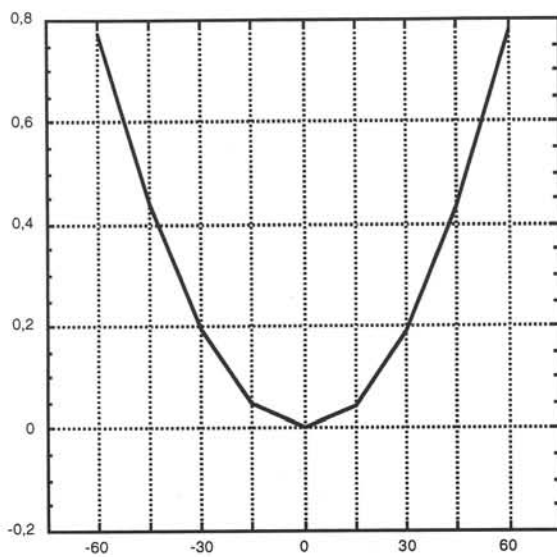
On rappelle que $R_p = (R_e // R_{af})$

En pratique, seulement le terme de non-linéarité (Δ_L) est pénalisant pour le capteur. En effet, la variation de pente ou le décalage de zéro suite à dissymétrie d'assemblage du capteur sont facilement compensables par un étalonnage du capteur. Le défaut de non-linéarité est lui a priori non compensable.

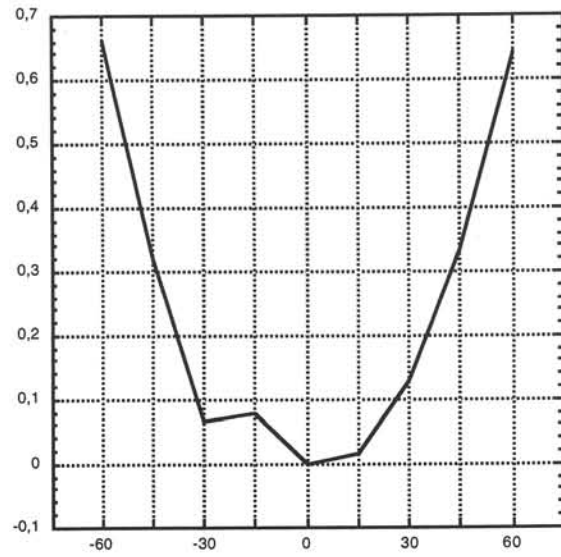
On peut remarquer que les deux termes Δ_L du tableau sont complémentaires. Lorsque l'on réduit l'influence des entrefer de mesure, on augmente l'influence des entrefer principaux (et vice versa).

1. Entrefer de mesure

Nous allons présenter en parallèle les résultats du modèle analytique (exploité avec Mathcad), et de modélisation par éléments finis. Nous présentons ainsi l'influence d'une dissymétrie sur les épaisseurs des entrefers de mesure (entrefer droit = 1mm, entrefer gauche 0,9mm). Nous présentons l'erreur de linéarité (les courbes), et les valeurs du décalage de zéro et de la variation de sensibilité du capteur par rapport au symétriques (les deux entrefers de mesure = 1mm).



Résultat du modèle analytique
(exploité avec Mathcad)



Résultats éléments finis (Flux3d)

Figure 3.9 : Erreur de linéarité (degrés) pour une dissymétrie des entrefers de mesure (1 mm et 0,9mm)

	Δ_z (degrés)	Δ_k (%)
Flux3d	-8,9	0,6
Analytique	-9,6	0,7

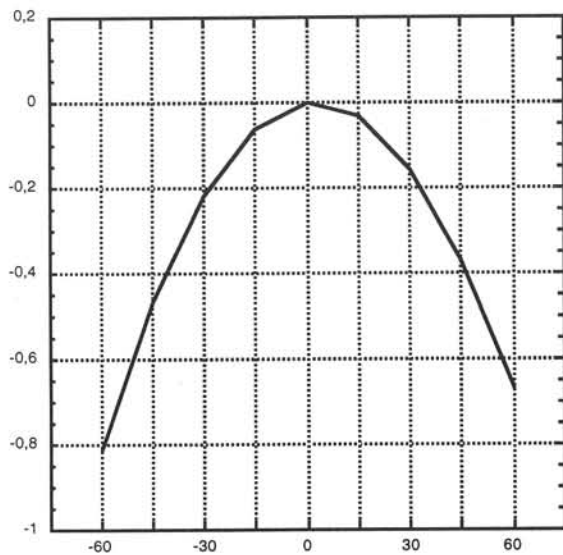
Tableau : Décalage de zéro et variation de la sensibilité pour une dissymétrie des entrefers de mesure.

Les résultats du modèle analytique sont cohérents avec les résultats donnés par la modélisation éléments finis (Flux3d). Sur une plage de mesure de 120 degrés, et pour une dissymétrie

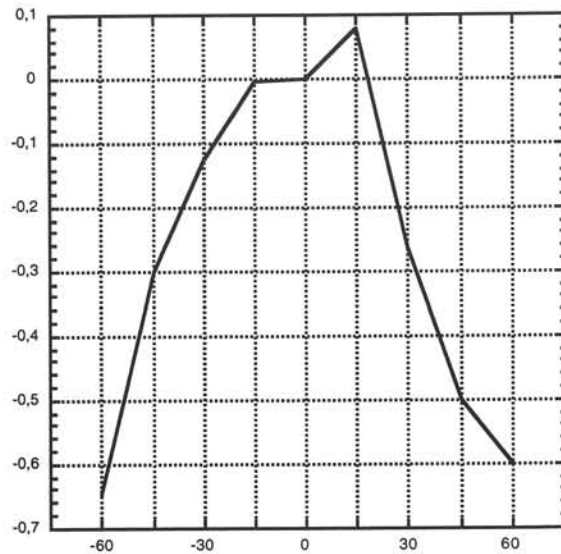
importante des entrefers de mesure (10%), l'erreur de linéarité reste faible.

2. Entrefer principal

Nous présentons les résultats obtenus suite au décalage d'une des pièces polaires supérieures vers le haut. Les entrefers principaux, dans lesquels se déplace l'aimant permanent, ne sont plus identiques entre la partie gauche et la partie droite du capteur (entrefer principal gauche = 6,25mm, entrefer principal droit = 6mm). Nous donnons les courbes d'erreur de non-linéarité (figure 3.10), le tableau pour le décalage de zéro et la variation de pente.



Résultat du modèle analytique
(exploité avec Mathcad)



Résultats éléments finis (Flux3d)

Figure 3.10 : Erreur de linéarité (degrés) pour une dissymétrie des entrefers principaux (6,25mm et 6mm)

	Δ_z (degrés)	Δ_k (%)
Flux3d	-2,4	-1,6
Analytique	-1,3	-0,6

Tableau : Décalage de zéro et variation de la sensibilité pour une dissymétrie des entrefers principaux.

On constate que le modèle analytique sous-évalue les valeurs de non-linéarité, de la variation de sensibilité, et du décalage de zéro. Il est intéressant de remarquer que la non-linéarité est faible devant la plage de mesure. On peut donc dire que la linéarité du capteur n'est pas trop affectée par un défaut d'assemblage.

III.5. Les mesures (SAGEM)

Nous allons présenter les résultats de mesure fait par la société Sagem de Montluçon sur un prototype. Nous comparons les résultats de mesure avec les résultats d'une modélisation par éléments finis (validation des modèles). Puis nous discuterons sur les phénomènes mis en évidence par les mesures non-visibles sur les modélisations (hystérésis, non-linéarité liée à l'aimant permanent).

III.5.1. Validation des modèles

Nous donnons les résultats d'une modélisation par la méthode des éléments finis (Flux3d) et les mesures sur le prototype correspondant (Figure 3.11). Les mesures présentées ont été faites avec deux aimants différents (différents fabricants). Nous donnons les courbes d'inductions dans les entrefers de mesure (valeurs mesurées par les sondes de Hall), et la courbe d'erreur de linéarité par rapport à la meilleure droite de la réponse du capteur (sur une plage de mesure ± 60 degrés).

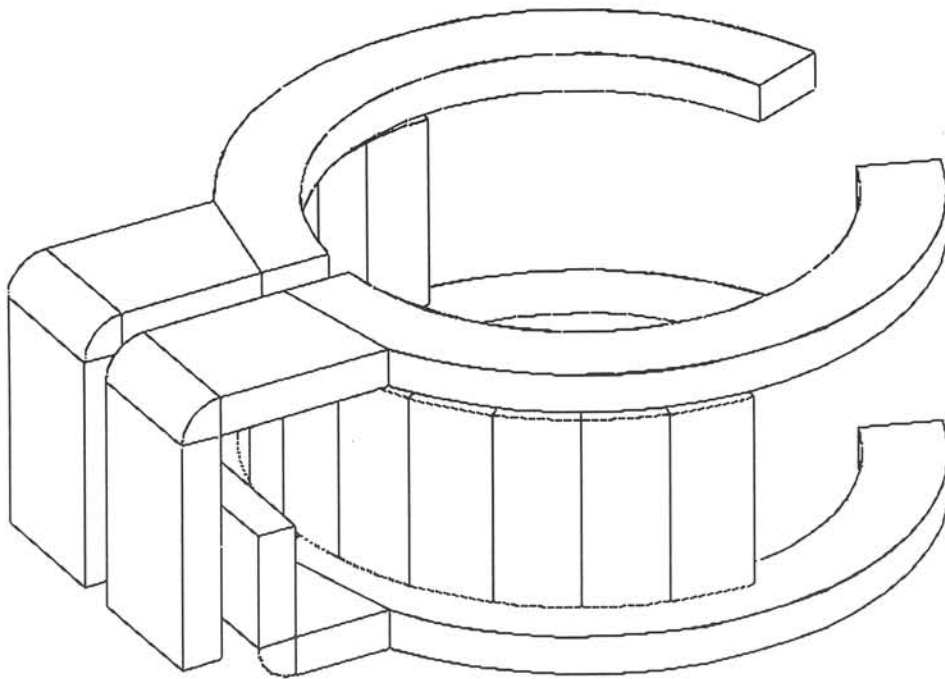
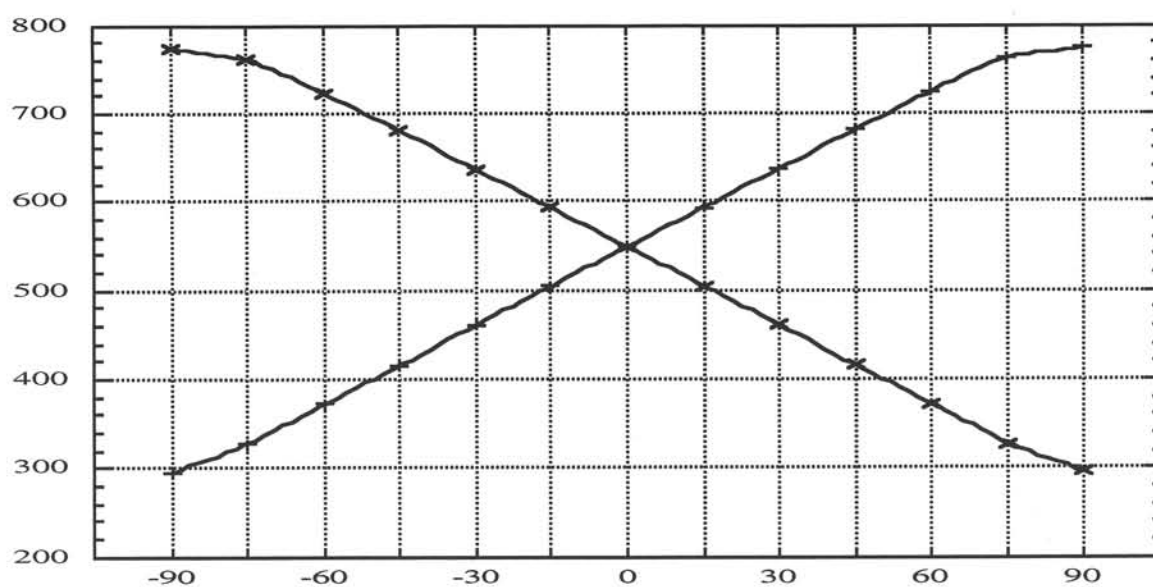
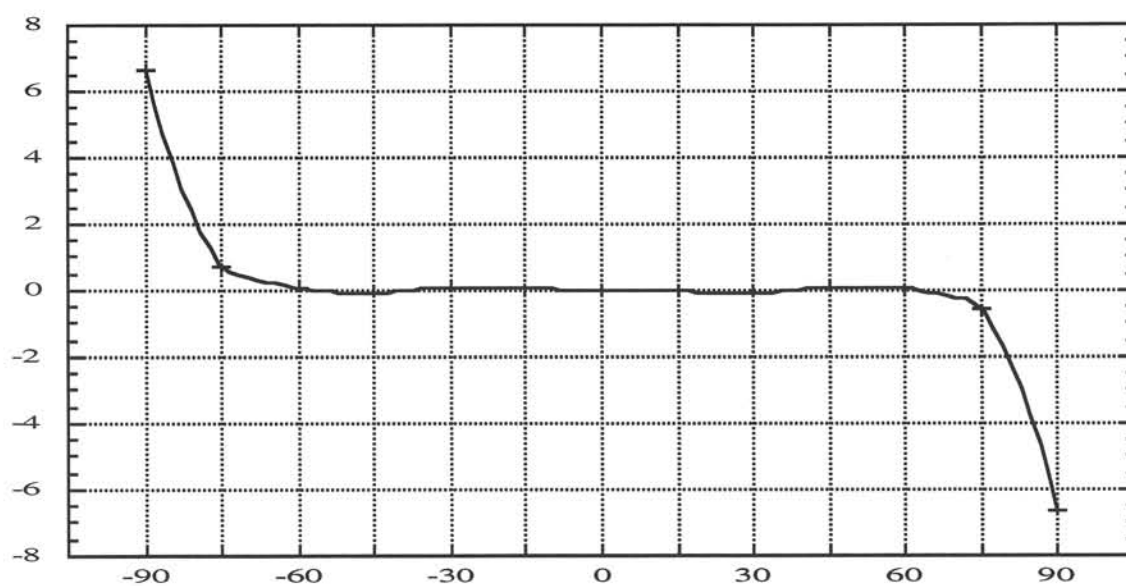


Figure 3.11 : Géométrie du prototype

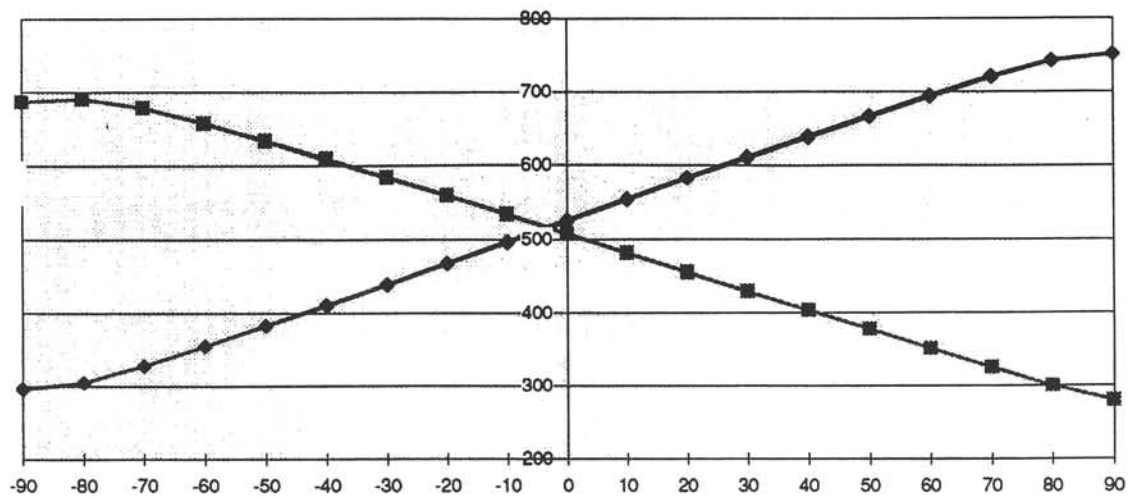


a1: Induction dans les entrefers de mesure (Gauss)

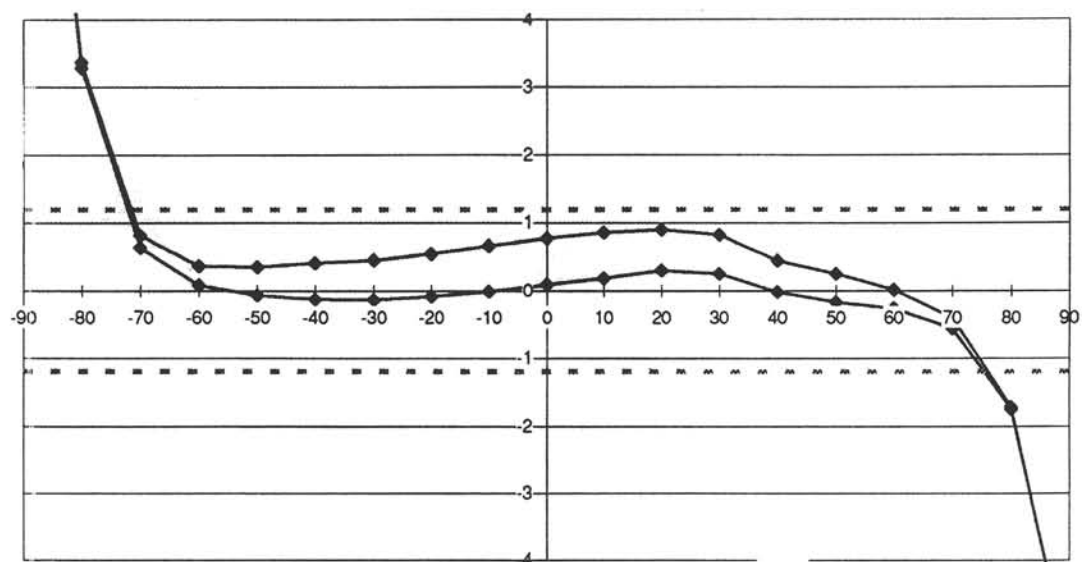


a2: Erreur angulaire totale en degrés par rapport à la meilleure droite sur ± 60 degrés

Figure 3.12: Résultats de modélisation par éléments finis

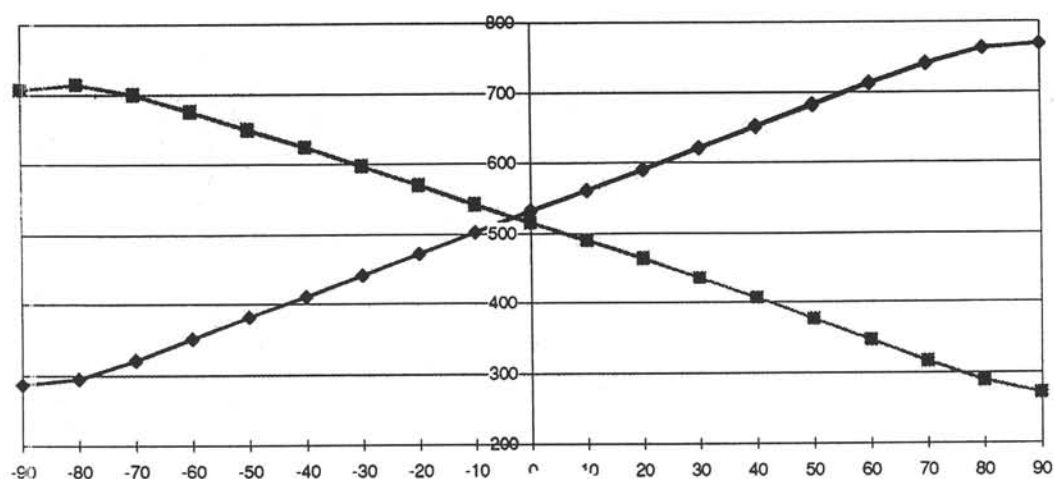


a1: Induction dans les entrefers de mesure (en Gauss)

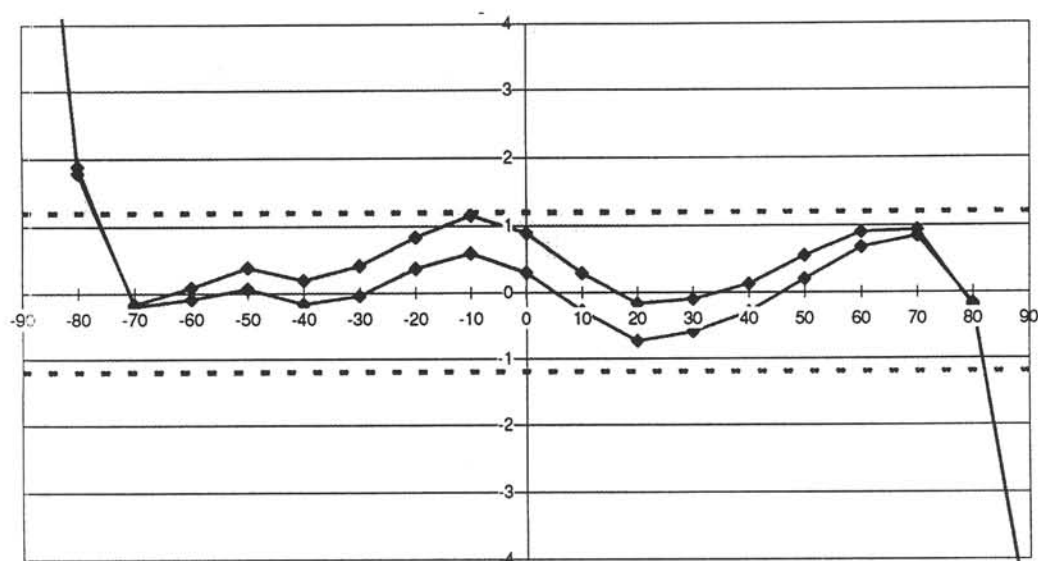


a2: Erreur angulaire totale en degrés par rapport à la meilleure droite sur ± 60 degrés

Figure 3.13: Résultat de mesure (SAGEM) sur prototype 1



a1: Induction dans les entrefers de mesure (en Gauss)



a2: Erreur angulaire totale en degrés par rapport à la meilleure droite sur ± 60 degrés

Figure 3.14: Résultat de mesure (SAGEM) sur prototype 2

	Prototype 1	Prototype 2	Calcul Flux3d
θ_0	190,5	186,18	186,6
	190,55	186,34	
Hystérésis	0,69	0,7	-
Erreur de zéro	0,09	-0,54	0,013

Tableau : Résultats des mesures et de la modélisation correspondante

On remarque, à l'exception de l'hystérésis, une grande similitude entre les mesures du prototype 1 et la modélisation par la méthode des éléments finis. On retrouve les mêmes effets d'extrémités (augmentation brusque de l'erreur de linéarité aux alentours de 75 degrés). Les facteurs d'échelles de la modélisation et des mesures sur le prototype sont sensiblement identiques.

Les mesures mettent en évidence deux problèmes non-observés sur les modélisations :

- Un hystérésis sur la réponse du capteur.
- Une non-linéarité fonction de l'aimant permanent utilisé.

L'hystérésis a pour origine l'hystérésis des caractéristiques du matériau des pièces ferromagnétiques. Plusieurs mesures ont montré que l'hystérésis de la réponse du capteur était proportionnel au champ coercitif du matériau ferromagnétique. Pour réduire cet hystérésis, il y a deux méthodes. La première consiste à augmenter les champs démagnétisants dans les pièces ferromagnétiques. Il faut pour cela augmenter les entrefers (entrefers de mesure et épaisseur de l'aimant permanent), réduire la longueur des lignes de champ dans les pièces ferromagnétiques, et augmenter les sections de passage du flux. Cette méthode est en pratique difficile à mettre en oeuvre. Une autre solution consiste à utiliser un matériau ayant un faible champ coercitif.

Les mesures ont montré la présence d'une non-linéarité pour certain aimant permanent. Cette non-linéarité a pour origine une aimantation de l'aimant permanent inhomogène. Ceci est le cas pour des aimants permanent avec liant plastique lorsque la poudre magnétique est répartie de façon non homogène par rapport au liant plastique. Le capteur lit la variation de l'induction lorsque l'aimant permanent tourne de façon identique à la lecture d'une bande magnétique.

III.6. Conclusion

Nous avons au cours de ce chapitre étudié un capteur original à aimant permanent et à circuit magnétique constant. Nous avons pour cela développé un modèle analytique basé sur la notion de circuit magnétique. Ce modèle nous a permis de dimensionner le capteur en fonction notamment des sondes de Hall.

L'étude réalisée a montré la bonne linéarité de ce type capteur sur une plage de mesure de 120 degrés (modélisation par éléments finis et mesures) et sa faible sensibilité aux défauts géométriques (modélisation par éléments finis).

Cette méthode d'étude, et ce type de modèle restent valables pour tous les capteurs à aimants permanents et à circuit magnétique variable.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Cette étude nous a permis de classer les différents capteurs existants en 4 grandes familles. Chacune de ces familles de capteurs magnétiques de position a des caractéristiques qui leurs sont propres. Nous avons choisi de développer une famille de capteurs dont les caractéristiques nous ont semblé intéressantes et dont le nombre de réalisations connues était faible. Une étude systématique des formes et des aimantations possibles pour les aimants permanents a permis de retrouver les capteurs existants (capteur du brevet Oudet) et de mettre en évidence des structures originales. Ces capteurs présentent les caractéristiques propres à cette famille (réponse naturellement linéaire et faible sensibilité dans le positionnement des différentes pièces) et de plus une faible sensibilité aux variations de température par l'utilisation d'une mesure différentielle relative. Ces nouveaux capteurs ont fait l'objet du dépôt d'un brevet avec la société SAGEM. Ils sont bien adaptés pour des capteurs fonctionnement dans des conditions sévères (température et poussière, vibration) et leur structure simple permet d'espérer un coût de réalisation relativement faible. Nous avons utilisé une méthode pour appréhender le développement de ce type de capteur à l'aide d'un modèle du type circuit magnétique. Cette approche peut être utilisée pour tous les capteurs à aimants permanents et à circuit magnétique variable. Nous pouvons appliquer cette expérience pour d'autres capteurs.

Nous avons limité notre étude aux capteurs de position angulaire pour des grandes plages de fonctionnement. Il est possible d'étendre cette étude à des capteurs fonctionnant sur une plage de mesure sur un tour complet. Nous donnons en annexe un exemple de réalisation de capteur de position fonctionnant sur 360 degrés. Il est possible de concevoir un capteur pour une faible plage de mesure (de l'ordre de quelques degrés). Ce type de structure de capteur est intéressant pour la réalisation de couplemètre. Nous donnons en annexe un exemple de réalisation de capteur pour une plage de mesure de 10 degrés et son utilisation pour la réalisation d'un couplemètre.

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

- [ADEN96] ADENOT, S. YONNET, J.P. FOGGIA, A. Angular position sensors with permanent magnets. Fourteenth international workshop on rare-earth magnets and their application, september 1996.
- [ADEN96] ADENOT, S. YONNET, J.P. FOGGIA, A. Capteurs angulaires magnétiques. 7TH international conference on ferrites, september 1996.
- [ASCH91] ASCH, P. Les capteurs en instrumentation industrielle. Paris: Dunod, 1991. ISBN 2-10-000220-1.
- [BLAC92] BLACHE, C. Contribution:à l'étude des capteurs linéaires de déplacement à aimants; Application au roulement capteur d'effort. Thèse doct-ing: Université de Savoie, 1992.
- [DOBL91] DOBLER, K. HACHTEL, H. Device for determining a length of linear movement or an angle of rotation of machine part. Brevet, USA, n°5.025.213, 1991.
- [DOBL92] DOBLER, K. HACHTEL, H. Measuring arrangement having axially and radially offset sensor coils for contactless determination of rotation angle. Brevet, USA, n°5.107.212, 1992.
- [DOBL92] DOBLER, K. HACHTEL, H. Measuring device for determination of rotary angle. Brevet, USA, n°5.175.497, 1992.
- [FIOR88] FIORI, D. Inductance coil sensor. Brevet, USA, n°4.777.436, 1986.
- [FIOR89] FIORI, D. Displacement sensor having multiplexed dual tank circuits. Brevet, USA, n°4.841.245, 1989.
- [HAUB87] HAUBNER, G. Transmetteur électrique de déplacement notamment pour la mise en oeuvre de la commande de la boîte de vitesses, l'injection de carburant ou analogues. Brevet, France, n°2.602.047, 1987.
- [HERE93] HEREMANS, J., Solid state magnetic field sensors and applications. Journal of Physics D, 1993, vol 26, p. 1149-1168.
- [ICHI88] ICHIKAWA, W. MATSUKI, S. MARUYAMA, T. Rotational position detection device. Brevet, USA, n°4.743.786, 1988.

- [JUFE95] JUFER, M. Traité d'électricité. Lausanne: Presses polytechniques et universitaires romandes, 1995. ISBN 2-88074-285-4.
- [KLEI90] KLEINHANS, J. Induktiver stellungsgeber. Brevet, Européen, n°0.447.653, 1990.
- [KLIM83] KLIMSTRA, J. Piston position detection having a metal cylinder rotating about an excentric axis. Brevet, USA, n°4.401.946.
- [KNET86] KNETSCH, K. KÜHNE, W. Method and apparatus for using spring-type resistive elements in a measurement bridge circuit. Brevet, USA, n°4.631.478, 1986.
- [KOH88] KOHN, D. FRANK, P. SCHILLINGER, J. Einrichtung zur messung einer physikalischen gröbe und insbesondere zur messung von abständen. Brevet, Allemand, n°36.35.787.1, 1988.
- [LEMA89] LEMARQUAND, G. Capteur inductif de position angulaire. Brevet, France, n°2.644.240, 1990.
- [LEMA90] LEMARQUAND, G. LEMARQUAND, V. Annular magnet position sensor. IEEE Transactions on magnetics, 1990, Vol. 26, n° 5, p. 2041-2043.
- [LEMA92] LEMARQUAND, G. LEMARQUAND, V. Inductive absolute angular position sensor. IEEE Transactions on magnetics, 1992, Vol. 28, n°5, p.2199-2201.
- [LINN80] LINN, K.O. JANSCHKE, W. ZABLER, E. Indicateur à bague de court circuit magnétique pour detecter le déplacement linéaire ou angulaire d'un élément de construction. Brevet, Européen, n°8026594, 1980.
- [MEHN94] MEHNERT, W. STRASSE, G. Inductive position indicator for monitoring the relative positions of two mutually movable bodies. Brevet, USA, n°5.323.109, 1994
- [OLSE75] OLSEN, E.O. Electro-magnetic position transducer for thermo-electric linear motor force rebalance system . Brevet, USA, n°3.864.614, 1975
- [OUDE90] OUDET, C. PRUDHAM, D. Capteur magnétique de position et de vitesse à sonde de Hall. Brevet, France, n°2.670.286, 1990
- [PIAT96] PIATON, J. ADENOT, S. YONNET, J.P. FOGGIA, A. Capteur magnétique de position. Brevet, France, n° 96 03990, déposé le 29 Mars 1996.
- [ROHR91] ROHRBACH, C. Induktiver Winkelaufnehmer. Brevet, Allemand,

n°41.02.478.8, 1991

[ROTE41]

ROTTERS, H.C. Electromagnetic devices. New York: John Wiley & Sons, Inc.
London: Chapman & Hall, Limited, 1941.

ANNEXES

Annexe 1 : Formules de Roters [ROTE41]

Ces formules permettent d'estimer la réluctance (ou la perméance) entre deux pièces ferromagnétiques. Le principe est de décomposer le volume de passage du flux entre deux pièces ferromagnétiques (deux équipotentiels magnétiques) en tubes d'induction élémentaires. Des formules empiriques ont été développées pour estimer les perméances de ces tubes d'inductions. La perméance totale entre les deux pièces ferromagnétiques est alors la somme des perméances élémentaires.

Les tubes d'induction élémentaires sont des parallélépipèdes, des demi-cylindres, des demi-anneaux et des quarts de sphères. Nous présentons en figure A1-1, une décomposition partielle entre deux pièces ferromagnétiques de forme parallélépipède.

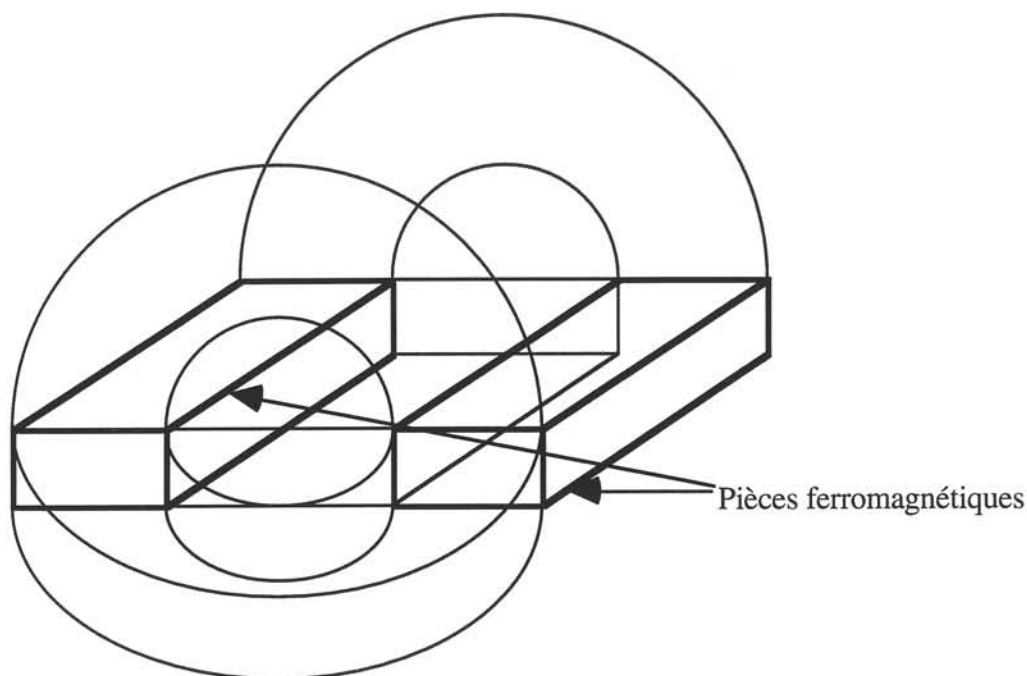
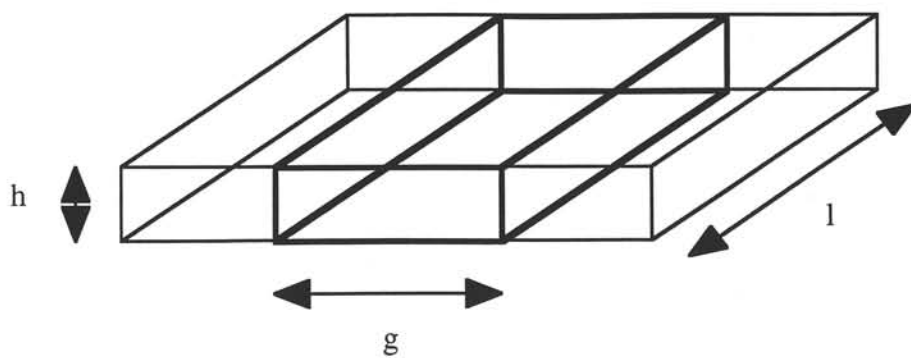


Figure A1-1 : Décomposition de la réluctance entre deux pièces ferromagnétiques selon Roters [ROTE41]

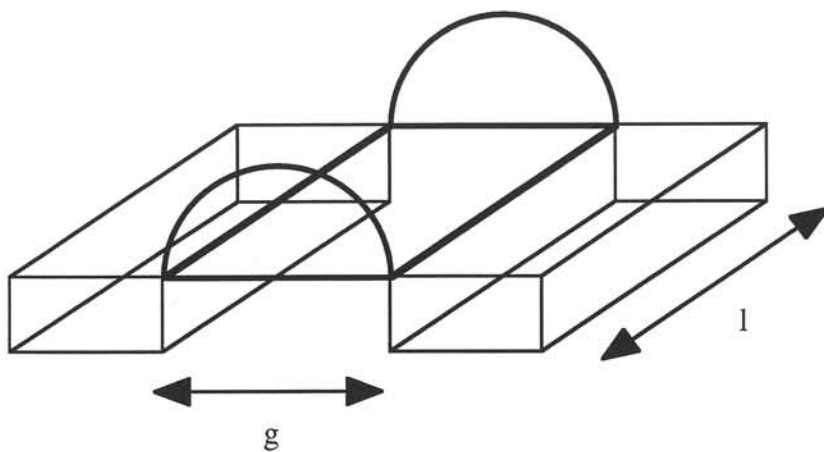
Nous donnons ci-dessous les formules des perméances des volumes élémentaires.

Le parallélépipède



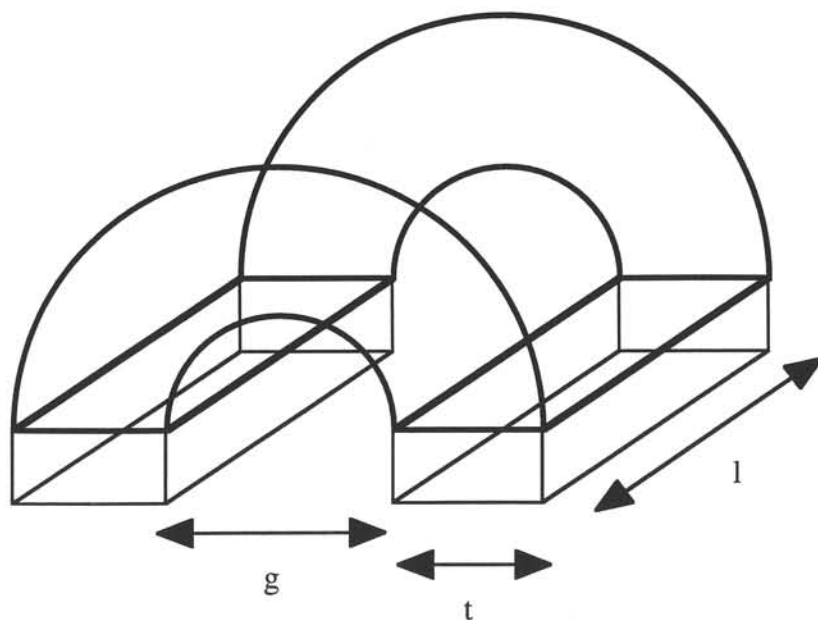
$$\mathcal{P} = \mu_0 \cdot \frac{h \cdot l}{g}$$

Le demi-cylindre



$$\mathcal{P} = \mu_0 \cdot 0,26 \cdot l$$

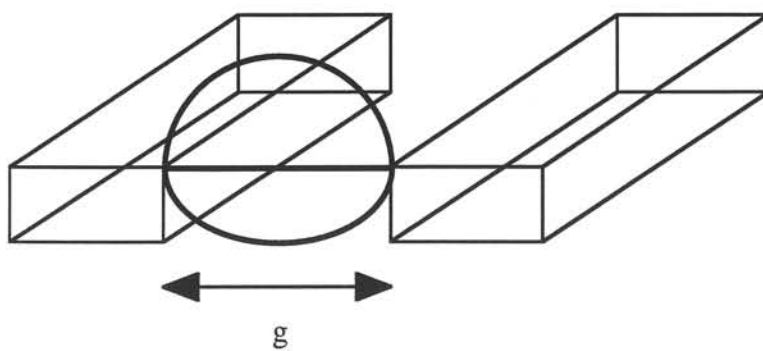
Le demi-anneau



$$\mathcal{P} = \mu_0 \cdot \frac{0,64 \cdot l}{\left(\frac{g}{t} + 1\right)}$$

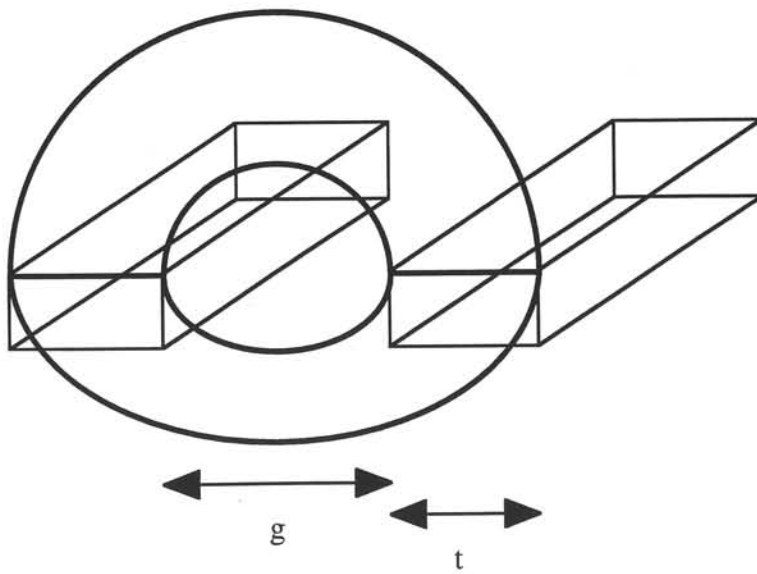
lorsque $g < 3 \cdot t$ alors $\mathcal{P} = \mu_0 \cdot \frac{1}{\pi} \cdot \ln\left(1 + \frac{2t}{g}\right)$

Le quart de sphère



$$\mathcal{P} = \mu_0 \cdot 0,077 \cdot g$$

Le quart de sphère "creuse"



$$\mathcal{P} = \mu_0 \cdot \frac{t}{4}$$

Etude de capteurs magnétiques de position angulaire

Dans une grande variété d'applications, les capteurs de position sont requis pour contrôler un processus. Pour ce type de capteurs, il existe plusieurs technologies: codeurs optiques, potentiomètres électriques et capteurs magnétiques. Toutes ces technologies ont leur champs d'applications et aussi leur prix. Quand un faible prix et une production en très grande série sont requis beaucoup de ces technologies de capteurs ne respectent ces conditions. Par exemple, le potentiomètre donne un signal bruité par le contact électrique glissant et a une faible durée de vie. Par contre, les capteurs magnétiques sont intéressants par leur fonctionnement sans contact.

On commence par exposer les principes des capteurs magnétiques. Les principales structures de capteurs magnétiques sont présentées. Une nouvelle structure de capteur à aimants permanents et à sonde de Hall est proposée. Ces nouveaux capteurs ont une faible sensibilité aux défauts de réalisation des pièces du circuit magnétique (aimant, pièces ferromagnétiques) et une faible sensibilité à la température. Dans la dernière partie de la thèse, nous comparons les résultats d'une modélisation numérique (éléments finis) et analytique avec ceux mesurés sur un prototype.

Study of magnetic angular position sensors

In a great variety of applications, position sensors are required to control a process. Many types of sensors exist such as optical, electrical and even magnetic devices. All of them have their own fields of application and also their price. When low prices and mass production sensors are required most of the mentioned equipments do not fill these conditions. For instance potentiometer sensors give a noisy signal because of the moving contact and are subjected to a short life time. On the other hand, magnetic sensors are more interesting because of their distance actions that do not require neither a moving contact nor a dust free environment.

Firstly the principle of magnetic sensors is exposed. Then the main magnetic position sensors are presented. A novel structure of permanent magnet position sensor are proposed. These new sensors have a low sensibility for an error form of magnetic circuit elements (magnet, iron pieces) and a low temperature sensitivity. In the last part, we present result of analytical and numerical models (finite elements), and we compare these results with experimental results.

Mots clés : modélisation, capteur angulaire, aimant permanent, sonde de Hall, mesure différentielle

