



HAL
open science

CONCEPTION ET OPTIMISATION D'ACTIONNEURS ELECTROMECHANQUES DANS LE CADRE DE LA PROTECTION BASSE TENSION

Edouard Dezille

► **To cite this version:**

Edouard Dezille. CONCEPTION ET OPTIMISATION D'ACTIONNEURS ELECTROMECHANQUES DANS LE CADRE DE LA PROTECTION BASSE TENSION. Sciences de l'ingénieur [physics]. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2008. Français. NNT: . tel-00323721

HAL Id: tel-00323721

<https://theses.hal.science/tel-00323721>

Submitted on 23 Sep 2008

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.

*Rien n'est plus dangereux
que la certitude d'avoir raison (François Jacob)*

A mes parents...

REMERCIEMENTS

Cette thèse s'est déroulée dans le cadre d'un contrat CIFRE en partenariat entre le G2ELAB et la société HAGER. Je remercie ces deux organismes pour leur support matériel et financier.

Je remercie Monsieur Mohammed BENBOUZID, professeur à l'université de Brest pour avoir présider le jury de cette thèse.

Messieurs Jean-Paul VILAIN, professeur à l'université de Compiègne et Christophe ESPANET, professeur à l'université de franche compté pour avoir accepté d'être les rapporteurs ce cette thèse.

Je tiens à remercier spécialement Frédéric WURTZ et Laurent GERBAULT qui sont les points d'entrée de cette thèse. Merci de m'avoir permis de découvrir ce métier à travers mon DEA et de m'avoir ouvert les portes de la conception.

Merci à Albert FOGGIA pour m'avoir accompagné pendant toute la durée de ma thèse et pour tous ses bons conseils.

Merci à l'équipe MAGE pour m'avoir aidé aussi bien intellectuellement que psychologiquement pendant ma première année de thèse en particulier Guillaume, Cédric, Dimitrios, Lalao, Hichem, Loïc, Benoit, Bertrand et tout ceux que j'ai dû oublié.

Merci aux Alsaciens de m'avoir accueilli, merci pour m'avoir permis de briller au Foot et de vous éclabousser de mes extraordinaires dribbles et autres passements de jambes tous les jeudis. Je ne remercie pas les fous qui me font souffrir tous les lundis et qui me rappellent que nous avons énormément de petits muscles cachés partout dans le corps.

Merci au SEDI pour son accueil et un merci tout particulier au Labo. C'est réellement un plaisir de travailler dans cette ambiance et je suis content de faire parti de cette communauté cachée (même si je vais terminer à la cave).

Un merci particulier à mes voisins de bureau, Stéphane, Criquet, Nicolas, Christian, Franck, Daniel mais également à ceux qui sont partis (Michel et Karine).

Une dédicace spéciale à Thierry qui est toujours de bon conseil et qui n'hésite pas à faire 10h de voiture dans une journée pour assister à une soutenance de thèse.

Un merci particulier à Pierre avec qui j'ai beaucoup appris et je pense que c'est loin d'être terminé.

Une thèse ne se passe bien que si on a le soutien de sa famille et j'ai la chance d'avoir une grande famille. Merci à mes parents qui m'ont toujours soutenu et si j'en suis là

maintenant, c'est surtout grâce à eux. Merci à ma belle maman et mon beau papa, Aude, JMi, Annette, Gwena, Antho, Vincent pour leur soutien.

Un ENORME merci à Magali qui est maintenant ma femme. Ce n'est pas toujours facile de supporter les coups de stress, les sauts d'humeurs et elle a été merveilleuse.

Enfin, je termine par celui sans qui rien n'aurait été aussi bien, que ce soit d'un point de vue professionnel mais aussi d'un point de vue plus personnel. Je remercie donc mon vénérable et ex-chef, Patrice JOYEUX. Merci de m'avoir aidé dans mes travaux, merci pour avoir donné de ton temps, avoir partagé ton savoir. Merci pour les grandes discussions sur notre tableau blanc adoré. Merci pour l'intégration en tant que « stagiaire » préféré. J'espère qu'on continuera sur cette voie là.

SOMMAIRE

SOMMAIRE	2
INTRODUCTION	4
CHAPITRE I - LES DANGERS DU COURANT ET LA PROTECTION DIFFERENTIELLE	9
1 - INTRODUCTION	9
2 - GENERALITES SUR LES DANGERS DU COURANT ELECTRIQUE ET LA PROTECTION ELECTRIQUE.....	9
2.a - Les risques de l'électricité.....	9
2.b - Les différents contacts électriques.....	11
2.c - La protection électrique	11
3 - LA PROTECTION DIFFERENTIELLE	12
3.a - Définition et principe de fonctionnement de la protection différentielle	12
3.b - Détection du courant résiduel de défaut	14
3.c - Transformation du courant.....	15
3.d - Comparaison avec un seuil et ouverture du circuit électrique	17
4 - LE RELAIS POLARISE HAUTE SENSIBILITE.....	18
4.a - Composition et fabrication du relais HAGER	18
4.b - Principe de fonctionnement de l'actionneur.....	19
4.c - Autres méthodes de fonctionnement.....	21
4.d - Bilan des forces sur la palette	23
4.e - Réglage du relais.....	24
5 - OBJECTIFS DE L'ETUDE.....	25
5.a - Définition des objectifs.....	25
5.b - Cahier des charges du relais différentiel	26
6 - METHODE DE CONCEPTION.....	26

7 - CONCLUSION	27
CHAPITRE II – METHODOLOGIE DE CONCEPTION D'UN NOUVEL ACTIONNEUR ELECTROMECHANIQUE	31
1 - INTRODUCTION	31
2 - ETUDE DU RELAIS EXISTANT	33
2.a - Modélisation fonctionnelle.....	33
2.b - Analyse causale.....	47
2.c - Contraintes de fabrication	51
2.d - Conclusion sur l'étude menée à partir de la méthodologie TRIZ.....	51
3 - VERS UNE NOUVELLE STRUCTURE D'ACTIONNEUR ELECTROMECHANIQUE	53
3.a - Le cahier des charges de la nouvelle structure	53
3.b - Structure actuelle sans rectification	54
3.c - Actionneurs à entrefers plus importants.....	55
3.d - Utilisation d'actionneurs à circuits magnétiques fermés	58
4 - CONCLUSION	59
CHAPITRE III – MODELISATION ET OPTIMISATION DES ACTIONNEURS	63
1 - INTRODUCTION	63
2 - IMPEDANCE D'ACTIONNEURS A CIRCUIT MAGNETIQUE FERME ..	63
2.a - Les actionneurs étudiés	63
2.b - Les réseaux de réductances	64
2.c - Variation de l'impédance en fonction de l'entrefer équivalent.....	69
3 - MODELISATION NUMERIQUE.....	73
3.a - Modélisation FLUX 2D.....	74
3.b - Modélisation FLUX 3D	81

3.c - Utilisation d'un entrefer plus important.....	82
4 - MODELISATION ANALYTIQUE.....	84
4.a - Le modèle réluctant	84
4.b - Intégration d' une partie du cahier des charges dans la modélisation.....	86
4.c - Mise en évidence des difficultés de la modélisation.....	88
4.d - Comparaison avec la modélisation numérique	90
4.e - Optimisation du modèle	92
5 - CONCLUSION	96
CHAPITRE IV – DE LA THEORIE A LA PRATIQUE.....	99
1 - INTRODUCTION	99
2 - FAISABILITE INDUSTRIELLE DE LA STRUCTURE.....	99
2.a - La découpe traditionnelle	99
2.b - Moulage par injection de métal	101
2.c - Fabrication de la bobine	103
3 - REALISATION DE PROTOTYPES.....	104
3.a - Le prototypage.....	104
3.b - L'entrefer.....	105
4 - LES RESULTATS EXPERIMENTAUX.....	108
4.a - Couple et couple différentiel sur la palette	108
4.b - Variabilité de l'impédance en fonction de l'induction de l'aimant.....	110
4.c - Variabilité de l'impédance en fonction de l'entrefer.....	112
4.d - Calcul du nombre d'ampères-tours nécessaires au déclenchement	113
4.e - Bilan sur les résultats expérimentaux.....	114
5 - IMPACT ECOLOGIQUE	114
6 - CONCLUSION	116

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	120
BIBLIOGRAPHIE.....	124
ANNEXE I : ESSAIS ELECTRIQUES DE LA FONCTION DIFFERENTIELLE	128
1 - Courant différentiel important.....	128
2 - Influence de la température	128
3 - Les déclenchements intempestifs	129
ANNEXE II : LES OUTILS UTILISES DE LA METHODOLOGIE TRIZ. 132	132
1 - Les 40 principes inventifs.....	132
2 - Les lois d'évolution	135
ANNEXE III : BREVET H14B84F	140
Dispositif de déclenchement électromagnétique	140
ANNEXE IV : LE REGIME DE NEUTRE [JOY]	158
1 - Introduction	158
1.a - LE NEUTRE (Figure 84).....	158
1.b - LES MASSES (Figure 85).....	158
1.c - LE CONDUCTEUR DE PROTECTION PE (Figure 86)	159
1.d - LA TERRE.....	160
1.e - LA PRISE DE TERRE (Figure 87)	160
1.f - L'ISOLEMENT ELECTRIQUE (Figure 88).....	160
2 - Identification des différents régimes de neutre	161
3 - Régime de neutre TT	162
3.a - Introduction.....	162
3.b - Schéma de principe	162
4 - Régime de neutre TN	164
4.a - Introduction.....	164

4.b - Schéma de principe	164
5 - Régime de neutre IT	167
5.a - Introduction.....	167
5.b - Schéma de principe	167
6 - Choix du type de protection.....	168
RESUME	171
MOTS-CLES	171
TITLE	171
ABSTRACT	171
KEYWORDS	171

INTRODUCTION

INTRODUCTION

La mondialisation entraîne une augmentation de la compétitivité des entreprises. Les industries doivent produire plus, accroître la qualité des produits et diminuer les coûts.

La sécurité des personnes n'échappe pas à cette règle, notamment dans le domaine de la protection électrique. La recherche d'un produit économiquement et techniquement performant passe par l'excellence et la maîtrise technologique. Celles-ci s'appuient sur les connaissances théoriques et expérimentales des concepteurs.

Certains dispositifs de la protection électrique doivent être techniquement très performants. En particulier les actionneurs électromécaniques à haute sensibilité que nous retrouvons dans les interrupteurs différentiels.

Les travaux présentés dans cette thèse ont pour objectifs la conception et l'optimisation d'un actionneur électromécanique. C'est à dire la conservation ou l'amélioration des performances techniques actuelles de l'actionneur en diminuant ses coûts de fabrication. Cette thèse s'est déroulée en partenariat avec l'Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG) et la société HAGER ELECTRO spécialisée dans la protection électrique.

Dans le premier chapitre, nous présenterons les dangers de l'énergie électrique. Nous exposerons ensuite la manière dont l'interrupteur différentiel ou plus précisément l'actionneur électromécanique haute sensibilité nous protège contre les effets néfastes du courant. Nous étudierons alors les technologies existantes. Nous pourrons ensuite définir les différents objectifs de l'étude ainsi que la méthodologie que nous appliquerons.

Le second chapitre propose l'utilisation de la méthodologie TRIZ pour la conception de nouveaux dispositifs. Nous décortiquerons ainsi le fonctionnement de l'actionneur électromécanique en mettant en évidence ses avantages et ses inconvénients. Une analyse causale complètera cette étude pour nous aider à définir les principaux éléments à améliorer. Nous serons ensuite en mesure de proposer des solutions pour l'amélioration de l'actionneur et nous pourrons présenter une structure répondant à une partie du cahier des charges.

L'utilisation de la modélisation numérique dans le troisième chapitre nous permettra d'affiner la nouvelle structure et d'intégrer une partie des solutions proposées dans le second chapitre. Des outils d'optimisation et un modèle analytique nous permettront de perfectionner cette structure.

Le processus industriel permettant la fabrication de nos produits sera alors choisi en fonction de la matière et de la géométrie de notre actionneur. Des prototypes seront ensuite réalisés pour valider les résultats théoriques. L'écologie étant désormais un

paramètre important dans la conception de nouveaux produits, nous évaluerons l'impact écologique de notre produit.

La conclusion générale nous permettra d'établir un bilan du travail proposé, tant sur le point méthodologique que sur le point des résultats obtenus.

CHAPITRE I

Les dangers du courant et la protection différentielle

CHAPITRE I - LES DANGERS DU COURANT ET LA PROTECTION DIFFERENTIELLE.....	9
1 - INTRODUCTION	9
2 - GENERALITES SUR LES DANGERS DU COURANT ELECTRIQUE ET LA PROTECTION ELECTRIQUE.....	9
2.a - Les risques de l'électricité.....	9
2.b - Les différents contacts électriques.....	11
2.c - La protection électrique	11
3 - LA PROTECTION DIFFERENTIELLE	12
3.a - Définition et principe de fonctionnement de la protection différentielle	12
3.b - Détection du courant résiduel de défaut	14
3.c - Transformation du courant.....	15
3.d - Comparaison avec un seuil et ouverture du circuit électrique	17
4 - LE RELAIS POLARISE HAUTE SENSIBILITE.....	18
4.a - Composition et fabrication du relais HAGER	18
4.b - Principe de fonctionnement de l'actionneur.....	19
4.c - Autres méthodes de fonctionnement	21
4.d - Bilan des forces sur la palette	23
4.e - Réglage du relais	24
5 - OBJECTIFS DE L'ETUDE.....	25
5.a - Définition des objectifs.....	25
5.b - Cahier des charges du relais différentiel	26
6 - METHODE DE CONCEPTION.....	26
7 - CONCLUSION	27

CHAPITRE I - LES DANGERS DU COURANT ET LA PROTECTION DIFFERENTIELLE

1 - INTRODUCTION

Ses facilités de transport et de transformation font de l'électricité l'énergie la plus utilisée au monde. Nous l'utilisons quotidiennement pour l'éclairage, les tâches ménagères et les loisirs... Elle devient commune et nous oublions presque que cette énergie invisible peut s'avérer dangereuse pour l'homme. En effet, le corps humain peut être considéré comme un récepteur électrique qui laisse passer le courant. Suivant certains paramètres comme par exemple l'intensité et le temps de passage de ce courant, cette énergie peut provoquer des dommages corporels importants et dans les cas extrêmes entraîner la mort.

Dans ce chapitre, nous évoquerons les différents risques liés à l'usage de l'électricité ainsi que les différentes protections existantes. Nous présenterons alors de façon plus approfondie la protection différentielle. Cela nous permettra ensuite de définir les différents objectifs de cette étude et la méthode que nous allons utiliser.

2 - GENERALITES SUR LES DANGERS DU COURANT ELECTRIQUE ET LA PROTECTION ELECTRIQUE

2.a - Les risques de l'électricité

Les effets de l'énergie électrique sur le corps humain peuvent être très différents car ils dépendent de plusieurs paramètres. Ce sont :

- La résistance du corps humain : elle peut varier de 300Ω (corps immergé) à 5000Ω (peau sèche). Elle est difficile à évaluer car elle dépend entre autres de la nature du contact, de la qualité et de l'hydrométrie de la peau ainsi que de l'intensité du courant électrique. Sur la Figure 1, issue de la spécification technique IEC TS 60479-1, nous pouvons observer la variation de la résistance du corps humain en fonction de la tension et de l'état de la peau.
- La nature du courant (continu ou alternatif) : un courant continu est 3.75 fois moins dangereux qu'un courant alternatif.
- L'intensité du courant
- Le temps de passage du courant dans le corps humain
- Le trajet du courant dans le corps humain (il est plus dangereux s'il passe par le thorax)

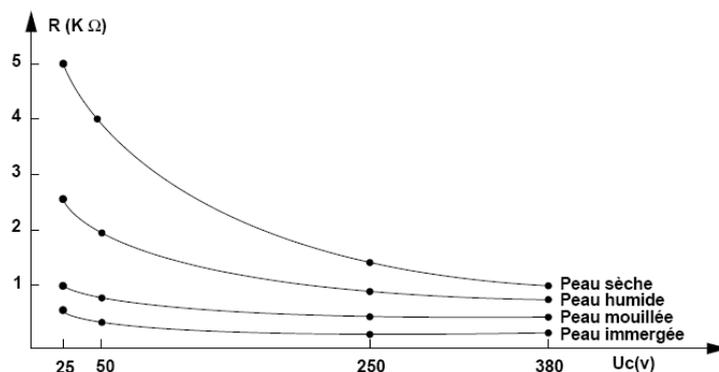


Figure 1 : Résistance du corps humain en fonction de la tension de contact [NOR]

Il faut faire une différence entre une électrisation et une électrocution. Une électrisation désigne les différentes manifestations physiopathologiques (picotements, brûlures, contractures...) dues au passage du courant électrique à travers le corps humain. L'électrocution désigne la mort consécutive à l'électrisation.

Les effets du courant électrique vont du léger picotement (électrisation) à la mort (électrocution). Sur la Figure 2, nous observons les différentes zones des effets du courant alternatif (50Hz) sur les personnes. Ces zones sont issues du rapport IEC60479 et dépendent de la durée de passage du courant et de son intensité.

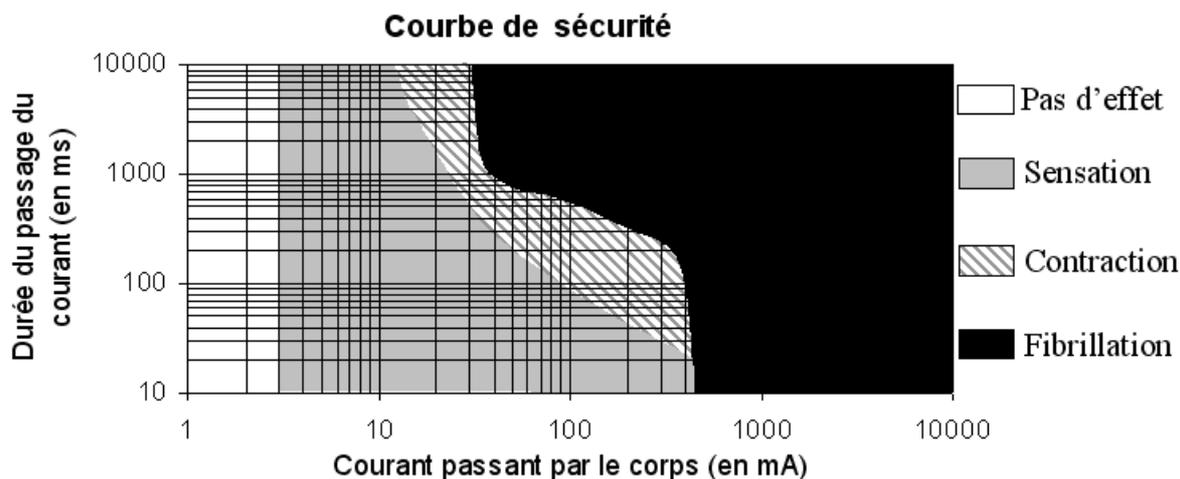


Figure 2 : Courbe de sécurité

Il y a quatre zones. Dans la première zone en blanc, le courant n'a habituellement aucun effet quel que soit son temps de passage. Dans la deuxième zone en gris, l'électrisé ressent en général de légers picotements sans effet physiologique dangereux. La troisième zone rayée procure elle des contractions des muscles pouvant empêcher la victime de lâcher

l'élément sous tension. La dernière zone en noir est extrêmement dangereuse avec des risques importants d'électrocution.

Bien sûr, pour que l'électricité soit dangereuse, il faut être en contact avec elle. Dans le paragraphe suivant, nous allons voir comment l'homme peut se retrouver en contact avec des parties sous tension.

2.b - Les différents contacts électriques

Dans l'habitat, les contacts avec l'énergie électrique se font souvent de deux façons : par un contact direct ou par un contact indirect.

Lors d'un contact direct, la personne entre en contact avec une partie active d'un circuit électrique, c'est à dire des éléments de circuit normalement sous tension. Nous pouvons prendre comme exemple un contact direct avec une phase (voir Figure 3).

Lors d'un contact indirect, la personne entre en contact avec une masse mise accidentellement sous tension comme le montre la Figure 4. Cela se produit par exemple lors d'un défaut d'isolement d'un conducteur à l'intérieur d'un appareil électrique qui entre en contact avec la carcasse métallique de cet appareil. Lorsque la personne va entrer en contact avec la carcasse métallique (masse mise accidentellement sous tension), elle risque une électrisation.



Figure 3 : contact direct [ACR]

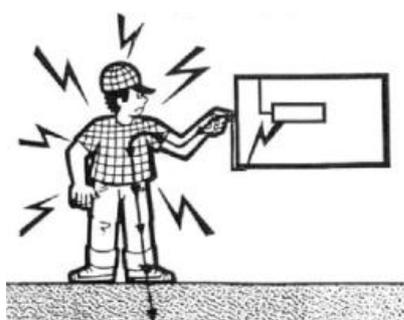


Figure 4 : contact indirect [ACR]

Nous allons maintenant nous intéresser aux moyens qui ont été mis en œuvre pour protéger les personnes mais aussi les biens et équipements contre ces différents risques électriques.

2.c - La protection électrique

Le contrôle et la sécurité lors de l'utilisation de l'électricité par l'homme sont de mieux en mieux assurés. L'amélioration de la sécurité est liée aux réglementations (Normes et Recommandations) et elle est rendue possible par les avancées techniques.

Les systèmes de protection et de contrôle sont indispensables pour les matériels et appareils qui les utilisent, mais ils sont surtout vitaux pour la sécurité des êtres vivants situés à proximité de ces appareils. Il existe trois grands types de protections.

- Protection galvanique : cette protection permet d'isoler électriquement les circuits sûrs des circuits qui ne le sont pas. Cela supprime les risques de courant de défaut à la terre. Nous pouvons prendre comme exemple les transformateurs d'isolement.
- Protection contre les surtensions ce qui entraîne une valeur du courant dans le circuit électrique supérieure à la valeur nominale. Cette protection protège les lignes électriques à des valeurs de courants trop importantes. Un disjoncteur ou un fusible protège contre les surintensités. Dans un régime de neutre IT ou TN, elle protège également les personnes contre les contacts directs. Le régime de neutre ou Schéma de Liaison à la Terre est la manière dont le transformateur d'alimentation et les masses du réseau électrique sont reliés à la terre. Il existe trois principaux types de liaison, IT, TT, TN [INS] (voir Annexe IV : le régime de neutre).
- La protection différentielle : ce type de protection appelé dispositif différentiel résiduel protège les biens et les personnes contre les courants de fuite directs et indirects avec un régime de neutre [INS] TT. Nous développerons son fonctionnement de façon plus détaillée dans le paragraphe qui suit.

3 - LA PROTECTION DIFFERENTIELLE

3.a - Définition et principe de fonctionnement de la protection différentielle

La somme des courants entrant et sortants d'un appareil électrique est nulle. Toutefois, si un courant résiduel de défaut apparaît, cette somme n'est plus nulle. La protection différentielle est là pour protéger les personnes et les biens contre ces courants résiduels de défaut.

Le dispositif différentiel résiduel (DDR), souvent appelé interrupteur différentiel, permet de détecter ce courant résiduel et de couper l'alimentation de l'installation en défaut si ce courant dépasse une certaine valeur.

Nous retrouvons deux technologies de protections différentielles :

- Les produits électroniques qui utilisent la tension du réseau comme source d'énergie. Nous pouvons retrouver ces produits dans différents pays comme aux Etats-Unis ou en Chine. Lorsque la tension d'alimentation est inférieure à une certaine limite (50V en général), les produits ne sont plus fonctionnels.

- Les produits électromécaniques qui fonctionnent indépendamment de la tension du réseau. Ce type de produit utilise l'énergie du courant de défaut pour ouvrir le circuit électrique. Ces produits fonctionnent quelle que soit la valeur de la tension du réseau. Cette technologie est utilisée en Europe et notre travail porte sur ce type de protection.

Nous pouvons décomposer le fonctionnement de la protection différentielle en quatre fonctions principales que nous pouvons visualiser sur le schéma fonctionnel de la Figure 5.

- Détection du courant de défaut
- Transformation du courant de défaut
- Vérification de la valeur du courant de défaut
- Ouverture du circuit électrique en défaut

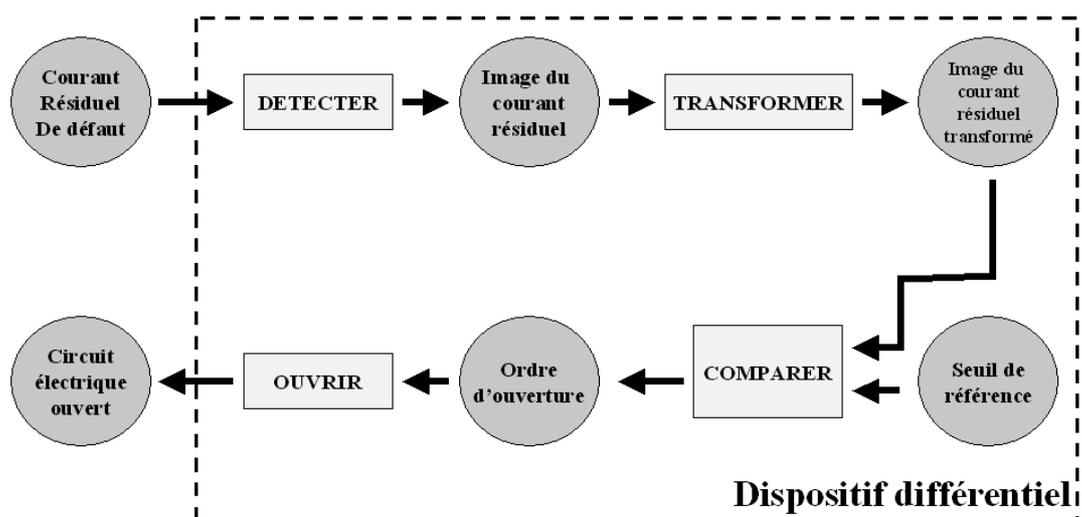


Figure 5 : schéma fonctionnel d'un dispositif différentiel

Le courant résiduel est détecté à partir des conducteurs de courant et à l'aide d'un tore. Nous obtenons alors une image de ce courant résiduel.

Cette image du courant résiduel peut être transformée pour par exemple éviter certains déclenchements intempestifs¹ ou amplifier un signal mesuré. Cela se fait habituellement à l'aide de composants électroniques passifs. Cette transformation du signal dépend du cahier des charges que le produit doit respecter. Elle se fait soit par un filtrage du signal,

¹ Courants de défaut non dangereux : par exemple la foudre, les courants d'appels de moteurs...

soit par une temporisation avant le déclenchement, soit par une association de ces deux solutions.

Une comparaison avec un seuil de référence est ensuite réalisée pour vérifier si le courant résiduel est suffisamment important pour ordonner l'ouverture du circuit électrique. Si le seuil de référence est dépassé, alors le dispositif différentiel ouvre le circuit électrique. Dans la suite de ce chapitre, nous allons détailler plus précisément chacune des fonctions du dispositif différentiel.

3.b - Détection du courant résiduel de défaut

La détection du courant résiduel de défaut se fait à l'aide d'un tore de mesure. La ou les phases ainsi que le neutre sont bobinés sur le tore. Dans la suite de ce mémoire, nous appellerons ces bobines les enroulements primaires. En l'absence de courant de défaut, les flux magnétiques produits par les enroulements primaires s'annulent. Par contre, lorsque qu'un courant résiduel apparaît, un déséquilibre se forme et un flux magnétique se crée à l'intérieur du tore.

Le flux magnétique variable fait alors apparaître une tension aux bornes d'un bobinage secondaire. La Figure 6 nous montre un exemple de tore de mesure d'un circuit monophasé avec les bobines du neutre, de la phase et du secondaire.

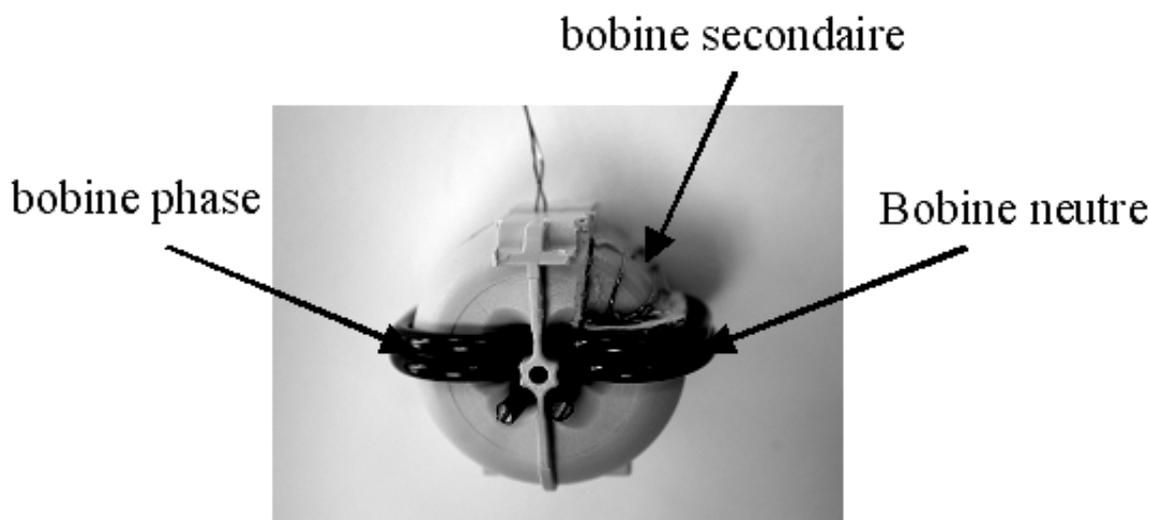


Figure 6 : tore de mesure pour un circuit monophasé

Le nombre de spires de chaque pôle (phase et neutre) est identique et bobiné dans le même sens pour permettre aux ampères tours de s'annuler.

Le tore peut être assimilé à un transformateur (voir Figure 7) mais son fonctionnement est particulier.

Le tore n'est pas utilisé en transformateur de courant car nous voulons un niveau de tension suffisant au secondaire pour faire déclencher le relais. L'induction du tore ainsi que le courant magnétisant ne sont plus négligeables. Le tore ne fonctionne donc pas en transformateur de courant.

Il n'est pas non plus utilisé en transformateur de tension. L'alimentation se fait par un courant sinusoïdal quelle que soit la tension [CON].

En fait, le tore est un dispositif intermédiaire entre un transformateur de courant et un transformateur de tension. Cela nous oblige à être extrêmement attentifs à l'impédance du secondaire. En effet, une impédance trop forte ne permettrait pas le déclenchement de l'actionneur électromécanique. Le courant passant par sa bobine serait insuffisant. De même, une impédance trop faible induirait la saturation du tore et donc le non fonctionnement du dispositif différentiel (plus de variation de flux). Il y donc un compromis à déterminer et à respecter. Nous reparlerons de l'impédance du secondaire et en particulier de celle du relais dans le chapitre II.

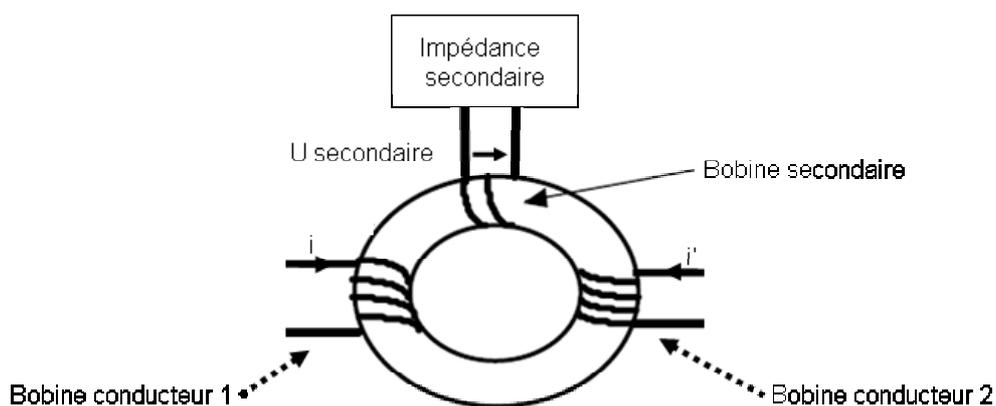


Figure 7 : Tore de mesure et impédance secondaire

Nous allons maintenant nous intéresser à la transformation du signal fourni par le tore. Ce signal, nous le rappelons, est une image du courant de défaut.

3.c - Transformation du courant

La transformation du signal n'est pas obligatoire. Dans notre cas, cela nous permet d'optimiser la performance de notre chaîne de mesure et de diminuer le volume du tore. Cette transformation autorise également le développement de produits beaucoup plus robustes : par exemple, des produits qui ne déclenchent pas lors de la mise sous tension de tubes fluorescents qui créent des courants transitoires.

En effet, pour valider le bon fonctionnement de notre dispositif différentiel, différents essais sont réalisés². Une partie de ces essais sont normalisés et d'autres sont internes à l'entreprise (exigence supplémentaire sur la qualité des produits). La transformation du courant est réalisée à l'aide d'une électronique qui permet d'améliorer la performance des produits différentiels. Cette plaquette, équivalente à un quadripôle, est reliée en entrée au secondaire du capteur de courant (tore de mesure) et en sortie à l'actionneur électromécanique (voir paragraphe suivant).

Cette plaquette n'est pas unique, elle dépend du produit. Il existe plusieurs produits différents comme par exemple :

- Le type AC qui déclenche uniquement sur des courants de défauts alternatifs sinusoïdaux.
- Le type A qui déclenche sur les courants alternatifs et qui accepte une légère composante continue et des ondes découpées.
- Le type B qui déclenche sur les courants de défauts continus et sinusoïdaux.

Sur la Figure 8, nous pouvons voir un exemple d'un schéma d'une plaquette électronique d'un produit différentiel de marque Hager avec un tore et le relais modélisés par une inductance et une résistance en série.

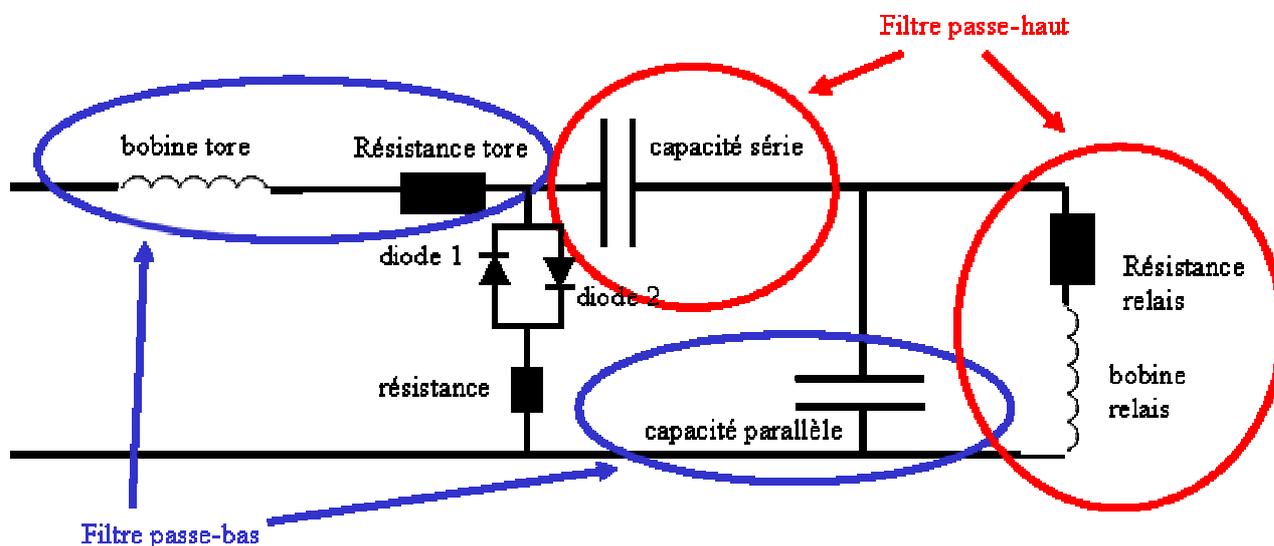


Figure 8 : plaquette électronique d'un produit différentiel

Nous allons maintenant expliquer le rôle des différents composants.

² Essais électriques détaillés en annexe I.

- Les diodes 1 et 2 (diodes de redressement) servent à protéger le dispositif contre les déclenchements intempestifs liés par exemple aux coups de foudre. En cas de coup de foudre, la tension aux bornes des diodes sera supérieure à leur tension de seuil et les diodes vont court-circuiter le reste de la plaquette. Cela permettra d'éviter un déclenchement intempestif.
- La résistance ($< 1 \text{ ohm}$) liée aux diodes permet d'augmenter la résistance dynamique des diodes. L'objectif de l'ensemble résistance et diodes est d'éviter les déclenchements intempestifs sur les courants du type coup de foudre et de protéger les capacités contre des tensions trop importantes.
- Les deux capacités (entre $1\mu\text{F}$ et $100 \mu\text{F}$) sont là pour filtrer le signal en fréquence (association avec les inductances et résistances de la bobine et du tore). L'utilisation de ces capacités va nous permettre d'éviter certains déclenchements sur des courants différentiels « normaux » (principalement liés à l'électronique utilisée dans certains produits électriques).

Cette plaquette permet la réalisation d'un filtre passe-bande, association d'un filtre passe-bas et d'un filtre passe-haut (voir Figure 8).

3.d - Comparaison avec un seuil et ouverture du circuit électrique

Les dispositifs différentiels électromécaniques contiennent tous un actionneur électromécanique. Ce relais différentiel haute sensibilité remplit deux fonctions.

- Tout d'abord, la comparaison avec un seuil de référence pour déterminer la valeur du courant de défaut.
- Ensuite, si ce courant de défaut est suffisamment important, le relais polarisé haute sensibilité fournit une énergie mécanique. Cette énergie mécanique, stockée à l'aide d'un ressort, est libérée par l'énergie électrique de défaut.

L'énergie mécanique ainsi fournie est amplifiée par une serrure mécanique³ qui permet l'ouverture du circuit électrique. Dans la suite de ce mémoire, nous n'entrerons pas dans le détail du fonctionnement de la serrure. Nous allons maintenant analyser le fonctionnement du relais.

³ Système de ressorts ou de bras de levier

4 - LE RELAIS POLARISE HAUTE SENSIBILITE

4.a - Composition et fabrication du relais HAGER

Nous venons de voir les différentes fonctions que doit réaliser la protection différentielle. Nous allons maintenant nous intéresser à la comparaison avec un seuil et la commande d'ouverture du circuit électrique. Ces deux fonctions sont réalisées avec un même composant : un relais polarisé haute sensibilité.

Le relais HAGER est composé de dix pièces au bobinage près (voir Figure 9 et Figure 10) ; il présente deux positions stables que nous appellerons fermée et ouverte :

- Le relais se trouve en position fermée lorsque la palette est collée à l'armature (le ressort est alors tendu).
- Le relais est en position ouverte lorsque la palette est complètement dans l'air (le ressort est alors détendu).

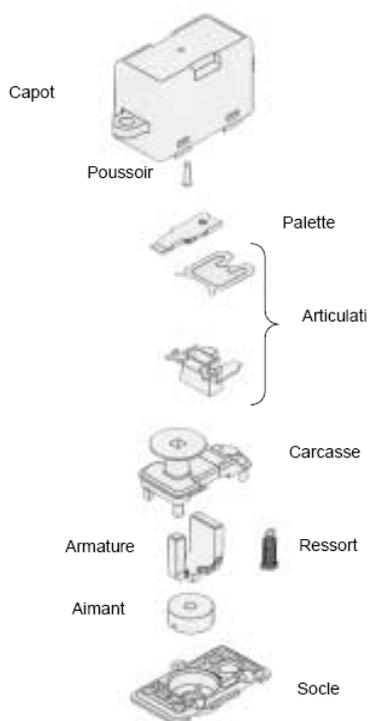


Figure 9 : décomposition du relais HAGER

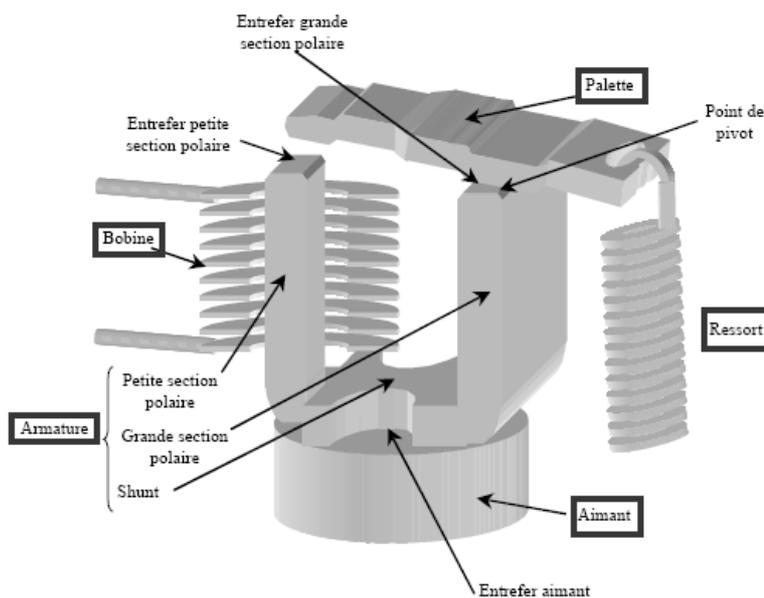


Figure 10 : relais polarisé haute sensibilité

Seules cinq pièces servent au fonctionnement magnétique du relais. Ce sont les pièces encadrées sur la Figure 10. Le circuit magnétique en lui-même est composé d'une armature en forme de U et d'une palette. Le ressort sert à fournir une énergie mécanique qui déclenchera la serrure. L'aimant permet de maintenir la palette en position fermée

(stockage de l'énergie) et enfin la bobine fournit l'énergie de défaut sous forme de flux magnétique.

Pour expliquer le fonctionnement du relais, nous devons définir certains paramètres. Nous appellerons petite surface polaire la surface de la petite section de l'armature qui sera en contact avec la palette (voir Figure 10). De même, la grande surface polaire est la surface de la grande branche de l'armature qui sera en contact avec la palette. Nous parlerons également du shunt qui est le changement de section présent sur la base de l'armature. Le contact entre la palette et l'armature n'étant pas parfait, nous définissons des entrefers équivalents [JOY] entre ces pièces que nous appellerons entrefer de la petite section polaire et entrefer de la grande section polaire. Cet entrefer représente une couche d'air qui existe entre deux pièces posées l'une sur l'autre (palette et armature dans notre cas).

- Le processus de fabrication de cet actionneur est décrit sur la Figure 11. L'assemblage est classique.

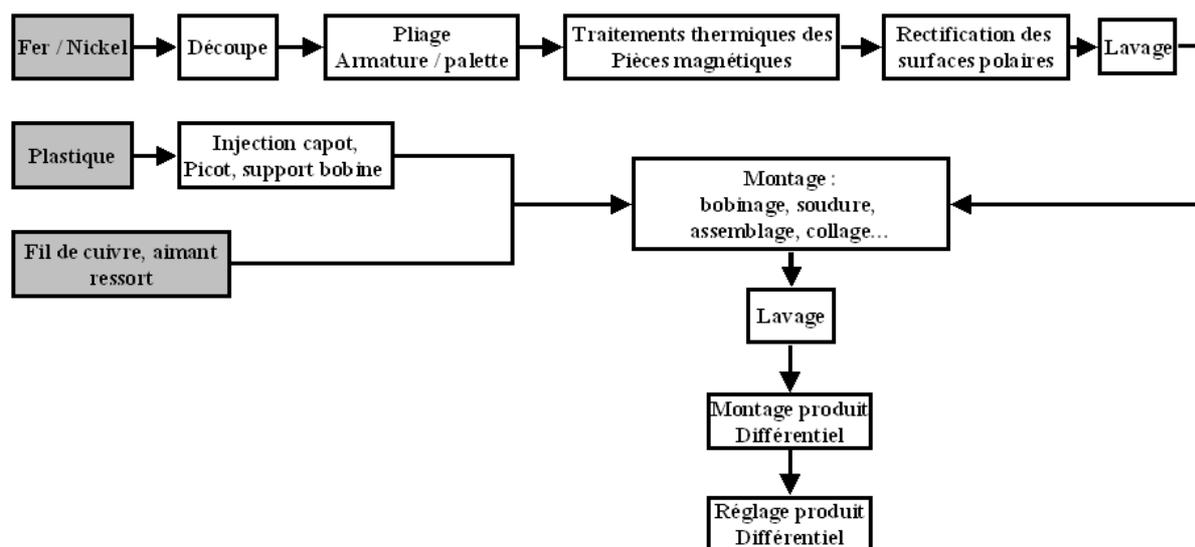


Figure 11 : Processus de fabrication de l'actionneur

Une spécificité de l'interrupteur différentiel est que le seuil de déclenchement est réglé une fois le produit totalement assemblé. Nous pouvons ainsi compenser les variations des différents éléments (tore, plaquette et relais) en réglant le relais avec toute la chaîne de mesure. Ce réglage peut se faire de trois manières possibles :

- Réglage du ressort du relais : l'inconvénient de cette solution est que nous devons prévoir une ouverture pour laisser passer par exemple une vis de réglage. L'avantage est qu'elle permet de maîtriser plus facilement l'impédance du relais.

- Réglage de la position de l'aimant : cela permet de modifier le flux magnétique qui va traverser l'actionneur et donc le seuil de déclenchement. L'inconvénient de cette solution est le même que précédemment, nous devons laisser un passage pour un outil de réglage une fois le produit fermé.
- Réglage de l'induction de l'aimant : ce principe de réglage permet de régler directement le flux que va générer l'aimant et donc de modifier le seuil de déclenchement. L'avantage de cette solution est que nous réglons le relais par un champ magnétique généré par des bobines de Helmholtz. Nous n'avons donc pas besoin d'ouverture à l'intérieur du produit. C'est le réglage qui est actuellement utilisé par la société HAGER ELECTRO. L'inconvénient principal est que l'impédance de l'actionneur peut varier avec le réglage.

4.b - Principe de fonctionnement de l'actionneur

Le principe de fonctionnement de ce relais en statique est assez simple.

En position fermé, l'aimant doit tout d'abord saturer le shunt de l'armature et va ensuite pouvoir traverser les entrefers des sections polaires et passera par la palette (explication ci-après).

Ce flux engendre une force magnétique qui maintient la palette en place. Cette force magnétique va s'opposer à la force mécanique exercée par le ressort sur la palette. Nous pouvons remarquer que la force engendrée par le ressort ne s'applique réellement que sur une des surfaces polaires (petite section) grâce à l'utilisation d'un bras de levier. C'est pourquoi, dans la suite de notre étude, nous parlerons de couple plutôt que de force.

La saturation du shunt [YAH] est nécessaire car la réluctance⁴ du shunt est très inférieure à celle des entrefers des surfaces polaires (zone d'air d'épaisseur d'environ $2\mu\text{m}$). Le flux prend le chemin le plus facile. Pour permettre au flux de passer par les surfaces polaires, nous devons augmenter la réluctance du shunt jusqu'au niveau de la réluctance d'entrefer. Contrairement à la réluctance des entrefers, la réluctance du shunt est variable et elle dépend du flux qui la traverse.

Lorsqu'un courant de défaut apparaît dans la bobine, celle-ci crée un flux magnétique qui s'oppose à celui de l'aimant (voir Figure 12). Le couple magnétique exercé sur la palette va alors être inférieur à celui du ressort ce qui provoque l'ouverture de la palette.

⁴ Résistance d'un matériau à un flux magnétique

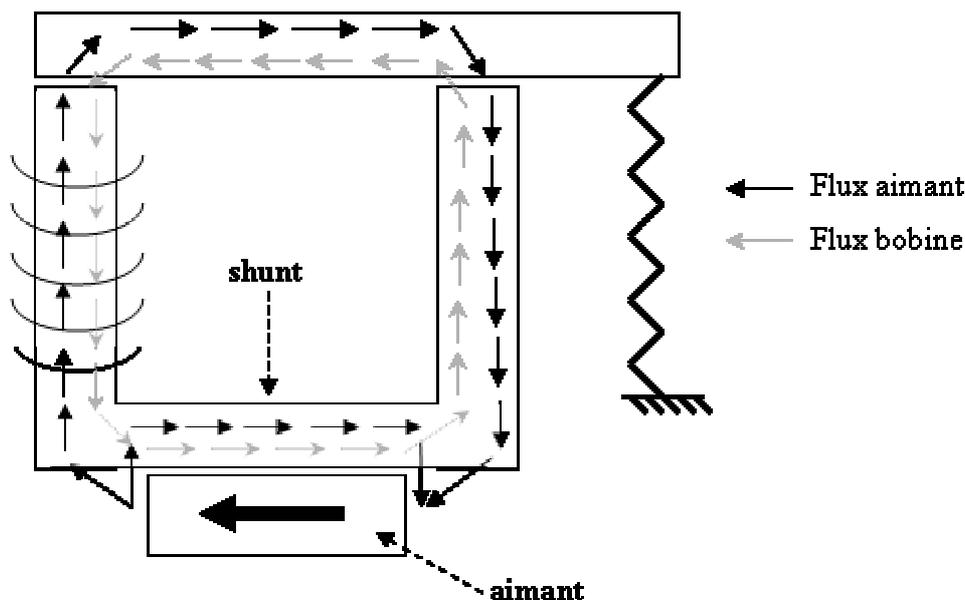


Figure 12 : schéma de fonctionnement du relais HAGER

Le shunt pourrait être remplacé par de l'air. C'est d'ailleurs ce que nous retrouvons chez certains fabricants (voir Figure 14). L'utilisation d'une matière magnétique offre au flux généré par la bobine un chemin réactant moins élevé (plus de flux généré pour une même excitation). Il permet également à l'aimant d'avoir un réseau réactant qui varie moins entre la position fermée et la position ouverte du relais. Nous évitons ainsi que l'induction de l'aimant varie entre les différentes manœuvres d'ouvertures et de fermetures.

Lors de la détermination d'une fonction différentielle, un tore et une plaquette sont associés à un relais afin de répondre à un cahier des charges (valeur d'un courant de défaut, déclenchements intempestifs dont il faut se prémunir, type de produit...). Pour que le relais déclenche toujours sur une même valeur de courant, nous devons nous assurer de la valeur de l'impédance de sa bobine, directement liée à l'état magnétique de l'actionneur.

Le sens du flux créé par la bobine dépend du sens du courant la traversant. Dans un cas, le flux généré par la bobine va s'opposer à celui de l'aimant traversant la palette (comme sur la Figure 12), dans l'autre cas il va s'additionner. Voilà pourquoi ce relais est dit polarisé.

4.c - Autres méthodes de fonctionnement

Bien entendu, ce fonctionnement n'est pas unique, nous avons rencontré dans la littérature deux autres grands types de fonctionnements.

Le premier n'utilise pas de shunt. Comme nous pouvons le voir sur la Figure 13, l'aimant de ce type de relais est placé à l'intérieur de l'armature. Le flux se sépare en deux et passe directement dans la palette. Lorsque la bobine engendre un flux magnétique, celui-ci s'ajoute à celui de l'aimant sur une des surfaces polaires mais s'oppose à ce flux sur l'autre surface.

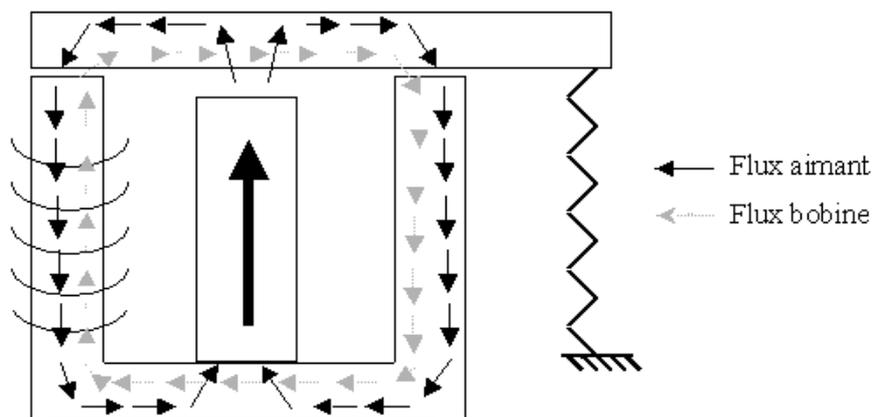


Figure 13 : relais avec un aimant à l'intérieur de l'armature

L'utilisation d'un bras de levier permet comme dans le système précédent de privilégier le couple sur une seule des surfaces polaires. Il suffit alors de diminuer le flux sur cette surface pour diminuer le couple (voir Figure 13). Là aussi, le relais est polarisé.

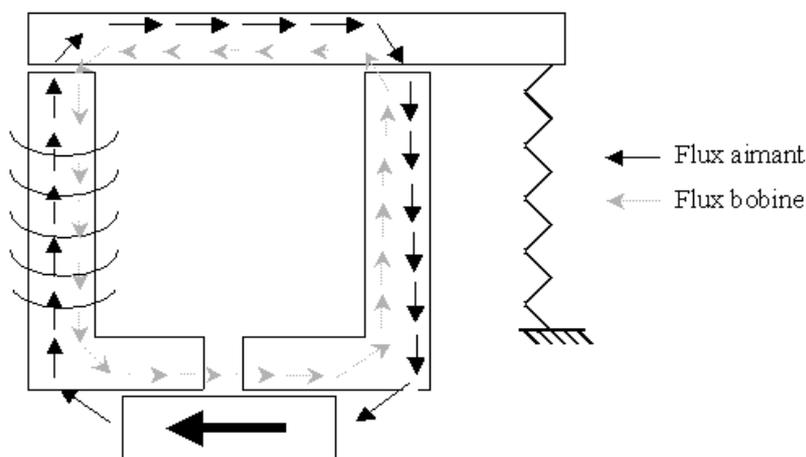


Figure 14 : relais avec entrefer sur armature

Le deuxième mode de fonctionnement que nous avons rencontré est différent du précédent. Le shunt en métal présent sur le relais HAGER est remplacé par un entrefer maîtrisé (voir Figure 14) et supérieur à celui existant entre la palette et l'armature. La maîtrise de cet entrefer est primordiale pour le fonctionnement de cet actionneur. Pour garantir une épaisseur constante de l'entrefer, ce type d'actionneur comporte en général une fine plaque amagnétique entre les deux parties de l'armature.

Ce type de relais a généralement une armature en deux parties. Le principe de fonctionnement est alors sensiblement identique au relais utilisé par HAGER. Le flux de l'aimant passe par la palette pour créer une force qui s'oppose à celle du ressort. Lorsqu'un courant de défaut apparaît, le flux créé par la bobine s'oppose à celui de l'aimant. Nous pouvons remarquer que le flux de la bobine passe alors par l'entrefer supplémentaire sur l'armature. Cet entrefer qui remplace le shunt doit donc avoir une surface très importante pour diminuer de façon significative sa réluctance. Le relais est là aussi polarisé.

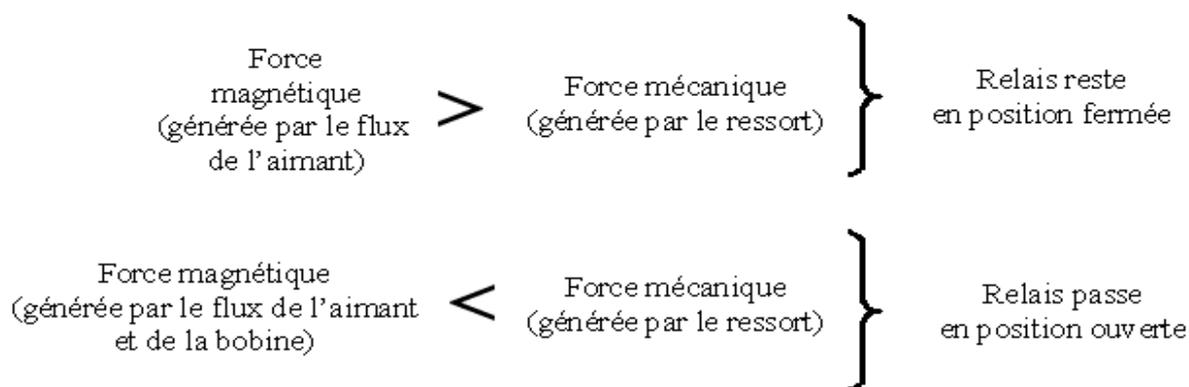
Nous venons de voir les trois grands types de relais. Nous pouvons les rencontrer sous différentes formes avec des géométries en trois dimensions, des systèmes de ressorts ou des bras de leviers différents. Toutefois, le principe de fonctionnement reste sensiblement le même. Nous stockons une énergie mécanique à l'aide d'un ressort et l'énergie de défaut permet de libérer cette énergie mécanique.

Nous allons maintenant faire un bilan des forces sur les palettes des différents relais.

4.d - Bilan des forces sur la palette

Quelle que soit la technologie utilisée, le bilan des forces sur la palette est le même pour passer de la position fermée à la position ouverte avec un relais qui fonctionne correctement.

C'est en utilisant l'énergie magnétique de l'aimant qu'il est possible de réaliser des relais haute sensibilité. A l'aide d'une faible énergie magnétique engendrée par la bobine, nous pouvons libérer une forte énergie mécanique. Ceci est possible grâce à l'énergie magnétique de l'aimant.



Ce bilan des forces peut être schématisé comme sur la Figure 15. Sur cette figure, nous avons à gauche le schéma du bilan des forces appliquées sur la palette. En réalité, les forces sont appliquées à travers des bras de leviers. Nous utiliserons alors la notion de

couple (figure de droite). Nous parlerons ainsi de couple différentiel engendré par la bobine.

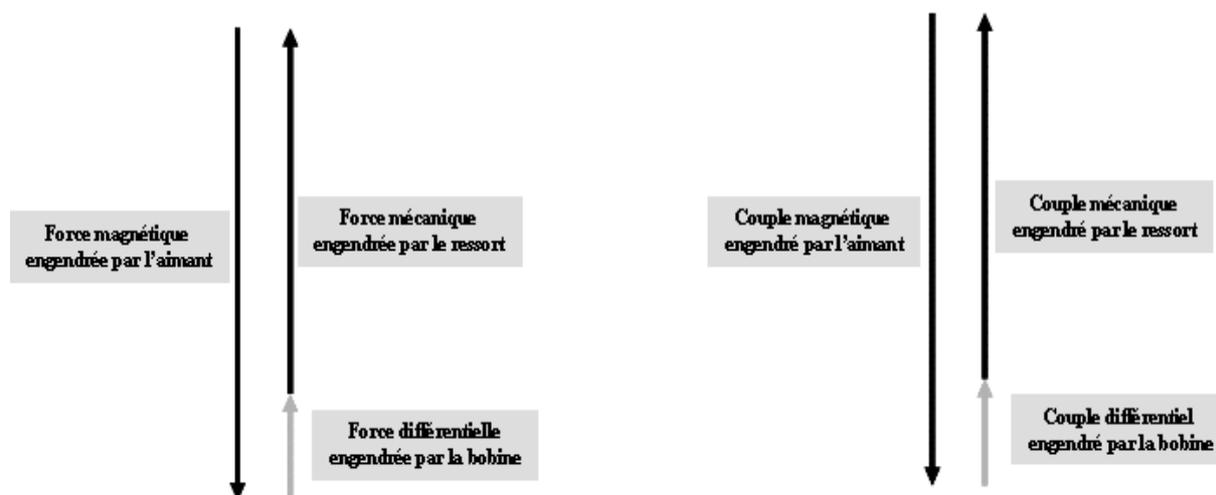


Figure 15 : bilan des forces et couples exercés sur la palette

La bobine doit engendrer un couple différentiel suffisant pour permettre le déclenchement de l'actionneur. Ce couple magnétique doit être la plus faible possible pour limiter la valeur de l'énergie que doit fournir la bobine, c'est à dire le nombre d'ampères tours nécessaires au déclenchement. Cependant, il doit rester suffisamment élevé afin que l'actionneur soit mécaniquement stable. Il ne doit pas être trop sensible aux problèmes de vibrations et de chocs mécaniques. Sa valeur sera le point de départ du dimensionnement.

4.e - Réglage du relais

Cette analyse semble simple, elle cache cependant un problème important. Dans l'industrie, les cotes des différentes pièces réalisées ont un intervalle de tolérance. Des variations des caractéristiques magnétiques et électriques des matériaux existent également entre les différents relais.

Sur toute une production, il est ainsi impossible de connaître précisément la valeur de la force du ressort comme il est impossible de connaître précisément les caractéristiques magnétiques et géométriques des pièces utilisées. Les relais dont nous parlons doivent cependant être d'une excellente précision (relais haute sensibilité). Nous devons donc prévoir un système de réglage pour palier les variations des paramètres de nos pièces.

Le réglage du relais consiste à vérifier qu'à la valeur de courant de déclenchement, le relais s'ouvre. C'est-à-dire que la différence entre la force du ressort et la force magnétique doit être exactement égale à celle créée par le flux de la bobine.

Le réglage du relais peut donc se faire sur deux paramètres : la force magnétique, ou la force mécanique.

Les relais réglant le déclenchement par la force mécanique utilisent fréquemment un réglage du ressort (plutôt qu'un bras de levier par exemple). En général, une extrémité du ressort est placée sur une pièce dont la position est modifiable (par exemple une vis).

L'autre méthode consiste à régler la force magnétique. Nous rencontrons deux écoles. Certains choisissent de régler l'induction de l'aimant pour obtenir la force voulue [JOY] D'autres préfèrent magnétiser l'aimant puis modifier sa position pour obtenir la force voulue.

Maintenant que nous avons vu comment fonctionne la protection différentielle et plus précisément le relais polarisé haute sensibilité, nous allons définir les objectifs de cette étude.

5 - OBJECTIFS DE L'ETUDE

5.a - Définition des objectifs

Nous souhaitons améliorer les performances et le coût du relais actuel. L'objectif de notre étude est le développement d'un nouvel actionneur moins cher et plus performant.

Ce travail peut se décomposer en trois parties.

- Tout d'abord, nous devons comprendre le fonctionnement complet du relais en statique et en dynamique et identifier les principaux défauts de celui-ci. Nous devons également étudier l'environnement dans lequel il est placé (champs magnétiques extérieurs, chocs et vibrations mécaniques...). La compréhension du fonctionnement, la mise en évidence des défauts et la connaissance de l'environnement nous permettront d'améliorer les performances du relais.
- Ensuite, nous devons identifier les paramètres générant des coûts importants. Nous devons également intégrer les problématiques liées à la fabrication de ce relais. L'objectif ici étant de définir les leviers pour diminuer le coût.
- Enfin, nous devons développer une structure répondant au cahier des charges, c'est à dire plus performante et moins onéreuse. Nous validerons alors son fonctionnement.

Cette étude devra répondre à un cahier des charges plus global reprenant les contraintes de l'ensemble de la protection différentielle (voir §I.5.b -).

Nous allons maintenant définir le cahier des charges de notre objectif.

5.b - Cahier des charges du relais différentiel

Le cahier des charges de cette étude est basé sur celui du relais actuellement fabriqué chez HAGER.

Tout d'abord, nous devons garantir les performances électriques du relais. La maîtrise du nombre d'ampères-tours de déclenchement et de l'impédance du relais est donc primordiale dans notre étude. Une même structure magnétique doit être capable de répondre à différentes déterminations électriques.

Nous devons également obtenir des performances mécaniques similaires aux performances actuelles. Ainsi, la course du poussoir (voir Figure 9) et la force mécanique fournies par le relais sont imposées.

Les performances mécaniques incluent également des essais d'endurance (vérifier la stabilité du relais sur un certain nombre de déclenchements) et de résistance aux chocs mécaniques (simulation d'une chute d'un produit).

Pour que cet actionneur puisse être utilisé dans les produits différentiels, les contraintes géométriques sont imposées. Le relais développé devra pouvoir être contenu dans le volume du capot du relais actuel (voir Figure 9).

La relation entre la recherche et le contexte industriel rend cette étude particulièrement intéressante. Nous devons intégrer de nouvelles technologies en gardant à l'esprit les contraintes de coût et de faisabilité technique.

Ce cahier des charges sera complété après la première phase de l'étude. Nous allons maintenant définir la méthode utilisée.

6 - METHODE DE CONCEPTION

Afin de réaliser ce relais et la fonction mesure, nous appliquerons une démarche structurée. Nous commencerons tout d'abord par la conception d'un relais différentiel.

Pour cela, nous utiliserons une modélisation fonctionnelle afin de comprendre le fonctionnement de ce relais d'une manière plus fine et de mettre en évidence un certain nombre de points à améliorer. Une analyse causale complétera cette étude pour mettre en évidence les paramètres générateurs de coût.

Nous incorporerons les résultats obtenus dans le cahier des charges à l'aide du logiciel GOLDFIRE® [INV]. L'étude se faisant en collaboration avec un industriel, nous aurons la chance de pouvoir intégrer les contraintes de fabrication du relais dans le cahier des charges.

Une fois cette étude de fonctionnement terminée, nous définirons une géométrie capable de répondre à nos besoins. La création d'une nouvelle géométrie doit prendre en compte un certain nombre de contraintes qui seront énoncées dans la suite. Nous nous aiderons d'une modélisation par éléments finis [FLU] pour valider d'un point de vue théorique le fonctionnement de ces actionneurs. Nous pourrons ainsi faire des choix entre les structures. La conception d'une structure doit prendre en compte la faisabilité technique (fabrication et matière).

Lorsque nous aurons choisi la géométrie la plus adaptée à nos besoins, une modélisation analytique nous permettra d'optimiser la structure en intégrant le cahier des charges. Celui-ci est détaillé dans le paragraphe I.5.b - . Nous utiliserons le logiciel **pro@design®** [DES] pour réaliser l'optimisation.

La réalisation de prototypes nous permettra ensuite de valider nos résultats.

Nous terminerons ce travail par une étude de l'impact de notre actionneur sur l'environnement à l'aide du logiciel EIME [EIM].

7 - CONCLUSION

Après avoir défini les dangers du courant électrique, nous avons montré que l'utilisation d'un dispositif de protection contre les courants résiduels permet de protéger les biens et les personnes. Nous avons alors décrit le fonctionnement de ces dispositifs comprenant un tore de mesure, une plaquette de transformation et un actionneur électromécanique polarisé haute sensibilité. Nous avons expliqué le fonctionnement en statique des trois grands types de relais différentiels haute sensibilité rencontrés dans la littérature.

Cela nous a amenés à l'objectif de cette thèse : la conception et le dimensionnement d'un actionneur électromécanique haute sensibilité. Cet objectif doit répondre à un cahier des charges spécifique.

Nous avons ensuite décrit la méthode de conception que nous allons utiliser durant cette étude.

Dans le chapitre suivant, nous étudierons de façon plus approfondie le fonctionnement du relais actuel. Nous utiliserons une modélisation fonctionnelle et une analyse causale afin de mettre en évidence les principaux défauts de la structure actuelle. Nous compléterons cette étude avec l'aide des industriels responsables de la fabrication du relais. Tout ceci nous permettra d'améliorer le cahier des charges.

Nous montrerons alors le cheminement qui nous a conduits à une structure capable de répondre à nos besoins.

CHAPITRE II

Méthodologie de conception d'un nouvel actionneur électromécanique

CHAPITRE II – METHODOLOGIE DE CONCEPTION D'UN NOUVEL ACTIONNEUR ELECTROMECHANIQUE	31
1 - INTRODUCTION	31
2 - ETUDE DU RELAIS EXISTANT'	33
2.a - Modélisation fonctionnelle.....	33
2.a.1 - Méthode et objectif.....	33
2.a.2 - Le schéma fonctionnel	33
2.a.3 - Analyse de la modélisation fonctionnelle et pistes de solutions.....	36
2.b - Analyse causale.....	47
2.b.1 - Méthode et objectifs.....	47
2.b.2 - Analyse causale.....	48
2.b.3 - Analyse du modèle de causalité	49
2.c - Contraintes de fabrication	51
2.d - Conclusion sur l'étude menée à partir de la méthodologie TRIZ.....	51
2.d.1 - Conclusion sur la méthodologie utilisée	51
2.d.2 - Résultats obtenus à partir de la méthodologie TRIZ	52
3 - VERS UNE NOUVELLE STRUCTURE D'ACTIONNEUR ELECTROMECHANIQUE	53
3.a - Le cahier des charges de la nouvelle structure	53
3.b - Structure actuelle sans rectification	54
3.c - Actionneurs à entrefers plus importants.....	55
3.d - Utilisation d'actionneurs à circuits magnétiques fermés	58
4 - CONCLUSION	59

CHAPITRE II – METHODOLOGIE DE CONCEPTION D'UN NOUVEL ACTIONNEUR ELECTROMECHANIQUE

1 - INTRODUCTION

Dans le chapitre précédent, nous avons défini le cadre de l'étude ainsi que son objectif, la conception d'un nouvel actionneur. Concevoir un nouveau produit est souvent difficile. Nous souhaitons formaliser les étapes de développement afin de le rendre plus simple, mieux organisé et le plus complet possible.

Pour cela, un grand nombre de méthodologies de conception sont à notre disposition comme par exemple l'analyse fonctionnelle, la méthodologie QFD⁵ [MAO], AMDEC⁶ [ANA] ou TRIZ [CAV]. Nous avons choisi d'utiliser cette dernière car elle semble la mieux adaptée à notre besoin.

A partir d'une problématique donnée, la méthodologie TRIZ permet d'identifier les véritables problèmes et offre des outils d'aide à la résolution. Cette méthode a été développée par GENRICH ALTSHULLER dans le milieu des années 40. TRIZ est l'acronyme russe de la théorie de résolution des problèmes inventifs. Définir le fonctionnement de cette méthode en quelques lignes est très difficile mais son but est d'améliorer la créativité du concepteur et de systématiser la démarche de conception. Elle utilise un grand nombre de concepts comme la notion de contradiction, les principes inventifs, la notion d'idéalité. Elle utilise également l'analyse fonctionnelle et causale pour bien poser le problème.

Nous avons à notre disposition le logiciel Goldfire Innovator® [INV] qui est basé sur la méthode TRIZ. Ce logiciel n'utilise qu'une partie des nombreux outils de TRIZ mais cela correspond à nos besoins. Ainsi, des outils comme l'analyse causale et la modélisation fonctionnelle nous permettront de poser les problèmes et de les reformuler. D'autres outils comme les principes inventifs ou les lois d'évolution nous aideront à les résoudre. Un des grands avantages de ce logiciel est un accès à une base de connaissance de brevets, d'effets scientifiques et des documents techniques internes à l'entreprise HAGER. Cet accès à des informations diverses nous permettront également de faciliter la résolution de problèmes.

Pour concevoir ou améliorer un produit, la méthodologie préconise de commencer par la description du système actuel. A l'aide d'une modélisation fonctionnelle, nous décrirons le fonctionnement du relais électromécanique. Cela améliorera notre compréhension du

⁵ Quality Function Deployment

⁶ Analyse des Modes de Défaillances de leurs Effets et de leur Criticité

système et mettra en évidence les liens entre les différents éléments et les problématiques. Nous associerons à cette étude le coût des composants du relais pour intégrer la notion de valeur d'une fonction (rapport entre le coût et le rang fonctionnel d'un composant).

Une fois que le fonctionnement sera clairement assimilé, nous exploiterons le travail de la modélisation fonctionnelle pour la génération de solutions aux problèmes rencontrés à partir des outils à notre disposition.

Le résultat de cette étude sera une liste de solutions potentielles pour l'amélioration du produit. Ces solutions seront ordonnées et pourront être étudiées d'une façon plus précise dans la suite.

Pour compléter cette étude et avoir une vision plus globale de notre système, nous utiliserons une analyse causale avec comme objectif le coût. Nous désirons cette seconde analyse car la répartition des coûts peut dans certains cas être une image des différentes problématiques du dispositif. Par exemple, un coût important pour maîtriser la côte d'une surface veut simplement dire que la variation de cette surface entraîne sûrement un mauvais fonctionnement du produit final. Nous abordons ainsi le produit sous un angle différent mais la démarche sera similaire à celle proposée précédemment.

L'analyse causale permet de déterminer les véritables raisons de certains dysfonctionnements. Il est souvent plus difficile d'identifier la véritable cause des problèmes que de résoudre les problèmes eux-mêmes. Cette identification des véritables problématiques est un principe de succès dans la conception ou l'amélioration d'un dispositif.

Comme pour la modélisation fonctionnelle, nous exploiterons ensuite cette analyse pour générer des pistes d'améliorations de l'actionneur électromécanique.

Ces deux analyses fourniront les axes d'améliorations du relais et le coût orientera les choix techniques. Cette étape nous aidera également à compléter le cahier des charges.

Pour la réalisation de notre relais, nous intégrerons des contraintes de fabrication. Des responsables de l'industrialisation de l'actionneur nous aideront à les mettre en évidence.

Toutes les informations que nous obtiendrons de ces différentes études nous permettront de compléter le plus exhaustivement possible le cahier des charges (contraintes à respecter), de définir les problématiques que nous devons résoudre et de fournir des pistes de solutions que nous pourrions mettre en œuvre.

Nous terminerons ce chapitre par la présentation d'une structure intégrant différentes solutions des analyses causales et fonctionnelles. Cette structure devra répondre au cahier des charges.

2 - ETUDE DU RELAIS EXISTANT

2.a - Modélisation fonctionnelle

2.a.1 - Méthode et objectif

Comme le préconise la méthodologie TRIZ, nous commencerons par décrire le fonctionnement du produit existant. A l'aide d'une modélisation fonctionnelle, nous décrirons les liens entre les différents éléments de l'actionneur. Ces liens peuvent être d'ordre magnétique (champ magnétique), physique (contact réel), thermique (échauffement)...

Tout d'abord, nous souhaitons comprendre de façon détaillée le fonctionnement de l'actionneur électromécanique actuel d'un point de vue magnétique statique mais aussi magnétique dynamique [MAR].

Notre actionneur réalise deux fonctions principales. La première fonction est la transformation de l'énergie électrique en énergie mécanique. La seconde fonction est la comparaison de la valeur du courant électrique à une valeur seuil qui est l'image du seuil du produit (par exemple 30mA).

A l'aide de la norme et des spécifications internes, nous définirons les fonctions secondaires mais essentielles de l'actionneur comme par exemple la résistance aux champs magnétiques extérieurs.

Cette analyse va permettre de mettre en évidence les contradictions, les actions néfastes ou les actions réalisées de manière insuffisante. Nous rechercherons alors des solutions pour chaque problème rencontré.

La modélisation fonctionnelle comporte d'autres intérêts. Le premier objectif est une capitalisation et une réutilisation du savoir qui est relativement complexe à mettre en place. De plus, si la modélisation est correctement réalisée, nous pourrions vérifier qu'une nouvelle structure répond à toutes les fonctions. Bien entendu, une partie des fonctions est propre à la structure utilisée. Nous devons seulement nous assurer que les fonctions utiles sont bien réalisées.

2.a.2 - Le schéma fonctionnel

Une décomposition fonctionnelle d'un processus ou d'un produit n'est pas unique et dépend des intervenants. Le schéma de la Figure 16 se limite simplement au fonctionnement classique c'est à dire avec un courant d'excitation image du courant de défaut.

- Si l'effet de cette fonction était moins important, est-ce que mon système fonctionnerait mieux ? (si la réponse est oui, alors la fonction est mal réalisée (trop forte)).

Nous associons à chaque composant un ou plusieurs paramètres physiques qui ont été modifiés par l'action. Par exemple, l'action « Poussoir pousse la palette » modifie la position de la palette (Figure 17).

Les personnes ayant réalisé cette modélisation comprennent facilement ce schéma. Il n'en est pas de même pour celles qui n'ont pas participé à cette étude. Pour que le travail soit réutilisable, nous devons mieux expliciter les fonctions à l'aide des outils à notre disposition (notes, valeurs réelles, variations temporelles, variations spatiales...).

Chaque action peut être définie de manière plus précise. Nous pouvons ajouter des notes (Figure 18), la valeur actuelle et celle à atteindre (Figure 17), des variations temporelles du paramètre modifié par l'action (Figure 19) ou alors une description spatiale du paramètre de l'action (Figure 20).

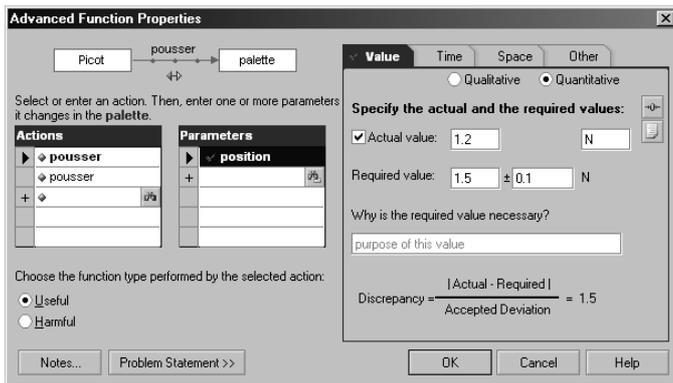


Figure 17 : Description de la valeur d'une action

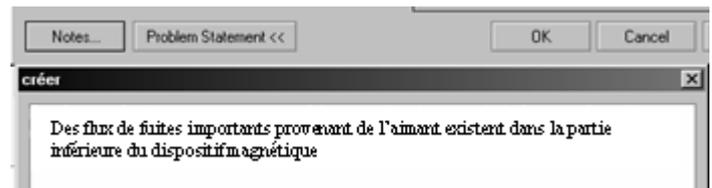


Figure 18 : Description par des notes d'une action

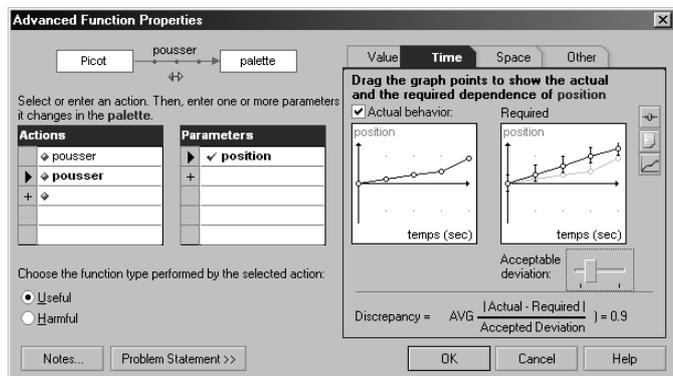


Figure 19 : Description temporelle de l'action

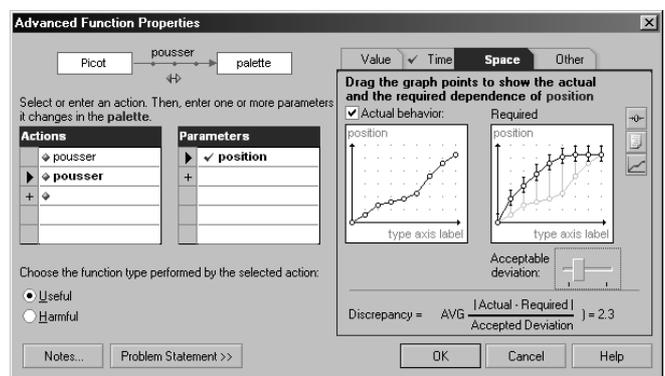


Figure 20 : Description spatiale de l'action

Par exemple, le poussoir exerce une force sur le levier de réarmement sur une certaine course et pendant un certain temps. Le paramètre force du poussoir aura donc une

contrainte en fonction du paramètre position, et le paramètre position une contrainte en fonction du temps.

Une description détaillée des différentes fonctions permet :

- l'amélioration du cahier des charges en fixant un objectif à atteindre et en connaissant l'écart avec le produit « idéal ».
- Une meilleure capitalisation du savoir. Il est ainsi possible de comprendre la signification des différentes actions et de vérifier l'évolution des performances des produits.

2.a.3 - Analyse de la modélisation fonctionnelle et pistes de solutions

Comme nous l'avons signalé dans le paragraphe précédent, la modélisation fonctionnelle n'est pas unique. Elle dépend des personnes qui la réalisent et des objectifs qu'ils se sont fixés. Il faut donc être attentif lors de sa réalisation et décrire le plus possible la réalité du problème qu'on étudie. L'inconvénient principal de cet exercice est donc la "partialité" et la pertinence relative de la décomposition.

Pour éviter ou plutôt pour limiter cet inconvénient, il est préférable de réaliser la modélisation fonctionnelle en petits groupes avec des spécialistes mais également une ou deux personnes d'un domaine différent. Un œil extérieur au domaine oblige les experts à décrire le fonctionnement d'une façon plus simple et souvent plus juste. Une trop grande complexité est souvent synonyme d'une mauvaise décomposition.

Nous allons maintenant analyser cette modélisation fonctionnelle. La démarche sera appliquée sur une seule action pour montrer le fonctionnement de la méthodologie.

Pour faciliter la lecture, nous regrouperons les autres actions par thème et nous les traiterons d'une manière plus directe.

La démarche d'analyse

La démarche d'analyse se déroule en trois étapes :

- Tout d'abord, il y a une sélection des actions à traiter. Nous regroupons les actions néfastes, mal réalisées et les contradictions et nous les classons par priorité de traitement. Les critères de classement sont définis par les concepteurs. Il n'est pas nécessaire de traiter l'ensemble des actions, ce choix appartient également aux concepteurs.
- Ensuite, nous sélectionnons une action. Il faut alors comprendre pourquoi cette action est par exemple insuffisante ou plutôt comprendre pourquoi elle a été notée

comme insuffisante. Les compléments d'informations (notes, descriptions temporelles...) sont autant d'éléments qui faciliteront cette étape.

- La dernière étape de l'analyse est la recherche de pistes de solutions. Classiquement, la recherche de solution en groupe se fait par un brainstorming. Nous continuerons d'utiliser cette technique mais nous orienterons les discussions à l'aide d'outils spécifiques comme l'idéalité, les principes inventifs, les principes d'évolutions, les matrices de contradiction. Cette orientation a comme objectif d'augmenter la créativité des intervenants. Nous commençons par la définition de l'action idéale puis nous balayons l'ensemble des principes pour accroître la créativité des intervenants. Les différents principes seront décrits en ANNEXE 2.

Exemple d'application : le flux magnétique de l'aimant

Pour cet exemple d'application, nous allons analyser l'action suivante (étape 1):

- l'aimant crée un flux magnétique mais d'une manière insuffisante. Dans la Figure 16, cette action est schématisée par « aimant (composant dans un cadre) » « créer (action insuffisante en pointillée) » « flux aimant (composant dans un cadre) ».

Le complément des notes et de la valeur de l'action (voir Figure 21) nous permet d'appréhender le problème beaucoup plus rapidement.

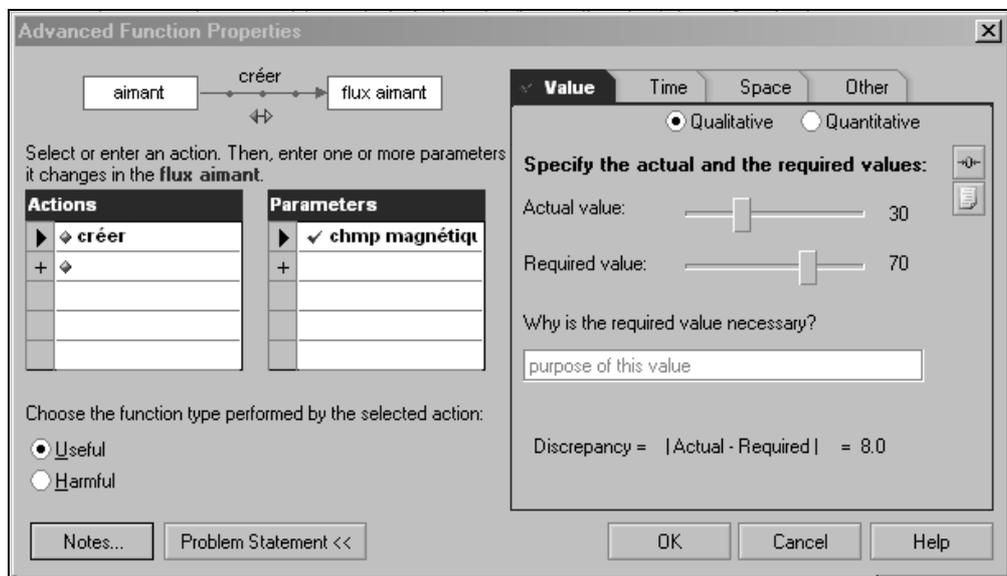


Figure 21 : description de l'action "aimant crée un flux aimant"

Nous allons donc commencer par bien cerner le problème (étape 2). Nous observons sur la figure ci-dessus que 30% du flux magnétique généré par l'aimant est utilisé actuellement et que l'objectif à atteindre est de 70%. La présence de flux de fuite magnétique est inscrite dans les annotations.

Pour valider la présence de flux de fuite, nous nous sommes référés à une modélisation des flux magnétiques de cet actionneur. Comme nous pouvons l'observer sur la Figure 22, il existe un grand nombre de flux de fuite qui passent dans l'air. L'inconvénient principal de ceux-ci est une augmentation inutile du volume de l'aimant ainsi qu'une sensibilité plus importante aux champs magnétiques extérieurs. Ces champs magnétiques proviennent essentiellement des voies de courant de produits électriques (par exemple des disjoncteurs) montés à côté des interrupteurs différentiels. En conséquence, seulement 30% du flux magnétique est utilisé pour la génération d'une force magnétique utile.

La problématique à résoudre est : comment limiter les flux de fuites sur l'actionneur ? Nous allons maintenant rechercher des solutions (étape 3).

La fonction idéale utiliserait la totalité du flux généré par l'aimant pour la création de la force magnétique sur la palette. Notre système doit essayer de tendre vers cette fonction idéale.

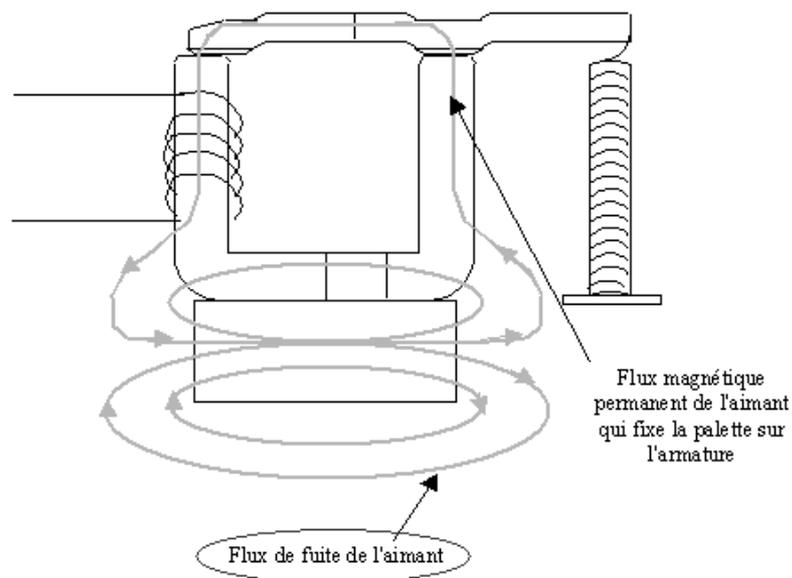


Figure 22 : Flux de fuite du relais

Nous remarquons que seules les lignes de champs circulant vers le haut de la structure (vers la palette) sont utiles. Le flux magnétique rebouclant vers le bas est au contraire inutile. Pour palier ce défaut, nous proposons de remplacer l'air sur le côté de l'aimant par un matériau magnétique. L'objectif est ici de limiter le nombre de lignes de champs qui rebouclent par le bas.

Concrètement, deux solutions sont envisageables. Tout d'abord l'installation d'un shunt magnétique autour de l'aimant ou alors un positionnement de l'aimant à l'intérieur de l'armature.

Pour une problématique donnée, nous venons de trouver des solutions. Elles ne sont pas testées ni validées. Ce sont des idées, des concepts.

Dans la suite de l'analyse, nous avons regroupé les problématiques par thème. Nous ne déroulerons pas toute la méthodologie, nous nous limiterons à l'énonciation des problématiques et des solutions envisageables.

Puisque notre actionneur transforme l'énergie électrique en énergie mécanique, nous commencerons par les problématiques électriques.

Problématiques électriques

La problématique électrique principale est l'impédance Z de la bobine de notre actionneur. Sa valeur doit être maîtrisée de la meilleure façon possible. Cette impédance est liée à la résistance R et à l'inductance L de la bobine (voir Équation 1), ω étant la pulsation du signal.

$$Z = \sqrt{R^2 + (L \times \omega)^2}$$

Équation 1 : Impédance de la bobine

La résistance du fil est relativement facile à maîtriser, elle dépend de la longueur l , de la section S ainsi que de la résistivité ρ du fil (voir Équation 2). Nous négligeons ici les variations liées à la température.

$$R = \rho \times \frac{l}{S}$$

Équation 2 : Résistance de la bobine

En ce qui concerne l'inductance, le problème est plus difficile. En effet, l'inductance est directement liée à la réluctance \mathfrak{R} vue par la bobine et à son nombre de spires N (voir Équation 3).

$$L = \frac{N^2}{\mathfrak{R}}$$

Équation 3 : Inductance de la bobine

Sur la Figure 23, nous pouvons voir une modélisation simplifiée par réseau de réluctance de l'actionneur. La problématique électrique étudiée est donc liée à la géométrie du circuit magnétique.

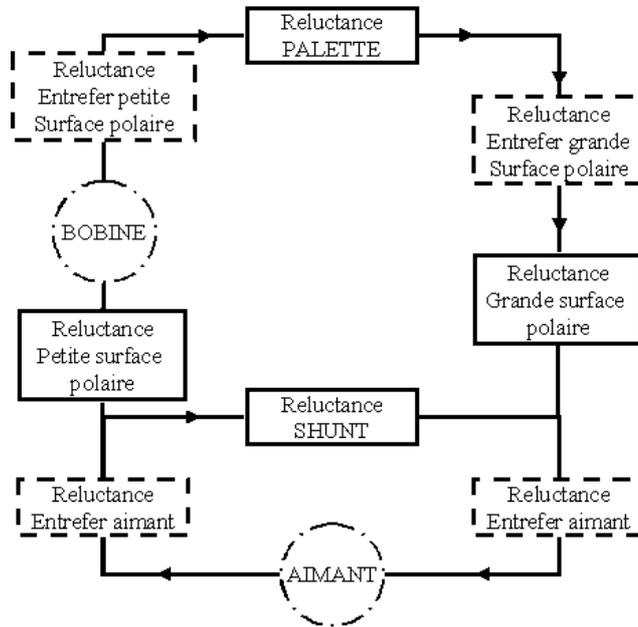


Figure 23 : Modélisation par réseau de réluctance du relais actuel

Comme la valeur des réluctances des entrefers entourant l'aimant et celle de l'aimant est très supérieure à celles des autres réluctances du système, le réseau de réluctance vu par la bobine peut se simplifier comme le montre la Figure 24. C'est une vision simplifiée de la réalité mais qui permet de mettre en évidence la problématique. Il faut cependant prendre en compte les points de polarisation dus à la présence de l'aimant.

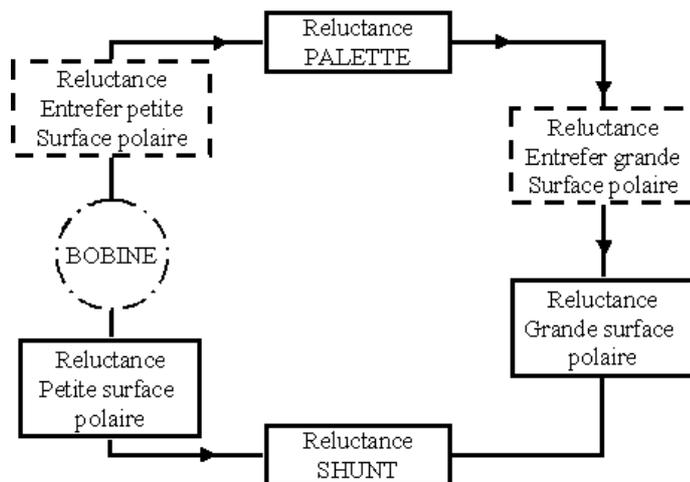


Figure 24 : Réseau de réluctance lié à la bobine

Les réluctances de la palette et des surfaces polaires n'étant pas saturées, la réluctance vue par la bobine est essentiellement liée à celles des entrefers et de la réluctance saturée du shunt (voir Équation 4). Une variation de l'entrefer entraîne directement une variation de la réluctance vue par la bobine et donc de son inductance.

$$\mathfrak{R} = \mathfrak{R}_{\text{entrefer_petite_surface_polaire}} + \mathfrak{R}_{\text{entrefer_grande_surface_polaire}} + \mathfrak{R}_{\text{shunt}}$$

Équation 4 : Réluctance vue par la bobine

Les réluctances d'entrefers sont proportionnelles à l'épaisseur de l'entrefer. La relation de la réluctance vue par la bobine est donc une application affine qui dépend de l'entrefer (voir Équation 5).

$$\mathfrak{R}(\text{entrefer}) = a \times \text{entrefer} + b$$

Équation 5 : Lien entre la réluctance vue par la bobine et l'entrefer

Avec a et b des valeurs liées au matériau et à la géométrie de la structure et où b n'est pas très grand devant le produit a×entrefer.

Nous devons limiter le lien existant entre la réluctance vue par la bobine et l'entrefer.

La première idée est d'augmenter la valeur de b pour rendre le produit a×entrefer négligeable. Cette solution diminuerait la valeur de l'inductance ce qui est un avantage. Mais elle diminuerait également la valeur du flux magnétique généré par la bobine (à nombre d'ampères-tours fixe) ce qui est un inconvénient. En effet, il faudrait alors plus d'ampères-tours pour que la bobine génère un flux équivalent à celui actuel, c'est à dire pour que la bobine crée une variation de force équivalente à celle actuelle.

Nous pouvons aussi envisager de modifier le circuit magnétique pour modifier la relation entre la réluctance vue par la bobine et l'entrefer.

Un circuit magnétique comportant deux shunts peut répondre à notre problème. Comme nous le voyons sur la Figure 25, une réluctance parallèle à celles des entrefers est ajoutée au circuit magnétique (Réluctance SHUNT 2).

Pour obtenir que le flux de l'aimant soit suffisant pour "coller" la palette, cette réluctance doit être saturée et donc une variation de l'entrefer modifiera peu sa valeur.

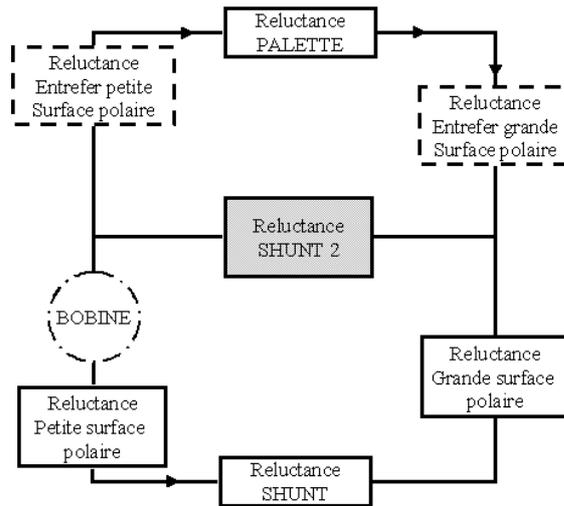


Figure 25 : Réseau de réductances lié à la bobine avec un shunt supplémentaire

La réductance vue par la bobine est donc modifiée. Elle est toujours liée à celle de l'entrefer mais pas de manière affine (voir Équation 6). Les réductances de la palette et des surfaces polaires n'étant pas saturées, nous les avons négligées dans le calcul de la réductance vue par la bobine.

$$\mathfrak{R} = \frac{\mathfrak{R}_{\text{entrefer_petite_surface_polaire}} + \mathfrak{R}_{\text{entrefer_grande_surface_polaire}} + R_{\text{shunt2}}}{(\mathfrak{R}_{\text{entrefer_petite_surface_polaire}} + \mathfrak{R}_{\text{entrefer_grande_surface_polaire}}) \times R_{\text{shunt2}}} + \mathfrak{R}_{\text{shunt}}$$

Équation 6 : Réductance vue par la bobine dans un circuit avec un shunt supplémentaire

Avec un circuit magnétique semblable à ce réseau de réductance, nous arriverions donc à limiter l'influence de l'entrefer. Le deuxième shunt permet de stabiliser la réductance vue par la bobine.

En prenant une réductance R_{shunt} équivalente à celle de la structure actuelle, l'influence de l'entrefer dépendra de la valeur de la réductance R_{shunt2} et donc du dimensionnement de la structure.

Nous allons maintenant analyser l'aspect mécanique de notre actionneur électromécanique.

Problématiques mécaniques

Les problématiques mécaniques sont principalement liées au mouvement de la palette et des pièces en contact avec celle-ci.

- Force exercée par la palette sur le poussoir

Nous remarquons que l'action exercée par la palette sur le poussoir (ouverture du relais) n'est pas optimale. En effet, une force et une course plus importante permettraient d'avoir des serrures mécaniques moins sensibles et donc plus faciles à réaliser industriellement. In fine, le coût de fabrication de la serrure serait moins important (augmentation des intervalles de tolérances et augmentation de la capacité machine).

- Force exercée par le poussoir sur la palette

Inversement, l'action exercée par le poussoir sur la palette (fermeture du relais) est trop importante. Pour refermer le relais, une serrure mécanique appuie sur la palette à travers le levier de réarmement et le poussoir. Cette force de fermeture est importante et engendre des modifications de l'entrefer. La valeur de l'impédance du produit et du nombre d'ampères-tours nécessaire au déclenchement est ainsi modifiée. Une force moins importante améliorerait la stabilité du relais. Nous pouvons également imaginer un relais bistable ne nécessitant pas de réarmement. Cela réduirait également le coût des serrures actuelles.

- Positionnement de la palette

Le positionnement de la palette sur l'armature est un contact plan sur plan. Mécaniquement, ce contact est en réalité constitué de trois points. Cela engendre une couche d'air entre les deux pièces que nous appelons entrefer [JOY]. En comparaison des réluctances des matériaux magnétiques utilisés, les réluctances de cette couche d'air très mince sont très importantes (mauvaise perméabilité de l'air). Cela signifie d'une part que le nombre d'ampères-tours nécessaires pour générer la variation de force augmentera et d'autre part que cette variation de force générée par le flux de la bobine sera très sensible à l'épaisseur de l'entrefer. Il est donc impératif de maîtriser de manière précise cet entrefer pour limiter ces problématiques magnétiques.

Problématiques magnétiques

- Problématiques de l'entrefer

Magnétiquement, nous modélisons cet entrefer par un entrefer équivalent. Nous considérons que les surfaces de l'armature et de la palette sont parfaitement planes et qu'il existe une couche d'air de faible épaisseur entre les deux pièces. Cette méthode néglige les trois points de contacts réels. Ceux-ci sont très rapidement saturés (petite section) et se comportent alors comme de l'air. Les résultats obtenus par modélisation sont alors très proches de la réalité.

Avoir un entrefer équivalent le plus petit possible permet d'avoir un circuit magnétique moins réluctant et donc un flux magnétique plus important pour une même excitation de la bobine.

Malheureusement, des variations de cet entrefer peuvent modifier le seuil de fonctionnement du produit. Il doit être le plus constant possible durant toute la vie du produit (quelques décennies). Si l'entrefer est trop petit, les variations qu'il pourra subir devront être elles-aussi très petites. La maîtrise d'un entrefer petit et constant est très difficile et coûteux industriellement. L'utilisation d'un entrefer relativement grand serait donc une solution pour palier ce défaut. De légères variations de sa valeur seraient alors négligeables.

Nous avons mis en évidence une contradiction : d'un côté il faut un petit entrefer pour augmenter la valeur des flux magnétiques générés par la bobine et de l'autre, il faut un entrefer assez grand pour accepter de plus grandes variations de sa valeur. Plusieurs alternatives existent pour résoudre cette contradiction.

Nous pouvons envisager de maintenir un entrefer le plus petit possible comme c'est le cas actuellement. Cela entraîne une maîtrise irréprochable des surfaces polaires et une grande sensibilité de la performance du relais aux variations de cet entrefer. Le grand avantage de cette solution est que le nombre d'ampères-tours nécessaires au déclenchement est faible.

Une autre solution est d'augmenter l'entrefer pour être moins sensible aux perturbations. L'inconvénient de cette solution est soit une augmentation du nombre d'ampères-tours nécessaires au déclenchement, soit une diminution de la valeur du flux magnétique que la bobine doit générer pour que l'actionneur déclenche (cela revient à réduire la différence entre la force magnétique et la force mécanique).

Malgré ces inconvénients, nous verrons dans la suite de ce chapitre que nous privilégierons la dernière solution.

- Flux et épaisseur de peau dans le shunt

Une autre problématique magnétique est le passage du flux magnétique engendré par la bobine dans le shunt.

Comme nous l'avons expliqué dans le §I.4.a, le flux de la bobine va contre celui de l'aimant qui passe dans la palette. Malheureusement ce flux passe également par le shunt ce qui augmente sa saturation. La conséquence est une dérivation d'une partie du flux du shunt vers la palette et donc une augmentation de la force de collage de la palette.

D'un côté, nous diminuons le flux de la palette et de l'autre, nous l'augmentons. Dans le cas présent, la diminution du flux est supérieure à son augmentation ce qui permet le fonctionnement de l'actionneur.

Les propriétés des matériaux nous permettent de limiter l'effet négatif du flux de la bobine. Comme le signal d'excitation est alternatif, nous utilisons à notre avantage

l'épaisseur de peau dans le shunt. En effet, en régime permanent, le flux généré par l'aimant est fixe et il parcourt toute la section. Le flux de la bobine est quant à lui variable et ne se déplace que dans l'épaisseur de peau. Cela signifie que le flux de la bobine ne contre celui de l'aimant que dans l'épaisseur de peau. Rendre négligeable l'épaisseur de peau par rapport aux dimensions de la section permet de limiter la variation du flux de l'aimant.

- Flux et épaisseur de peau dans les surfaces polaires

L'utilisation de l'épaisseur de peau dans le shunt est essentielle pour améliorer les performances de l'actionneur mais elle peut être problématique pour les surfaces polaires. Pour un maximum d'efficacité, il est important que la totalité de la section des surfaces polaires soit parcourue par le flux généré par la bobine.

Nous venons de voir que l'aspect matériaux est primordial dans ces applications. Nous allons donc le développer plus précisément.

Problématiques des matériaux

Magnétiquement, nous utilisons deux matériaux :

- Un matériau magnétique dur, l'AlNiCo pour la réalisation de l'aimant. Le choix de l'aimant dépendra du type de réglage du relais choisi mais aussi de la température.
- Un matériau magnétique doux pour la réalisation de l'armature et de la palette. Ce matériau est composé d'un alliage Fer/Nickel avec une perméabilité statique relative de l'ordre de 100 000 et d'une induction à saturation de l'ordre de 1.5T.

Des contraintes industrielles existent pour la réalisation de pièces métalliques, elles dépendent du matériau et de la technologie utilisée. Par exemple, en découpe traditionnelle, nous ne pouvons pas utiliser des matériaux trop épais ni des largeurs trop petites.

Le choix du matériau dépendra donc de la géométrie désirée et du processus industriel associé.

D'un côté, pour un même nombre d'ampères-tours d'excitation, l'utilisation d'un matériau à haute perméabilité augmente le flux magnétique dans le circuit magnétique.

D'un autre côté, l'épaisseur de peau étant plus importante avec un matériau à plus faible perméabilité, la section utile des pièces magnétiques peut être plus importante. Nous venons de mettre en évidence une contradiction. Nous la résoudrons une fois la géométrie et le processus de fabrication choisis.

Bilan de la modélisation fonctionnelle

Nous venons de voir les différents points faibles de la structure actuelle et nous avons trouvé des solutions potentielles. Voici un récapitulatif des différentes actions néfastes ou mal réalisées issues de notre analyse :

<i>Actions néfastes ou mal réalisées</i>	<i>Solutions envisagées</i>
Flux de fuite de l'aimant	Ajout de la matière autour de l'aimant
	Aimant à l'intérieur de l'armature en U
Problématique électrique : Sensibilité de l'impédance	Modification de la structure pour limiter l'influence de l'entrefer sur l'impédance et le nombre d'ampères-tours nécessaires au déclenchement (utilisation d'un deuxième shunt).
Problématiques mécaniques : Interactions pousoir/palette non optimum	Augmentation de la force et de la course du pousoir
	Diminution de la force de réarmement du relais
	Développement d'un relais bistable
Problématique magnétique : Saturation du shunt par le flux généré par la bobine	Utilisation de l'épaisseur de peau pour que la section utilisée par le flux de la bobine soit petite devant celle utilisée par le flux de l'aimant
Problématique magnétique : Sensibilité et influence de l'entrefer	Diminution de l'entrefer pour augmenter le flux généré par la bobine
	Augmentation de l'entrefer pour diminuer la sensibilité de l'impédance lorsque l'entrefer varie.

<i>Actions néfastes ou mal réalisées</i>	<i>Solutions envisagées</i>
Problématique matériaux : Flux magnétique mal conduit par l'armature et la palette	Changement de matière en fonction de la géométrie et du processus

Nous avons donc listé les différentes problématiques mais également les solutions envisageables. Nous ne les utiliserons pas toutes et d'ailleurs certaines se contredisent. En fait, le choix d'une solution dépendra des objectifs que nous nous fixerons.

L'objectif principal est la diminution du coût global de l'actionneur en améliorant les performances. Une analyse causale sur le coût va permettre de définir les paramètres sur lesquels nous devons intervenir.

2.b - Analyse causale

2.b.1 - Méthode et objectifs

Nous désirons utiliser une analyse causale pour réaliser une étude de coût : "pourquoi l'actionneur coûte-t-il cher ?". Cette étude a été menée avec l'aide de personnes du bureau d'étude et de la fabrication.

Le coût de fabrication d'un produit est primordial pour les industriels. Il sera un des critères de l'optimisation et nous permettra de définir des priorités. Trois objectifs différents sont associés à cette étude.

- Tout d'abord, une étude complémentaire permet d'éviter un oubli de certains problèmes. Avec deux modélisations différentes en termes de méthode et d'objectifs, nous limiterons les erreurs. De plus, cette étude nous permet d'intégrer de façon macroscopique les problèmes de fabrication.
- Ensuite, nous voulons comprendre les principales raisons du coût du relais. Est-ce un problème structurel, de processus ou de maîtrise de certains paramètres trop sensibles ? Nous ne travaillerons pas sur l'optimisation du processus, mais si certains aspects sont liés à la structure propre du relais, nous tenterons de les simplifier.
- Enfin, nous confronterons dans le §2.d les résultats de la modélisation fonctionnelle et de l'analyse causale. Nous quantifierons ainsi l'impact de chaque paramètre sur les performances et le coût d'un actionneur. Nous aurons ainsi la possibilité d'ordonner nos priorités et d'orienter nos choix techniques.

2.b.2 - Analyse causale

Les outils de la méthodologie TRIZ que nous avons utilisés pour l'analyse de la modélisation fonctionnelle seront les mêmes que ceux de l'analyse causale. Nous utiliserons donc des brevets, des bases d'effets scientifiques [ANNEXE II], la théorie d'évolution des produits, le principe d'idéalité et des documents scientifiques internes à Hager ou provenant d'internet.

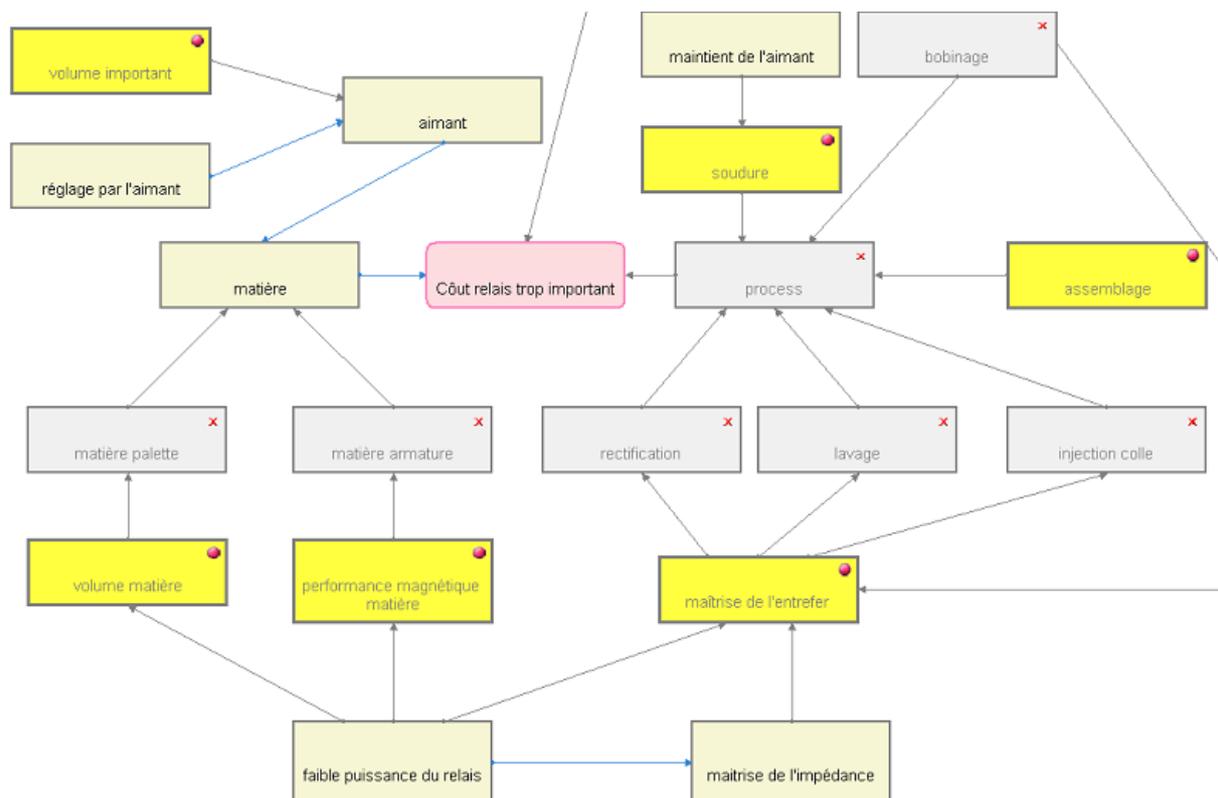


Figure 26 : partie de l'analyse causale sur le coût du relais

Sur la Figure 26, nous pouvons observer la majeure partie⁷ de l'analyse causale sur le coût du relais. L'objectif au centre de l'image est : "coût relais trop important". Nous pouvons en déduire 3 causes principales :

- La part matière : elle est essentiellement liée à la matière de l'armature, de la palette et de l'aimant.
- Le processus de fabrication : nous nous limitons à une analyse macroscopique. Les principales causes sont les problématiques de soudure, de rectification, de lavage, d'injection de colle et bien sûr d'assemblage.

⁷ Une visualisation de l'ensemble du graphique ne serait pas lisible

- Le taux de rebut qui provient essentiellement du réglage et de la casse du fil de la bobine.

Dans le prochain paragraphe, nous verrons les principaux résultats que nous avons obtenus.

2.b.3 - Analyse du modèle de causalité

Comme pour la modélisation fonctionnelle, ce travail d'analyse est divisé en trois étapes :

- Sélection de la problématique à résoudre
- Compréhension de la problématique
- Résolution de la problématique

Dans la suite de ce mémoire, nous ne déroulerons pas l'ensemble de la méthodologie, seuls les problématiques et les pistes de solutions seront évoquées.

Les deux sources de coût du relais sont la matière et le processus industriel. Nous diviserons donc cette analyse en deux parties en commençant par l'étude de la matière.

Sources de coût liées à la matière

Ce coût est globalement réparti sur trois pièces différentes : l'armature, la palette et l'aimant.

- Pour l'aimant, le coût varie en fonction de la matière utilisée et le volume de l'aimant.
 - En ce qui concerne la matière, la technologie actuelle utilise un ALNICO⁸. Cet aimant a comme avantage d'être facilement réglable et permet de régler le seuil de déclenchement de l'actionneur. Il a comme inconvénient d'être relativement cher par rapport à un aimant ferrite. Une solution serait de changer la matière de l'aimant et par là même, changer le mode de réglage des actionneurs.
 - Pour le volume de l'aimant, nous devons l'optimiser. Cela passe par une augmentation de la part réellement utile du flux généré par l'aimant. Nous pouvons limiter les flux de fuites ainsi que les saturations locales.
- Nous retrouvons les deux mêmes pistes de travail pour la palette et l'armature.

⁸ Alliage d'aluminium, de nickel, de fer et de cobalt

- Les matières de la palette et de l'armature sont les mêmes. Nous utilisons actuellement un alliage à base de fer et de nickel très performant magnétiquement mais qui a un coût élevé. L'idéal serait d'utiliser une matière moins chère et aussi performante, malheureusement le prix d'un matériau est la plupart du temps lié à ses performances. Cependant, nous pouvons peut-être utiliser une matière moins performante tout en assurant un fonctionnement équivalent.
- Le volume des pièces actuelles n'est peut-être pas optimisé. Une diminution du volume est donc envisageable.

Nous allons maintenant nous intéresser aux causes du coût du processus de fabrication.

Sources de coût liées au processus de fabrication

Nous limiterons cette étude aux étapes générant les coûts les plus importants.

- L'assemblage : la solution envisagée devra être assemblable de façon automatisée. Concrètement, nous élaborerons une ou plusieurs structures et nous les présenterons aux différents intervenants. Leurs remarques et leurs conseils sur les autres aspects (mécaniques et assemblage) seront alors pris en compte pour améliorer le produit.
- La soudure : nous remarquons que la soudure de l'aimant sur l'armature génère un coût important. La question est alors la suivante : Pourquoi devons-nous souder l'aimant ?

La réponse est très simple : un mouvement de l'aimant entraînerait obligatoirement un dérèglement du relais et donc un mauvais fonctionnement du produit différentiel. Dans la prochaine structure, nous devons nous assurer du maintien de l'aimant dans une position donnée et si possible, sans soudure.

- Un grand nombre d'étapes du processus sont nécessaires pour maîtriser un faible entrefer. Parmi celles-ci, nous retrouvons la rectification, le lavage... Le niveau d'exigence sur ces fonctions est très élevé ce qui augmente l'engagement financier.

Avec la structure actuelle, il est nécessaire d'obtenir un entrefer le plus petit et le plus constant possible pour permettre le fonctionnement de l'actionneur dans les valeurs de puissance et d'impédance souhaitées.

Il serait préférable de travailler avec des entrefers plus grands en acceptant une variation plus importante de leur état de surface. Si une structure est capable de travailler avec un entrefer plus grand, nous pourrions envisager d'éliminer un grand nombre d'étapes du processus extrêmement onéreuses.

Bilan de l'analyse du modèle causal

Comme pour la modélisation fonctionnelle, nous allons lister les principaux défauts, ou plutôt les principales causes des défauts :

- Le flux généré par l'aimant n'est pas totalement utilisé.
- Le volume, la forme et la matière de l'armature et de la palette ne sont pas optimisés.
- La maîtrise de la position de l'aimant est nécessaire.
- Nous devons utiliser des entrefers précis pour maîtriser l'impédance et minimiser le nombre d'ampères-tours nécessaire au déclenchement.

2.c - Contraintes de fabrication

Nous devons intégrer le mieux possible les contraintes industrielles. Cependant, elles dépendent beaucoup de la géométrie de l'actionneur. Chaque géométrie aura ses propres contraintes industrielles. Nous allons nous imposer des règles générales :

- Proposer des structures réalisables en production de masse et pas uniquement en prototypage. Cela impose de prendre en compte les contraintes des matières utilisées et les processus associés. Par exemple, en utilisant la matière actuelle, nous devons travailler avec des épaisseurs faibles car les pièces sont obtenues par usinage. Si nous changeons de matière, il faudra introduire les contraintes du processus associé (découpe, pliage, forgeage, injection, traitements thermiques...).
- Comme il est difficile de se passer d'une bobine, nous devons prendre en compte le bobinage de celle-ci. Par exemple, il faut réserver un volume suffisant pour pouvoir bobiner un nombre conséquent de spires. La section du fil est également contrainte par les industriels pour limiter les casses fils et les difficultés de bobinage.

Ces réflexions semblent évidentes mais il existe souvent un fossé entre ce qu'on pense être réalisable et ce qui l'est réellement en production (du point de vue de la conception). Les contraintes de fabrication et de conception sont totalement différentes et faire appel aux spécialistes industriels permet de s'engager directement dans de bonnes directions.

2.d - Conclusion sur l'étude menée à partir de la méthodologie TRIZ

2.d.1 - Conclusion sur la méthodologie utilisée

L'utilisation de la méthodologie TRIZ nous a permis d'organiser notre démarche en commençant par la description du fonctionnement du relais (modélisation fonctionnelle),

suivie d'une analyse de coût du produit (analyse causale). Ces deux étapes ont servi à définir les véritables problèmes de la structure actuelle. La redéfinition simple des problèmes est essentielle pour la conception et la méthodologie TRIZ est très bien adaptée à ce type d'exercice.

Un des points forts de cette méthode est qu'elle est pluridisciplinaire. Dans notre application, nous avons été capables d'analyser des systèmes mécaniques, électriques et magnétiques sans difficultés majeures.

En ce qui concerne les outils d'aide à la créativité, ils permettent de systématiser la recherche de solution et d'obliger les utilisateurs à se poser des questions. Cette méthodologie n'est pas un outil « presse-bouton » pour résoudre des problèmes mais il développe l'imagination des inventeurs.

2.d.2 - Résultats obtenus à partir de la méthodologie TRIZ

L'étude complète est relativement dense et les résultats obtenus sont nombreux et parfois contradictoires. Le produit idéal permettrait de résoudre toutes les problématiques mais malheureusement, cela semble assez difficile. Il est alors nécessaire de trier les pistes de solution et de retenir celles qui semblent les plus pertinentes.

Le choix des solutions à traiter est un choix propre à l'utilisateur. Certains outils comme l'analyse de la valeur peuvent aiguiller ces choix. Avec la modélisation fonctionnelle, nous pouvons déterminer le poids de chaque composant et le rang de problème. Ces paramètres dépendent des valeurs des fonctions qui leur sont propres et de leur éloignement à une cible. Nous pouvons également déterminer leur coût. Il est alors possible de les trier par coût, par valeur de fonction ou par une fonction des deux. Dans notre application industrielle, le coût nous permettra principalement de faire nos choix.

Les problématiques liées à l'impédance se retrouvent dans la modélisation fonctionnelle et dans l'analyse causale. Notre objectif sera donc la réduction de la sensibilité de l'impédance. Comme nous l'a montré la modélisation fonctionnelle, cette sensibilité provient essentiellement de la dépendance aux variations de l'entrefer. Cet objectif est en réalité deux objectifs différents.

- Dans un premier temps, nous devons dissocier structurellement l'impédance et l'entrefer équivalent : idéalement, l'impédance du relais ne doit pas dépendre de l'entrefer. Nous verrons dans le paragraphe suivant qu'une structure à circuit magnétique fermé permet de dissocier l'impédance et l'entrefer équivalent. Cette solution répond au problème « sensibilité de l'impédance » de la modélisation fonctionnelle et aux problèmes de réglage de l'analyse causale.

- Dans un deuxième temps, nous devons augmenter l'amplitude des variations acceptées par l'entrefer, c'est à dire augmenter l'entrefer. Concrètement, c'est le principal levier pour une diminution du coût et une augmentation de la stabilité du fonctionnement. C'est une des solutions qui a été évoquée dans la modélisation fonctionnelle (« sensibilité et influence de l'entrefer »). Cette solution répond en partie aux problématiques de rebut et de processus de fabrication (rectification) de l'analyse causale. Nous devons alors rechercher une structure capable de fonctionner avec une épaisseur d'entrefer plus importante. C'est ce que nous réaliserons dans le chapitre III.
- Notre dernier objectif portera sur un autre paramètre important que nous retrouvons dans les deux modélisations : c'est le nombre d'ampères-tours nécessaires au déclenchement. Afin que la chaîne de mesure consomme le moins d'énergie possible, nous devons diminuer le nombre d'ampères-tours nécessaire au déclenchement. C'est une solution aux problèmes de volume de matière et de maîtrise de l'entrefer (analyse causale). Une solution à cette problématique sera apportée dans le chapitre III.

3 - VERS UNE NOUVELLE STRUCTURE D'ACTIONNEUR ELECTROMECHANIQUE

3.a - Le cahier des charges de la nouvelle structure

Les trois principaux objectifs qui viennent d'être définis doivent être priorisés. En effet, le type de structure qui sera mis en œuvre en dépendra.

- Objectif principal : le plus important est une séparation structurelle de l'impédance et de l'entrefer. Comme nous l'avons vu précédemment, les variations d'impédance sont sources de rebut et compliquent le réglage du produit différentiel.
- Second objectif : l'augmentation des variations acceptées par l'entrefer, c'est-à-dire l'augmentation de l'épaisseur de l'entrefer. Celle-ci doit être suffisamment importante pour rendre l'entrefer relativement indépendant du positionnement de la palette sur l'armature. De même, le fonctionnement du relais ne doit pas être affecté par de petites particules polluantes sur les surfaces polaires.
- Troisième objectif : enfin, nous voulons diminuer le plus possible le nombre d'ampères-tours consommés par notre actionneur. Cela semble contradictoire avec l'augmentation de l'entrefer. Nous serons ainsi amenés à faire le compromis en essayant de maintenir le nombre d'ampères-tours au niveau actuel.

Nous devons également répondre à un certain nombre de contraintes, comme le maintien des performances mécaniques et électriques, l'encombrement de l'actionneur, la faisabilité industrielle du dispositif... Nous les intégrerons autant que possible dans nos modèles et elles définiront le cadre d'étude.

3.b - Structure actuelle sans rectification

Avant de réfléchir à une nouvelle structure d'actionneur, nous devons nous assurer que la structure actuelle ne répond pas à notre besoin. En effet, ce serait la solution la plus simple et la plus rapide à mettre en place.

Ce que nous désirons, c'est un entrefer plus important, une impédance plus stable et un nombre d'ampères-tours nécessaire au déclenchement plus faible.

La première idée qui vient à l'esprit est : est-il possible d'utiliser la structure actuelle sans les étapes de maîtrise de l'entrefer (rectification, lavage...)? Nous devons alors en vérifier l'impact sur l'impédance et la puissance de déclenchement.

Les palettes et les armatures sont obtenues par usinage. Ce procédé ne permet pas de maîtriser l'état de surface des pièces de manière satisfaisante. Cela entraîne un mauvais contact entre les deux pièces. Par exemple, sur la Figure 27, nous pouvons observer l'état de la petite surface polaire après usinage. La Figure 28 présente la même surface mais après la rectification. Nous constatons que la réalisation des chanfreins fait de la petite surface polaire une surface très perturbée.



Figure 27 : Petite surface polaire brute



Figure 28 : Petite surface polaire après rectification

Lorsque les pièces sont assemblées avec la palette (voir Figure 29), les surfaces de contact ne sont plus du tout du même ordre de grandeur.



Figure 29 : Comparaison relais avec et sans rectification

Avec des surfaces polaires brutes et en se plaçant dans la configuration actuelle (même aimant, même ressort), la force magnétique n'est pas suffisante pour contrer la force mécanique du ressort même avec un aimant magnétisé au maximum. Le relais n'est alors plus fonctionnel. L'utilisation de la structure actuelle avec des surfaces polaires brutes n'est pas envisageable.

Nous venons donc de voir qu'il n'est pas possible d'utiliser les pièces brutes sans modifications. En voyant l'état des surfaces polaires brutes, nous pouvons imaginer utiliser des surfaces plus précises tout en évitant la rectification. Formulé différemment, la structure actuelle est-elle capable de fonctionner avec un entrefer plus important ?

En pratique, il est possible de générer une force magnétique suffisante pour contrer la force mécanique du ressort mais le réglage est impossible. Nous devons maîtriser l'impédance et le nombre d'ampères-tours de l'actionneur ce qui est impossible lorsque l'entrefer subit de grandes variations.

Nous devons trouver des solutions pour que le fonctionnement du relais soit possible avec des entrefers équivalents plus importants.

3.c - Actionneurs à entrefers plus importants

L'entrefer équivalent a donc une forte influence sur les ampères tours nécessaires au déclenchement. L'utilisation d'entrefers plus importants est cependant un des objectifs de cette étude.

D'un point de vue magnétique, ce n'est pas réellement l'entrefer équivalent qui nous intéresse mais plutôt la réluctance d'entrefer (voir Équation 7).

$$\mathfrak{R}_{\text{entrefer}} = \frac{l_{\text{entrefer}}}{\mu_0 \times S_{\text{entrefer}}}$$

Équation 7 : Réluctance de l'entrefer équivalent

l_{entrefer} est la longueur de l'entrefer

S_{entrefer} est la surface à travers laquelle passe le flux magnétique

μ_0 est la perméabilité du vide

Si l'entrefer augmente, la réluctance d'entrefer augmente proportionnellement. Une des solutions pour contrer ce phénomène est une augmentation de la surface à travers laquelle passe le flux magnétique.

La première idée est donc d'utiliser des surfaces polaires plus importantes pour permettre l'utilisation d'entrefers plus grands. Concrètement, si nous désirons doubler l_{entrefer} , nous devons alors doubler S_{entrefer} . Avec une structure équivalente à celle utilisée actuellement,

une telle modification serait théoriquement transparente pour l'impédance puisque les réluctances d'entrefer restent constantes (voir Équation 4).

L'inconvénient principal de l'augmentation des surfaces polaires est qu'avec un même flux magnétique, il y a une diminution de la force magnétique exercée sur la palette (voir Équation 8). Cela signifie que si nous voulons une force magnétique équivalente à celle générée aujourd'hui, nous devons augmenter le flux magnétique. Cette solution n'est pas du tout satisfaisante dans l'état actuel.

$$F_{magnétique} = \frac{\varphi^2}{2 \times \mu_0 \times S_{surface_polaire}}$$

φ est le flux traversant la surface

μ_0 est la perméabilité du vide

Équation 8 : Force magnétique sur une surface polaire

Nous devons trouver une manière d'augmenter les surfaces polaires en conservant la valeur du flux magnétique et celle de la force magnétique. Nous proposons d'optimiser l'utilisation des flux magnétiques générés par l'aimant et la bobine.

Ces flux magnétiques passent par l'entrefer équivalent de la petite surface polaire, par la palette, par l'entrefer équivalent de la grande surface polaire et enfin se reboucle sur l'armature. Dans la plupart des actionneurs existants et en particulier dans le relais Hager, les deux surfaces ne sont pas utilisées de manière optimale pour la génération d'une force magnétique.

En effet, deux raisons font qu'une seule des deux surfaces est utilisée :

- La différence de section des surfaces polaires : d'un côté, la petite surface polaire a une petite section qui permet de générer beaucoup de force. Les dimensions de cette surface sont également soumises à une contrainte industrielle : il est nécessaire de réserver un emplacement pour permettre le bobinage. De l'autre, la grande surface polaire a une grande section qui permet de diminuer la réluctance d'entrefer.
- La position du point de pivot favorise la force magnétique sur la petite surface polaire.

A flux magnétique constant, la différence de section des surfaces polaires a un impact direct sur la valeur de la force comme nous pouvons le voir sur l'Équation 8.

Dans le cas de notre actionneur, le flux traversant la petite surface polaire est équivalent au flux traversant la grande surface polaire. La force magnétique sur cette dernière est donc beaucoup moins importante que celle sur la petite surface polaire.

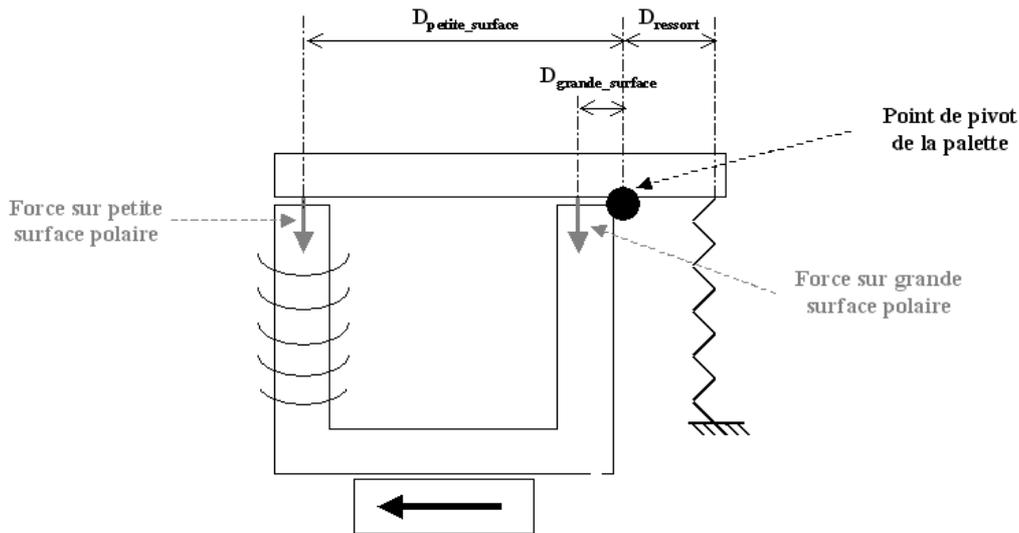


Figure 30 : Bilan des forces sur le relais

A un positionnement du poussoir fixe, le positionnement du point de pivot n'est pas avantageux pour la grande surface polaire. Comme on peut l'observer sur la Figure 30, la force exercée sur la grande surface polaire est très proche du point de pivot, contrairement à celle sur la petite surface polaire.

En réalité, la distance $D_{\text{grande_surface}}$ entre le point de pivot et le point d'application de la force sur la grande surface polaire est douze fois moins importante que la distance $D_{\text{petite_surface}}$ séparant le point d'application de la force sur la petite surface polaire et le point de pivot.

Dans le cas de la structure actuelle, la grande surface polaire ne sert qu'à la création d'un circuit magnétique le moins réactif possible. Elle réalise cette fonction de manière insuffisante et elle comporte des effets néfastes. Nous limitons ces effets néfastes par exemple en augmentant la section (diminution de la réactance d'entrefer). Nous allons essayer d'utiliser ce "composant" pour la réalisation d'autres fonctions utiles.

La solution proposée est la suivante : nous allons rapprocher les deux surfaces polaires afin de les utiliser toutes les deux. Ainsi, le flux magnétique circulant dans les deux surfaces polaires sera utilisé pour deux choses :

- Pour la création du couple magnétique servant à maintenir la palette en place. Nous pourrions alors soit augmenter le couple magnétique en conservant la valeur actuelle du flux magnétique, soit diminuer le flux magnétique en conservant la valeur actuelle du couple magnétique.
- Pour la création du couple différentiel magnétique servant à déclencher l'actionneur, nous pourrions alors soit augmenter la valeur du couple différentiel en

conservant la valeur du courant excitateur, soit diminuer la valeur du courant excitateur en conservant la valeur du couple différentiel. Dans notre application, nous souhaitons conserver la valeur du couple différentiel.

Si l'entrefer est plus important, la valeur du courant excitateur nécessaire au déclenchement augmentera. En utilisant les deux surfaces polaires, nous pouvons limiter cette augmentation.

Ainsi, pour conserver les performances mécaniques et électriques de notre actionneur, nous allons augmenter les entrefers équivalents, nous allons nous servir des deux surfaces polaires, augmenter l'aire de ces surfaces et conserver le même courant excitateur et la même force mécanique. Les performances de l'actionneur actuel seront donc maintenues même en utilisant un entrefer plus important.

3.d - Utilisation d'actionneurs à circuits magnétiques fermés

L'emploi d'entrefer équivalents plus importants peut certes diminuer les variations d'impédance, mais n'est nullement efficace sur de plus fortes fluctuations de l'entrefer. La problématique principale est que l'entrefer et l'impédance sont liés directement (voir Équation 4).

Pour limiter le lien entre l'entrefer et l'impédance, nous proposons d'étudier une structure à circuit magnétique fermé. C'est une structure où le circuit magnétique embrassé par la bobine se referme sur lui-même sans intervalle d'air. Cette solution provient d'une réflexion simple : quel est le circuit magnétique le moins réticent vu par une bobine et ne dépendant pas d'un entrefer ? La réponse est un circuit magnétique fermé sans entrefer. Nous l'avons alors adapté pour qu'il fonctionne avec une pièce mobile maintenue en équilibre entre un couple magnétique (aimant) et un couple mécanique (ressort).

Pour la réalisation d'un tel circuit magnétique, nous proposons l'utilisation d'un deuxième shunt comme nous l'avons défini au paragraphe 2.a.3 (voir Figure 25). La structure représentée sur la Figure 31 en est un exemple. Le poussoir n'est pas représenté sur cette figure mais il est positionné sur la palette. La position finale sera déterminée suivant le besoin de la serrure mécanique qu'il faudra déverrouiller.

Le fonctionnement de cet actionneur peut être décrit ainsi. Le flux généré par l'aimant sature les deux shunts magnétiques et passe par la palette, cela crée une force magnétique qui maintient la palette en position. Le flux magnétique généré par la bobine s'oppose au flux de l'aimant dans la palette et dans le shunt supérieur. Le flux provenant de la bobine reboucle par le shunt du bas.

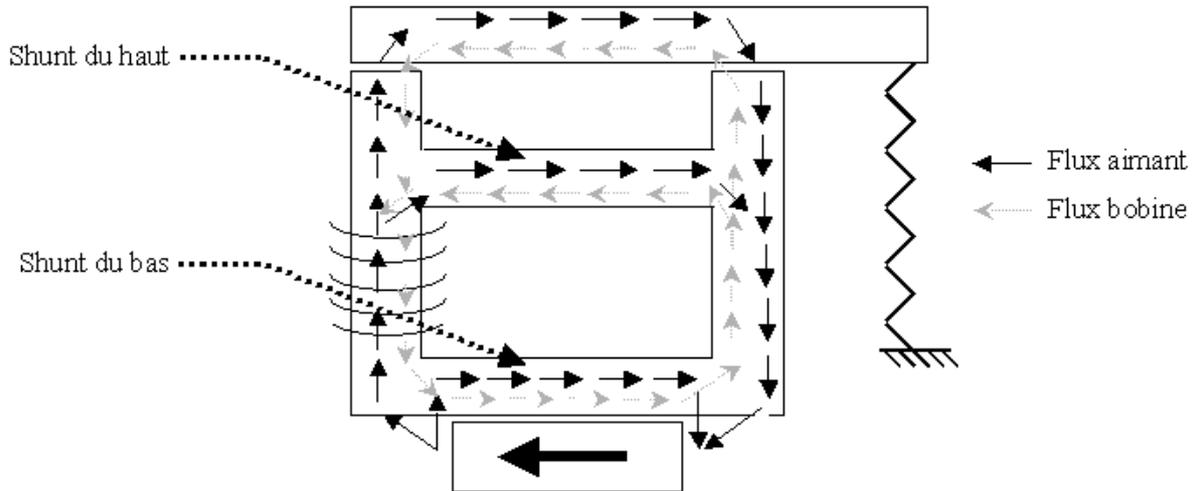


Figure 31 : relais à circuit magnétique fermé

Avec ce type de structure, la réluctance vue par la bobine (voir Équation 6) et donc l'inductance de la bobine (voir Équation 3) sont quasiment indépendantes de l'entrefer. Le calcul plus détaillé des impédances se fera dans le chapitre suivant.

4 - CONCLUSION

La modélisation fonctionnelle a permis de comprendre le fonctionnement du relais et de mettre en évidence ses points faibles. Des pistes de solutions ont alors été énoncées et seront étudiées en fonction des objectifs.

Ces objectifs ont été fixés à l'aide de l'analyse causale du coût du relais. La maîtrise structurelle de l'impédance sera notre objectif prioritaire et l'augmentation de la valeur de l'entrefer équivalent notre objectif secondaire. Enfin, la diminution du nombre d'ampères-tours consommé par l'actionneur sera notre dernier objectif.

Une structure d'actionneur à circuit magnétique fermé est alors proposée. Elle semble répondre à notre principal objectif, la diminution des variations de l'impédance. Nous vérifierons cela par calcul dans le chapitre suivant. Nous vérifierons alors l'impact de cette modification sur les ampères-tours nécessaires au déclenchement et sur la valeur de l'entrefer équivalent.

CHAPITRE III

Modélisation et optimisation des actionneurs

CHAPITRE III – MODELISATION ET OPTIMISATION DES ACTIONNEURS63

1 - INTRODUCTION	63
2 - IMPEDANCE D'ACTIONNEURS A CIRCUIT MAGNETIQUE FERME ..	63
2.a - Les actionneurs étudiés	63
2.b - Les réseaux de réluctances	64
2.b.1 - Description des matériaux ferromagnétiques doux	64
2.b.2 - Description des matériaux ferromagnétiques durs	66
2.b.3 - Réluctances du circuit magnétique.....	67
2.c - Variation de l'impédance en fonction de l'entrefer équivalent.....	69
3 - MODELISATION NUMERIQUE.....	73
3.a - Modélisation FLUX 2D.....	74
3.b - Modélisation FLUX 3D	81
3.c - Utilisation d'un entrefer plus important.....	82
4 - MODELISATION ANALYTIQUE.....	84
4.a - Le modèle réluctant	84
4.b - Intégration d' une partie du cahier des charges dans la modélisation.....	86
4.c - Mise en évidence des difficultés de la modélisation.....	88
4.d - Comparaison avec la modélisation numérique	90
4.e - Optimisation du modèle	92
5 - CONCLUSION	96

CHAPITRE III – MODELISATION ET OPTIMISATION DES ACTIONNEURS

1 - INTRODUCTION

Le concept d'une nouvelle structure d'actionneur à circuit magnétique fermé a été posé dans le chapitre précédent.

Dans ce chapitre, nous vérifierons l'influence de l'entrefer équivalent sur l'impédance de la bobine dans une structure fermée. Nous le ferons à l'aide d'une modélisation analytique.

Nous intégrerons ensuite les différentes pistes d'améliorations qui ont été énoncées dans le chapitre précédent. Différentes géométries seront alors proposées et nous étudierons les performances de chacune d'elles à l'aide d'une modélisation numérique en deux dimensions.

Une fois la géométrie fixée, une phase d'optimisation sera alors mise en place en utilisant des modèles analytiques. Pour ce faire, nous utiliserons le logiciel pro@design®.

2 - IMPEDANCE D'ACTIONNEURS A CIRCUIT MAGNETIQUE FERME

2.a - *Les actionneurs étudiés*

Afin de vérifier l'influence de l'entrefer équivalent sur l'impédance de la bobine d'un actionneur à circuit magnétique fermé, nous utiliserons une modélisation analytique basée sur les réseaux de réluctances.

Nous comparerons deux structures d'actionneurs.

- La première est celle de l'actionneur Hager qui est la technologie la plus fréquente. Sur la Figure 32, nous avons rappelé la structure du relais Hager.

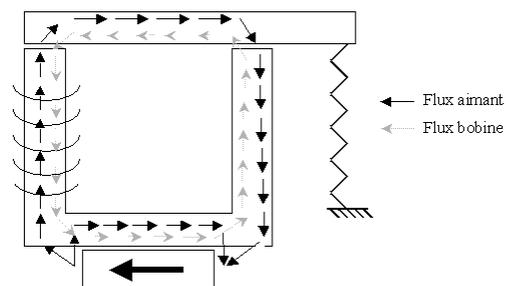


Figure 32 : Actionneur classique

- La seconde structure (Figure 33) est celle d'un actionneur comprenant un circuit magnétique fermé.

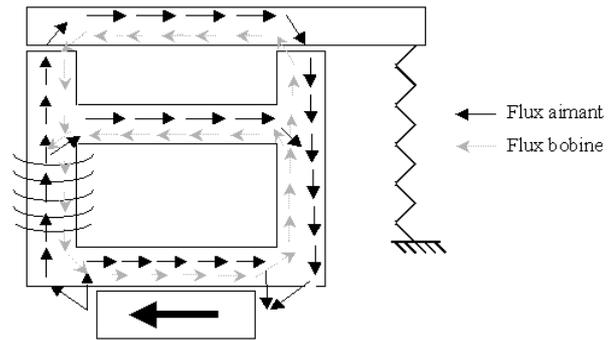


Figure 33 : Actionneur à circuit magnétique fermé

Cette modélisation analytique ne prend pas en compte les flux de fuites. Leurs influences ne sont pas négligeables car l'actionneur comporte des zones de saturation et le positionnement de l'aimant n'est pas optimal car il favorise les fuites magnétiques.

En se plaçant dans la zone de fonctionnement du relais, ces flux de fuites sont relativement constants. Nous commettons donc une erreur sur la valeur réelle du flux magnétique qui traverse la palette (nous la surestimons) mais pas sur l'allure des variations sur celui-ci (les flux de fuites restent relativement constants).

2.b - Les réseaux de ré reluctances

2.b.1 - Description des matériaux ferromagnétiques doux

Les matériaux ferromagnétiques doux [COU] (champ coercitif faible) sont utilisés pour la réalisation de l'armature et de la palette de nos actionneurs. Ils sont isotropes et à haute perméabilité magnétique, comme par exemple les alliages ferronickel. Ils sont saturables et nous intégrerons cette saturation dans le fonctionnement.

Pour écrire un modèle analytique de ces actionneurs, nous devons définir une loi de comportement $B(H)$ non linéaire pour un milieu isotrope en prenant en compte la saturation du matériau ainsi que la forme du coude de cette loi de comportement.

Notre étude est basée sur les réseaux de ré reluctances [ALB][DUP], nous utiliserons le théorème d'Ampère et la loi d'Hopkinson [JUF].

$$\oint_C H \cdot dl = \sum NI$$

Équation 9 : Théorème d'Ampère

Où

H est le champ magnétique

I l'intensité parcourant la bobine

N le nombre de spires de la bobine

dl la longueur du circuit magnétique

$$\Re\phi = \sum NI$$

Équation 10 : Loi d'Hopkinson

ϕ le flux magnétique

\Re la réluctance du circuit magnétique

Il est usuel d'utiliser la loi $B(H)$ pour définir le comportement des matériaux. Le modèle analytique intégrant la saturation et le contrôle du coude de cette courbe est défini par l'équation suivante [CED] :

$$B(H) = \mu_0 \times H + J_s \frac{\mu_0 H \left(\frac{\mu_r - 1}{J_s}\right) + 1 - \sqrt{(\mu_0 H \left(\frac{\mu_r - 1}{J_s}\right) + 1)^2 - 4\mu_0 H \left(\frac{\mu_r - 1}{J_s}\right)(1 - a)}}{2(1 - a)}$$

Équation 11 : Loi de comportement $B(H)$ [CED]

Avec

J_s l'induction à saturation du matériau (Tesla)

μ_r la perméabilité relative (constante)

B l'induction magnétique (Tesla)

a le coefficient de contrôle du coude (constante)

μ_0 la perméabilité du vide (Henry/mètre)

H le champ magnétique (Ampère/mètre)

Dans notre cas, il est plus simple d'utiliser la loi $H(B)$ pour revenir à la perméabilité du matériau. Nous proposons d'utiliser le modèle mathématique décrit par l'Équation 12. Ce modèle est issu de l'inversion de l'Équation 11.

$$H(B) = \frac{\mu_r (J_s - B) + B(1 - 2a) - \sqrt{B^2(1 - 2\mu_r) + (J_s - B)^2 \mu_r^2 + 2J_s B[2a(\mu_r - 1) + \mu_r]}}{2(a - \mu_r)\mu_0}$$

Équation 12 : Loi de comportement H(B)

Avec

J_s l'induction à saturation du matériau

μ_r la perméabilité relative

B l'induction magnétique

a le coefficient de coude

μ_0 la perméabilité du vide

H le champ magnétique

$$\text{Avec } H_r(B) = \begin{cases} H(B) & \text{si } B > 0 \\ -H(-B) & \text{sinon} \end{cases}$$

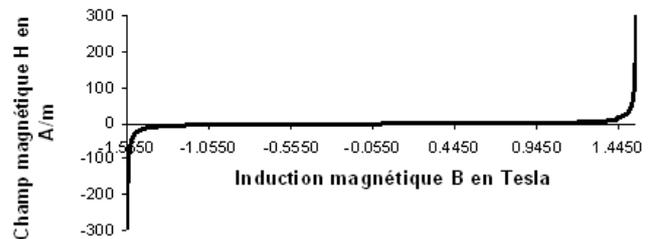


Figure 34 : Loi de comportement H(B)

Nous obtenons ainsi la perméabilité du matériau utilisé :

$$\mu(B) = \begin{cases} B/H_r(B) & \text{si } B \neq 0 \\ 0.01/H_r(0.01) & \text{si } B = 0 \text{ (pour les problèmes de convergence)} \end{cases}$$

La valeur spéciale pour $B=0$ est utilisée pour éviter une division par 0 ($H(0)=0$). En effet, une division par 0 entraîne des problèmes de convergence lorsque l'algorithme de résolution du système d'équation utilise ce point de calcul. Dans la réalité, nous n'avons aucune reluctance qui fonctionne aux alentours de 0. Cette petite astuce ne va donc pas modifier nos résultats mais va permettre d'améliorer la convergence.

2.b.2 - Description des matériaux ferromagnétiques durs

Les matériaux ferromagnétiques durs (champ coercitif élevé) sont utilisés dans les actionneurs pour la réalisation des aimants.

Afin de simplifier la modélisation et permettre l'analyse de l'impédance des actionneurs à circuit magnétique fermé, nous utiliserons des aimants « rigides » comme les ferrites ou les terres rares [BRI]. Ces aimants ont une caractéristique linéaire ce qui simplifie les calculs (voir Figure 35). Cependant, si nous choisissons un réglage de l'actionneur par l'aimant, nous utiliserons plutôt des aimants du type AlNiCo.

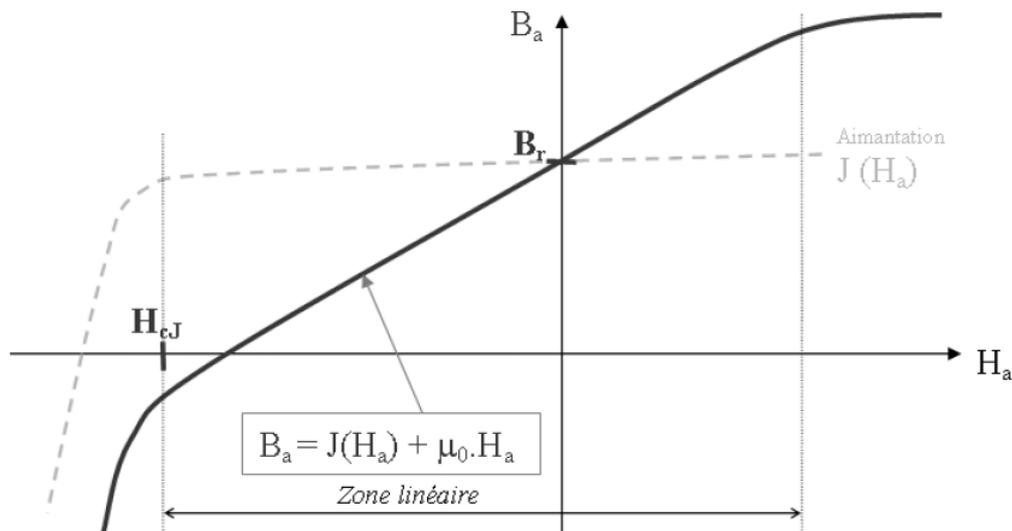


Figure 35 : courbe d'aimantation d'un aimant [MUL]

2.b.3 - Réluctances du circuit magnétique

Le calcul de la variation de l'inductance de la bobine en fonction de l'entrefer se fait en trois étapes.

Tout d'abord, nous devons décrire le circuit magnétique étudié à partir de réluctances magnétiques. Ces réluctances seront définies dans la suite de ce paragraphe.

Ensuite, nous devons résoudre un système d'équations non linéaires pour obtenir la répartition des flux à l'intérieur du circuit magnétique. Dans cette étude, nous devons résoudre ce système implicite pour chaque valeur d'entrefer.

Enfin, nous pourrions calculer la réluctance vue par la bobine qui sera l'inverse de l'image de l'inductance de la bobine pour un même nombre de spires ($L = \frac{N^2}{\mathfrak{R}}$).

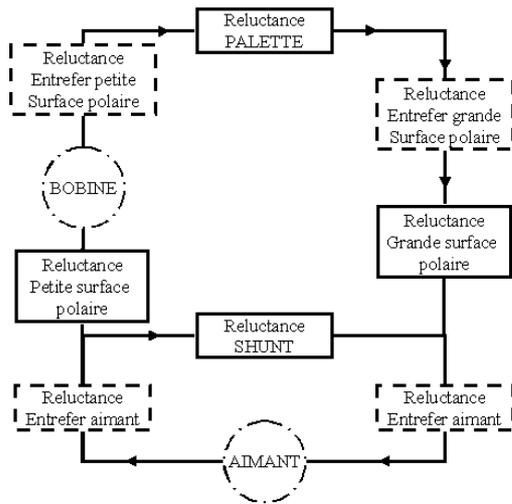


Figure 36 : Réseau de réductance d'un actionneur classique

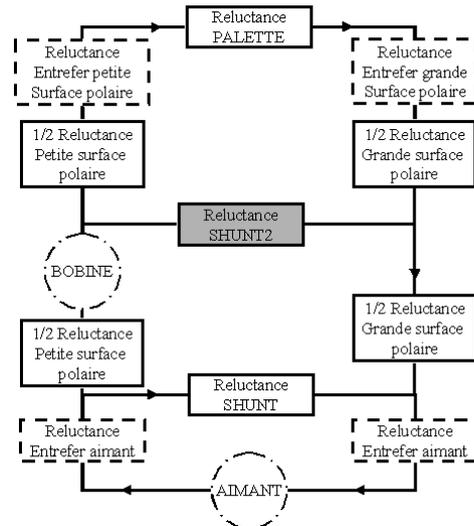


Figure 37 : Réseau de réductance d'un actionneur à circuit magnétique fermé

Nous serons alors en mesure de décrire les deux réseaux de réductances que nous comparerons (voir Figure 36 et Figure 37). Nous utiliserons les mêmes réductances pour les deux structures. Seule la valeur de l'induction magnétique de l'aimant sera modifiée pour obtenir la saturation du shunt supplémentaire de la structure à circuit magnétique fermé.

Les réductances d'entrefer, c'est-à-dire celles qui existent entre l'aimant et l'armature et celles entre la palette et l'armature sont décrites dans l'équation ci-après. Cette réductance est linéaire et elle est de la même forme pour tous les entrefers [HER].

Avec

$$R_{ent}(ent, S) = \frac{1}{\mu_0 \times S} \times ent$$

Équation 13 : Réductance d'entrefer

- ent : entrefer existant entre les deux pièces (m)
- μ_0 : la perméabilité magnétique du vide (H/m)
- S : la surface à travers laquelle passe le flux (m²)

Nous utiliserons le même type de réductance magnétique pour la description des différentes parties de l'actionneur. Avec cette modélisation, nous supposerons que les sections des différentes réductances sont constantes et que la répartition d'induction est constante.

Avec

$$R_{psp}(\phi, S, l) = \frac{1}{\mu\left(\frac{\phi}{S}\right) \times S} \times l$$

Équation 14 : Réductance du bras de l'armature côté petite surface polaire

- ϕ : le flux magnétique
- μ : la perméabilité magnétique non linéaire du matériau utilisé (H/m).
- S : la surface à travers laquelle passe le flux (m²)
- l : longueur de la réductance (m)

Après avoir décrit les structures analytiquement, nous pouvons calculer la répartition des flux magnétiques dans les deux actionneurs.

Pour le calcul de l'induction de l'aimant, nous procédons comme si nous avons une étape de réglage. Nous calculons l'induction de l'aimant pour obtenir un couple de 10 N.mm avec un entrefer de cinq micromètres. Cet objectif sur le couple exercé sur la palette est atteint pour les deux structures.

2.c - Variation de l'impédance en fonction de l'entrefer équivalent

Nous devons maintenant évaluer pour chaque structure la réductance magnétique vue par la bobine.

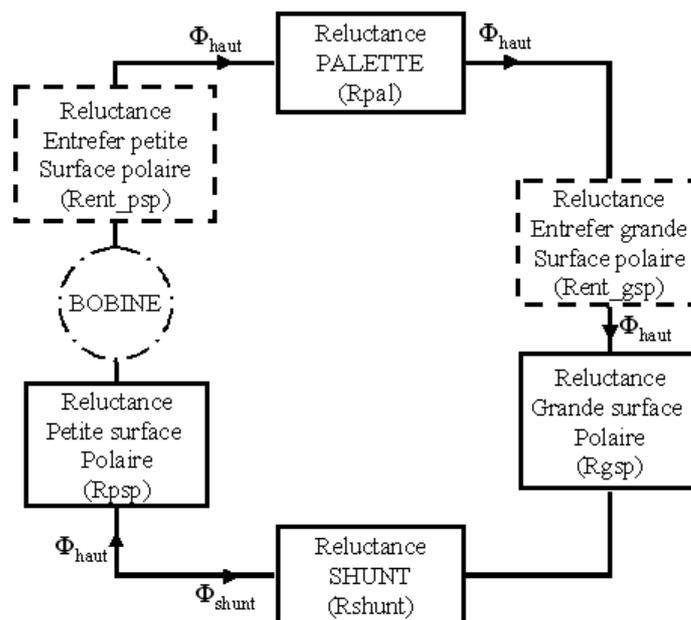


Figure 38 : Réseau de réductance d'un actionneur classique vu par la bobine

Sur la Figure 38, nous observons le réseau de réluctances vu par la bobine pour la structure classique. Par rapport au réseau de réluctances complet, la partie « aimant » est prise en compte pour le calcul des flux mais elle est négligée pour le calcul de la réluctance vue par la bobine.

La réluctance vue par la bobine pour le circuit magnétique classique est la suivante :

$$\mathfrak{R}_{classique} = R_{ent_psp}(\phi_{haut}) + R_{pal}(\phi_{haut}) + R_{ent_gsp}(\phi_{haut}) + R_{psp}(\phi_{haut}) + R_{gsp}(\phi_{haut}) + R_{shunt}(\phi_{shunt})$$

Équation 15 : Réluctance vue par la bobine pour un actionneur classique

Deux flux sont utilisés dans ce cas présent : le flux traversant la réluctance SHUNT (ϕ_{shunt}) et le flux traversant la palette (ϕ_{pal}). Ils sont représentés sur la Figure 39. Ces deux flux ont été calculés en résolvant le système d'équations non linéaires.

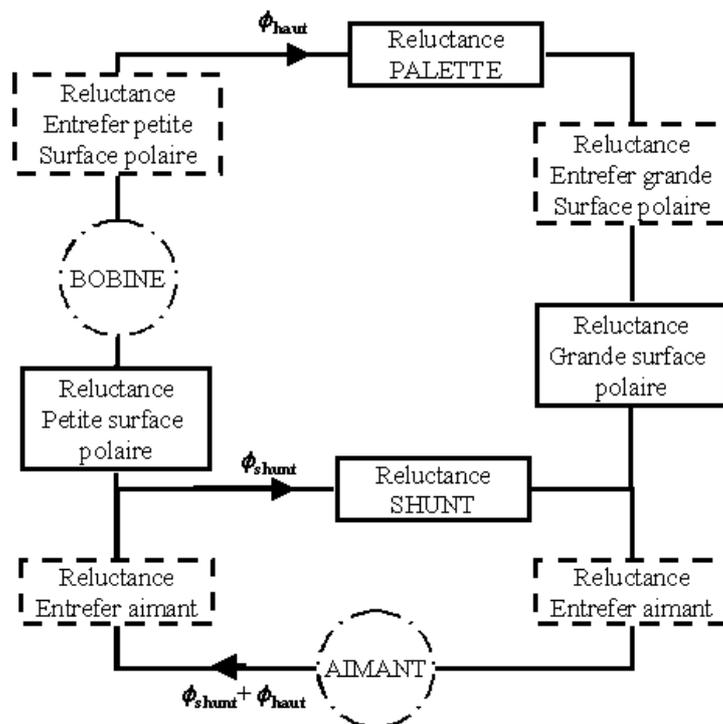


Figure 39 : Réseau de réluctance d'un circuit magnétique classique avec représentation des flux

Un schéma identique pour la structure à circuit magnétique fermé est dessiné sur la Figure 40.

Une réluctance supplémentaire apparaît : SHUNT2. Cette réluctance représente le shunt supplémentaire permettant de conserver un circuit magnétique fermé autour de la bobine. Elle est indépendante de l'entrefer.

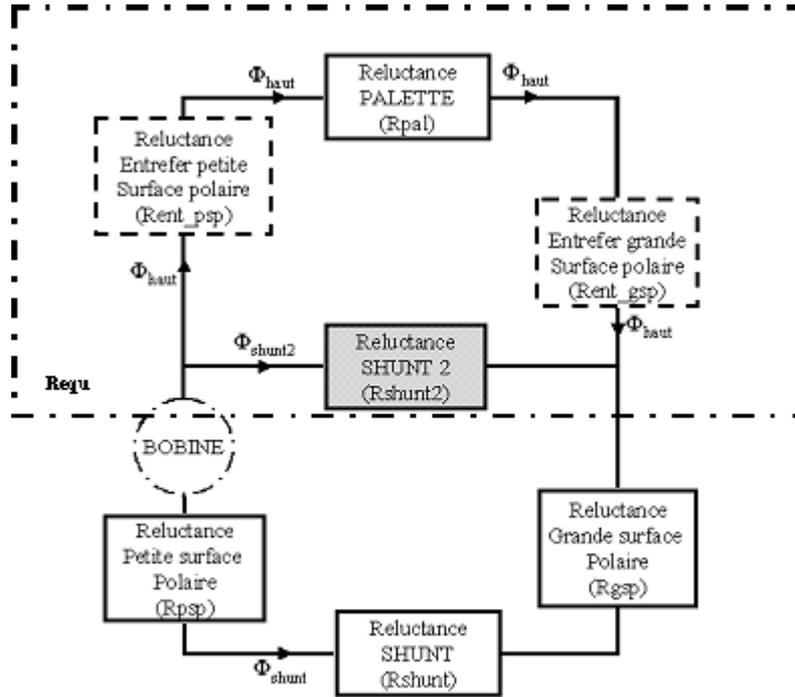


Figure 40 : Réseau de réductances d'un actionneur à circuit magnétique fermé vu par la bobine

La réductance vue par la bobine avec cette structure est la suivante :

$$\mathfrak{R}_{ferme} = \frac{1}{2} R_{psp}(\phi_{haut} + \phi_{shunt2}) + \frac{1}{2} R_{gsp}(\phi_{haut} + \phi_{shunt2}) + R_{shunt}(\phi_{shunt}) + Requ(\phi_{haut}, \phi_{shunt2})$$

Équation 16 : Réductance vue par la bobine d'un actionneur à circuit magnétique fermé

Avec

$$Requ(\phi_{haut}, \phi_{shunt2}) = \frac{[Rent_psp(\phi_{haut}) + R_{pal}(\phi_{haut}) + Rent_gsp(\phi_{haut}) + \frac{1}{2} R_{psp}(\phi_{haut}) + \frac{1}{2} R_{gsp}(\phi_{haut})] \times R_{shunt2}(\phi_{shunt2})}{Rent_psp(\phi_{haut}) + R_{pal}(\phi_{haut}) + Rent_gsp(\phi_{haut}) + \frac{1}{2} R_{psp}(\phi_{haut}) + \frac{1}{2} R_{gsp}(\phi_{haut}) + R_{shunt2}(\phi_{shunt2})}$$

Équation 17 : Réductance équivalente en parallèle

Dans le cas d'un circuit magnétique fermé, trois flux magnétiques ont été calculés par résolution du système d'équations non linéaires : ϕ_{shunt} , ϕ_{shunt2} et ϕ_{haut} . Deux flux magnétiques traversent les shunts et le troisième passe par la palette. Ces flux sont représentés sur la Figure 41.

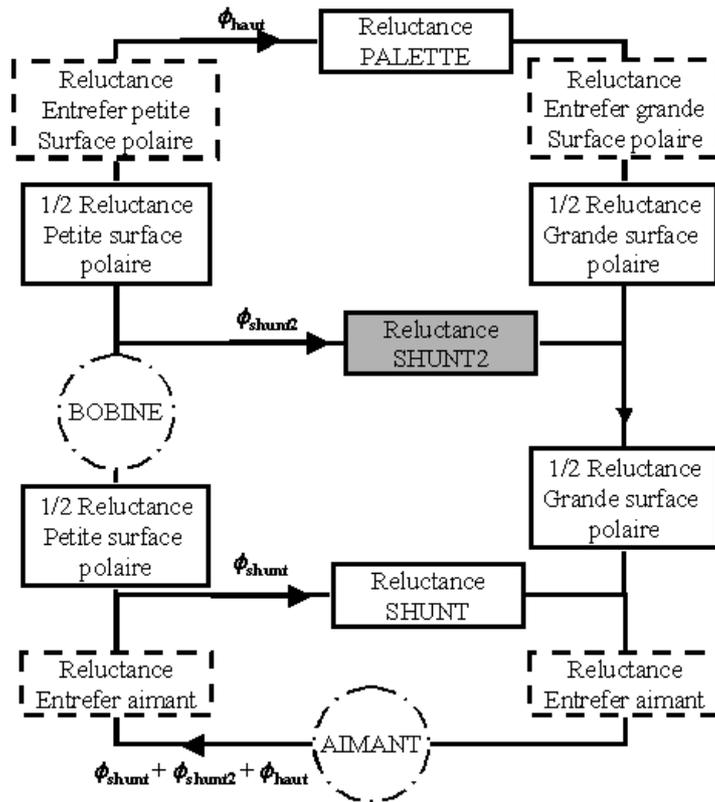


Figure 41 : Réseau de réticence d'un circuit magnétique fermé avec représentation des flux

Après avoir évalué les réticences et la répartition des flux, nous pouvons visualiser l'influence de l'entrefer. Sur la Figure 42, l'inverse de la réticence, la perméance, du relais classique varie en fonction de l'entrefer alors que celle du relais fermé ne varie que très légèrement.

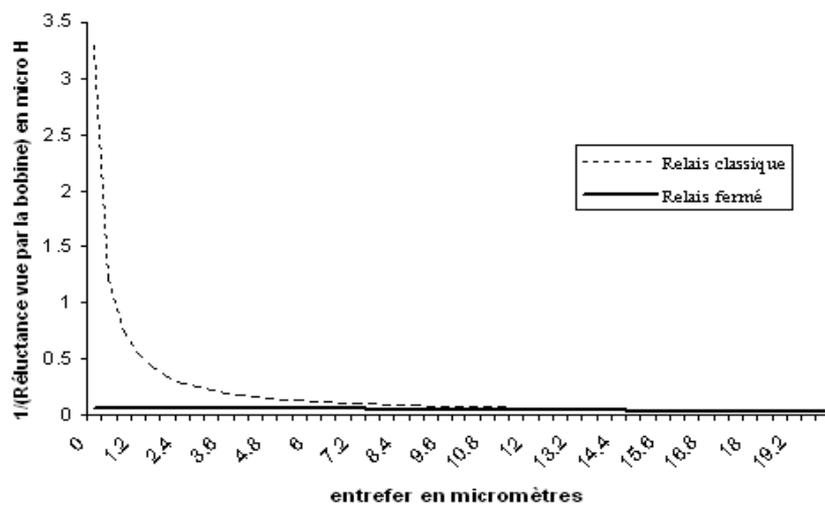


Figure 42 : Variation de l'inverse des réticences vues par la bobine en fonction de l'entrefer

La valeur des réluctances est relativement similaire pour des entrefers supérieurs à $8\mu\text{m}$. Une structure classique avec de grands entrefers permettrait donc d'obtenir une réluctance stable. Malheureusement, dans ce cas, l'ensemble de la structure est saturé et il est alors impossible de générer une variation de force avec une faible excitation de la bobine. Ce n'est pas le cas avec la structure fermée. La valeur de la réluctance vue par la bobine dépend de la géométrie de la réluctance R_{shunt} . Il est alors possible de modifier sa valeur géométriquement.

Il est important de noter que le domaine de validité de ce modèle est limité puisque nous n'avons pas pris en compte les flux de fuites. Ainsi, il faut faire attention à ne pas sursaturer les réluctances pour rester dans le domaine de validité. Pour des entrefers supérieurs à $20\mu\text{m}$ et avec les valeurs de surface et de longueur utilisées, les réluctances magnétiques sont totalement saturées et le modèle analytique n'est plus valable.

Ce modèle analytique simple nous a permis de valider le principe de fonctionnement de cet actionneur. En effet, il est possible de générer suffisamment de flux magnétique dans la palette pour créer une force magnétique avec un nombre d'ampères-tours raisonnable (≈ 1 A.tour). Les actionneurs utilisés actuellement fonctionnent entre 0.6 A.tours et 1.2 A.tours.

L'utilisation d'un circuit magnétique fermé autour de la bobine semble permettre une stabilisation de l'inductance de la bobine. Dans la suite, nous continuerons dans le sens de cette piste d'amélioration.

Néanmoins, nous n'avons pas estimé la valeur réelle de l'induction ni défini une structure capable de répondre à tous les critères géométriques, mécaniques et électriques souhaités. La modélisation numérique nous permettra d'affiner la conception.

3 - MODELISATION NUMERIQUE

Maintenant que nous avons validé l'utilisation d'un actionneur à circuit magnétique fermé il reste à intégrer et à valider les autres critères d'amélioration de l'actionneur pour maîtriser structurellement l'impédance du relais (objectif n°1).

Pour cela, nous devons étudier les solutions issues de l'analyse causale et de la modélisation fonctionnelle. L'ensemble des concepts évoqués au chapitre II a été traité. Le coût et les gains de performances nous ont permis de choisir parmi ces solutions.. Nous verrons dans la suite les solutions choisies.

Afin d'étudier théoriquement tous ces concepts, nous devons modéliser notre actionneur. L'élaboration d'un modèle analytique d'un actionneur électromécanique est relativement complexe. En effet, le réseau de réluctance utilisé dépend de la géométrie du produit étudié. Cela signifie que pour chaque géométrie, il faudrait un modèle avec son réseau de

réductance associé. Le travail serait alors trop important pour explorer un maximum de pistes.

Ainsi, nous proposons d'utiliser une modélisation numérique pour valider les différentes pistes de solution.

Tout d'abord, une modélisation en deux dimensions avec le logiciel FLUX2D®. Cette modélisation est assez simple à mettre en œuvre et elle nous permettra de faire un premier tri des différentes idées retenues.

Ensuite nous utiliserons une modélisation en trois dimensions [FOG] à l'aide du logiciel FLUX3D®. Nous validerons ainsi les modèles 2D retenus et nous apporterons des modifications si cela est nécessaire.

Nous devons modéliser un entrefer très petit comparé au reste des grandeurs géométriques. Il existe deux manières de faire avec FLUX2D® :

- La première est une réalisation graphique de l'entrefer, c'est-à-dire dessiner et mailler une zone d'air d'épaisseur comprise entre 1 et 100 μm . Le maillage devient alors très compliqué à réaliser puisque nous devons utiliser des mailles de l'ordre de l'entrefer et faire le lien avec des mailles cent fois plus grandes. Le temps de calcul étant lié au nombre de mailles de notre modèle, il est dans ce cas relativement important.
- La deuxième manière de modéliser un entrefer en 2D est d'utiliser des régions linéiques. Ces régions sont utilisées pour la simulation de pièces de faible épaisseur comme des entrefers de contact, des tôles fines, des nappes de courant... Concrètement, on remplace la face représentant l'air par une ligne sur laquelle est appliquée une loi physique particulière. Compte tenu de la taille de l'épaisseur de nos entrefers, nous privilégierons cette solution.

De manière similaire, nous remplacerons l'entrefer géométrique en 3D par des régions surfaciques. Le principe est exactement le même qu'avec la modélisation 2D.

3.a - Modélisation FLUX 2D

Lors d'une modélisation en deux dimensions, nous imposons une profondeur fixe à l'ensemble du produit. Pour simuler les différents changements de sections existants dans notre actionneur comme par exemple le shunt, nous modifierons artificiellement les caractéristiques magnétiques [JOY] des matériaux utilisés. C'est une méthode classique pour la simulation des changements de section avec le logiciel FLUX.

Cette étude numérique va nous permettre de faire un choix parmi toutes les structures que nous pouvons imaginer pour converger vers une solution satisfaisante.

Pour converger plus rapidement sur une solution, nous utiliserons une modélisation statique en calculant deux couples magnétiques exercés sur la palette :

- Le couple magnétique généré uniquement par le flux de l'aimant : c'est le couple de « repos » du relais.
- Le couple magnétique généré par le flux de l'aimant et de la bobine lorsqu'un courant la traverse. Pour l'instant, la valeur du courant et le nombre de spires de la bobine seront identiques à ce qui est utilisé sur le relais classique.

Nous calculerons ainsi la variation de couple générée par le flux de la bobine. Cette variation de couple doit être suffisamment importante pour que la structure puisse fonctionner correctement.

Ce couple différentiel (Figure 43) est une image de la stabilité mécanique et électrique du relais.

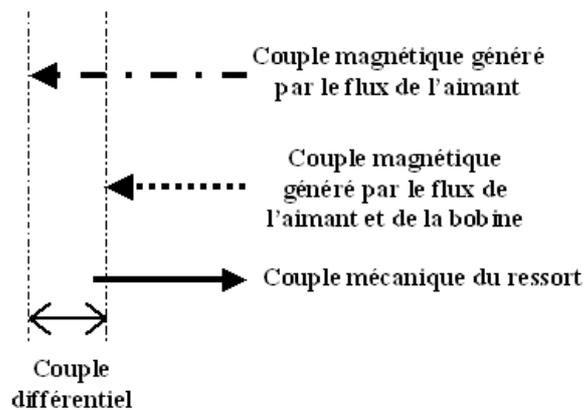


Figure 43 : Couple différentiel

Sa valeur doit être suffisamment importante pour nous permettre un réglage rapide du relais [JOY]. Une optimisation de ce couple différentiel autoriserait une augmentation de la valeur de l'entrefer équivalent (deuxième objectif d'amélioration du relais). Nous observons sur la Figure 44 le résultat de la simulation de notre actionneur à circuit magnétique fermé.

Avec les différentes simulations effectuées, nous avons mis en évidence différentes problématiques. Certaines avaient d'ailleurs été évoquées lors de la modélisation fonctionnelle du relais actuel. Cette modélisation numérique nous permet de tester différentes pistes de solutions citées dans le §II.2.a.3 - (bilan de la modélisation fonctionnelle).

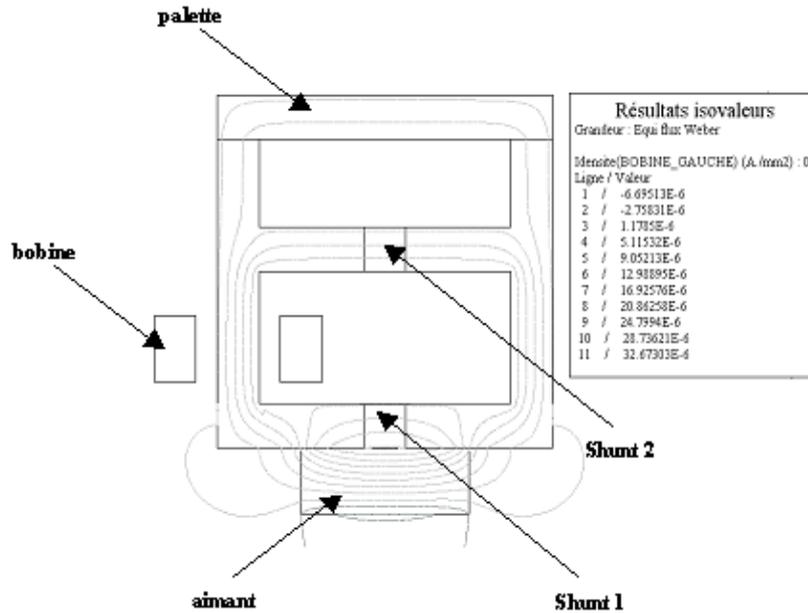


Figure 44 : Simulation 2D d'un actionneur à circuit magnétique fermé

Pour permettre une augmentation de la valeur de l'entrefer, nous devons maximiser le couple différentiel provenant du flux magnétique généré par la bobine. Pour une même excitation électrique, le flux généré par la bobine sera dépendant de l'état magnétique du circuit sur lequel elle est bobinée. Nous devons diminuer la valeur des réluctances vue par la bobine. Cela signifie limiter au maximum les saturations locales comme par exemple les effets de coin.

Avec ce type de structure, nous retrouvons également la problématique de l'aimant⁹ évoquée au §II.2.a.3 - (bilan de la modélisation fonctionnelle). La simulation deux dimensions va nous permettre de vérifier rapidement l'influence de l'emplacement de l'aimant. La première idée a été de placer l'aimant à l'intérieur de la structure (voir Figure 45). L'aimant est ainsi complètement entouré par un circuit magnétique et les lignes de fuites dans l'air sont très limitées.

Cette solution a tendance à augmenter la valeur des réluctances vue par la bobine et nous voulons justement le contraire. En effet, l'ensemble du flux magnétique généré par l'aimant passe par les bras inférieurs de l'actionneur ce qui conduit à une augmentation de l'induction locale et donc une augmentation de la réluctance vue par la bobine.

⁹ Flux magnétiques de fuite non utiles générés par l'aimant

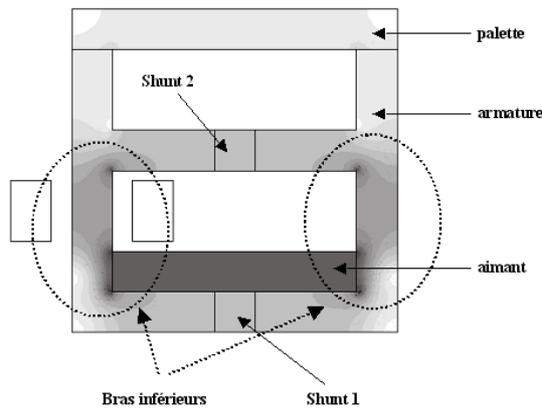


Figure 45 : Carte d'induction sur un actionneur avec "aimant interne"

Plutôt que de déplacer l'aimant, nous proposons d'adapter la structure pour entourer l'aimant là où il est placé (sous le shunt 1) comme sur les Figure 48 et 51.

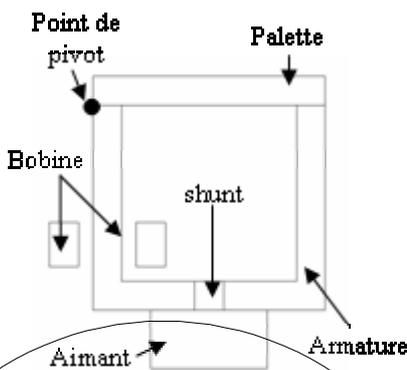


Figure 46 : Actionneur classique

Figure 47 : Actionneur à Circuit Magnétique Fermé (CMF)

Figure 48 : Actionneur à CMF avec intégration de l'aimant

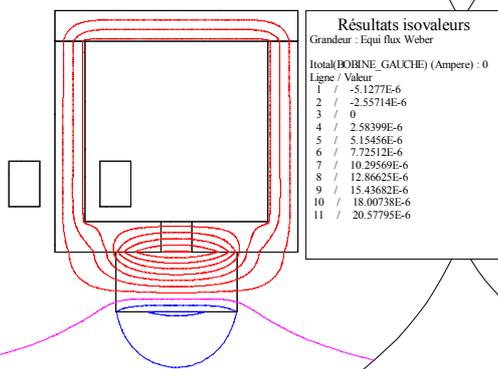


Figure 49 : Iso-induction sur actionneur classique

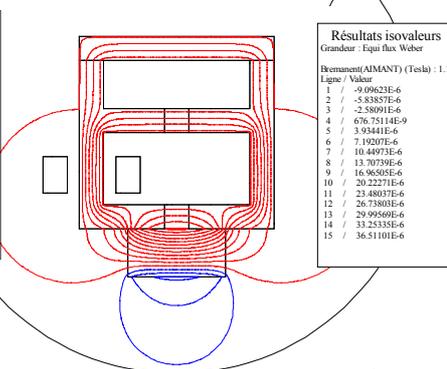


Figure 50 : Iso-induction sur actionneur à CMF

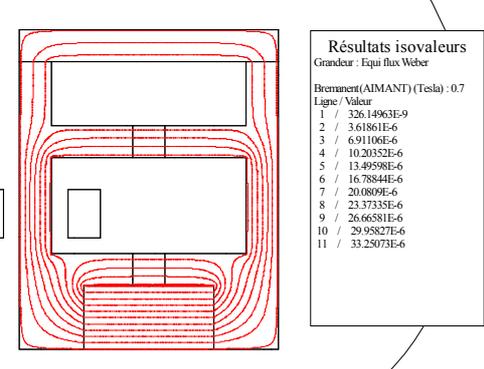


Figure 51 : Iso-induction sur actionneur CMF et intégration aimant

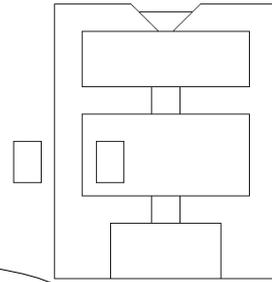


Figure 52 : Actionneur à CMF avec palette en forme de V centrée

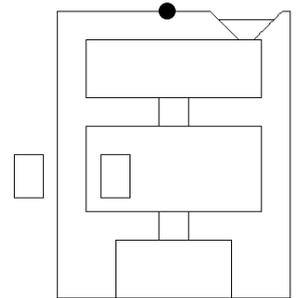


Figure 53 : Actionneur à CMF avec palette en V décentrée

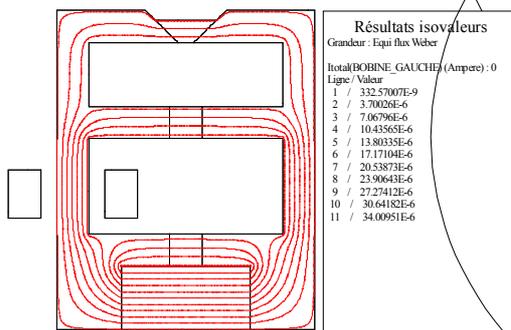


Figure 54 : Iso-induction sur actionneur CMF et palette en V centrée

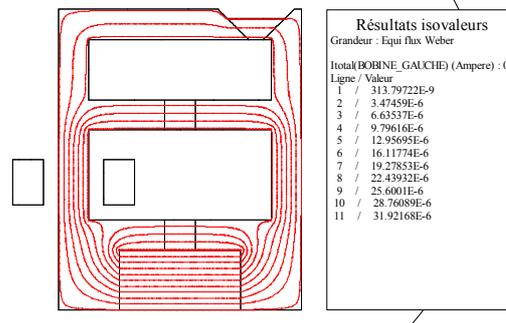


Figure 55 : Iso-induction sur actionneur CMF avec palette en V décentrée

Sur les figures précédentes, nous pouvons observer l'évolution de l'actionneur lors de l'intégration des différentes solutions proposées lors de la modélisation fonctionnelle et de l'analyse causale.

- L'intégration de l'aimant dans la structure : cela permet de diminuer les flux de fuites (non utiles) et ainsi de diminuer le volume de l'aimant. Cette intégration peut se voir dès la Figure 48 et 51.
- Une palette en forme de V décentrée sur un côté : la forme en V (utilisée dès la Figure 52 et 54) permet d'avoir deux surfaces polaires les plus proches possible et donc d'utiliser les deux forces magnétiques générées par l'aimant et la bobine. Dans le cas classique de la Figure 56, seul F_{mag2} va fournir un couple. Dans le cas de la Figure 57, les deux forces sont utiles. Le décentrage (Figure 53 et 55 et 58) permet d'augmenter les bras de levier.

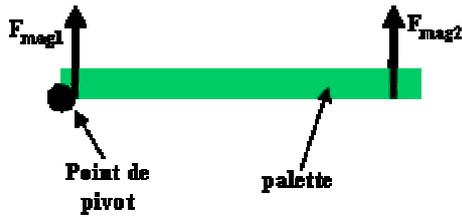


Figure 56 : Forces magnétiques sur palette classique

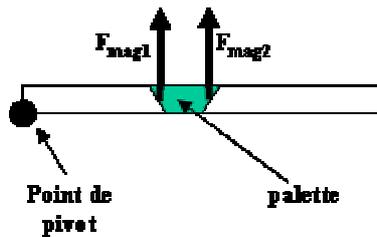


Figure 57 : Forces magnétiques sur palette en V

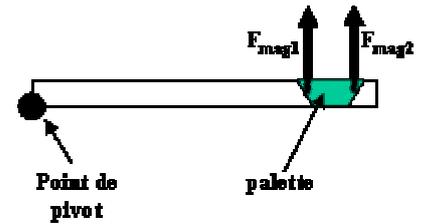


Figure 58 : Force magnétique sur palette en V décentrée

Ce design est à l'origine de deux nouveaux inconvénients :

- Le premier est la non utilisation de l'ensemble du flux magnétique pour la génération d'une force magnétique. En effet, la force engendrée est normale à la surface de la palette, ce qui signifie que seule la composante verticale est utile. Un calcul de l'angle idéal de la palette reste donc à faire.
- Le deuxième inconvénient est un problème mécanique : la forme en V est potentiellement une source de coincement des pièces. Une étude mécanique permettra de définir les côtes et les tolérances de celles-ci pour éviter ce type de problématique. Magnétiquement, il est nécessaire que l'entrefer soit maîtrisé.

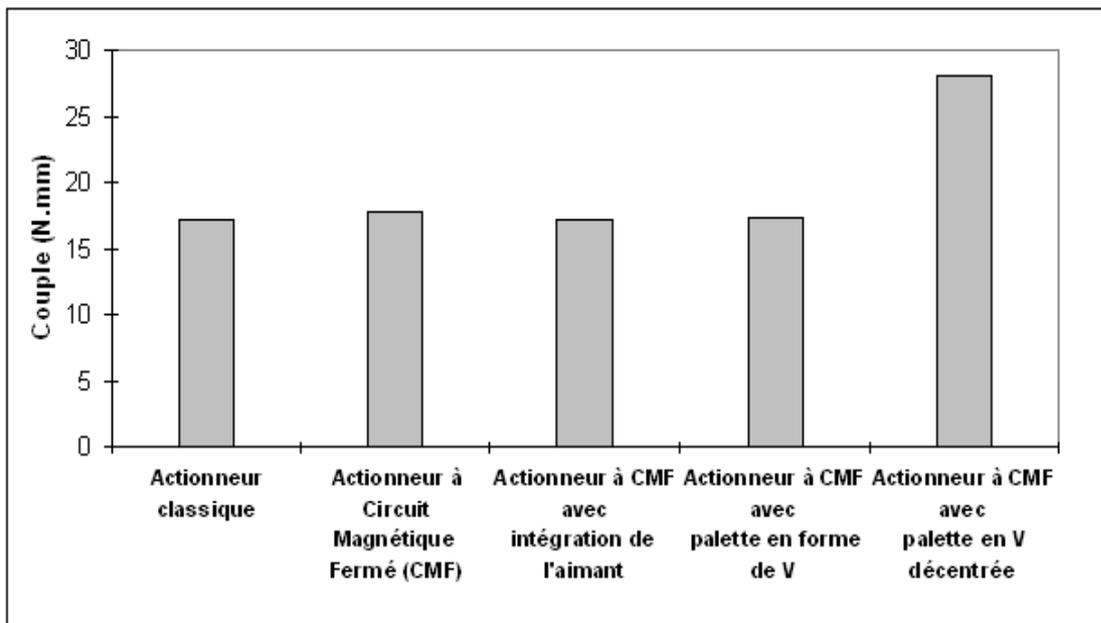


Figure 59 : Couple de force en fonction de la géométrie de l'actionneur à flux magnétique traversant la palette constant

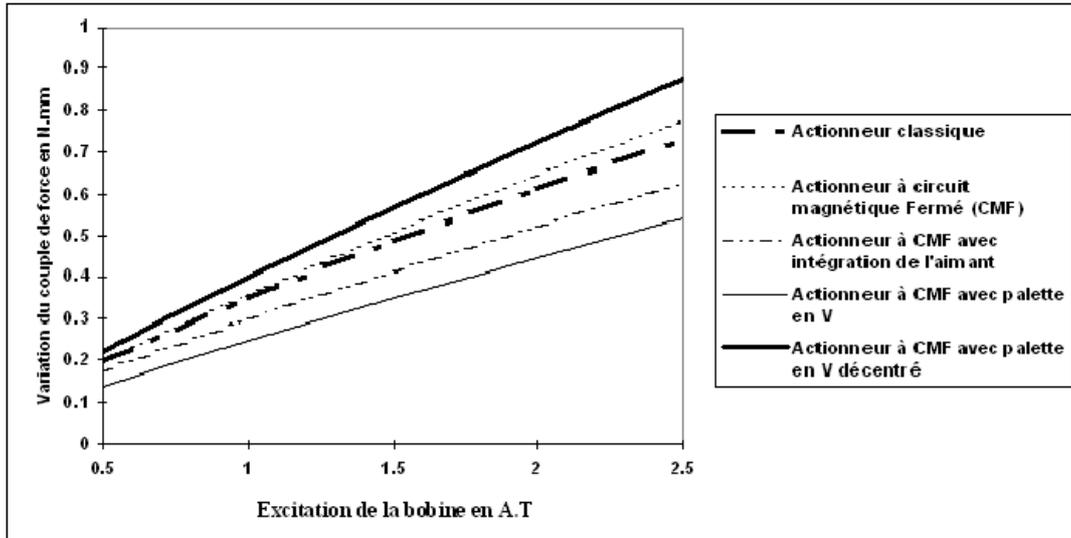


Figure 60 : Couple différentiel en fonction de l'excitation de la bobine à flux magnétique traversant la palette constant et entrefer constant entre les différentes géométries

Sur les **Figure 59** nous visualisons le couple de force sur chaque structure, c'est à dire le couple magnétique généré par l'aimant. Sur la **Figure 60**, nous visualisons le couple différentiel, c'est à dire la différence entre le couple magnétique généré par l'aimant et le couple magnétique généré par l'aimant et la bobine (voir **Figure 43** page 75).

Nous constatons alors deux choses essentielles :

- La première est que le couple de force généré par la structure modifiée est supérieur à celui de l'actionneur initial (**Figure 59**).
- La seconde est que le couple différentiel sur la structure modifiée est supérieur à celui de l'actionneur initial (**Figure 60**), et ce pour un nombre d'ampères-tours d'excitation égal.

Cependant, nous n'avons pas besoin d'un couple de force aussi grand et encore moins d'un couple différentiel aussi important.

Deux possibilités s'offrent alors :

- diminuer le nombre d'ampères-tours nécessaires au déclenchement¹⁰
- Augmenter la valeur de l'entrefer¹¹ équivalent en utilisant le même nombre d'ampères-tours

¹⁰ Troisième objectif d'amélioration de l'actionneur

¹¹ Deuxième objectif d'amélioration de l'actionneur

Comme la deuxième solution correspond à un objectif plus prioritaire que la première, nous essayerons par la suite d'augmenter la valeur de l'entrefer.

La conclusion de cette modélisation numérique est qu'une structure utilisant une palette décentrée en forme de V permet la génération d'un couple différentiel largement suffisant pour répondre au cahier des charges. De plus, à un nombre d'ampères-tours constant, nous pourrions utiliser un entrefer plus important.

Nous devons maintenant valider nos résultats avec une modélisation en trois dimensions pour vérifier que nous ne commettons pas d'erreurs trop importantes en négligeant les flux de fuites magnétiques dus aux changements de sections.

3.b - Modélisation FLUX 3D

Notre structure étant une géométrie en trois dimensions, nous sommes arrivés dans le paragraphe précédent à la limite de la modélisation deux dimensions en statique. Une fois la structure validée en régime magnétostatique, nous pourrions toutefois revenir à la géométrie à deux dimensions pour une étude en régime magnéto-harmonique et magnéto-transitoire.

Cette étude numérique va également nous permettre d'optimiser « magnétiquement » la forme des shunts pour limiter les saturations locales. Cela nous permettra de mieux maîtriser le calcul.

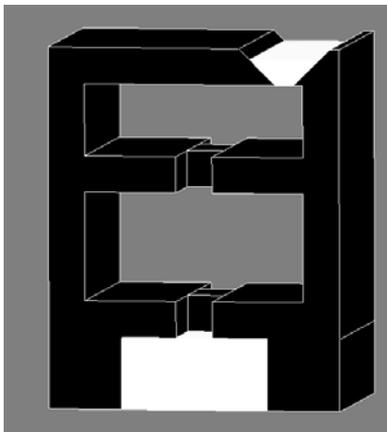


Figure 61 : Structure modélisée avec FLUX3D®

La variation de l'induction de l'aimant (Figure 62) permet de valider le modèle 2D suivant les différents états de saturation du circuit magnétique. En effet, sur la Figure 62, les courbes de la modélisation 2D et 3D sont quasiment confondues.

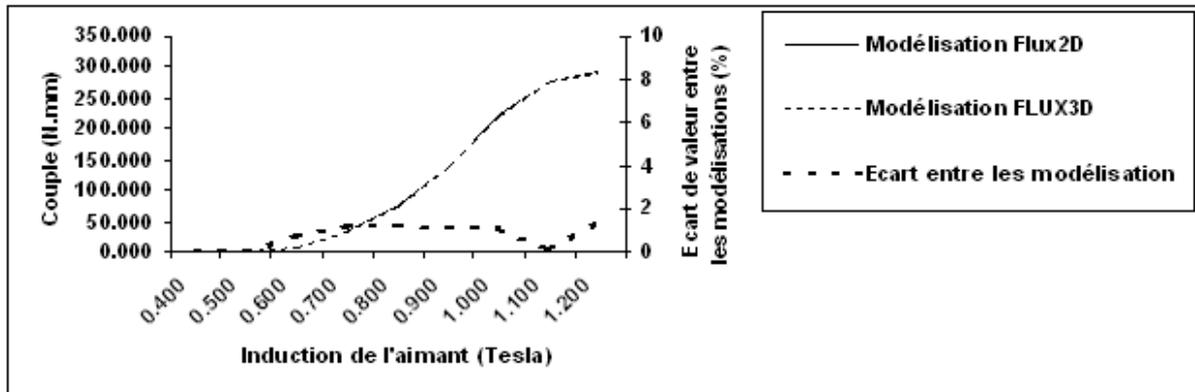


Figure 62 : Variation de la force en fonction de l'induction

Nous remarquons que pour de très faibles inductions de l'aimant ($<0.6T$), le couple est pratiquement nul, le modèle 2D et le modèle 3D donnent les mêmes résultats. Pour des inductions plus importantes ($>0.6T$), un léger écart inférieur à 2% apparaît. Cet écart provient principalement des flux de fuites mais aussi des problèmes de maillage. Le maillage 2D est beaucoup plus fin que celui de la 3D pour des problèmes de mémoire et de temps de calcul.

Pour la structure étudiée, une modélisation en deux dimensions est suffisante. Néanmoins, si nous désirons optimiser la forme des shunts, l'utilisation d'une modélisation en trois dimensions est plus adaptée.

Pour l'instant, nous avons uniquement validé un modèle (2D) par rapport à un autre modèle (3D) sensé être plus proche de la réalité. Nous confronterons les résultats théoriques à la pratique dans le chapitre suivant.

3.c - Utilisation d'un entrefer plus important

Nous allons maintenant tester l'utilisation d'un entrefer équivalent plus important. Deux paramètres nous intéressent : l'influence de l'entrefer sur la valeur du couple et l'influence de l'entrefer sur le nombre d'ampères-tours nécessaires au déclenchement.

En ce qui concerne la sensibilité du couple de force, nous supposons que plus l'entrefer sera important et plus le couple sera faible. Une augmentation du volume de l'aimant ou de son induction devrait être suffisante pour obtenir le résultat voulu.

En ce qui concerne l'influence de l'entrefer sur le nombre d'ampères-tours nécessaires au déclenchement, le problème est plus complexe à quantifier. En effet, l'augmentation de l'entrefer aura tendance à augmenter la réluctance vue par la bobine. Il faudra alors quantifier cette influence.

Compte-tenu des résultats obtenus précédemment, cette étude se fera à l'aide d'une modélisation 2D.

Comme nous avons utilisé des régions linéiques pour modéliser les entrefers fins, nous pouvons en modifier l'épaisseur pour en étudier l'influence.

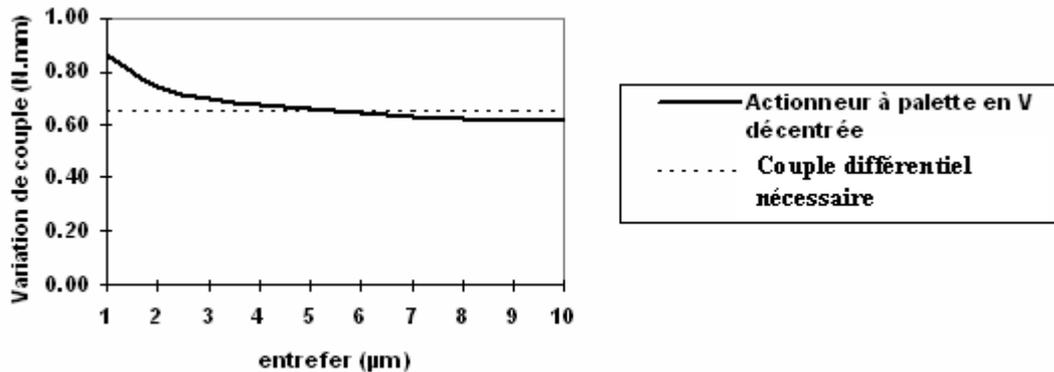


Figure 63 : Etude de variation du couple en fonction de l'entrefer (au nombre d'ampères-tours constant)

Nous pouvons constater sur la

Figure 63 qu'il est possible d'augmenter l'entrefer en conservant les mêmes performances de variation de couple. Avec une structure comprenant une palette en V décentrée, nous pourrions utiliser un entrefer de 5µm d'épaisseur tout en ayant des performances similaires au niveau actuel.

Néanmoins, cela nous semble encore insuffisant et nous pouvons sûrement encore améliorer la structure.

La structure n'a toujours pas été optimisée au sens premier du terme, c'est-à-dire en trouvant les meilleurs paramètres pour répondre à nos besoins. A savoir les caractéristiques des matériaux, les caractéristiques mécaniques et les dimensions géométriques de la pièce.

Une optimisation rigoureuse ne peut, actuellement, se faire avec des logiciels par éléments finis. Les temps de calcul seraient trop longs en 3D. En ce qui concerne l'optimisation 2D, elle serait envisageable avec un logiciel adapté, ce qui n'existe par encore industriellement. Nous proposons donc dans le paragraphe suivant l'utilisation d'une modélisation analytique et d'un logiciel d'optimisation, pro@design®. Nous intégrerons ainsi des équations mécaniques, mais aussi, ce qui est très important, certaines équations représentatives du coût. Nous pourrions ainsi avoir une vision système qu'il est difficile d'avoir avec les éléments finis.

4 - MODELISATION ANALYTIQUE

Nous venons de voir que l'utilisation d'un actionneur à circuit magnétique fermé permet de maîtriser structurellement l'impédance de celui-ci. En intégrant l'aimant dans la structure, nous limitons également les flux de fuites et diminuons par la même occasion son volume. Nous pouvons alors augmenter la valeur de l'entrefer équivalent en conservant la même variation de couple et le même nombre d'ampères-tours nécessaires au déclenchement.

Nous allons maintenant modéliser analytiquement ce relais pour une optimisation globale. Pour cela nous allons, comme dans le paragraphe III-2, utiliser un réseau de réluctances.

4.a - Le modèle réluctant

La principale difficulté lors de la réalisation d'un modèle réluctant [KOK] est de décomposer de manière correcte la structure étudiée. Cette discrétisation peut se faire en deux temps. Tout d'abord, il y a l'étude des réluctances du relais en lui-même, et ensuite, il y a celle des réluctances de fuites.

Puisque les flux se propagent principalement à travers l'actionneur, le réseau de réluctance doit suivre la forme générale du relais.

Certaines réluctances sont plus délicates à calculer. Par exemple, lorsqu'il existe un angle vif ou alors lorsque le volume étudié est un peu plus complexe qu'un parallélépipède classique.

En ce qui concerne les flux de fuite, le problème est différent. En régime classique et sans saturation, nous pourrions limiter l'utilisation des flux de fuite. L'inconvénient ici est que nous ne maîtrisons pas les points de fonctionnement qui vont être calculés.

En effet, le modèle analytique va être utilisé par un logiciel d'optimisation. Ce type de logiciel peut être assimilable à un détecteur de modèle non robuste. La moindre faille est mise en évidence dès les premiers calculs.

Notre modèle doit être valable dans tout le domaine de variation des paramètres. L'ensemble des paramètres géométriques est variable. Malgré cela, les résultats du modèle analytique doivent être cohérents même lors de saturations excessives des réluctances. C'est pourquoi l'intégration de réluctances de fuite est primordiale.

L'estimation de ces réluctances n'est pas aussi simple que pour les réluctances des matériaux magnétiques. Nous devons au préalable étudier la répartition des lignes de champ magnétique et calibrer notre modèle réluctant avec les données numériques. Ces étapes sont longues et nécessitent un grand nombre de rebouclages.

Sur la Figure 64, nous observons le réseau de réductance associé à la structure. Il y a sept réductances de fuites. En réalité, il en existe beaucoup plus mais ces réductances sont en parallèle les unes des autres. Nous les avons regroupées pour simplifier le schéma.

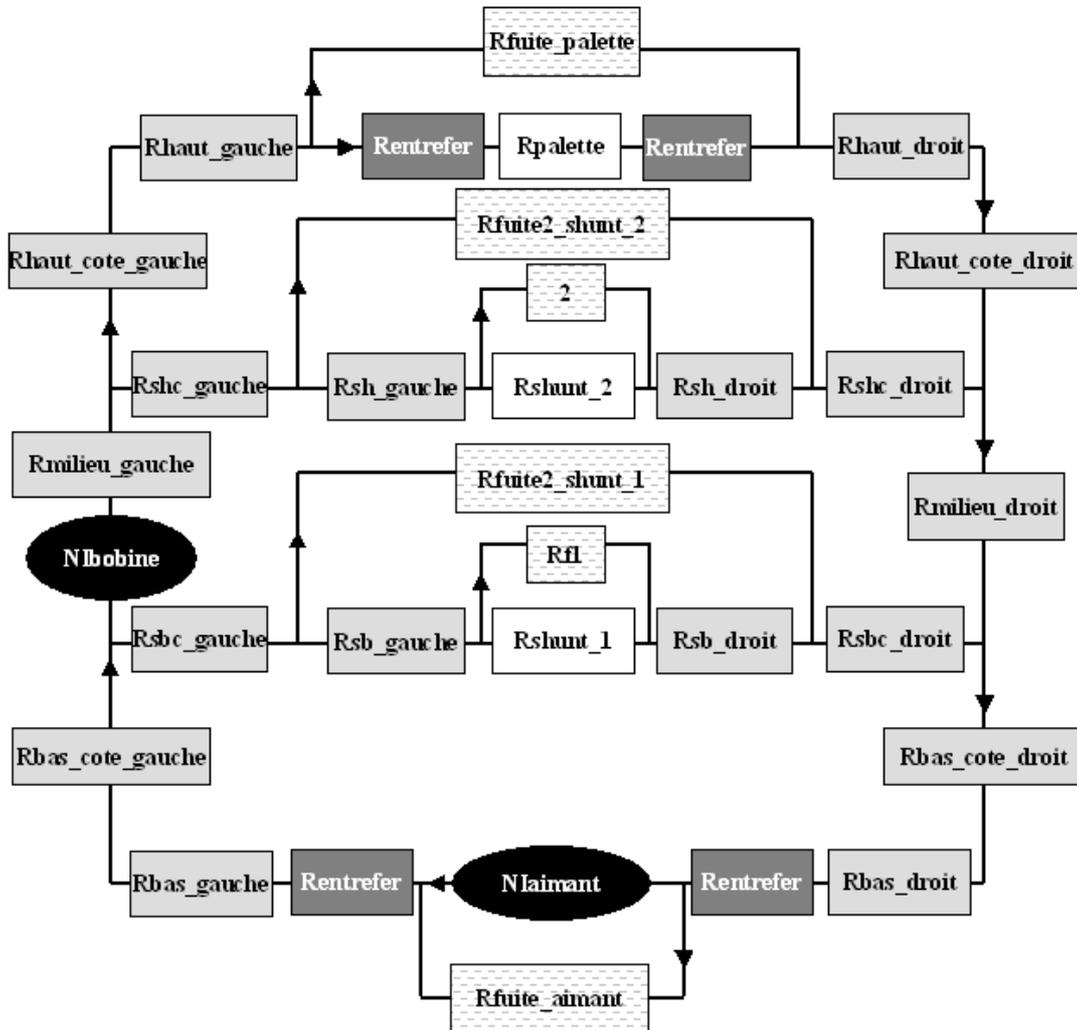


Figure 64 : Réseau de réductance global

Les flèches indiquent le sens « supposé » des flux magnétiques. Nous utilisons le terme « supposé » car il se peut que dans certaines configurations, le flux magnétique calculé soit négatif : par exemple pour un flux faible généré de l'aimant et un flux élevé généré par la bobine. Généralement, nous essayons d'utiliser les conventions récepteurs et générateurs de l'électricité.

Des logiciels spécifiques permettent de réaliser des réseaux de réductances d'une manière semi-automatique comme par exemple RELUCTOOL [DUP] ou KIRSCHOFF [DES]. Ces outils facilitent le travail du concepteur en proposant des réductances prédéfinies et une interface pour la réalisation du réseau. Le résultat obtenu est alors identique au calcul manuel.

Le calcul des réductances est similaire à celui fait dans le paragraphe sur l'impédance des actionneurs à circuit magnétique fermé (§ III-2). Le principal changement est la forme des réductances, et donc de la formule associée. Par exemple, pour une réductance magnétique de forme trapézoïdale comme sur la Figure 65, la formule de la réductance prend la forme de celle de l'Équation 18.

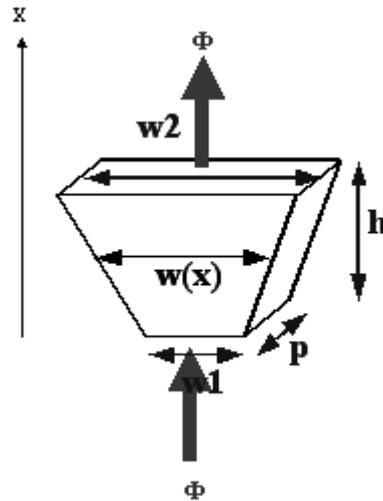


Figure 65 : Réductance magnétique trapézoïdale

$$\mathfrak{R}(\phi) = \frac{h}{\mu \left(\frac{\phi}{p \times \frac{w_1 + w_2}{2}} \right) \times p \times (w_2 - w_1)} \times \ln\left(\frac{w_2}{w_1}\right)$$

Équation 18 : Formule de la réductance d'une pièce trapézoïdale [LAC][OST]

Dans cette équation, nous considérons que l'induction est constante sur une section. Le calcul de la perméabilité se fait pour la section médiane.

Une fois l'ensemble des réductances calculé, nous devons passer à l'étape de mise en équation. Nous utilisons les lois de Kirchhoff : à chaque maille et nœud correspond une équation. Nous devons ensuite résoudre numériquement le système d'équations implicites pour déterminer la répartition des flux magnétiques.

Ce calcul doit se faire pour deux points de fonctionnement, le premier lorsque la palette est fermée et qu'il n'y a aucun courant qui traverse la bobine, et le second lorsque la bobine est parcourue par un courant.

4.b - Intégration d'une partie du cahier des charges dans la modélisation

Un des principaux avantages de la modélisation analytique est qu'il est possible d'intégrer tout type d'équation (notion de système).

Ainsi, nous pouvons utiliser des équations mécaniques. Tout d'abord les équations simples calculant le couple en fonction de la position du point de pivot et de la force du ressort (comme les Équation 19, Équation 20 et Équation 21). Il est également possible d'utiliser les modèles mécaniques du ressort pour l'optimiser en même temps que la structure.

$$F(\phi, S) = \frac{\phi^2}{2\mu_0 S} \quad \begin{array}{l} \text{Avec } \Phi \text{ le flux traversant la surface (Wb)} \\ S \text{ la surface (m}^2\text{)} \end{array}$$

Équation 19 : Force magnétique (N)

$$\text{Couple}_{\text{magnetique}} = F(\phi_{\text{haut}} - \phi_{\text{fuite_psp}}, S_{\text{psp}}) \times \text{pivot}_{\text{psp}} + F(\phi_{\text{haut}} - \phi_{\text{fuite_gsp}}, S_{\text{gsp}}) \times \text{pivot}_{\text{gsp}}$$

Équation 20 : Couple magnétique exercé sur la palette

Avec Φ_{haut} le flux traversant la palette (Wb)

$\Phi_{\text{fuite_psp}}$ les flux de fuite ne passant pas par la petite surface polaire (Wb)

$\Phi_{\text{fuite_gsp}}$ les flux de fuite ne passant pas par la grande surface polaire (Wb)

pivot_psp la longueur entre le point d'application de la force et la petite surface polaire (m)

pivot_gsp la longueur entre le point d'application de la force et la grande surface polaire (m)

$$\text{Couple}_{\text{différentiel}} = \text{Couple}_{\text{magnetique}} - \text{Couple}_{\text{mecanique}}$$

Équation 21 : Couple différentiel sur la palette

Un certain nombre de contraintes physiques existent sur le relais comme par exemple l'influence des champs magnétiques extérieurs. Cette contrainte peut être intégrée grâce à un paramètre ΔH (voir Figure 66). Celui-ci est calculé puis restreint pour répondre au cahier des charges. Pour calculer ce paramètre, nous utilisons deux courbes (voir Figure 66) :

- La caractéristique d'un aimant : cet aimant est de type AlNiCo.
- La droite de fonctionnement de la structure : cette droite a été calculée à partir des réductances et des flux magnétiques lorsqu'il n'y a pas de palette sur l'armature et que l'aimant est le moins entouré de matériau magnétique (la plus mauvaise situation possible pour l'aimant). C'est le circuit réductant que voit l'aimant.

L'intersection de ces deux courbes nous fournit le point de fonctionnement de notre aimant. Nous calculons alors le paramètre ΔH qui doit être supérieur à plusieurs kilo ampères par mètre. Cette valeur est déterminée en calculant le champ magnétique extérieur que doit supporter notre actionneur. En effet, l'environnement proche de l'actionneur est composé de conducteurs de courant qui génèrent un champ magnétique potentiellement perturbateur. Ces courants peuvent être très élevés lors d'un court-circuit par exemple (10000A). L'actionneur doit pouvoir supporter ces champs magnétiques.

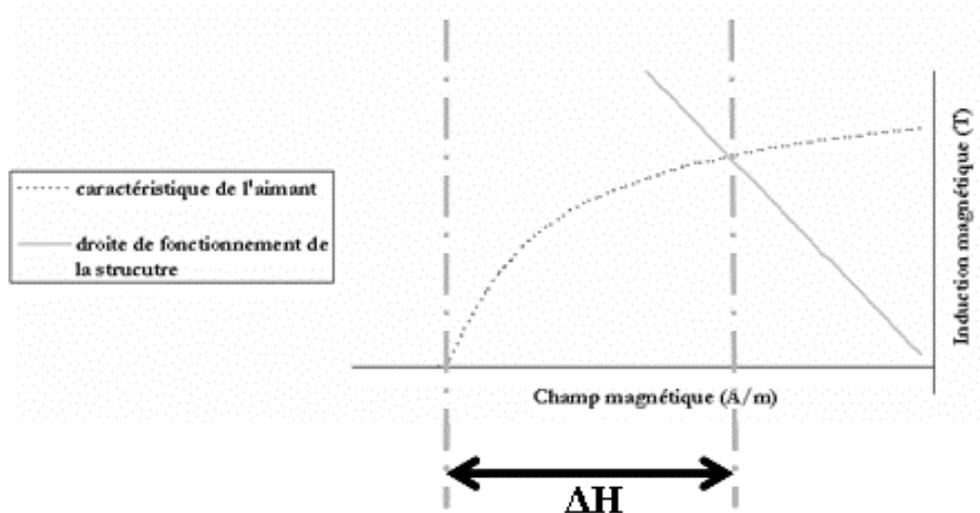


Figure 66 : Résistance aux champs magnétiques extérieurs

L'intégration des équations représentatives du coût est plus délicate puisqu'il faut être capable de les calculer. Le coût peut se décomposer en trois parties : la matière première, la main d'œuvre et le processus industriel.

En ce qui concerne la matière, le calcul est relativement simple, il suffit de calculer la masse des différentes pièces et de connaître le prix de la matière. Si nous connaissons le processus industriel de fabrication des pièces, nous pouvons même estimer la masse totale de matière utilisée en tenant compte des chutes. Celles-ci peuvent alors être recyclées.

Nous ne sommes pas capables de mettre en équation le coût de la main d'œuvre et du processus industriel. Ceux-ci dépendent de la structure et des choix industriels de fabrication.

Il y a donc ici une limitation du modèle que nous ne pouvons pas contourner.

4.c - Mise en évidence des difficultés de la modélisation

La difficulté principale a été la convergence du modèle analytique. En effet, avec le réseau de réluctances décrit précédemment (voir Figure 64), nous avons neuf équations

magnétiques et une équation mécanique dans le système implicite. Les équations magnétiques calculent la répartition des flux à travers la structure. L'équation mécanique permet de réaliser l'équilibre entre le couple engendré par les flux magnétiques et le couple généré par le ressort.

Ce système d'équations est non linéaire car les réluctances sont non linéaires (elles dépendent du flux qui les traverse). Nous avons rencontré de grandes difficultés pour faire converger ce système quelle que soit la valeur des paramètres d'entrée.

En effet, les paramètres du modèle n'ont pas les mêmes ordres de grandeur. Les paramètres calculés sont au minimum de l'ordre de 10^{-9} (flux magnétiques) et au maximum de l'ordre de 10^8 (réluctances magnétiques).

De plus, ces paramètres varient énormément lors d'une optimisation sous contraintes.

Pour limiter ces défauts, nous avons normalisé l'ensemble des paramètres d'entrés et les équations du système implicite. La normalisation des équations du système implicite va permettre d'améliorer la rapidité et la convergence du calcul des solutions de ce système implicite uniquement. La normalisation des paramètres va augmenter la rapidité et la précision des résultats du modèle analytique entier (système implicite + reste du modèle).

Nous avons commencé par normaliser les paramètres. Dans le cas du calcul des ampères-tours (NI) aux bornes d'une réluctance (R) sans la normalisation, nous utilisons la formule de l'Équation 22. Dans ce cas, le flux φ est de l'ordre de 10^{-6} Wb.

$$NI(\varphi) = \mathfrak{R}(\varphi) \times \varphi$$

Équation 22 : Utilisation d'une réluctance sans normalisation

Dans le cas de l'Équation 23, nous avons normalisé le paramètre φ_{norm} , c'est à dire que φ_{norm} est maintenant de l'ordre de l'unité. Pour que les calculs restent cohérents, il faut multiplier le paramètre normalisé par sa valeur de normalisation (10^{-6} dans l'exemple de l'Équation 23).

$$NI(\varphi_{norm}) = \mathfrak{R}(\varphi_{norm} \times 10^{-6}) \times \varphi_{norm} \times 10^{-6}$$

Équation 23 : Utilisation d'une réluctance avec normalisation du flux

Avec cette normalisation, les paramètres que nous utilisons sont maintenant tous de l'ordre de l'unité. La rapidité et la précision du calcul sont ainsi nettement améliorées.

Nous allons maintenant normaliser l'ensemble des équations du système implicite pour améliorer sa convergence. Dans l'Équation 24, nous avons une équation d'équilibre entre

trois réluctances magnétiques \mathbf{R}_1 , \mathbf{R}_2 et \mathbf{R}_3 . Dans cet exemple, nous avons conservé la normalisation des paramètres. Cette équation n'est pour l'instant pas normalisée.

$$\mathfrak{R}1(\varphi_{norm} \times 10^{-6}) \times \varphi_{norm} \times 10^{-6} = \mathfrak{R}2(\varphi_{norm} \times 10^{-6}) \times \varphi_{norm} \times 10^{-6} + \mathfrak{R}3(\varphi_{norm} \times 10^{-6}) \times \varphi_{norm} \times 10^{-6}$$

Équation 24 : Equation du système implicite non normalisée

Dans cette équation, $\mathfrak{R}1(\varphi_{norm} \times 10^{-6}) \times \varphi_{norm} \times 10^{-6}$ est de l'ordre de 10000. Nous avons alors normalisé les deux membres de l'équation par le paramètre NORM (voir Équation 25) égal à 10000. Les deux membres de l'équation sont alors de l'ordre de l'unité. La convergence est ainsi mieux réalisée.

$$\frac{\mathfrak{R}1(\varphi_{norm} \times 10^{-6}) \times \varphi_{norm} \times 10^{-6}}{NORM} = \frac{\mathfrak{R}2(\varphi_{norm} \times 10^{-6}) \times \varphi_{norm} \times 10^{-6} + \mathfrak{R}3(\varphi_{norm} \times 10^{-6}) \times \varphi_{norm} \times 10^{-6}}{NORM}$$

Équation 25 : Equation du système implicite normalisée

Informatiquement, les différentes matrices créées lors de la résolution sont plus faciles à conditionner.

Une optimisation sous contrainte utilise un grand nombre de points de calcul. La normalisation des paramètres et des équations nous a permis de diminuer de 25% le nombre de points non calculés et d'augmenter la vitesse de calcul.

La seule difficulté avec ces modifications est de bien faire suivre la normalisation dans la suite des calculs. Si ce n'est pas le cas, les résultats obtenus nous le rappellent très rapidement.

4.d - Comparaison avec la modélisation numérique

Maintenant que nous avons vu la manière dont le modèle a été réalisé et comment nous avons contourné les différentes problématiques, nous pouvons comparer les résultats avec la simulation flux3D®.

Sur la Figure 67, nous observons la variation du couple en fonction de l'induction de l'aimant pour la modélisation numérique et analytique.

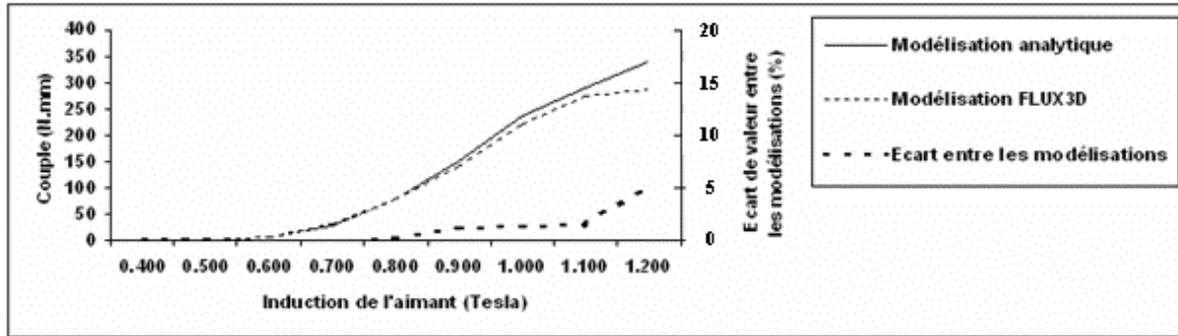


Figure 67 : Couple en fonction de l'induction de l'aimant

Pour une faible induction de l'aimant ($<0.85T$), les résultats obtenus avec le modèle analytique sont très proches de ceux obtenus avec le modèle numérique.

Pour des inductions plus importantes ($>0.9T$), un écart apparaît à cause d'une sous-estimation des flux magnétiques de fuite. Nous pourrions ajouter ou re-calibrer les réluctances de fuites.

En réalité, une surestimation des réluctances de fuites entraîne un écart du modèle pour de faibles inductions de l'aimant alors qu'une sous-estimation entraîne un écart du modèle pour de fortes inductions de l'aimant. Il y a alors deux solutions possibles à ce problème :

- Modifier le modèle pour améliorer les résultats, c'est à dire ajouter des réluctances de fuite supplémentaires pour obtenir une meilleure précision. Cette solution a comme inconvénient de complexifier le modèle ce qui entraîne des problèmes de convergence supplémentaire.
- Réaliser un compromis et faire en sorte que les résultats de la modélisation analytique correspondent à ceux de la modélisation numérique pour des inductions proches de celles du fonctionnement du relais. L'inconvénient de cette solution est que nous devons vérifier si nous nous trouvons dans la bonne plage de calcul.

Nous choisissons la dernière solution en mettant en place des systèmes de contrôle automatique. Nous allons contraindre le flux dans les réluctances de fuites et l'induction des réluctances du matériau.

Maintenant que nous avons validé la modélisation analytique, nous pouvons faire une première étape d'optimisation avant la réalisation des prototypes.

4.e - Optimisation du modèle

Retranscrire le savoir sous une forme mathématique est un excellent exercice pour améliorer sa connaissance du produit. C'est ce que nous faisons lorsque nous réalisons un modèle analytique. On se rend d'ailleurs rapidement compte des limites de nos connaissances.

L'optimisation est une étape supplémentaire dans la compréhension des systèmes. Elle nous oblige à quantifier et à limiter certains paramètres du modèle. Un cahier des charges complet est alors indispensable pour pouvoir répondre à toutes les contraintes.

L'optimisation réalisée à l'aide du logiciel pro@design® se fait en trois étapes :

- La création d'un modèle de calcul généré par le logiciel [ATI]
- L'édition du cahier des charges
- L'optimisation proprement dite à partir d'algorithmes de type SQP pour Sequential Quadratic Programming [WUR] ou d'algorithmes de recherche de solutions discontinues.

Sur la **Figure 68** est représenté une partie du cahier des charges tel que nous le remplissons sur le logiciel pro@design®. Il est ainsi possible de fournir la valeur initiale des paramètres d'entrées (dans le cadre « paramètres d'entrées et de sorties » de la **Figure 68**) et de contraindre leurs variations, c'est à dire les contraintes à respecter (dans le cadre « contraintes sur les paramètres » de la **Figure 68**).

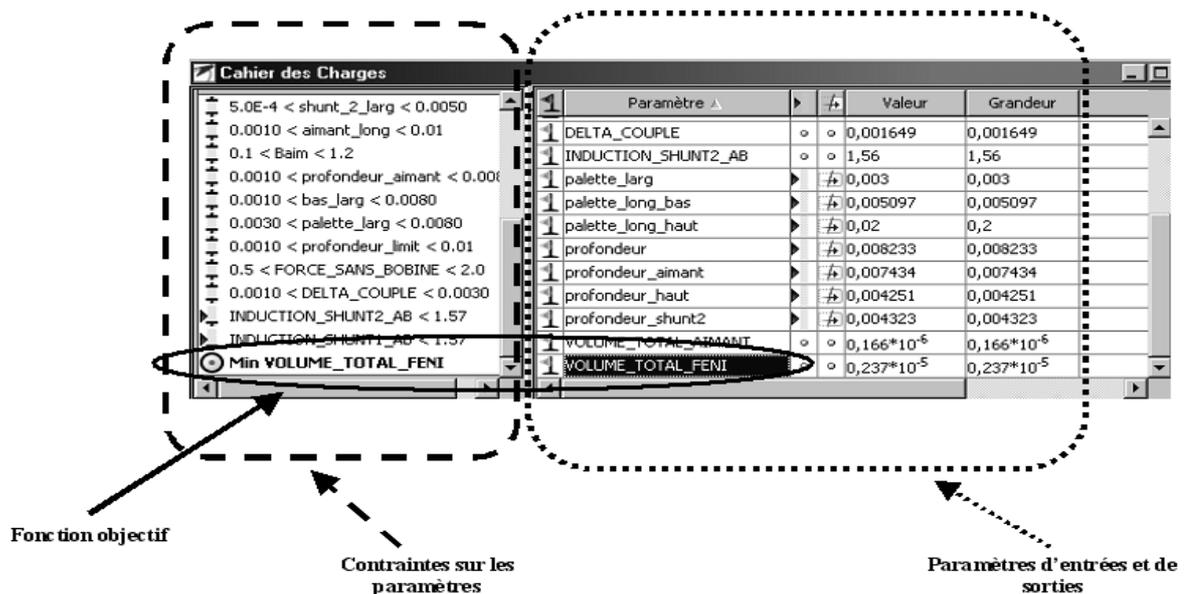


Figure 68 : Cahier des charges pro@design®

Une fois l'ensemble des paramètres contraints, l'optimisation met en évidence les paramètres influents et ceux qui ne le sont pas. De plus, elle fournit des axes d'améliorations de la structure lorsqu'un point sensible est mis en évidence.

Lors des premières optimisations, nous nous sommes retrouvés face à des problèmes sur-contraints. En d'autres termes, l'algorithme ne convergait pas vers une solution satisfaisant tous les critères.

Ces difficultés de convergence nous ont appris énormément sur l'interaction entre les différents paramètres mais aussi sur les paramètres critiques du modèle. Cela nous a amené à des réflexions sur la signification réelle de certaines contraintes et de certains paramètres critiques. Nous avons ainsi pu faire évoluer quelques contraintes et mettre en évidence les paramètres les plus importants (géométrie du shunt, entrefer, couple différentiel...). Nous avons également identifié les paramètres qui ont très peu d'interactions sur le fonctionnement magnétique (longueur et section des bras de l'armature).

L'objectif de cette optimisation (fonction objectif sur la Figure 68) est la minimisation du volume avec une contrainte forte sur le nombre d'ampères-tours nécessaires au déclenchement. Des paramètres comme la valeur de l'entrefer, le couple de l'actionneur ou le couple différentiel ont été contraints.

Cette optimisation nous a permis :

- De redéfinir certaines cotes comme les sections des shunts, les sections des bras de l'armature, la forme rectangulaire de la partie supérieure (la forme a légèrement été modifiée pour réduire la valeur des réluctances magnétiques).
- De définir les dimensions de la palette.
- De déterminer l'entrefer maximum auquel nous pouvons travailler et quels ampères-tours seront nécessaires au déclenchement.
- De diminuer au maximum le volume de l'actionneur compte tenu des contraintes sur les autres paramètres.

Une optimisation permet également au concepteur d'améliorer sa connaissance du système. Il est difficile de voir l'interaction entre les différents paramètres lorsque le système est non linéaire. En jouant sur les contraintes de certains paramètres et en fixant les autres, il est possible de vérifier la sensibilité du système.

Nous pouvons voir l'évolution de la géométrie sur les figures suivantes. La géométrie initiale est celle de la Figure 69.

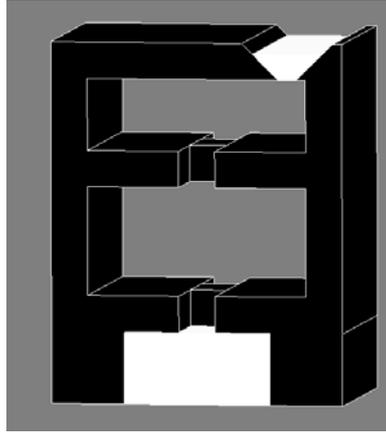


Figure 69 : Géométrie avant modélisation analytique

Les premiers résultats de l'optimisation nous ont amenés à modifier légèrement une partie de la géométrie pour par exemple diminuer la longueur des réluctances ou limiter les fuites.

L'objectif était la diminution du volume de l'actionneur en appliquant des contraintes sur le couple différentiel et les ampères-tours nécessaires au déclenchement. L'optimisation a diminué les parties les moins utiles au passage du flux. Nous sommes donc arrivés à la structure de la Figure 70.

L'optimisation nous dirige vers le couple différentiel minimal et un nombre d'ampères-tours maximal pour diminuer au maximum le volume de l'actionneur.

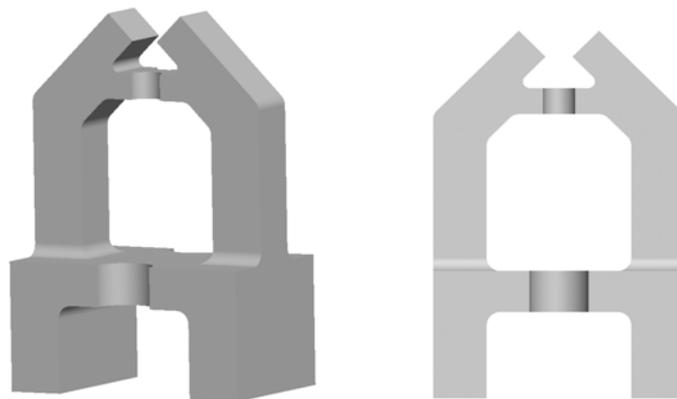


Figure 70 : Actionneur avant l'optimisation multicritères

Les résultats obtenus après une optimisation des ampères-tours nécessaires au déclenchement ne sont pas identiques (voir Figure 71 et 72). Le troisième objectif d'amélioration de l'actionneur était la diminution des ampères-tours. Cette structure répond en partie à cet objectif. On observe une augmentation des surfaces polaires et une

augmentation générale du volume. L'optimisation nous amène vers une structure qui minimise la réluctance vue par la bobine.

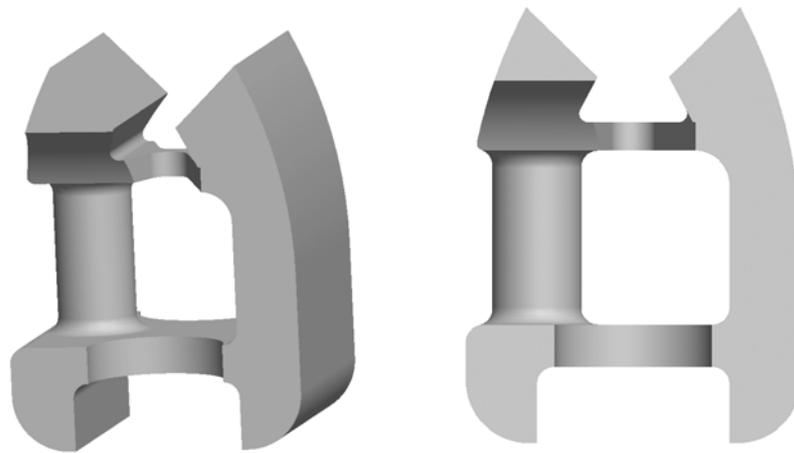


Figure 71 : Actionneur après optimisation

Les angles ont été arrondis après l'optimisation pour éliminer la matière inutile magnétiquement (la forme des réluctances n'est pas paramétrée dans notre modèle). La différence de section entre les deux bras s'explique par le bobinage : nous devons conserver une zone à faible section pour permettre le bobinage.

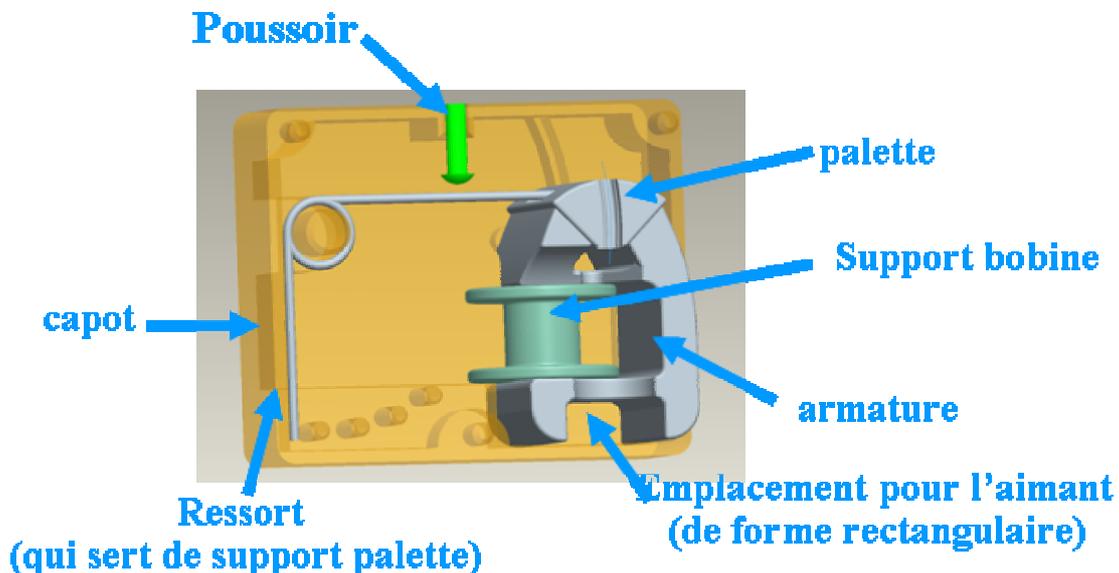


Figure 72 : Vue d'ensemble de l'actionneur après optimisation

Les résultats obtenus sont satisfaisants. Avec un même nombre d'ampères-tours, nous avons pu augmenter par quatre l'entrefer équivalent autorisé. S'il existe un processus de fabrication capable d'obtenir des pièces avec la précision de l'entrefer, nous pourrions

alors nous passer de l'étape de rectification. Nous verrons dans le chapitre suivant qu'un tel processus existe.

Malheureusement, dans un même temps, le volume de l'actionneur a doublé et donc le coût matière a doublé. Comme notre objectif final est la diminution du coût, cela pose tout de même un problème. Cette augmentation de volume est uniquement liée à la valeur de l'entrefer que nous voulions atteindre. Si nous réduisons la valeur de l'entrefer, nous pourrions réduire le volume de l'actionneur. Néanmoins, nous privilégions un grand entrefer qui évite une reprise des pièces pour la rectification.

Il faut alors comparer le coût de la rectification des pièces polaires et des processus qui en découlent (lavage...) et le coût de la matière supplémentaire pour quantifier le gain final.

5 - CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons vu l'intérêt de l'utilisation d'un actionneur à circuit magnétique fermé. Cela permet de maîtriser structurellement l'impédance, c'est à dire de limiter les variations d'impédance lorsque l'entrefer équivalent augmente ou diminue.

A l'aide d'une modélisation numérique en deux dimensions, nous avons validé le principe de fonctionnement et la structure a évolué. Nous avons confronté ces résultats avec une modélisation en trois dimensions afin de s'assurer du caractère bien-fondé de la modélisation précédente.

Une palette en forme de V autorise l'utilisation d'un entrefer plus important en conservant un couple et un nombre d'ampères-tours nécessaire au déclenchement équivalent.

Nous avons enrichi notre modélisation à l'aide d'une étude analytique permettant d'une part, une modélisation multi physique et d'autre part, l'intégration de critères de coût.

L'augmentation de la valeur d'entrefer n'étant pas suffisante, nous nous sommes tournés vers une optimisation à partir du modèle analytique. Les résultats obtenus sont alors conformes à nos espérances. Nous remarquons cependant que le volume de l'actionneur a augmenté. Pour que la structure soit économiquement viable, il faut que le coût de matière supplémentaire soit très inférieur au coût de rectification.

L'ensemble de ce chapitre est purement théorique, et nous devons confronter nos résultats avec la réalité. Dans le chapitre suivant, nous réaliserons des prototypes et nous nous intéresserons à la faisabilité industrielle de notre actionneur.

CHAPITRE IV

De la théorie à la pratique

CHAPITRE IV – DE LA THEORIE A LA PRATIQUE.....	99
1 - INTRODUCTION	99
2 - FAISABILITE INDUSTRIELLE DE LA STRUCTURE.....	99
2.a - La découpe traditionnelle	99
2.b - Moulage par injection de métal	101
2.b.1 - Présentation du process.....	101
2.b.2 - Les matériaux.....	102
2.b.3 - Adaptation de la géométrie au processus industriel.....	102
2.c - Fabrication de la bobine	103
3 - REALISATION DE PROTOTYPES.....	104
3.a - Le prototypage.....	104
3.b - L'entrefer.....	105
4 - LES RESULTATS EXPERIMENTAUX.....	108
4.a - Couple et couple différentiel sur la palette	108
4.b - Variabilité de l'impédance en fonction de l'induction de l'aimant.....	110
4.c - Variabilité de l'impédance en fonction de l'entrefer.....	112
4.d - Calcul du nombre d'ampères-tours nécessaires au déclenchement	113
4.e - Bilan sur les résultats expérimentaux.....	114
5 - IMPACT ECOLOGIQUE	114
6 - CONCLUSION	116

CHAPITRE IV – DE LA THEORIE A LA PRATIQUE

1 - INTRODUCTION

Les différentes études théoriques réalisées dans les chapitres précédents doivent être confrontées à des essais sur des actionneurs réels.

Dans ce chapitre, nous étudierons la faisabilité industrielle de la structure proposée. Cette étude se limite à la fabrication de l'armature, de la palette et du bobinage. Cette étape nous amènera à des modifications de la géométrie pour simplifier ou pour permettre la fabrication des pièces.

Ensuite, nous verrons comment les prototypes ont été fabriqués et quelles ont été les principales difficultés rencontrées. Un certain nombre d'essais seront alors réalisés pour nous permettre de confronter nos résultats avec le cahier des charges.

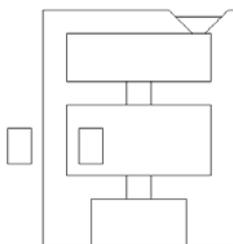
L'impact écologique des produits Hager est étudié dès la phase de conception. Afin de s'intégrer au mieux à la démarche d'éco-conception, nous comparerons l'impact écologique du nouvel et de l'ancien actionneur. Nous utiliserons, pour cela, un outil d'évaluation des risques environnementaux et de gestion des opportunités, le logiciel EIME [EIM].

2 - FAISABILITE INDUSTRIELLE DE LA STRUCTURE

La première question que nous devons nous poser est : « la structure proposée est-elle viable industriellement ? ». En d'autres termes, sommes-nous capables de la fabriquer et à quel coût ?

Dans ce paragraphe, nous nous intéresserons uniquement à la faisabilité de fabrication de l'armature, de la palette et du bobinage.

2.a - La découpe traditionnelle



Nous rappelons sur la Figure 73 l'actionneur étudié : cette structure a pour particularité un circuit magnétique fermé.

La fabrication d'un tel dispositif n'est pas élémentaire. Les outils utilisés pour la réalisation du relais actuel sont des outils de découpe traditionnels.

Figure 73 : Structure de l'actionneur étudiée

Ces outils ont l'avantage d'avoir une cadence très rapide. Leur inconvénient principal est que l'épaisseur des tôles usinées est dépendante du matériau à travailler et elle doit être relativement faible.

En découpe traditionnelle, nous pouvons obtenir des surfaces relativement planes. Sur la Figure 74, nous pouvons observer une surface après la phase de découpe. Deux zones principales sont visibles, la zone de découpe et la zone d'arrachement. Cette dernière est toujours présente et il est difficile de la maîtriser.



Figure 74 : surface découpée

La zone d'arrachement dépend en particulier de l'usure de l'outil de découpe et cet outil subit des dérives dans le temps.

Si nous utilisons le relais actuel avec une surface découpée, l'entrefer équivalent sera plus important qu'actuellement mais très instable d'une pièce à l'autre.

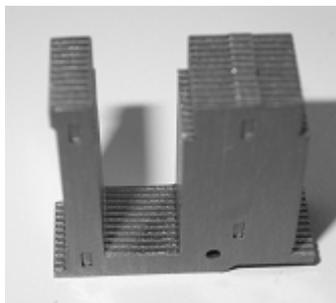


Figure 75 : Exemple du contacteur

L'armature de notre actionneur a une épaisseur d'environ 8 mm. Nous serions obligés d'usiner plusieurs tôles fines pour la réalisation de l'armature. Il faudrait ensuite les assembler comme pour les contacteurs (voir Figure 75).

Un assemblage supplémentaire paraît incompatible avec une diminution des coûts. Même si cette structure travaille à un entrefer équivalent plus important, nous devons tout de même le maîtriser ce qui paraît impossible en utilisant un empilage de tôles sans rectification.

Cette solution de découpe ne nous satisfait pas. Nous devons trouver une autre technologie permettant une liberté de géométrie des pièces de l'actionneur et une précision relativement importante pour la réalisation de l'entrefer ($\sim 30\mu\text{m}$).

Nous avons étudié différentes solutions techniques :

- Différents procédés de découpe comme la découpe fine ou la découpe laser.
- Différents procédés de métallurgie des poudres comme la compression uni-axiale, la compression isostatique, le fritté-forgé, l'injection.

La solution la mieux adaptée à notre actionneur est l'injection de métal. Elle allie la liberté de géométrie, la précision des pièces et des matériaux à haute performance magnétique. Dans le paragraphe suivant, nous allons décrire plus précisément cette technologie.

2.b - Moulage par injection de métal

2.b.1 - Présentation du processus industriel

Nous proposons d'étudier le processus d'injection de métal, plus connu sous le nom de MIM : Metal Injection Molding. Cette technologie est proche d'une injection plastique classique. Le processus de fabrication est divisé en quatre étapes :



Figure 76 : Mélange de poudre métallique et de liant plastique

1 - Tout d'abord, il faut mélanger la poudre métallique avec un liant plastique permettant l'injection.

Le mélange obtenu se retrouve sous forme de granules.

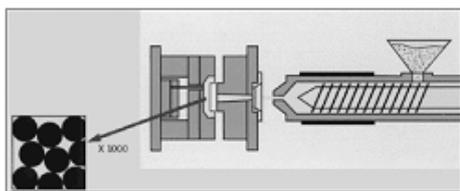


Figure 77 : Injection

2 - La seconde est l'injection de la matière dans un moule permettant d'obtenir la pièce. A ce stade, la pièce est composée d'un mélange d'alliage de métal et de plastique.

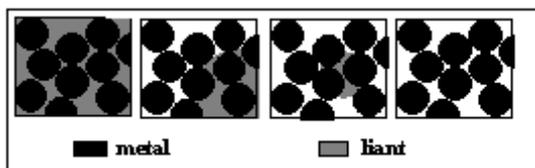


Figure 78 : Déliantage

3 - La phase de déliantage sert à éliminer le liant plastique. La pièce devient une structure poreuse composée de particules métalliques juxtaposées.

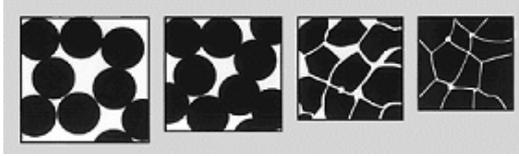


Figure 79 : Frittage

4 - La dernière étape est le frittage. C'est un traitement thermique donnant à cette structure la densité et la cohésion nécessaire. Il s'accompagne d'un retrait contrôlé.

Ce processus, très proche d'une injection plastique, offre une grande liberté pour la forme géométrique de la pièce. La géométrie fermée ne pose donc pas de problème particulier. Le retrait homogène et contrôlé garantit une bonne précision des pièces. Par exemple, la tolérance d'un angle est de $0^{\circ}30'$.

2.b.2 - Les matériaux

Le nombre de matériaux disponibles est moins important que pour la découpe. Néanmoins, un matériau avec des performances magnétiques convenables existe : l'alliage de Fer et de Nickel.

Un rebouclage avec la modélisation sera nécessaire puisque les performances magnétiques du matériau moulé par injection ne sont pas identiques à celles définies avec la matière initialement étudiée. Les caractéristiques magnétiques doivent également être validées. Un traitement thermique annexe sera peut-être nécessaire si le processus d'obtention des pièces dégrade les performances magnétiques et mécaniques.

2.b.3 - Adaptation de la géométrie au processus industriel

L'utilisation de cette technologie nous oblige à adapter notre géométrie pour faciliter l'industrialisation, et bien entendu diminuer le coût de fabrication. Nous devons garantir le fonctionnement et permettre l'injection des pièces.

Deux modifications principales ont été apportées. Elles sont visibles sur la Figure 81.

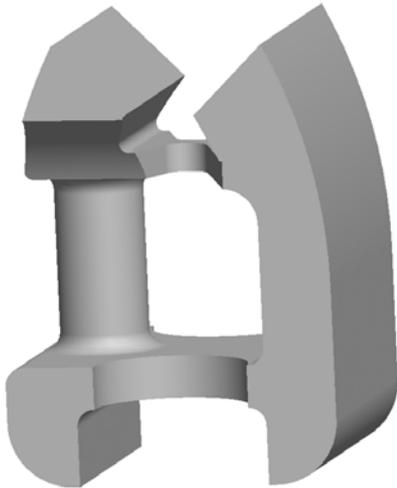


Figure 80 : Actionneur avant modification pour le process MIM

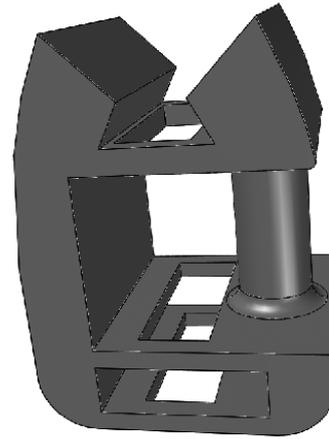


Figure 81 : Actionneur après modification pour le process MIM

Tout d'abord, on remarque l'apparition d'un shunt supplémentaire. Magnétiquement, ce shunt supplémentaire ne va pas modifier le fonctionnement de l'actionneur mais nous allons devoir utiliser un aimant un peu plus volumineux. Mécaniquement, cela va permettre à la structure de ne pas se déformer lors des étapes de déliantage et de frittage.

Ensuite, nous remarquons que la forme des shunts a été modifiée. La section a été conservée mais la forme a été transformée pour faciliter l'insertion d'un seul tiroir au centre de la pièce.

2.c - Fabrication de la bobine

Tous les fabricants d'actionneurs utilisent la technique de bobinage sur un support plastique emboîté directement sur la structure magnétique. Cependant, cette technique ne peut pas être utilisée dans le cas d'un circuit magnétique fermé.

Nous devons nous assurer de la faisabilité technique du bobinage sur un tel circuit. Nous pouvons penser au tore de mesure de courant. Ce tore est un circuit fermé sur lequel nous bobinons du fil. Ce serait donc une première solution mais ce processus est utilisé pour bobiner quelques spires. Or, nous devons bobiner plusieurs centaines de spires. La cadence étant trop faible, nous nous sommes dirigés vers d'autres technologies.

La seconde solution est l'utilisation d'un support plastique tournant autour d'un des bras de la structure pour enrouler directement le fil.

Les cadences de la seconde solution étant plus importantes, nous optons pour ce choix technique. Mais une adaptation de la structure s'avère nécessaire pour qu'un support plastique puisse tourner autour d'un bras. Pour ce faire, une forme cylindrique sur un bras de l'actionneur est conseillée.

Comme pour le changement de matière, nous rebouclerons avec la modélisation pour valider l'utilisation d'un bras de forme cylindrique.

3 - REALISATION DE PROTOTYPES

3.a - *Le prototypage*

La réalisation des prototypes a été réalisée avant l'optimisation et l'adaptation de la géométrie au processus industriel. Nous n'utiliserons donc pas la géométrie finale pour les essais mais une version intermédiaire (voir Figure 83). Nous pourrions ainsi valider nos modèles.

L'inconvénient principal du MIM est la réalisation des prototypes. En effet, il faudrait usiner un moule pour permettre une injection classique. Ce type de prototypage est excessivement onéreux et très long à réaliser.

Nous avons opté pour une autre solution : nous avons usiné des blocs de métal injecté. Les étapes de déliantage et de frittage ont été réalisées par la suite. Cette méthode est rapide à mettre en place et peu coûteuse par rapport à la réalisation d'un moule. L'inconvénient est que nous n'utilisons pas le matériau dans son état original. De plus, la précision des pièces n'est pas liée au processus d'injection mais à la précision des outils d'usinage.

Le bobinage se fait manuellement. Nous avons adapté la carcasse et le système de bras de levier de l'actionneur Hager. Ce prototypage s'est déroulé en 5 étapes :

- Dans un premier temps, nous avons découpé la palette en deux morceaux pour conserver l'axe de pivot du relais Hager. Cet axe est le bras de l'armature ayant la grande section.
- Nous avons ensuite fixé la demi-armature sur le support de l'actuel relais préalablement découpé.
- Puis nous avons fixé le sous-ensemble précédent, l'armature du nouveau relais et l'aimant permanent par de la résine.
- Nous avons développé un support pour bobiner sur la structure. Le bobinage est alors manuel.
- La dernière étape consiste à fixer la palette du nouveau relais sur celle de l'ancien relais avec de la colle car il faut éviter de détériorer les caractéristiques magnétiques de la palette par une soudure ou d'autres procédés trop agressifs. La colle permet également :

- La création d'un entrefer suffisamment grand entre l'ancienne et la nouvelle palette ce qui limite les flux de fuite.
- L'adaptation du positionnement de la palette en V sur l'armature.

Le prototype obtenu est visible sur la Figure 82.

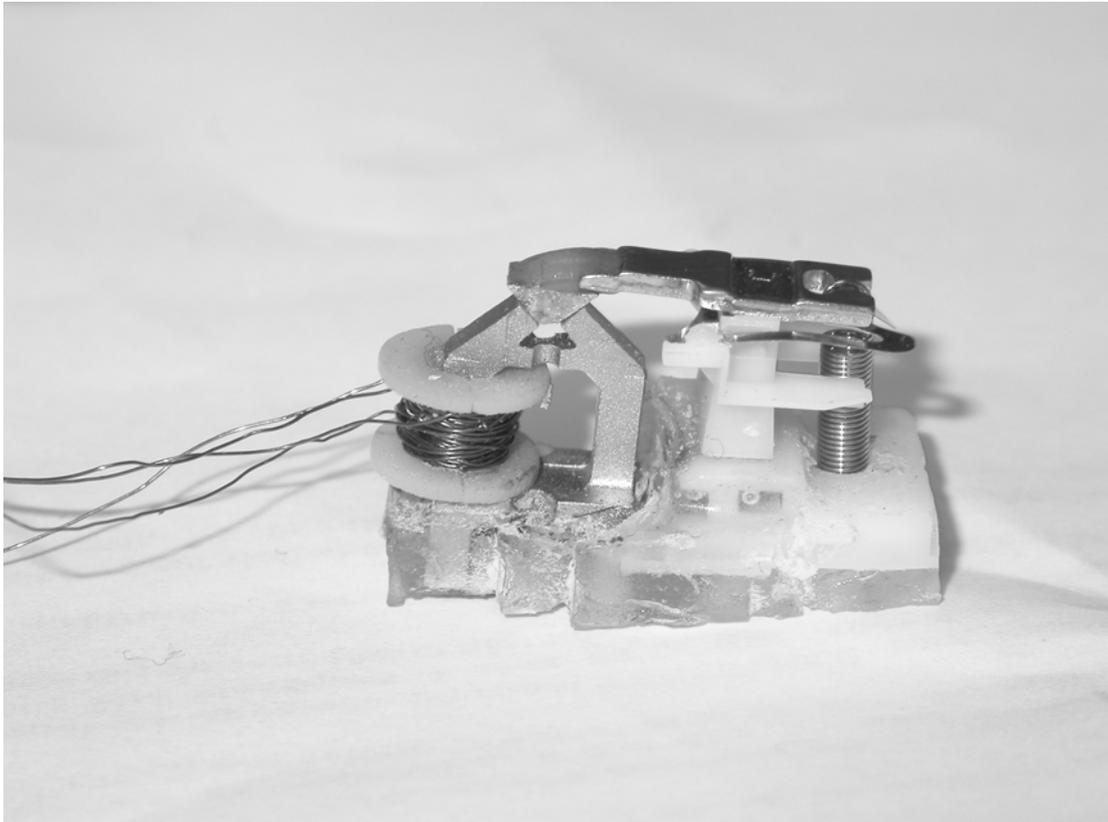


Figure 82 : prototype de relais

3.b - L'entrefer

La maîtrise de l'entrefer est très importante pour assurer un bon fonctionnement de l'actionneur. La valeur de cet entrefer dépend de l'état des surfaces polaires et du positionnement de la palette vis à vis de l'armature.

Les pièces que nous avons obtenues sont déformées et le positionnement de la palette vis-à-vis de l'armature n'est pas optimal. L'entrefer équivalent ainsi obtenu est supérieur à l'objectif fixé (environ $30\mu\text{m}$).

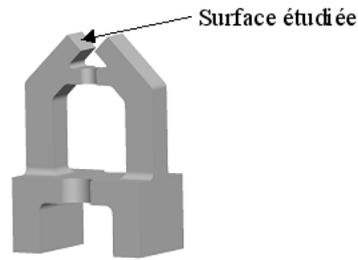


Figure 83 : Surface polaire étudiée

Ces défauts sont apparus lors de l'usinage des pièces. Sur la Figure 84, nous observons l'état de surface d'une des faces de l'armature en contact avec la palette (celle visualisée sur la Figure 83). Cette surface comporte un trou d'environ $70\ \mu\text{m}$ provenant d'un léger saut lors du fraisage.

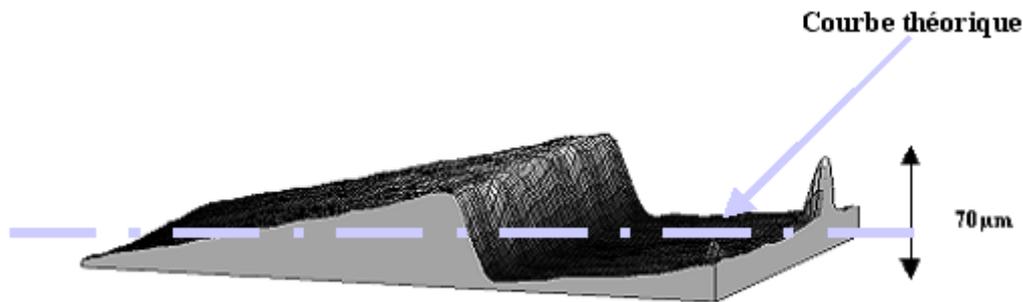


Figure 84 : Etat de surface de la surface polaire de l'armature avant traitement thermique (voir Figure précédente)

Les différents traitements liés au MIM (déliantage et frittage) modifient l'état des surfaces. Nous observons sur la Figure 85 la même surface mais après les différents traitements. Nous remarquons que la hauteur de la bosse a diminué (de $70\ \mu\text{m}$ à $60\ \mu\text{m}$) et que le trou a diminué. La matière s'est en fait lissée vers le bas grâce à la force de gravité. Il faut ainsi être attentif à la forme du moule car le traitement thermique modifiera l'aspect des surfaces.

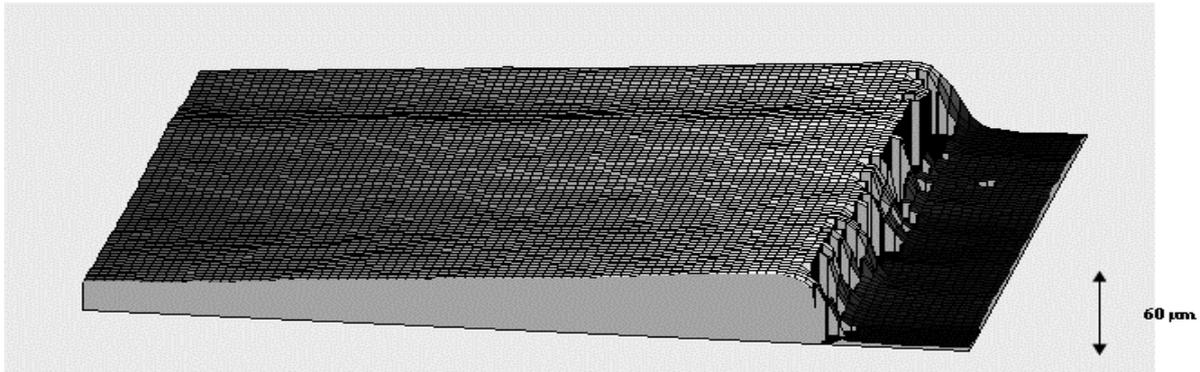


Figure 85 : Etat de la surface polaire de l'armature après traitement thermique

La manière dont les pièces métalliques ont été réalisées n'est pas optimale. L'utilisation de moules (moule palette et armature) permettrait d'améliorer le retrait. La palette ne se place pas de manière optimale sur l'armature. Des pièces spécifiquement développées pour cet actionneur amélioreraient sa position. De façon globale, l'état de surface et donc l'entrefer équivalent sont améliorables.

Dans la suite de notre étude, nous utiliserons ces prototypes même s'ils comportent un entrefer supérieur à notre objectif. Nous validerons ainsi nos modèles et nous disposerons d'informations sur la performance du relais. Les influences de l'augmentation de l'entrefer équivalent sur les mesures devraient être les suivantes :

- Le couple et le couple différentiel devraient répondre au cahier des charges : nous augmenterons sensiblement l'induction de l'aimant pour contrer la baisse de couple.
- La sensibilité de l'impédance devrait rester faible : la structure fermée devrait limiter l'influence de l'entrefer sur l'impédance.
- Le nombre d'ampères-tours nécessaires au déclenchement devrait être supérieur à ceux du cahier des charges : les états de saturations des shunts seront plus importants et ils limiteront l'efficacité du flux généré par la bobine.

Pour que nos modèles se rapprochent de la réalité, nous allons utiliser deux régions linéiques par surface polaire (voir Figure 86). La première représentera la forme plate (voir Figure 84) avec un entrefer faible et la seconde représentera le trou (voir Figure 84) avec un entrefer d'une valeur de 70µm.

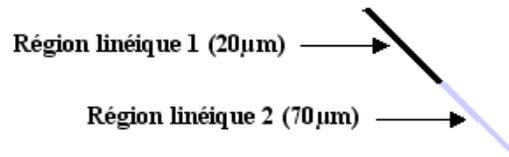


Figure 86 : modélisation de l'entrefer par deux régions linéiques

4 - LES RESULTATS EXPERIMENTAUX

Des mesures sont nécessaires pour valider le fonctionnement de notre actionneur. Les paramètres prépondérants sont :

- le couple exercé sur la palette
- l'impédance du relais
- la puissance de déclenchement.

Toutes les mesures ont été réalisées pour caractériser au mieux les performances du nouveau relais.

4.a - Couple et couple différentiel sur la palette

Nous cherchons à mesurer deux choses :

- Tout d'abord, le couple statique sur le relais, c'est à dire le couple généré par l'aimant.
- Ensuite, nous désirons mesurer la différence entre le couple généré par l'aimant et le couple généré par le ressort, c'est-à-dire le couple différentiel sur la palette. En d'autres termes, c'est le couple minimal à engendrer pour que la palette puisse décoller.

Afin de quantifier ces valeurs, nous utilisons une colonne de mesure et un capteur de force de type jauge de déformation (voir Figure 87). Ce capteur mesure la variation de la résistance de la pièce déformée.

A l'extrémité de ce capteur, nous avons fixé une pointe très fine en appui à l'endroit où est fixé le ressort (voir Figure 88).

Le couple est ensuite calculé en mesurant la distance entre le point d'impact et l'axe de pivot de la palette.

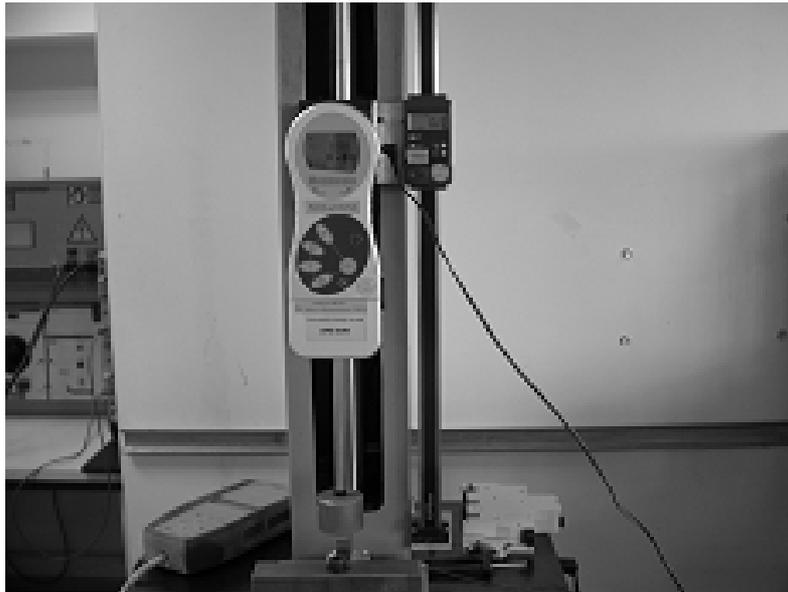


Figure 87 : Mesure du couple

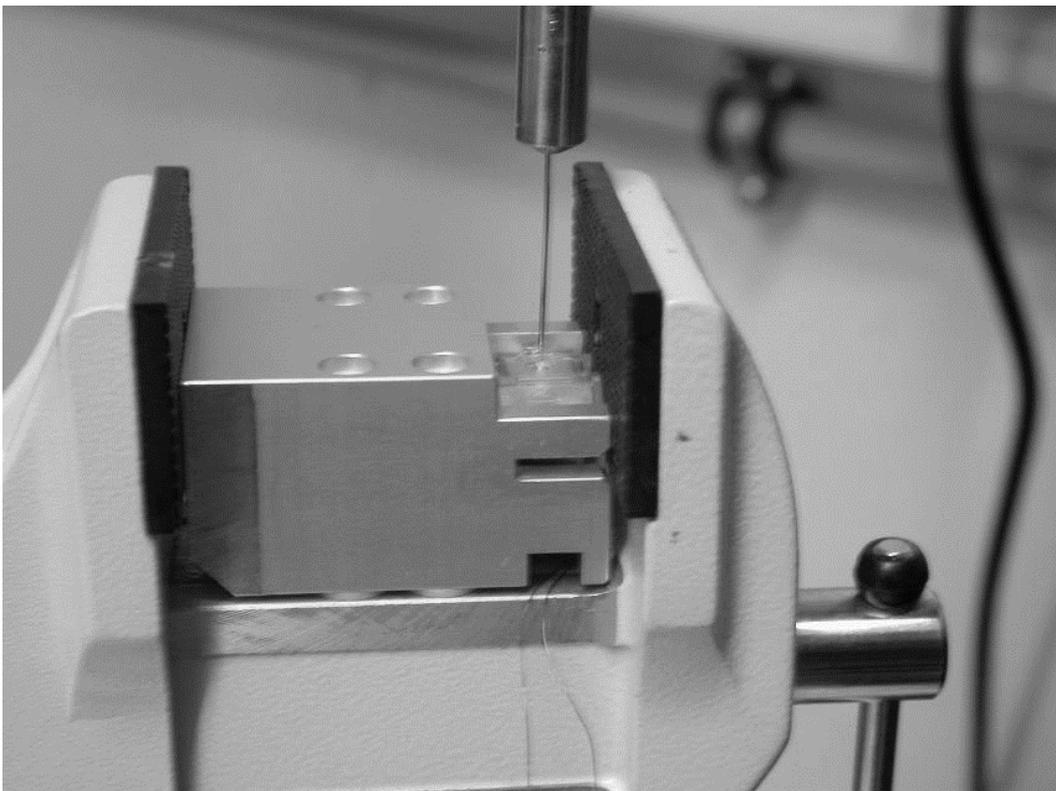
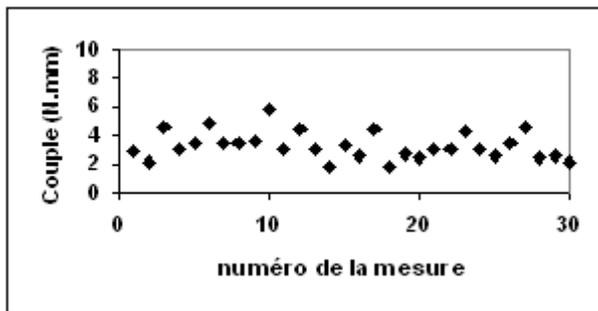


Figure 88 : Pointe en appui à l'endroit où est fixé le ressort

Pour mesurer le couple de force généré par l'aimant, le ressort est enlevé après magnétisation du relais.

Pour mesurer le couple différentiel exercé sur la palette, la même méthode de mesure est réalisée mais en laissant le ressort en place. Nous commencerons par cette dernière.

Trente mesures ont été effectuées sur un même actionneur. Le relais n'est pas magnétisé entre deux mesures. Les résultats obtenus sont très délicats à analyser (voir Figure 89).



Nous observons une dispersion importante ($\pm 2.5\text{N.mm}$) de la mesure avec une moyenne d'environ 3 N.mm.

Cette fluctuation des résultats peut provenir de plusieurs éléments que nous identifierons par la suite.

Figure 89 : couple différentiel sur le nouvel actionneur

Le couple moyen obtenu est de 3N.mm. Il est proche de la valeur calculée (2 N.mm).

La même mesure est réalisée sur la valeur du couple engendré par l'aimant.

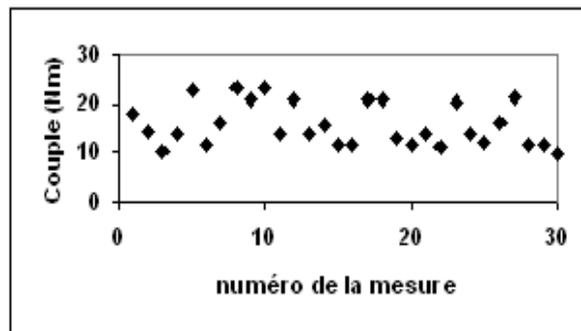


Figure 90 : Couple engendré par l'aimant sur le nouvel actionneur

Les résultats sont identiques à ceux obtenus précédemment (voir Figure 90). En effet, après trente mesures sur le même relais et dans les mêmes conditions, la variation de la mesure est très importante ($\pm 7\text{N.mm}$). La valeur moyenne est d'environ 17 N.mm.

La dispersion de la mesure ne nous permet pas de comparer les résultats et la théorie avec précision. Cependant, les ordres de grandeurs restent identiques.

4.b - Variabilité de l'impédance en fonction de l'induction de l'aimant

Comme le relais est réglé par l'aimant, la sensibilité de l'impédance vis-à-vis de l'induction magnétique de l'aimant est importante à vérifier. En magnétisant l'aimant à différentes valeurs, nous modifions l'état de saturation du circuit magnétique. Cela peut influencer directement sur l'impédance de l'actionneur.

Malheureusement, nous ne sommes pas capables de mesurer l'induction de l'aimant une fois assemblé dans l'actionneur. Il n'est pas non plus possible de l'enlever du circuit magnétique puisqu'il se démagnétiserait partiellement¹². Le problème se contourne en utilisant la méthode de réglage de l'aimant.

Le réglage de l'aimant se fait en deux parties, tout d'abord une magnétisation avec un champ magnétique extérieur important puis une démagnétisation avec un champ magnétique plus faible. Ces champs magnétiques sont générés par des bobines de Helmholtz et nous contrôlons leurs valeurs par les tensions de magnétisation et de démagnétisation. Ces tensions sont l'image des courants qui traversent les bobines de Helmholtz. Les courants sont alors l'image des champs magnétiques générés par les bobines et nous permettant de régler l'aimant.

Dans notre cas, la tension de démagnétisation est toujours identique et nous faisons varier uniquement la tension de magnétisation. Cette tension est une image de l'induction de l'aimant.

Comme le réglage de l'actionneur se fait en modifiant l'induction de l'aimant, nous risquons de modifier également la valeur de l'impédance du relais. Nous proposons donc de vérifier la variation de l'impédance en fonction de la tension de magnétisation de l'aimant. Chaque mesure a été réalisée cinq fois.

La tension de magnétisation est limitée entre 1000V et 1500V. En dessous de 1000V, l'aimant ne génère plus assez de flux magnétique pour maintenir la palette en place. Notre banc d'essai ne nous permet pas d'aller au delà de 1500V.

Les essais ont été réalisés sur deux prototypes comprenant un nombre de spires différent. Sur la Figure 91, nous observons :

- Un écart sur les valeurs moyennes d'impédance des deux actionneurs provenant de la différence du nombre de spires de chacun.
- Une légère dispersion pour chaque point de mesure. Celle-ci n'est pas identique d'un relais à l'autre, mais elle est toujours inférieure à 0.1Ω .
- Une variation de l'impédance en fonction de l'état de saturation du circuit magnétique : l'écart entre le maximum et le minimum est toujours inférieur à 0.15Ω .

¹² Ce qui est d'ailleurs une des problématiques que nous avons réglée avec la nouvelle structure.

La dispersion sur les points de mesure est du même ordre que les variations d'impédances en fonction de l'induction de l'aimant. Nous pouvons en conclure que la variation d'impédance en fonction de la tension de magnétisation est négligeable. Ceci n'est bien entendu valable que lorsque l'induction de l'aimant est suffisante pour générer une force magnétique sur la palette.

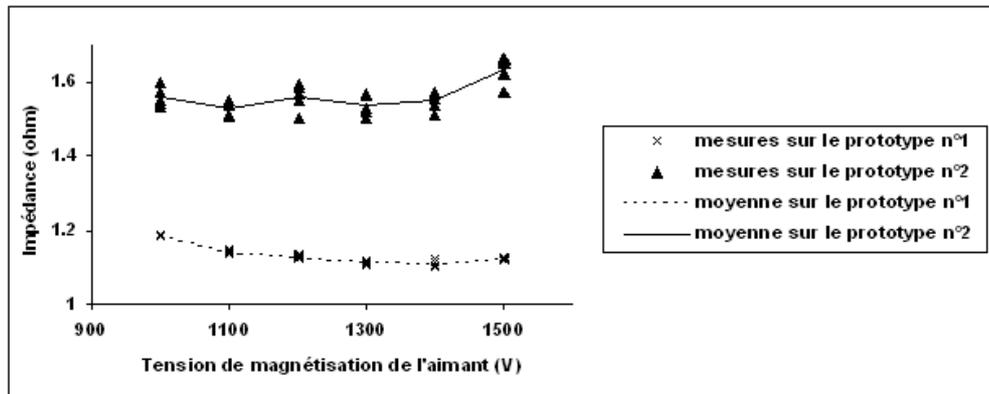


Figure 91 : Sensibilité de l'impédance vis-à-vis de l'induction de l'aimant

4.c - Variabilité de l'impédance en fonction de l'entrefer

L'influence de l'entrefer sur l'impédance est un objectif important de notre étude. C'est un essai très difficile à réaliser d'un point de vue pratique.

Une diminution de l'entrefer existant est difficile. Comme la palette n'est pas plane mais de forme trapézoïdale, une rectification serait très difficile à mettre en place. De plus, elle modifierait l'état magnétique local du matériau.

Une augmentation de l'entrefer est possible en ajoutant un matériau fin entre la palette et l'armature. Ce matériau doit être amagnétique et non conducteur.

Au vu des difficultés, nous proposons d'étudier cette variation d'impédance sur deux points extrêmes :

- Lorsque la palette est en position fermée, donc pour l'entrefer minimal que nous pouvons obtenir.
- Lorsque la palette est absente, donc pour l'entrefer maximum que nous pouvons obtenir.

Cet essai est réalisé sur les prototypes du nouveau relais mais également sur celui de Hager. En ce qui concerne l'actionneur Hager, il existe différents relais à différentes

impédances. Comme ce sont les variations d'impédances qui nous intéressent, le choix du relais importe peu. Les résultats sont récapitulés sur le Tableau 1.

	Impédance relais Hager (Ω)	Impédance nouveau relais (Ω)
Relais fermé	38.3	1.19
Relais ouvert	7.8	1.13
variation	79%	5%

Tableau 1 : Variation de l'impédance relais ouvert / relais fermé

Les variations d'impédances entre le relais fermé et le relais ouvert sont très faibles pour le nouvel actionneur. Nous pouvons ainsi en conclure qu'une variation d'entrefer influera peu sur les variations d'impédance (<5%) ce qui n'est pas le cas de l'actionneur actuel. L'utilisation d'une structure magnétique fermée répond donc à notre cahier des charges.

4.d - Calcul du nombre d'ampères-tours nécessaires au déclenchement

Le troisième paramètre qui nous intéresse est le nombre d'ampères-tours nécessaire pour déclencher l'actionneur.

L'essai se déroule en deux parties :

- Le réglage du relais : nous ajustons l'induction de l'aimant pour obtenir le couple différentiel du cahier des charges. Le relais est ainsi réglé par rapport au couple mécanique et non vis-à-vis de la puissance de déclenchement.
- La mesure de l'intensité : nous mesurons l'intensité traversant la bobine pour obtenir les ampères-tours nécessaires.
- Le réarmement du relais : il se fait manuellement entre chaque déclenchement.

Nous observons sur la Figure 92 les résultats obtenus.

Comme précédemment cette mesure a été effectuée trente fois et nous avons une dispersion de plus ou moins 1.2A.T pour la mesure.

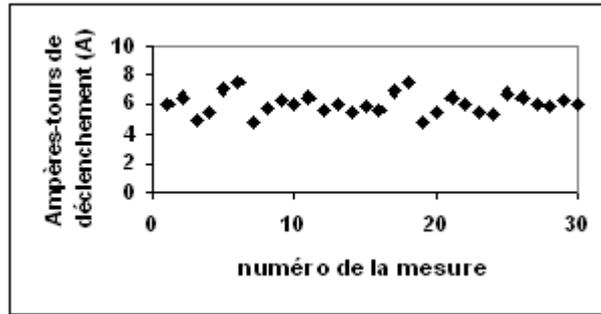


Figure 92 : Mesures d'ampères-tours nécessaires au déclenchement

Durant l'essai, nous observons que le nombre d'ampères-tours pour le déclenchement est directement lié à la manière dont est réarmé le relais. Lorsque nous réarmons le relais sans forcer, la valeur de déclenchement est autour des 8 A. Tours. Lorsque nous appuyons plus sur la palette lors du réarmement, le nombre d'ampères-tours est d'environ de cinq.

La valeur moyenne, autour de 6 A. Tours, est très largement supérieure à celle de notre cahier des charges (0.8 A. Tours). Néanmoins, en modifiant la valeur de l'entrefer utilisé dans notre modélisation pour la ramener à la valeur réelle supposée (environ 30 μ m), le nombre d'ampères-tours nécessaires au déclenchement est environ de 1A. Tours ce qui est proche de notre objectif.

4.e - Bilan sur les résultats expérimentaux

L'ensemble des résultats obtenus est très encourageant pour la suite. En effet, que ce soit du point de vue du couple exercé sur la palette ou que ce soit du point de vue de la variation de l'impédance, le nouvel actionneur répond au cahier des charges.

Compte-tenu de la valeur de l'entrefer entre la palette et l'armature, le nombre d'ampères-tours nécessaires au déclenchement est satisfaisant mais un peu élevé. Une meilleure précision de l'entrefer nous permettrait de diminuer cette valeur. Mais est-il possible d'obtenir les précisions souhaitées avec le procédé MIM ?

Une amélioration du mode de prototypage devrait être nécessaire pour obtenir les précisions souhaitées. Nous devons développer un support dédié au nouvel actionneur pour obtenir une meilleure position de la palette vis-à-vis de l'armature. De plus, l'utilisation d'un moule et un meilleur traitement thermique nous permettraient d'améliorer l'état de surface de nos relais.

5 - IMPACT ECOLOGIQUE

Le développement d'un nouveau dispositif ne doit pas nuire pas à l'environnement. L'impact écologique doit donc être pris en compte dès le début de l'étude.

Pour cela, nous utilisons le logiciel EIME [EIM] qui est un outil d'évaluation des risques environnementaux. L'impact écologique du nouvel actionneur est ainsi comparé à celui actuellement en production.

Le processus de fabrication de l'actionneur a été décomposé pour permettre le calcul de l'impact environnemental. Cependant, certains processus de fabrication ou certains matériaux ne font pas parti de la banque de données du logiciel.

Nous avons ainsi été amenés à les estimer d'une manière détournée. Par exemple, l'alliage fer/nickel que nous utilisons n'est pas répertorié. Dans un premier temps, nous avons calculé le volume de matière utilisé puis nous avons estimé la masse de l'élément fer et de l'élément nickel pour chaque actionneur. La masse de chaque élément a ainsi été intégrée dans le calcul.

Les résultats sont représentés sur la courbe de la Figure 93. Ce diagramme prend comme référence les performances du relais actuellement en production (trait noir). Le nouveau relais (trait gris) est alors noté à partir de cette référence.

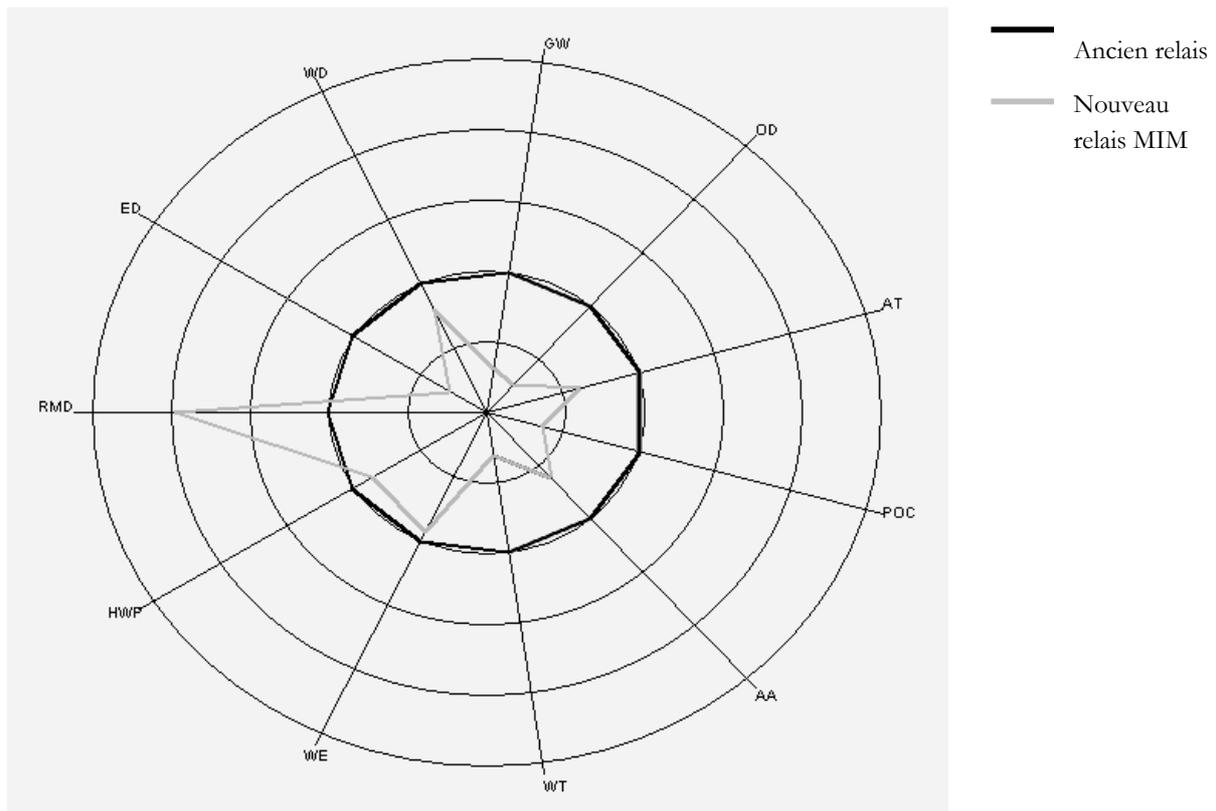


Figure 93 : Comparaison écologique entre le nouveau et l'ancien relais

RMD : Raw Material Depletion	POC : Photochemical Ozone Creation
ED : Energy Depletion	AA : Air Acidification
WD : Water Depletion	WT : Water Toxicity
GW : Global Warming	WE : Water Eutrophication
OD : Ozone Depletion	HWP : Hazardous Waste Production
AT : Air Toxicity	

Mis à part une plus grosse consommation de matière première, les performances obtenues sont relativement bonnes.

Le volume de matière utilisé est plus important sur le nouveau relais, ce qui explique que le RMD (Raw Material Depletion) soit plus important. Par contre, le processus de fabrication a été amélioré avec l'élimination de la rectification, l'élimination de soudures, de colle, de résine et la diminution du nombre de pièces. Cela explique la nette amélioration de l'impact écologique. Ainsi, la toxicité de l'eau, la consommation d'énergie et les problématiques liées à l'ozone sont améliorées.

Bien que notre dispositif ne soit pas écologiquement parfait, nous améliorons nettement l'impact de la production sur l'environnement. Nous remplissons ainsi un des objectifs de HAGER en termes d'écologie.

6 - CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons mis en pratique la théorie des chapitres précédents. Cela c'est effectué en trois temps.

Tout d'abord, nous avons réglé la problématique de la faisabilité industrielle de la structure. Deux difficultés principales apparaissent, la réalisation des pièces métalliques et le bobinage.

Comme l'actionneur a pour particularité un circuit magnétique fermé, l'utilisation d'une découpe classique pour la réalisation de l'armature et de la palette n'est pas possible sans un empilement de tôles. Après avoir étudié différents procédés de fabrication, nous avons convergé vers le moulage par injection de métal. Cette technologie allie la liberté de géométrie et la précision. De plus, elle permet l'utilisation de matériaux à haute performance magnétique.

En ce qui concerne le bobinage, les techniques classiques ne peuvent pas être utilisées avec une structure fermée. D'autres technologies permettent de bobiner plusieurs centaines de spires sur une structure fermée avec des cadences répondant au cahier des charges.

Après s'être assuré de la faisabilité industrielle de la structure, nous avons fabriqué des prototypes. Pour la réalisation des premiers prototypes, nous n'avons pas utilisé de moules. Nous avons directement usiné les actionneurs sur des blocs d'alliages composés de métal et de plastique préalablement injectés, les différents traitements thermiques se faisant par la suite. L'avantage de cette méthode est la diminution du coût des prototypes et du temps de fabrication. L'inconvénient est que nous n'utilisons pas le matériau dans sa forme traditionnelle (nous avons usiné un bloc de métal préalablement injecté).

Enfin, différents essais nous ont permis de valider le fonctionnement de cet actionneur. Les différents paramètres qui ont été étudiés sont le couple et le couple différentiel sur la palette, la variabilité de l'impédance et le nombre d'ampères-tours nécessaire au déclenchement. Le couple, le couple différentiel et l'impédance répondent au cahier des charges. A cause d'un entrefer équivalent trop important, le nombre d'ampères-tours est trop important. Toutefois, nous retrouvons les mêmes ordres de grandeurs avec une simulation utilisant un entrefer important. Une amélioration des prototypes est possible ce qui devrait diminuer le nombre d'ampères-tours.

D'un point de vue écologique, notre dispositif n'est pas parfait puisque nous utilisons plus de matière première. Néanmoins, la suppression d'un grand nombre d'étapes du processus industriel comme les soudures ou la rectification nous permet de diminuer fortement l'impact sur l'écologie. Globalement, ce dispositif nuira moins à l'environnement.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

L'énergie électrique est présente partout où nous allons. Elle est essentielle dans notre vie de tous les jours mais elle reste potentiellement dangereuse. Le travail sur des produits de protection des personnes qu'on appelle interrupteur différentiel nécessite une qualité irréprochable pour prévenir tout danger d'électrocution.

Le bon fonctionnement d'un produit différentiel est indispensable pour assurer la sécurité des personnes. Le tore de mesure, la plaquette électronique et le relais polarisé sont les organes qui détectent le courant de défaut, qui le caractérisent et qui ordonnent l'ouverture du circuit électrique. Nous travaillons sur des produits différentiels traditionnels ce qui signifie qu'ils doivent fonctionner indépendamment de la tension du réseau en utilisant uniquement l'énergie du défaut électrique. L'actionneur électromécanique présent dans ce type d'interrupteur différentiel doit transformer une énergie électrique faible en une énergie mécanique élevée avec l'aide de l'énergie magnétique d'un aimant.

L'objectif de cette étude est l'amélioration des performances techniques et la diminution des coûts de fabrication de cet actionneur électromécanique à haute sensibilité. Afin de formaliser et d'optimiser le développement de ce relais, nous nous sommes appuyés sur la méthodologie TRIZ. Celle-ci a été un précieux outil pour la reformulation des problèmes, la définition des axes d'améliorations et la recherche de solutions à différentes problématiques.

La compréhension du fonctionnement du relais actuel à l'aide d'une modélisation fonctionnelle a été la première étape. Nous avons ainsi mis en évidence les principaux défauts de la structure actuelle.

Une étude complémentaire sous forme d'analyse causale a orienté nos recherches et nous a aidés à définir les principaux axes d'améliorations :

- La dissociation structurelle de l'impédance et de l'épaisseur de l'entrefer équivalent.
- L'augmentation de l'épaisseur de l'entrefer équivalent.
- La diminution du nombre d'ampères-tours nécessaires au déclenchement.

Les outils d'aide à la recherche de solutions associés à la méthodologie TRIZ ont facilité la résolution des problématiques mises en évidence par la modélisation fonctionnelle et l'analyse causale.

Cette méthodologie nous a apporté deux concepts essentielles :

- La maîtrise du « connu ». En effet, il est indispensable de décrire le fonctionnement par des mots. Comprendre une problématique technique et être capable de l'écrire sont deux étapes différentes dans la maîtrise technique. Cela nous permet d'ordonner notre savoir et donc de mieux le maîtriser. Nous avons alors une vision plus globale du dispositif.
- La découverte de l'inconnu. Par l'utilisation de cette méthodologie, nous avons alors découvert les véritables problématiques techniques et économiques du produit. Nous avons alors été capables de faire les liens entre ces deux domaines et d'en ressortir les axes d'amélioration à apporter au système.

Nous avons alors présenté une nouvelle structure d'actionneur. L'originalité de cette structure réside en un circuit magnétique fermé autour de la bobine. Il est alors possible de maîtriser l'impédance de la bobine et cela indépendamment de l'épaisseur de l'entrefer. Ce résultat a été vérifié à l'aide d'une modélisation analytique.

Ce nouvel actionneur ne répondant pas à l'ensemble du cahier des charges, les outils de modélisation numérique nous ont permis de tester un grand nombre de solutions pour converger vers une structure répondant aux critères de l'épaisseur de peau et du nombre d'ampères-tours nécessaires au déclenchement. L'optimisation à partir de modèles analytiques a ensuite conduit à l'amélioration des performances de l'actionneur.

Etant dans un contexte industriel, nous nous sommes ensuite intéressés à la faisabilité de fabrication de la structure. Nous avons ainsi recherché une matière et un processus de fabrication capables de réaliser notre structure. L'injection d'un alliage de fer-nickel est une solution intéressante à notre problématique. Ce type de matériau est utilisé principalement dans l'horlogerie et l'automobile mais il n'est jamais utilisé dans la protection électrique. Des prototypes en MIM nous ont permis de valider nos résultats théoriques et de conclure sur la faisabilité réelle de notre actionneur.

Cette étude doit être complétée dans trois principaux domaines, la modélisation, l'étude des coûts et les performances techniques :

Pour ce qui est de la modélisation, il existe deux pistes d'amélioration :

Tout d'abord, une modélisation de type « robuste » doit être utilisée. C'est-à-dire l'intégration dans le modèle des variations statistiques des différents éléments du système comme par exemple les côtes ou les caractéristiques des matériaux. L'objectif étant de contrôler les variations statistiques des paramètres importants du produit.

Ensuite, nous faisons le constat que nous nous limitons à la conception et à l'optimisation d'un seul composant de l'interrupteur différentiel, l'actionneur. Une modélisation du système complet serait une étape supplémentaire dans le dimensionnement des produits.

Il serait alors nécessaire d'utiliser des outils communs à des mécaniciens, des électriciens, des thermiciens pour la modélisation de l'interrupteur différentiel, en partant de la détection du courant de défaut jusqu'à l'ouverture des contacts électriques.

En ce qui concerne l'étude de coûts, il est impératif d'étudier de manière plus précise le coût de fabrication de ce nouvel actionneur en intégrant de façon complète le processus de fabrication. Nous pourrions ainsi statuer définitivement sur l'intérêt économique de ce relais.

Pour affiner nos résultats expérimentaux, d'autres prototypes doivent être élaborés en utilisant des moules pour l'injection des pièces métalliques. Nous serons alors en mesure de vérifier l'épaisseur des entrefers que nous sommes capables d'obtenir avec le procédé MIM et de valider définitivement son emploi.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- [ACR] « Définition du risque électrique »,
http://www.ac-rouen.fr/rectorat/etablissements_ihs/r_elec03.php
- [ALB] L.ALBERT, « Modélisation et optimisation des alternateurs à griffes, application au domaine automobile », thèse INPG, Génie Electrique, Grenoble, Juillet 2004.
- [ANA] J.C CLOAREC, « Analyse fonctionnelle ou la préparation de l'AMDEC », Maintenance & Entreprise, 1993. Vol.466, pp. 20-22
- [ATI] E.ATIENZA, « Méthodologie et outils pour le dimensionnement », thèse INPG, Génie Electrique, Grenoble, Juillet 2003.
- [BRI] P.BRISSONNEAU, « Aimants permanents, principes et circuits magnétiques », Techniques de l'ingénieur, pages D 2090 – 1 à 20.
- [CAV] D.CAVALUCCI, « TRIZ : l'approche Alschullerienne de la créativité », Techniques de l'ingénieur, pages A 5211 – 1 à 18.
- [CED] FLUX 9.30, Guide d'utilisation, « Description physique, couplage circuit, circuit magnétique », Vol 2 page 35, avril 2006.
- [CON] J.CONRAD, « Modélisation d'un transformateur de courant à charge variable », thèse INPG, Génie Electrique, 26 Novembre 1997.
- [COU] G.COUDERCHON, « Alliages magnétiques doux », Techniques de l'ingénieur, pages M 350 – 1 à 30.
- [DES] « Modéliser, Dimensionner, Partager », <http://designprocessing.free.fr/>
- [DUP] B.DU PELOUX DE SAINT ROMAIN, « Modélisation des actionneurs électromagnétiques par réseaux de réductances. Création d'ou outil métier dédié au prédimensionnement par optimisation », thèse INPG, Génie Electrique, 09 octobre 2006.

- [EIM]** « Conception Développement Durable Environnement », www.codde.fr/eng/EIMEPrincipes.html
- [FLU]** J.C.SABONNADIÈRE, G.MEUNIER et B.MOREL, « Flux : a general interactive finite elements package for 2D electromagnetic fields », IEEE Transactions on magnetics n°18, p. 411-15 (1982).
- [FOG]** A.FOOGIA, G.MEUNIER, JR.CARDOSO, N.RETIERE, “Bidimensionnal Solution of 3D Electromagnetic Problems”, Compumag RIO, Vol. 1, 1997, pages 53-54.
- [HER]** HERBERT C.ROTTERS, «Electromagnetic devices », John Wiley & Sons, Inc. London : Chapman & Hall, Limited, 1941, pages 116 à 150.
- [INV]** « Plan and Research, Conceive and Design, Prevent and Fix Defects », www.invention-machine.com
- [INS]** Norme internationale, « Installations électriques à basse tension – Partie 1: Principes fondamentaux, détermination des caractéristiques générales, définitions », IEC 60364 – 1, pages 38 à 70.
- [JOY]** P.JOYEUX, « Modélisation d'un relais polarisé haute sensibilité », thèse INPG, Génie Electrique, 21 Décembre 2000.
- [JUF]** M.JUFER, « Circuits magnétiques », Techniques de l'ingénieur, pages D 1050 – 1 à 30.
- [KOK]** J.M.KOKERNAD, D.A.TORREY, « Magnetic circuit model for the mutually coupled switched-reluctance machine », IEEE transactions on magnetics, Vol 36, n°2, mars 2000, pages 500 à 507.
- [LAC]** G.LACROUX, “Les aimants permanents », Technique et documentation, Lavoisier, 1989, pages 193 à 210, ISBN 2-85206-573-8.
- [MAO]** J.MARSOT, « Conception et Ergonomie, Méthodes et Outils pour intégrer l'ergonomie dans le cycle de conception des outils à mains », Département Ingénierie des équipements de travail, centre de Lorraine de l'INRS, Vandoeuvre, INRS, note scientifique et technique n°219.

- [MAR]** F.MARTHOURET, « Développement de modèles dynamiques comportementaux de circuits magnétiques. Pris en compte de l'hystérésis et de la géométrie », thèse INSA de Lyon, 21 Novembre 1995.
- [MUL]** B.MULTON, « Application des aimants aux machines électriques », Ecole Normale Supérieure de Cachan, département de mécatronique, médiathèque EEA.
- [NOR]** Spécification technique « Effets du courant sur l'homme et les animaux domestiques », CEI/IEC/TS 60479-1 :2005
- [OST]** V.OSTOVIC, J.M.MILLER, V.K.GARG, R.D.SCHULTZ, S.H.SWALES, « A magnetic equivalent circuit based performance computation of a Lundell alternator », IEEE transactions on industry applications, vol.35, n°4, July/August 1999.
- [PRI]** <http://fr.wikipedia.org/wiki/TRIZ>
- [WUR]** F.WURTZ, « Une nouvelle approche pour la conception sous contraintes de machines électriques », thèse INPG, Génie Electrique, Grenoble, Mai 1996.
- [YAH]** A.YAHIAOUI, F.BOUILLAULT, « Saturation effect on the electromagnetic behaviour of an induction machine », IEEE transactions on magnetics, Vol 31, n°3, mai 1995, pages 2036 à 2039.

ANNEXE I

Essais électriques de la fonction différentielle

ANNEXE I : ESSAIS ELECTRIQUES DE LA FONCTION DIFFERENTIELLE

La fonction différentielle doit répondre à un grand nombre d'essais électriques différents [JOY]. Une partie de ces essais est normatif, l'autre partie provient de spécifications internes à HAGER.

1 - Courant différentiel important

L'objectif de cet essai est la protection des personnes sur de forts courants différentiels. Pour les très grandes valeurs de courant, c'est le disjoncteur qui assurera la protection. Cependant, pour des courants intermédiaires où le disjoncteur se trouve dans la zone thermique, le temps de déclenchement est trop important. La fonction différentielle permet de protéger les personnes contre les contacts directs. Nous retrouvons alors deux essais différents :

- A 500 A différentiels et 1500 A différentiels, la fonction différentielle doit déclencher. Cela peut simuler par exemple un défaut franc d'isolation (phase à la terre) ce qui engendre un courant de défaut dont la valeur est proche de celle d'un court-circuit.
- A 1500A équilibrés et $10 \cdot I_{\Delta n}$, la fonction différentielle doit également déclencher (court-circuit et défaut différentiel simultané).

2 - Influence de la température

Les matériaux magnétiques sont très sensibles aux variations de températures. Nous devons vérifier le fonctionnement de la protection différentielle lorsque la température est modifiée. Deux essais sont alors réalisés :

- Le fonctionnement en charge : la fonction mesure doit déclencher sur des courants différentiels lorsque le produit a été alimenté pendant une longue période. Cette longue période sous courant nominal va augmenter la température à l'intérieur du produit différentiel. Celui-ci doit rester dans les plages de déclenchement.
- Le fonctionnement en température : les produits doivent fonctionner en été avec des températures très élevées comme en hiver lors de la remise en route d'une installation.

3 - Les déclenchements intempestifs

Des courants électriques spécifiques existent dans certaines installations. La fonction différentielle ne doit pas considérer ces courants comme des courants différentiels. Trois essais sont alors réalisés pour éviter des désagréments à l'utilisateur :

- L'onde de courant 8/20 μ s qui simule un coup de foudre sur le réseau électrique. Le produit différentiel ne doit pas déclencher sur ce type de courant.
- La mise sous tension de tubes fluorescents peut engendrer l'apparition de courants transitoires (pour les filtres comportant des condensateurs et des mises à la terre). La fonction différentielle ne doit pas déclencher sur ces courants qui ne sont pas des courants différentiels.
- Des problématiques d'équilibrages apparaissent par exemple lors du démarrage d'un moteur. Il existe alors un appel de courant de ligne pouvant aller jusqu'à dix fois le courant nominal de l'appareil. Une mauvaise position des conducteurs primaires du tore peut engendrer un flux à l'intérieur de celui-ci. Ce type de courant ne doit pas faire déclencher la fonction différentielle.

ANNEXE II

Les outils utilisés de la méthodologie TRIZ

ANNEXE II : LES OUTILS UTILISES DE LA METHODOLOGIE TRIZ

TRIZ est l'acronyme russe de la théorie de résolution des problèmes inventifs "Теория Решения Изобретательских Задач - ТРИЗ). Cette méthodologie permet la résolution de problèmes techniques d'une manière rigoureuse. Elle est basée sur différents principes. Nous n'utilisons pas l'ensemble des outils proposés par TRIZ mais uniquement une partie :

- Les principes inventifs
- Les lois d'évolution des systèmes

1 - Les 40 principes inventifs

Lors de la résolution d'une problématique, nous vérifions si un de ces 40 principes [PRI] peut être appliqué. Ces principes sont donc passés en revue un par un.

1	Segmentation	Accroître le degré de fragmentation d'un objet, Diviser un objet en pièces indépendantes, Faciliter le désassemblage d'un objet
2	Extraction	Extraire un élément ou une propriété nuisible d'un objet ou isoler l'élément ou la propriété utile d'un objet
3	Qualité locale	Amener chaque partie de l'objet à remplir une fonction utile et différente Faire passer la structure d'un objet, un environnement ou une influence externe d'un état homogène à un état hétérogène Amener chaque partie fonctionnelle de l'objet dans les conditions de fonctionnement appropriées.
4	Asymétrie	Remplacer la forme symétrique d'un objet par une forme asymétrique Si la forme est déjà asymétrique, accroître son degré d'asymétrie
5	Combinaison	Combiner ou paralléliser des actions, les rapprocher dans le temps Rapprocher ou fusionner des objets identiques ou similaires, assembler des parties identiques ou similaires pour réaliser des opérations parallèles
6	Universalité	Faire en sorte que l'objet assure plusieurs fonctions, de manière à éliminer le besoin d'autres pièces
7	Placement intérieur « poupées russes »	Placer les objets en série les uns dans les autres Faire passer un élément dans une cavité d'un autre
8	Contrepoids	Contrebalancer la masse d'un objet en le combinant avec un autre qui le soulève Compenser la masse d'un objet en le faisant interagir avec son environnement

		(par exemple, en utilisant une force aérodynamique, hydrodynamique etc.)
9	Action inverse préliminaire	Si l'action à exécuter présente à la fois des effets utiles et néfastes, celle-ci devra être précédée d'actions inverses contrôlant les effets néfastes Créer des contraintes internes de l'objet, qui s'opposeront aux contraintes néfastes de l'objet en fonctionnement
10	Action préliminaire	Réaliser à l'avance (entièrement ou partiellement) un changement requis plus tard Prépositionner idéalement les objets de façon à ce qu'ils entrent en action efficacement et sans perte de temps
11	Compensation ou protection préliminaire	Compenser le manque de fiabilité de l'objet par des contre- mesures prises à l'avance
12	Equipotentialité	Limiter les changements de position (par exemple, changer les conditions de travail de manière à ce que l'objet n'ait besoin ni d'être élevé ni d'être abaissé)
13	Inversion	Inverser l'action utilisée pour résoudre le problème (par exemple, au lieu de refroidir un objet, le réchauffer) Rendre les pièces mobiles fixes et inversement Retourner l'objet (ou le procédé)
14	Sphéricité	Remplacer des parties, surfaces ou formes rectilignes par des courbes, des surfaces planes par des surfaces sphériques ou des pièces parallélépipédiques par des structures sphériques Utiliser des rouleaux, des billes, des spirales, des dômes Remplacer une translation par une rotation ; utiliser la force centrifuge
15	Mobilité	Permettre ou concevoir une optimisation des caractéristiques de l'objet, de l'environnement extérieur ou du procédé ou trouver des conditions de fonctionnement optimales Diviser un objet en plusieurs éléments mobiles les uns par rapport aux autres Si un objet (ou un procédé) est fixe, le rendre mobile ou adaptable
16	Action partielle ou excessive	S'il est difficile d'obtenir un effet à 100% par une méthode donnée, appliquer cette méthode « partiellement » ou « à l'excès » peut simplifier considérablement le problème
17	Changement de dimension	Déplacer un objet dans un espace bidimensionnel ou tridimensionnel Utiliser un assemblage multicouches d'objets plutôt qu'un assemblage monocouche Incliner ou réorienter l'objet, le poser de côté Utiliser l'autre face d'une surface donnée
18	Vibration mécanique	Faire osciller ou vibrer un objet Si l'oscillation existe, accroître sa fréquence Utiliser la fréquence de résonance d'un objet Utiliser des vibrations piézo-

		électrique au lieu de mécanique Combiner ultrasons et champ électromagnétique
19	Action périodique	Remplacer une action continue par une action périodique ou pulsatoire Si l'action est déjà périodique, modifier sa fréquence ou son amplitude Utiliser les pauses entre les impulsions pour accomplir une autre action
20	Continuité d'une action utile	Privilégier une action continue (sans pauses), où toutes les parties d'un objet agissent plein régime Eliminer tous les temps morts
21	Grande vitesse	Effectuer un procédé ou certaines phases dangereuses ou néfastes à grande vitesse
22	Application bénéfique d'un effet néfaste	Utiliser des facteurs néfastes (en particulier les effets néfastes de l'environnement) pour obtenir un effet positif Annuler l'effet d'un facteur néfaste en le combinant avec un autre facteur néfaste Accroître un effet néfaste jusqu'à ce qu'il ne soit plus nuisible
23	Asservissement	Introduire un asservissement (réponse, vérification) afin d'améliorer un procédé ou une action Si l'asservissement existe déjà, modifier son ampleur ou son influence
24	Intermédiaire	Utiliser un objet ou un procédé intermédiaire Combiner provisoirement un objet à un autre (opération facilement réversible)
25	Self-service	Faire de sorte que l'objet se suffise à lui-même en effectuant des fonctions auxiliaires utiles Réutiliser les résidus énergétiques et matériels
26	Copie	Utiliser des copies simplifiées et bon marché plutôt qu'un objet complexe, cher ou fragile Remplacer un objet ou un procédé par sa copie optique Si les copies optiques sont déjà utilisées, utiliser les copies infrarouges ou ultraviolettes
27	Ephémère et bon marché	Remplacer un objet cher par un ensemble d'autres objets bon marché, en renonçant à certaines de ses qualités (comme la durée de l'action par exemple)
28	Remplacer les systèmes mécaniques	Remplacer un système mécanique par un système sensoriel (optique, acoustique, olfactif) Utiliser des champs électriques, magnétiques, électromagnétiques pour interagir avec l'objet Remplacer les champs statiques par des champs mobiles, les champs aléatoires par des champs structurés Utiliser les champs en conjonction avec des particules activées par ces champs (par exemple, ferromagnétiques)
29	Systèmes pneumatiques et hydrauliques	Remplacer les parties solides d'un objet par un gaz ou un liquide ; par exemple, objets gonflables (à air ou eau), à coussin d'air, hydrostatique ou hydro-réactif

30	Membrane flexible et film mince	Remplacer les structures tridimensionnelles par des membranes flexibles et des films minces Isoler l'objet de son environnement en utilisant des membranes flexibles et des films minces
31	Matériau poreux	Rendre un objet poreux ou lui adjoindre des éléments poreux Si l'objet est déjà poreux, remplir les pores (les trous) d'une substance ou d'une fonction utile
32	Changement de couleur	Modifier la couleur d'un objet ou de son environnement extérieur Modifier le degré de transparence d'un objet ou de son environnement extérieur
33	Homogénéité	Faire interagir les objets avec un objet annexe de même matière (ou d'une matière ayant des propriétés identiques)
34	Éliminer récupérer	Éliminer un élément de l'objet (par dissolution, évaporation etc.) lorsque celui-ci a assuré sa fonction ou le modifier au cours de fonctionnement A l'inverse, récupérer les éléments consommables de l'objet au cours du fonctionnement
35	Changement de paramètre	Modifier l'état physique d'un objet (ex. sous forme de gaz, de liquide ou de solide) Changer la concentration ou la consistance Modifier le degré de flexibilité Modifier la température
36	Changement de phase	Utiliser les phénomènes associés aux changements de phase (changement de volume, perte ou absorption de chaleur etc.)
37	Dilatation thermique	Utiliser la dilatation ou la contraction thermique des matériaux Utiliser des matériaux différents avec des coefficients de dilatation différents
38	Oxydants puissants	Remplacer de l'air normal par de l'air enrichi Remplacer l'air ou l'oxygène par des radiations ionisantes Utiliser de l'oxygène ozonisé Remplacer l'oxygène ozonisé ou ionisé par de l'ozone Remplacer un environnement normal par un environnement inerte
39	Environnement inerte	Ajouter des pièces neutres ou des additifs inertes à un objet
40	Matériaux composites	Remplacer un matériau homogène par un matériau composite

2 - Les lois d'évolution

Intégralité des parties d'un système technique

Conductibilité énergétique du système

Coordination du rythme des parties

Augmentation du niveau d'idéalité

Développement inégal des parties d'un système

Transition vers le super système

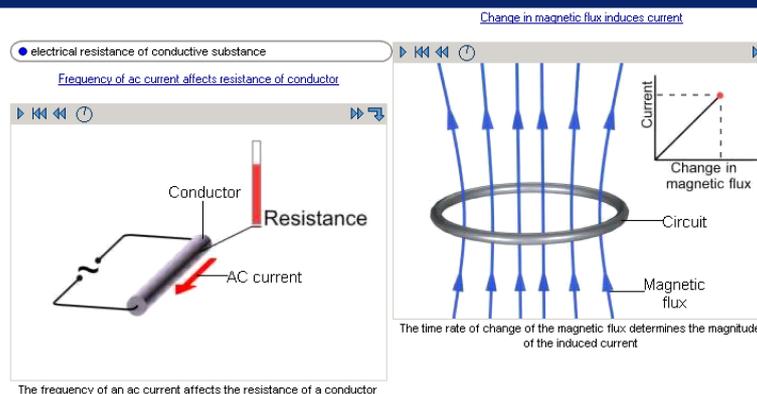
Transition vers le micro niveau

Augmentation de la contrôlabilité et du dynamisme

3 - Bases d'effets scientifiques

Une base scientifique est une base de données intégrée à l'outil Goldfire Innovator. Elle ne fait pas partie des outils classiques de la méthodologie TRIZ mais elle permet d'améliorer la recherche de solution. Elle comprend une grande partie des effets scientifiques connus et explique leur fonctionnement. L'intérêt de cette base est qu'elle présente les phénomènes physiques (avec des animations) de manière relativement pertinente (voir figure ci-dessous).

Link 1 of 6: frequency of ac current can change electrical resistance of conductive substance. Electrical resistance of conductive substance can change induction current <<Back to search res



Description

An ac current flows through a [conductor](#). Changing the frequency of the current affects the resistance of the conductor.

The conductor is cylindrically shaped. The ac current creates an alternating magnetic field in the conductor. The lines of the magnetic field are concentric circles with centers positioned on the axis of the conductor. Consider a rectangular contour in the conductor. The surface enclosed by the contour is parallel to the axis of the conductor. One of the sides of the contour is positioned close to the axis, while the opposite side is at a greater distance from it.

The field lines cross the surface of the contour normal to the surface. The alternating field creates an alternating magnetic flux (not shown) through the surface enclosed by the contour. As a result, an [electromotive force \(emf\)](#) arises in the contour (not shown), which induces current flow. The induced current through the side of the contour, which is closer to the axis, is directed opposite to the ac current. Thus, the net current through the conductor near its axis is lower than the ac current. On the whole, the current is partially extruded from the center of the conductor to its periphery.

Increasing the frequency of the ac current increases the induced current. This extrudes the current from the central region of the conductor even more, decreasing the cross-sectional area of the layer near the surface through which the ac current mainly flows. Decreasing the cross-sectional area through which the current flows increases the resistance of the conductor.

Thus, the frequency of the ac current through the conductor affects the resistance of the conductor.

Advantages

The effect of the frequency of an ac current on the resistance of a [conductor](#) is used in heaters.

Formula

Description

When the magnetic flux through a closed conducting coil changes, an [electromotive force \(emf\)](#) is induced in the coil. According to Faraday's law, the magnitude of the electromotive force is equal to the time rate of change of the magnetic flux. The electromotive force pushes the electrons through the circuit. The number of electrons passing through the cross-sectional area of the [conductor](#) per unit time is defined as the electric current. The value of this current, according to Ohm's law, is inversely proportional to the closed circuit resistance.

Increasing the rate of change of the magnetic flux increases the electromotive force. An increase in the electromotive force accelerates the electron motion. The induction current in the closed circuit grows.

The minus sign in the equation is explained by Lenz's law. The induced current generates its own magnetic field. The direction of the induced current is such that its magnetic field opposes the changing magnetic flux.

Conditions

The change in the magnetic flux must be uniform.

Advantages

The current induced in the closed circuit may be used:

1. to measure the spatial and temporal changes in the magnetic flux induction.
2. to measure the angular velocity of coil rotation with respect to the magnetic field.
3. for remote sensing of magnetic objects.

Formula

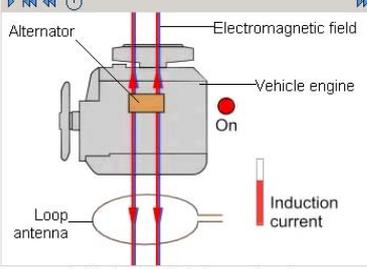
$$I = - \frac{1}{R} \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

I - induction electric current in closed circuit, A (ampere)

Save Solution... Export...

De plus, elle offre des exemples dans lesquels le phénomène physique en question est utilisé (voir figure ci-dessous avec un alternateur).

Ex: Induction current detects operating engine
 Problem Solution Advantages References See Also



Problem
 A sensor that detects spark pulses determines whether an engine is operating. The sensor is located around the spark coil. It cannot determine from a remote location whether an engine is running. Such control is required at gas stations, where vehicle engines must be turned off for safety during refueling.

Solution
 A loop antenna is placed where a vehicle refuels. When the vehicle engine is on, the alternator operates. The alternator generates an alternating electromagnetic field. The field reaches the location of the loop antenna. An alternating magnetic flow passes through the antenna. It generates an induction current in the antenna. When the engine is off, the alternator is also off. The induction current is zero. Thus, an induction current indicates a running engine.

Advantages
 The method works from remote locations.

References
 U.S. Patent. 5,705,999; West, AJ, et al.; Jan. 6, 1998; "Engine operation detection", Shell Oil Company.

See Also
 Effect: [Change in magnetic flux induces current](#)
 Example: [Magnetic sensor detects vehicle theft](#)

ANNEXE III

Brevet du nouvel actionneur

ANNEXE III : BREVET H14B84F**Dispositif de déclenchement électromagnétique**

La présente invention concerne un dispositif de déclenchement électromagnétique ou relais, c'est-à-dire un micro-actionneur qui, alimenté par une faible énergie électrique, est capable de fournir une forte énergie mécanique.

Il est classiquement constitué :

- d'un aimant permanent ;
- d'une armature réalisée en matériau ferromagnétique et canalisant le flux de l'aimant permanent ;
- d'au moins un enroulement excitateur parcouru par un courant reflétant le défaut ;
- d'une palette mobile par rapport à l'armature, apte à définir avec cette dernière au moins un entrefer, fermée contre ladite armature en l'absence d'excitation d'un niveau suffisant dans le ou les enroulements, et sollicitée à l'ouverture par des moyens de rappel.

Ce type de dispositif cumule deux fonctions : une fonction électrique, car le relais est une impédance complexe insérée dans le circuit de détection d'un courant de défaut. Par ailleurs, le relais comporte une fonction mécanique, puisqu'à partir d'un certain critère de déclenchement sur la tension et le courant, il doit libérer une énergie mécanique suffisante pour déverrouiller une serrure.

L'aimant permanent crée un flux dans le circuit magnétique qui engendre des forces au niveau des entrefers entre la palette et l'armature. Ces forces sont en principe suffisamment importantes pour s'opposer à l'action des

moyens de rappel, en général un ressort, et garder ainsi la palette collée contre l'armature magnétique.

Lorsque le ou les enroulement(s) ou bobine(s) est/sont alimenté(s) dans le bon sens, et avec une amplitude suffisante, le flux qu'il(s) produit(sent) s'oppose(nt) au flux de l'aimant. Les forces d'entrefer décroissent corrélativement, et l'effort exercé par le ressort devient prépondérant et permet le décollement de la palette.

Dans la plupart des cas, les dispositifs de déclenchement ou relais actuels comportent deux défauts principaux. L'un d'eux est la sensibilité du relais aux champs magnétiques extérieurs.

Mais le défaut principal concerne l'impédance du relais, qui est extrêmement sensible à la valeur de l'entrefer. Cette impédance dépend en fait de la résistance du fil, mais également de l'inductance de la bobine. Or, cette dernière dépend du circuit magnétique, et notamment de la réluctance du circuit magnétique vue par la bobine. Cette réluctance dépend elle-même directement de la valeur de l'entrefer entre la palette et l'armature, ce qui conduit à rectifier la palette et l'armature magnétique pour maîtriser un entrefer minimal. Un tel objectif est difficile à réaliser, et implique un coût élevé.

L'invention se propose de remédier à ces inconvénients, en proposant des nouvelles configurations de circuits magnétiques, c'est-à-dire de l'ensemble armature magnétique / palette, qui suppriment notamment la nécessité de réaliser une rectification de ces pièces.

A titre essentiel, selon l'invention, l'armature définit au moins un circuit magnétique fermé, parcouru par un champ magnétique généré par le ou les enroulements en sens inverse de celui créé par l'aimant sur une portion dudit circuit, et comporte au moins deux shunts ou zones "bouchon" saturés par le flux magnétique généré par l'aimant permanent, lesdits shunts ou zones "bouchon" étant disposés entre le ou les enroulements et la zone présentant la palette et les entrefers.

Lorsque les deux shunts ou zones "bouchon" sont saturés, ce qui est le cas en fonctionnement normal, leurs réluctances sont quasiment constantes, même avec une variation d'entrefer ou de la magnétisation de l'aimant. La réluctance vue par la bobine devient donc en pratique indépendante de la valeur de l'entrefer, ce qui signifie qu'il est possible d'utiliser des entrefers plus importants, et/ou d'accepter une variation de l'entrefer plus grande.

Avec une telle structure, la maîtrise de la valeur de l'impédance, ainsi que sa variation, sont assurées, ce qui est le résultat recherché puisqu'il permet la maîtrise du déclenchement des relais pour un seuil de courant de défaut prédéterminé.

Selon une possibilité, l'armature comprend une partie en circuit fermé à fenêtre centrale comportant au moins un enroulement et au moins deux shunts.

Plus précisément encore, cette partie en circuit fermé peut être rectangulaire, l'un des côtés du rectangle comportant un enroulement et les deux côtés adjacents parallèles formant deux shunts.

Cette configuration est notamment pratique en termes de fabrication / encombrement, et elle permet la mise en œuvre de multiples variantes pour le positionnement de l'aimant, les possibilités de palettes, etc.

Ainsi, dans cette hypothèse, l'aimant permanent et la palette mobile peuvent être disposés à l'extérieur des deux côtés formant un shunt.

Parmi les possibilités de configuration, , qui sont alors ouvertes, si l'aimant est rectangulaire, il peut alors être entouré sur trois côtés par une portion en U de l'armature dont la base est constituée par l'un des côtés formant shunt.

Outre le caractère fermé du circuit et l'existence des deux shunts, cette configuration permet de mieux canaliser les lignes de champ dues à l'aimant permanent.

Pour ce qui concerne le côté palette, selon une possibilité, les côtés parallèles du rectangle dont l'un comporte l'enroulement se prolongent en deux branches dont les extrémités libres forment avec la palette deux entrefers.

L'existence de deux entrefers, impliquant l'existence de deux surfaces de canalisation des flux sur la palette et donc de deux forces distinctes s'opposant à la force de rappel, permet de diminuer le taux de saturation nécessaire à la création des forces magnétiques, en l'occurrence divisées par deux.

Plusieurs configurations sont alors possibles, parmi lesquelles :

- lesdites branches sont symétriques et constituent avec le côté formant shunt un U coopérant avec une palette rectiligne ;
- les branches sont inclinées en toit l'une vers l'autre, avec des surfaces d'extrémités définissant un espace pour une palette de forme trapézoïdale, triangulaire ou circulaire.

Dans les deux hypothèses, la palette comporte bien deux surfaces actives, c'est-à-dire deux surfaces créant, avec des surfaces en vis-à-vis de l'armature, deux entrefers homologues.

Alternativement, la palette peut présenter deux extrémités libres planes parallèles à la face extérieure du côté du rectangle formant shunt, localisés dans le prolongement des côtés parallèles du rectangle dont l'un comporte l'enroulement.

Dans ce cas, de préférence, ladite palette peut être en U.

L'invention peut également être mise en œuvre selon une seconde famille de configurations qui se caractérisent en ce que l'armature comprend :

- une partie en circuit fermé à fenêtre centrale comportant l'enroulement ;
- une seconde partie entourant l'aimant permanent et comprenant la palette ;

les deux parties étant séparées par des tronçons formant des zones "bouchon".

Dans ce cas, les zones "bouchon" sont les équivalents des deux shunts, en l'occurrence placés un peu différemment car ils ne font plus partie du circuit fermé principal dans lequel est enroulée la bobine. Globalement, les caractéristiques et effets de ce circuit magnétique rejoignent ceux des

configurations qui ont été présentées auparavant. Dans cette hypothèse, selon une possibilité, l'un des côtés de la partie entourant l'aimant comporte deux branches à extrémités biseautées en regard, formant un espace pour une palette de forme trapézoïdale ou triangulaire.

On retrouve par conséquent l'existence de deux entrefers distincts, disposés face à une palette par exemple de forme trapézoïdale.

Dans les configurations possibles à palettes trapézoïdales ou triangulaires, les branches s'orientant l'une vers l'autre en vue de créer les deux entrefers peuvent être disjointes.

Plus généralement, selon l'invention, l'armature magnétique et la palette sont de préférence réalisées à partir de matériaux magnétiques en poudre frittée.

Ce mode de réalisation est très avantageux, notamment économiquement, car il permet d'éviter des opérations de rectification difficiles et coûteuses.

L'invention va à présent être décrite plus en détail, en référence aux figures annexées, pour lesquelles :

- la figure 1 est une vue en élévation de la première configuration de relais selon l'invention ;
- la figure 2 en montre une variante à palette à section circulaire ;
- la figure 3 représente une configuration à palette rectiligne ;
- la figure 4 en illustre une variante à palette en U ; et
- la figure 5 présente une vue en élévation de la seconde famille de configurations mentionnée auparavant.

En référence à la figure 1, le dispositif de déclenchement électromagnétique ou relais de l'invention comporte une armature (1) ayant

sensiblement la forme d'une maison. Dans sa partie inférieure, cette armature (1) comporte un aimant permanent (2), qui crée un flux permanent dans le circuit magnétique de l'armature engendrant des forces au niveau des entrefers entre l'armature (1) et la palette (3). Celle-ci se situe au sommet de la "toiture" de la maison, entre deux branches homologues (4) et (5) de l'armature (1) se développant l'une vers l'autre.

Une bobine (6) enroulée de telle sorte que lorsqu'elle est alimentée, elle crée un flux magnétique s'opposant à celui de l'aimant (2), est placée dans la partie centrale de l'armature (1). Le flux de l'aimant permanent (2) a été symbolisé en traits pleins, alors que le flux issu de la bobine est symbolisé en traits pointillés.

Pour ne pas faire dépendre l'impédance du relais de la valeur de l'entrefer, il faut que l'inductance de la bobine soit maintenue la plus constante possible. Or, cette inductance $L = \frac{n^2}{r}$ dépend du nombre de spires de la bobine et de la réluctance r du circuit magnétique vu par la bobine. L'impédance a donc un rapport direct avec la réluctance.

Dans les configurations de l'art antérieur, la valeur de cette réluctance dépendait elle aussi directement de la valeur de l'entrefer entre la palette et l'armature. Pour en obtenir une maîtrise suffisante, il était nécessaire de micro rectifier la palette et l'armature, en vue de le maintenir à une valeur minimale.

Dans la configuration montrée, le circuit vu à titre principal par la bobine, qui comprend les deux shunts (7) et (8), est fermé. Lorsque ces shunts (7) et (8) sont saturés, ce qui est le cas en fonctionnement normal du fait du choix de l'aimant (2) et du dimensionnement des shunts (7) et (8), les réluctances de ces derniers sont quasiment constantes, même lorsqu'il se produit une certaine variation des entrefers ou de la magnétisation de l'aimant. La réluctance vue par la bobine est donc quasiment indépendante de la valeur de

l'entrefer, d'où une possibilité d'avoir des tolérances bien supérieures à la fois pour l'entrefer et pour sa variation.

L'existence des portions (9) et (10) de l'armature (1) entourant l'aimant permanent (2) permet par ailleurs de diminuer la sensibilité aux champs magnétiques extérieurs, puisque les lignes de champs créées par l'aimant permanent (2) sont bien mieux canalisées dans ce type de configuration.

L'aimant ne voit pratiquement pas de fluctuation quand la palette s'ouvre.

La palette (3) comporte deux entrefers, au niveau des surfaces situées aux extrémités des branches (4) et (5). L'intérêt de ces deux surfaces est évident en termes de décomposition des forces. La force exercée par le ressort pour décoller la palette (3) de l'armature (1) peut être décomposée en deux forces distinctes, forcément beaucoup moins élevées que l'unique force qui serait nécessaire avec un seul entrefer, et permettant de diminuer le degré de saturation nécessaire dans l'armature.

Les figures 2 à 4 montrent des variations à la configuration de la figure 1. Celle de la figure 2 comporte une palette (3') circulaire, alors que les branches (4) et (5) de l'exemple illustré en figure 3 sont réduites à une portion rectiligne prolongeant les côtés du rectangle perpendiculaires aux côtés formant shunt (7, 8), et coopérant avec une palette rectiligne (3"). Enfin, la variante apparaissant en figure 4 montre une palette en U (23), c'est-à-dire intégrant les branches (14) (15).

La figure 5 montre une variante possible à la configuration précédente, mais qui répond aux mêmes objectifs. Dans le schéma de la figure 5, les éléments

identiques à ceux de la figure 1 portent les mêmes références. La palette n'est pas représentée, pour faciliter la visualisation des surfaces d'extrémité des branches (4) et (5), qui sont en l'espèce des surfaces biseautées ou inclinées (11) et (12). L'aimant permanent (2) est totalement entouré par l'armature (1), c'est-à-dire que les extrémités libres des prolongements (9) et (10) sont reliées par un côté supplémentaire de l'armature référencé (13). La canalisation des

lignes de champs magnétiques générés par l'aimant permanent (2) est encore meilleure, dans cette hypothèse, que pour celle de la figure 1.

L'avantage de cette structure est qu'il n'est pas nécessaire de saturer la partie fermée que voit la bobine (6), c'est-à-dire les côtés (7) et (8) rejoignant le côté autour duquel est enroulée la bobine (6) d'une part, et le côté en vis-à-vis d'autre part.

Il est en revanche nécessaire, dans ce cas, de saturer les zones "bouchon" (7') et (8') ainsi que la zone (13) afin que la bobine ne voit pas ou pratiquement pas le circuit de la palette et de l'aimant permanent (2).

D'autres configurations peuvent encore être proposées, qui reprennent les caractéristiques principales de l'invention examinée, mais qui peuvent différer des versions des figures 1 à 5 par la forme.

REVENDEICATIONS

1. Dispositif de déclenchement électromagnétique comprenant :
 - un aimant permanent ;
 - une armature réalisée en matériau ferromagnétique et comportant au moins un circuit magnétique fermé ;
 - au moins un enroulement excitateur entourant une portion d'un circuit fermé de ladite armature ;
 - une palette mobile par rapport à l'armature, apte à définir avec cette dernière au moins un entrefer, fermée contre ladite armature en l'absence d'excitation par le ou les enroulements, et sollicitée à l'ouverture par des moyens de rappel,

caractérisé en ce que ledit circuit fermé est parcouru par un champ magnétique généré par le ou les enroulements en sens inverse de celui créé par l'aimant sur une portion dudit circuit, et comporte au moins deux shunts ou zones "bouchon" saturés par le flux magnétique de l'aimant permanent, lesdits shunts ou zones "bouchon"

étant disposés entre le ou les enroulements et la zone présentant la palette et les entrefers.

2. Dispositif de déclenchement électromagnétique selon la revendication précédente, caractérisé en ce que l'armature comprend au moins une partie en circuit fermé à fenêtre centrale comportant au moins un enroulement et au moins deux shunts.
3. Dispositif de déclenchement électromagnétique selon la revendication précédente, caractérisé en ce que la partie en circuit fermé de l'armature est rectangulaire, l'un des côtés du rectangle comportant un enroulement et les deux côtés adjacents parallèles formant deux shunts.
4. Dispositif de déclenchement électromagnétique selon la revendication précédente, caractérisé en ce que l'aimant permanent et la palette mobile sont disposés à l'extérieur des deux côtés formant un shunt.
5. Dispositif de déclenchement électromagnétique selon la revendication précédente, caractérisé en ce que l'aimant est rectangulaire et entouré sur trois côtés par une portion en U de l'armature dont la base est constituée par l'un des côtés formant un shunt.
6. Dispositif de déclenchement électromagnétique selon l'une des revendications 4 et 5, caractérisé en ce que les côtés parallèles du rectangle dont l'un comporte l'enroulement se prolongent en deux branches dont les extrémités libres forment avec la palette deux entrefers.
7. Dispositif de déclenchement électromagnétique selon la revendication précédente, caractérisé en ce que lesdites branches sont symétriques et constituent avec le côté formant un

shunt, un U coopérant avec une palette rectiligne.

8. Dispositif de déclenchement électromagnétique selon la revendication 6, caractérisé en ce que les branches sont inclinées en toit l'une vers l'autre, avec des surfaces d'extrémités définissant un espace pour une palette de forme trapézoïdale, triangulaire ou circulaire.
9. Dispositif de déclenchement électromagnétique selon l'une des revendications 4 et 5, caractérisé en ce que la palette présente deux extrémités libres planes parallèles à la face extérieure d'un côté du rectangle formant un shunt, localisés dans le prolongement des côtés parallèles dont l'un comporte l'enroulement.
10. Dispositif de déclenchement électromagnétique selon la revendication précédente, caractérisé en ce que la palette est en U.
11. Dispositif de déclenchement électromagnétique selon la revendication 1, caractérisé en ce que l'armature comprend :
 - une première partie en circuit fermé à fenêtre centrale comportant l'enroulement ;
 - une seconde partie entourant l'aimant permanent et comprenant la palette ;

les deux parties étant séparées par des tronçons formant zones "bouchon".

12. Dispositif de déclenchement électromagnétique selon la revendication précédente, caractérisé en ce que l'un des côtés de la partie entourant l'aimant comporte deux branches à extrémités biseautées en regard formant un espace pour une palette de forme trapézoïdale ou triangulaire.

13. Dispositif de déclenchement électromagnétique selon l'une des revendications 8 et 12, caractérisé en ce que les branches sont disjointes.
14. Dispositif de déclenchement électromagnétique selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que l'armature magnétique et la palette sont réalisées à partir de matériaux magnétiques en poudre frittée.

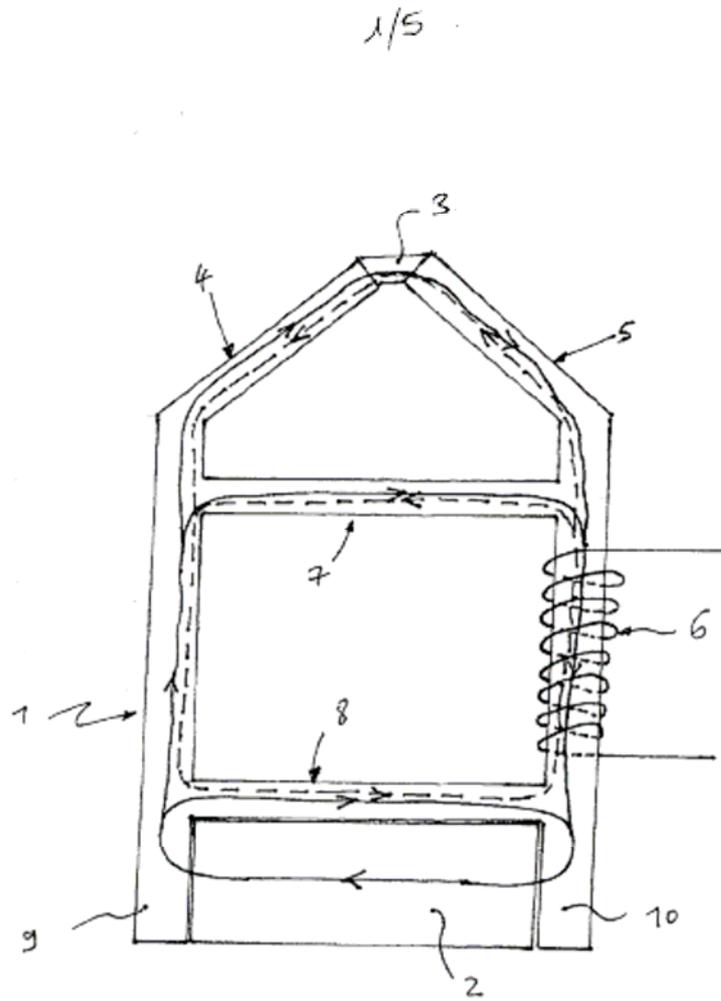


Figure 1

2/5

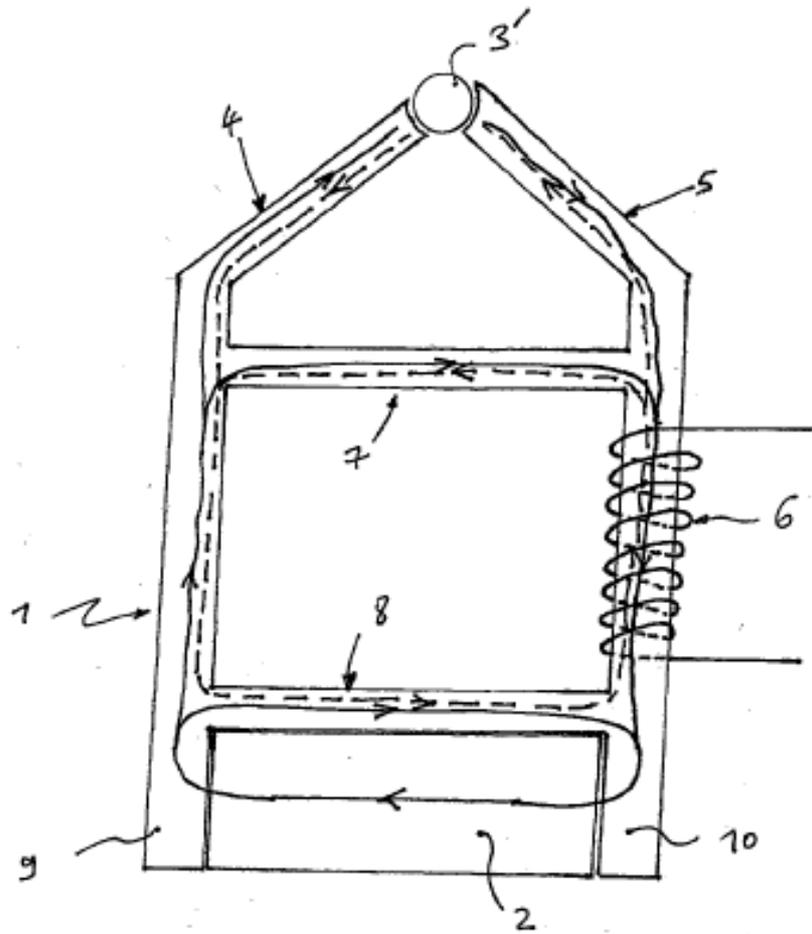


Figure 2

3/5

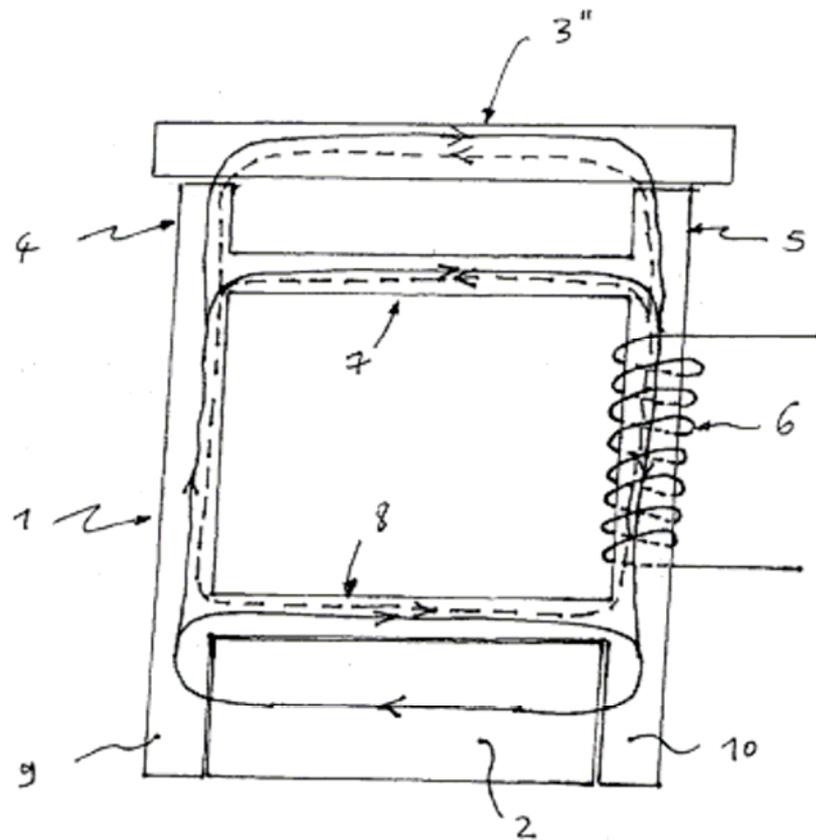


Figure 3

4/5

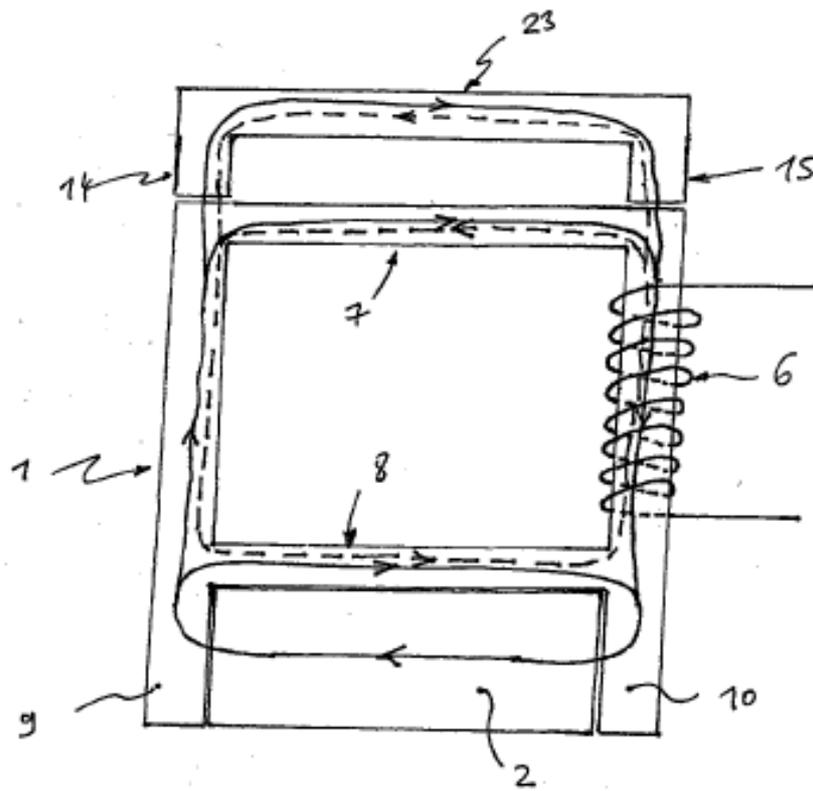


Figure 4

5/5

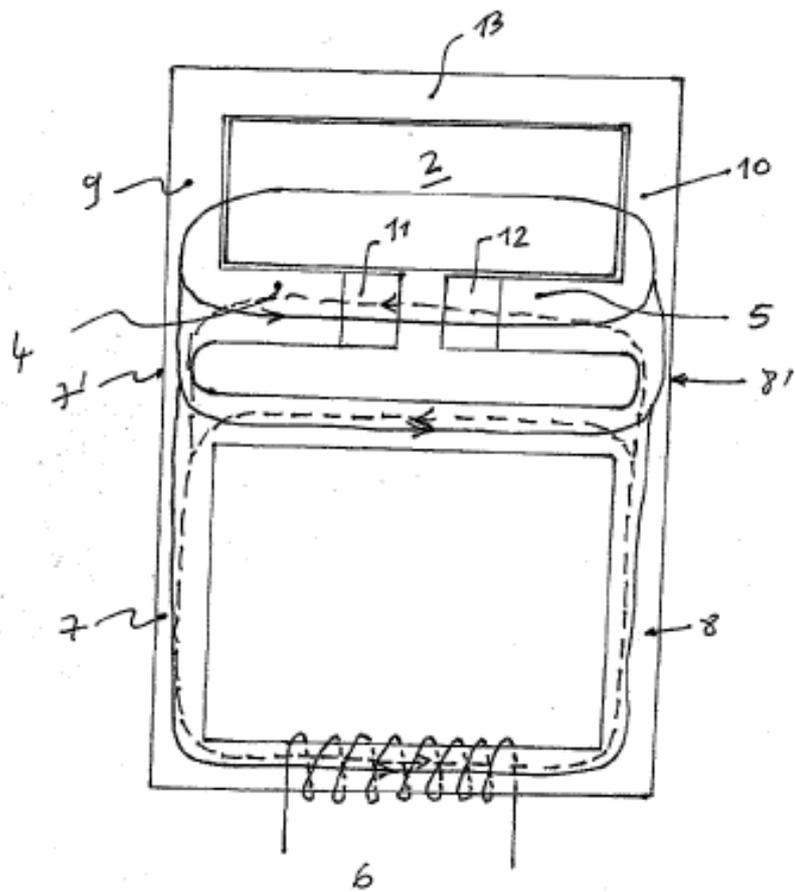


Figure 5

ANNEXE IV

Le régime du neutre

ANNEXE IV : LE REGIME DE NEUTRE [JOY – ANNEXE I]

1 - Introduction

Les régimes de neutre ont été imaginés par les normalisateurs afin de définir les conditions de protection des personnes contre les risques électriques résultant de défauts d'isolement, suivant les conditions de mise à la terre des réseaux d'alimentation.

La première norme qui impose la mise à la terre des masses métalliques des matériels électriques date de 1923. Ensuite, en 1927 un arrêté impose la mise à la terre du conducteur neutre des réseaux de distribution.

En 1965 les premiers travaux d'harmonisation des règles d'installations commencent. Ceci a amené la classification des schémas de liaisons à la terre des réseaux de distribution (ou régimes de neutre).

Les régimes de neutre sont des dispositions qui décrivent comment sont connectés le conducteur NEUTRE et le conducteur de protection sur les installations électriques.

Il convient avant tout de clarifier certains termes utilisés :

1.a - LE NEUTRE (Figure 94)

Ce sont les points neutres des transformateurs HT/BT ainsi que les conducteurs neutres qui, en régime équilibré, ne sont parcourus par aucun courant.

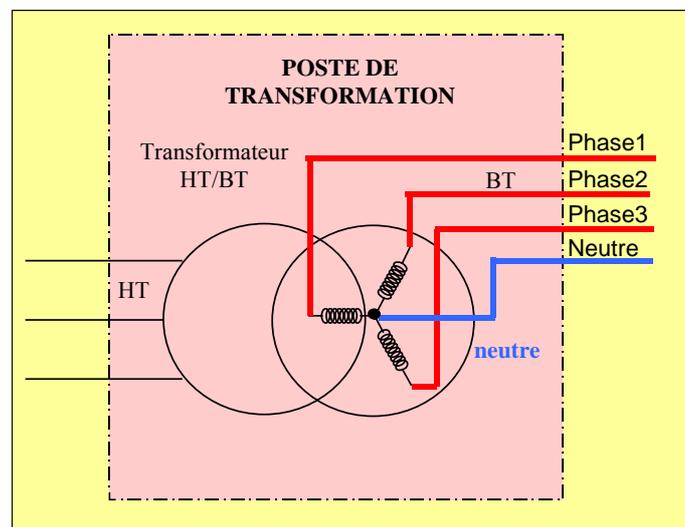


Figure 94 : Le neutre

1.b - LES MASSES (Figure 95)

Ce sont les parties conductrices accessibles d'un matériel électrique susceptibles d'être mises sous tension en cas de défaut.

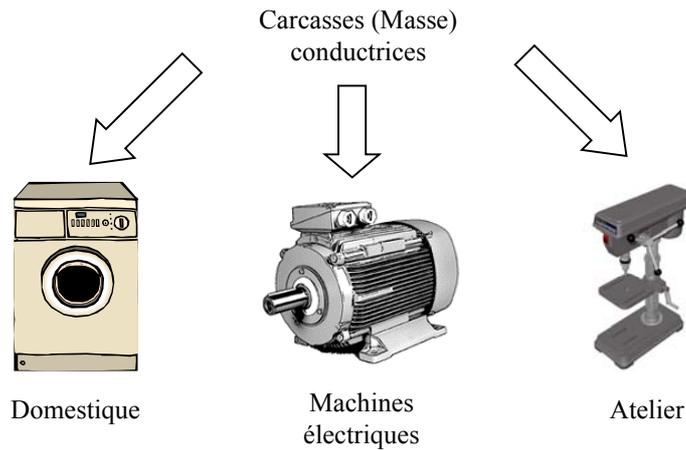


Figure 95 : Les masses

1.c - LE CONDUCTEUR DE PROTECTION PE (Figure 96)

C'est un conducteur de couleur VERT/JAUNE dont la fonction est de relier toutes les masses métalliques des appareils à la terre. En cas de défaut, il permet de canaliser le courant électrique provoqué par le défaut.

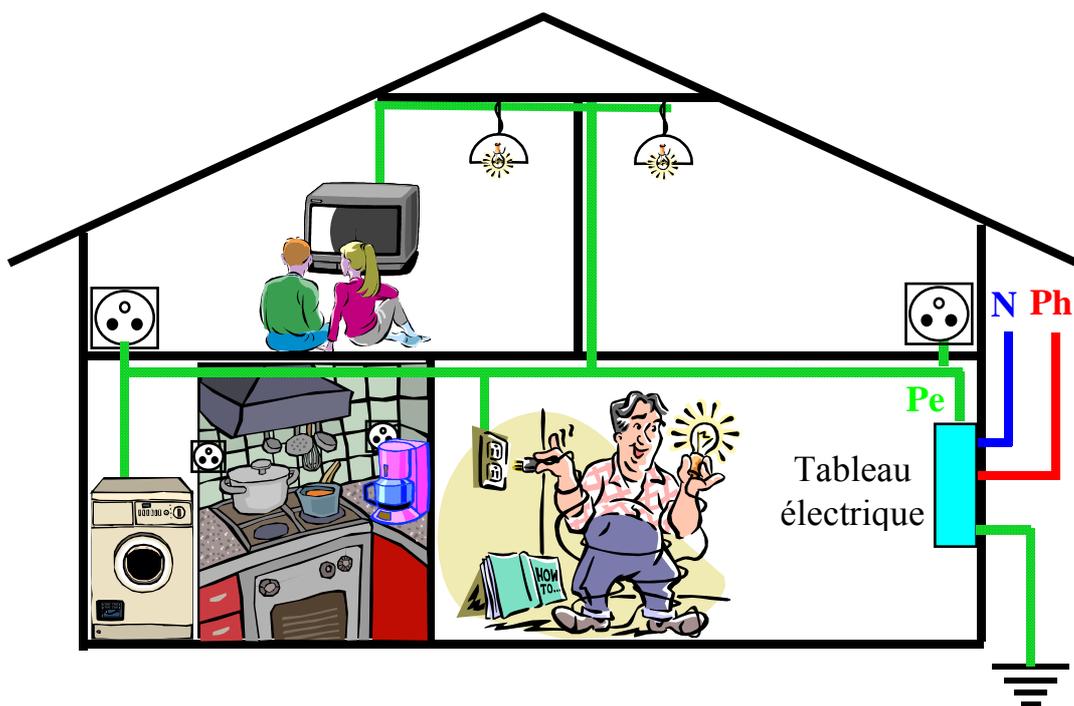


Figure 96 : Le conducteur de protection

Afin d'éviter la multiplication des prises de terre, on ramène les conducteurs de protection au tableau de distribution.

Ils sont reliés ensuite à la terre par l'intermédiaire d'un piquet de terre ou autres. Le conducteur de protection n'est pas distribué par le fournisseur d'énergie (EDF en France).

1.d - LA TERRE

La terre peut être considérée comme un milieu conducteur. Sa résistance dépend de la nature du milieu (terre argileuse, roche granitique, etc.).

1.e - LA PRISE DE TERRE (Figure 97)

C'est l'endroit où le conducteur de protection PE de l'installation électrique est relié à la terre.

Physiquement il s'agit d'un conducteur enterré ou d'un piquet métallique planté dans la terre.

Cependant, l'utilisation d'un piquet de terre (ou autre) pour la mise à la terre ne permet pas de réaliser un contact parfait entre ce piquet et la terre. En effet, il existe une résistance de contact, non négligeable, qui peut atteindre quelques dizaines, voire quelques centaines d'Ohms. On l'appelle la RESISTANCE DE PRISE DE TERRE (R_{pe}).

On la symbolise par une résistance fictive.

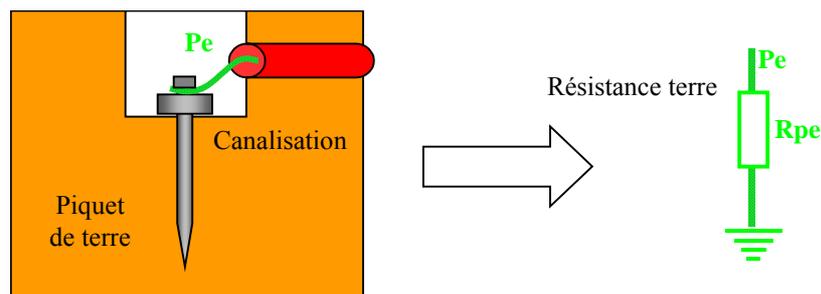


Figure 97 : La prise de terre

Il est impératif de prendre en compte l'existence de cette résistance de prise de terre dans l'étude des différents défauts. C'est pour cette raison, que les croquis la prendront en compte sous forme d'une résistance fictive.

Ceci est vrai pour la résistance de prise de terre du neutre (au niveau du poste de transformation) et du PE (au niveau de l'habitation).

1.f - L'ISOLEMENT ELECTRIQUE (Figure 98)

C'est la capacité que possède une installation, un appareil ou partie d'un appareil à ne pas laisser entrer en contact une de ses parties avec un autre potentiel autre que le sien (dans les conditions normales). En présence de deux potentiels différents, il peut y avoir circulation d'un courant.

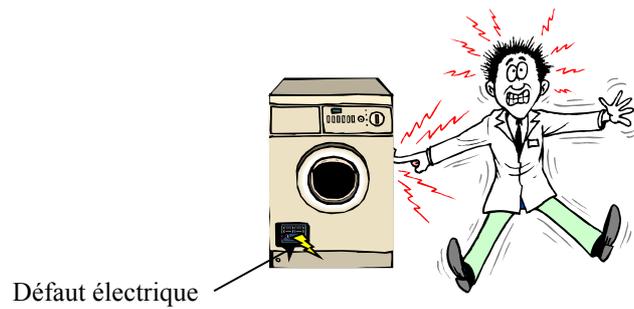


Figure 98 : Défaut d'isolement

En cas de mauvais isolement, on parle de DEF AUT D'ISOLEMENT.

2 - Identification des différents régimes de neutre

Il existe trois schémas de liaison à la terre ou régime de neutre. La norme NFC 15 100 les caractérise par 2 ou 3 lettres.

- La première lettre permet d'identifier la situation du neutre par rapport à la terre (Figure 99) :

T : liaison directe du neutre à la terre.

I : absence de liaison du neutre à la terre, neutre isolé ou liaison par l'intermédiaire d'une impédance.

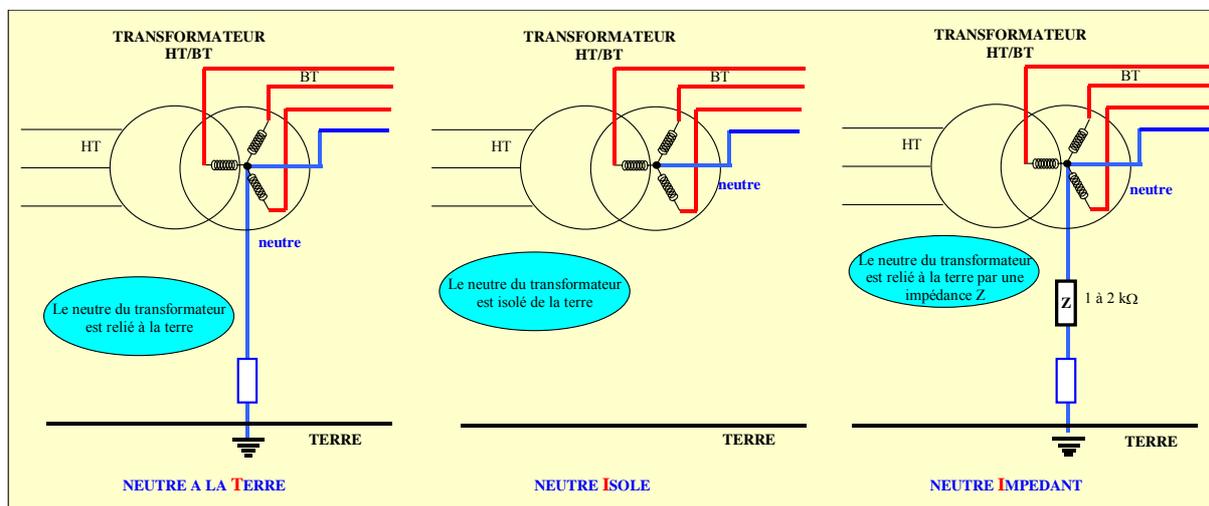


Figure 99 : Possibilité de branchement du neutre

- La deuxième lettre permet d'identifier la situation des masses de l'installation (Figure 100) :

T : connexion directe des masses à la terre.

N : connexion des masses au neutre.

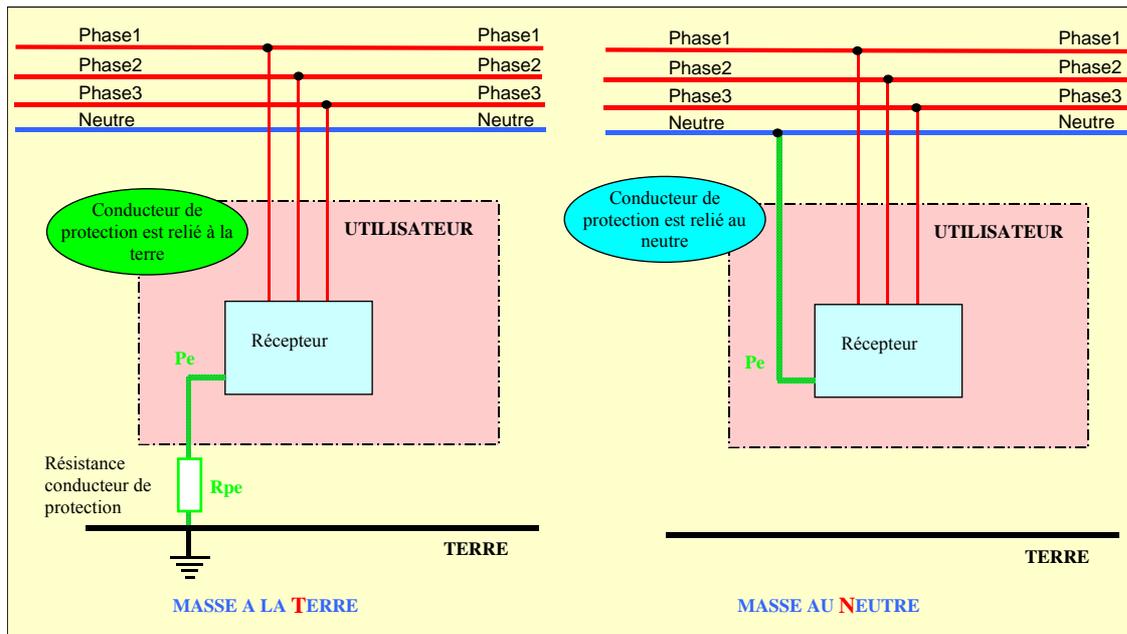


Figure 100 : Possibilité de branchement des masses

- La troisième lettre est nécessaire dans le cas du régime de neutre TN :

TNC : le conducteur neutre et le conducteur de protection PEN sont Confondus.

TNS : le conducteur neutre et le conducteur de protection PE sont Séparés.

3 - Régime de neutre TT

Le neutre du transformateur est relié à la terre.

Les masses métalliques sont reliées à la terre par l'intermédiaire du PE.

3.a - Introduction

C'est le schéma de liaison à la terre employé par EDF pour toute la distribution d'énergie publique du réseau basse tension (< 1000 V), donc en particulier pour les installations domestiques et les petits ateliers.

C'est le régime le plus courant dans le monde où le différentiel est roi !

3.b - Schéma de principe

Le schéma de principe est le suivant (Figure 101).

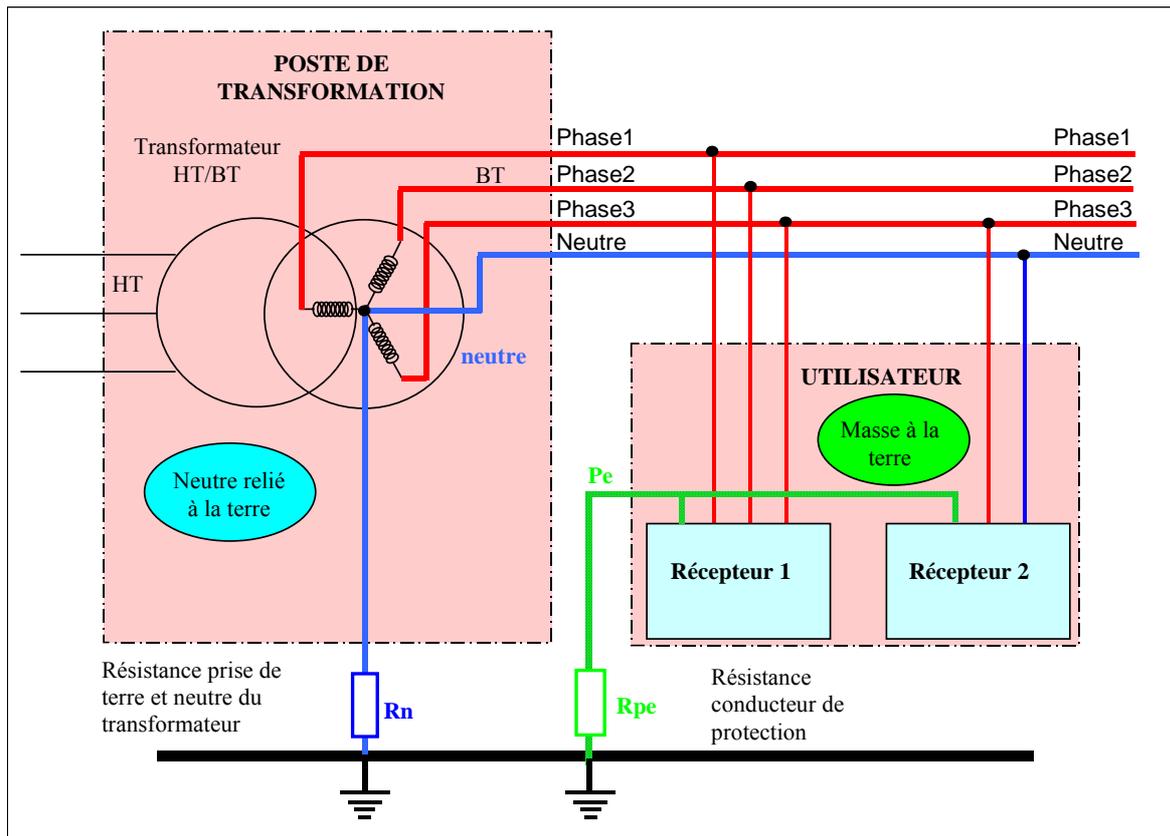


Figure 101 : Régime TT

En présence d'un défaut d'isolement, le courant de défaut est essentiellement limité par la résistance de la prise terre.

Du fait des résistances de terre, le courant de défaut au delà duquel il y a un risque, reste très inférieur aux réglages des dispositifs de protection à maximum de courant (fusible, disjoncteur). Il faudra donc mettre en tête d'installation un dispositif de sécurité capable de détecter un courant de fuite, c'est le rôle des dispositifs différentiels.

Typiquement on trouve dans le domestique la configuration suivante :

Protection différentielle	Protection des personnes	Protection des biens
Protection générale de type 500 mA	Uniquement en contact indirect si la prise de terre est inférieure à 100 Ohms afin de garantir les 50 volts de tension de contact	oui
Protection de 100 mA pour un chauffe eau par exemple	Compromis entre des fuites à la terre et une esquisse de protection en contact direct.	oui
Protection terminale de 30 mA	Contact direct en milieu sec	oui

4 - Régime de neutre TN

Le neutre du transformateur est relié à la terre.

Les masses métalliques sont reliées au Neutre par l'intermédiaire du PE.

4.a - Introduction

C'est un régime utilisé principalement en Allemagne. On distingue deux types de régime TN, les régimes TNC et TNS.

4.b - Schéma de principe

Le schéma de principe est le suivant (Figure 102).

En présence d'un défaut d'isolement, le courant est limité par l'impédance des câbles de la boucle en défaut. Nous nous trouvons en présence d'un court-circuit phase neutre, dont l'intensité de défaut est importante.

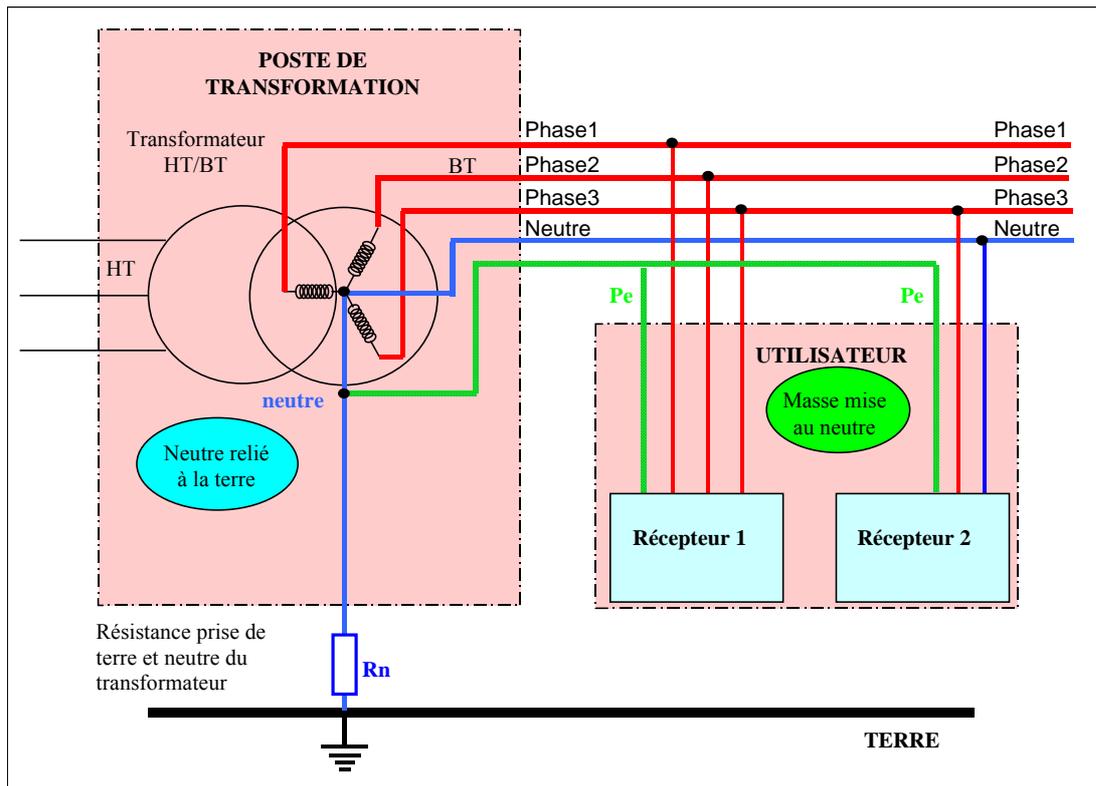


Figure 102 : Régime TN

Il existe en fait, deux schémas d'installation possibles : les schémas TNC et TNS.

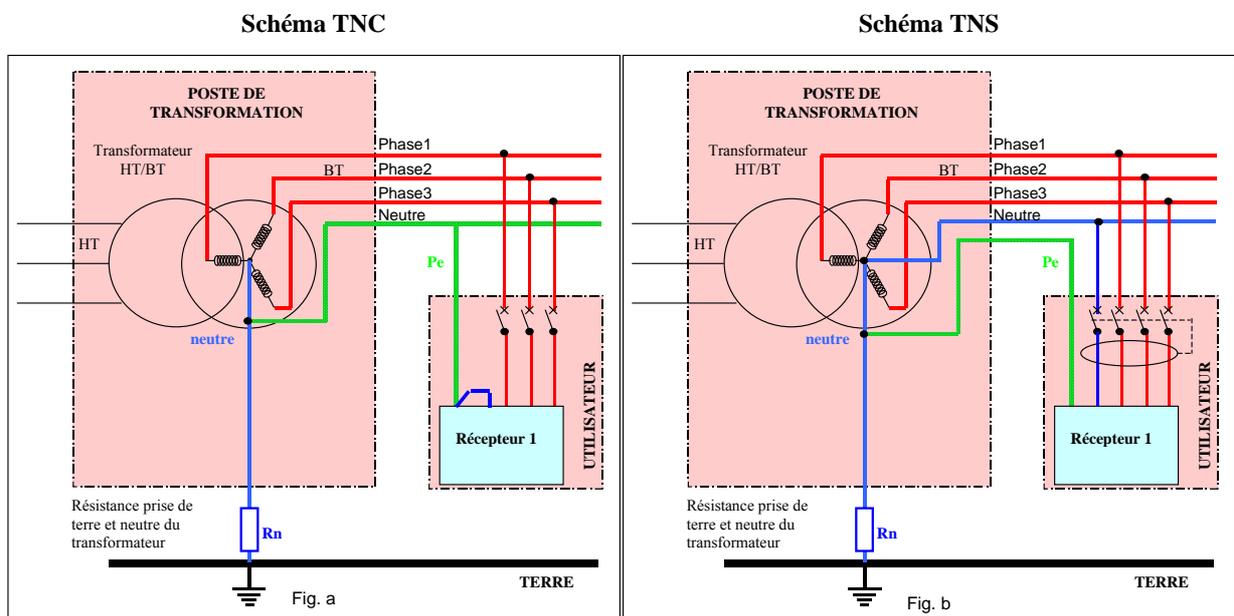


Figure 103 : Différent branchement du régime TN.

Schéma TNC : Le neutre et le conducteur de protection PE sont Confondus (Figure 103a).

Le conducteur qui sert de neutre et de protection s'appelle le PEN.

Le conducteur neutre du récepteur est connecté au conducteur de protection PEN.

Ceci permet de n'utiliser qu'un dispositif de protection tripolaire (au lieu d'un tétra-polaire pour la prise en compte du neutre).

Un défaut franc au niveau du récepteur équivaut à la création d'un court-circuit entre la phase et le neutre.

Le schéma TNC est le schéma d'installation qui sera toujours recherché. A défaut de pouvoir utiliser le schéma TNC, on utilisera le schéma d'installation TNS (dont le coût est plus élevé).

L'utilisation de ce schéma n'est autorisée que sur les conducteurs de section supérieure à :

- 10 mm² pour les conducteurs en cuivre.
- 16 mm² pour les conducteurs en aluminium.

Schéma TNS : Le neutre et le conducteur de protection PE sont Séparés (Figure 103b).

Le dispositif de protection doit comporter un pôle pour la coupure du conducteur neutre (appareil tétra-polaire).

Un défaut franc au niveau du récepteur équivaut à la création d'un court-circuit entre la phase et le neutre.

Le schéma TNS est à utiliser dans les cas où le schéma TNC ne peut convenir, c'est-à-dire:

- lorsque la section des conducteurs est $>$ à 10 mm² pour le cuivre.
- lorsque la section des conducteurs est $>$ à 16 mm² pour l'aluminium.
- lorsqu'une longueur de câbles trop importante fait baisser la valeur du courant de court-circuit et par conséquent, le temps de déclenchement du dispositif de protection.

La tension de masse qui apparaît est supérieure à la tension de sécurité (50 V), l'ouverture du circuit doit s'effectuer en un temps inférieur à celui de l'électrisation.

Le défaut est toujours similaire à un court-circuit entre la phase et le neutre, l'ouverture du circuit sera réalisée par un disjoncteur ayant un pouvoir de coupure adéquate.

La protection des personnes sera efficace si quelque soit le lieu du défaut, le courant est supérieur au seuil de fonctionnement du dispositif de protection.

5 - Régime de neutre IT

Le neutre du transformateur est isolé de la terre (neutre isolé) ou dans certains cas relié à celle-ci par l'intermédiaire d'une impédance de forte valeur (neutre impédant).

Les masses métalliques sont reliées à la terre par l'intermédiaire du PE.

5.a - Introduction

C'est un régime utilisé aussi bien dans le monde professionnel que dans les pays scandinaves.

5.b - Schéma de principe

Le schéma de principe est le suivant (Figure 104).

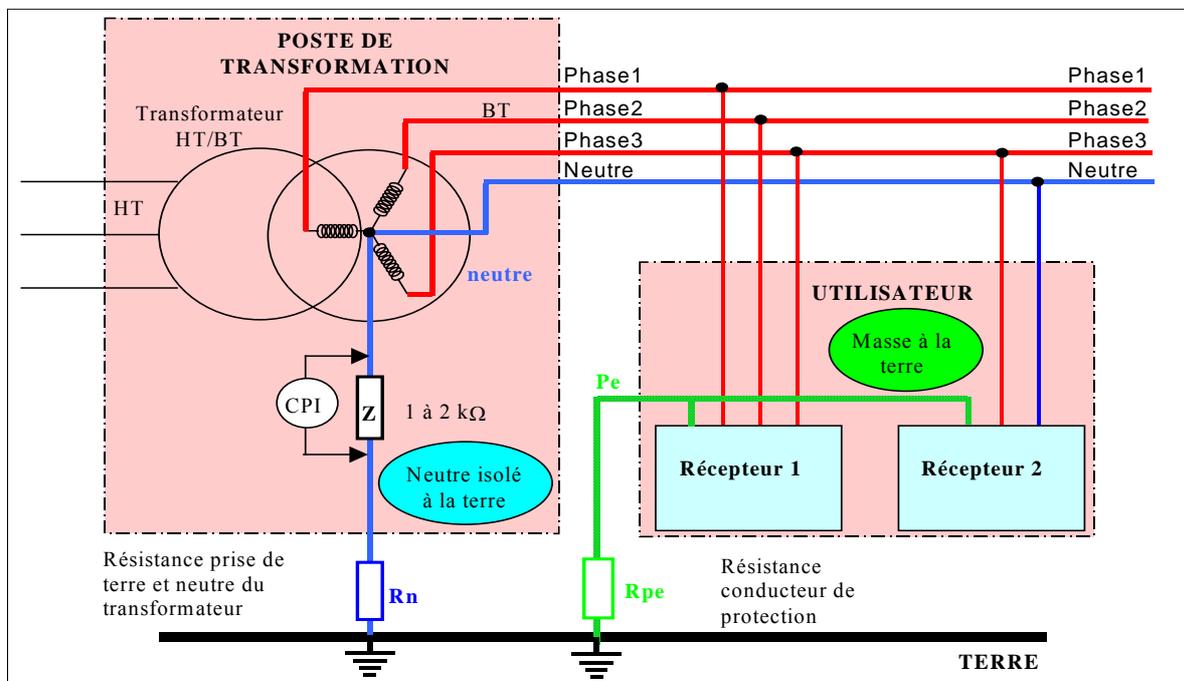


Figure 104 : Régime IT.

L'avantage d'un tel système est qu'au premier défaut de l'installation, lorsqu'une phase est en contact avec les masses ou en contact direct sur un conducteur actif, il ne se passe rien car le neutre est très impédant vis-à-vis des masses et de la terre. Il y a toutefois un courant très faible et sans danger qui circule et qui est détecté par le contrôleur permanent d'isolement (CPI). Celui-ci donne l'alerte de manière à éliminer le défaut. En effet, un défaut permanent tel qu'une phase en contact avec les masses transforme le régime IT en un régime similaire au régime TN. Ainsi, les disjoncteurs ou fusibles vont protéger de tout nouveau défaut, mais pas des contacts directs. C'est pourquoi, il est recommandé de placer en tête d'installation un dispositif différentiel de 30 mA.

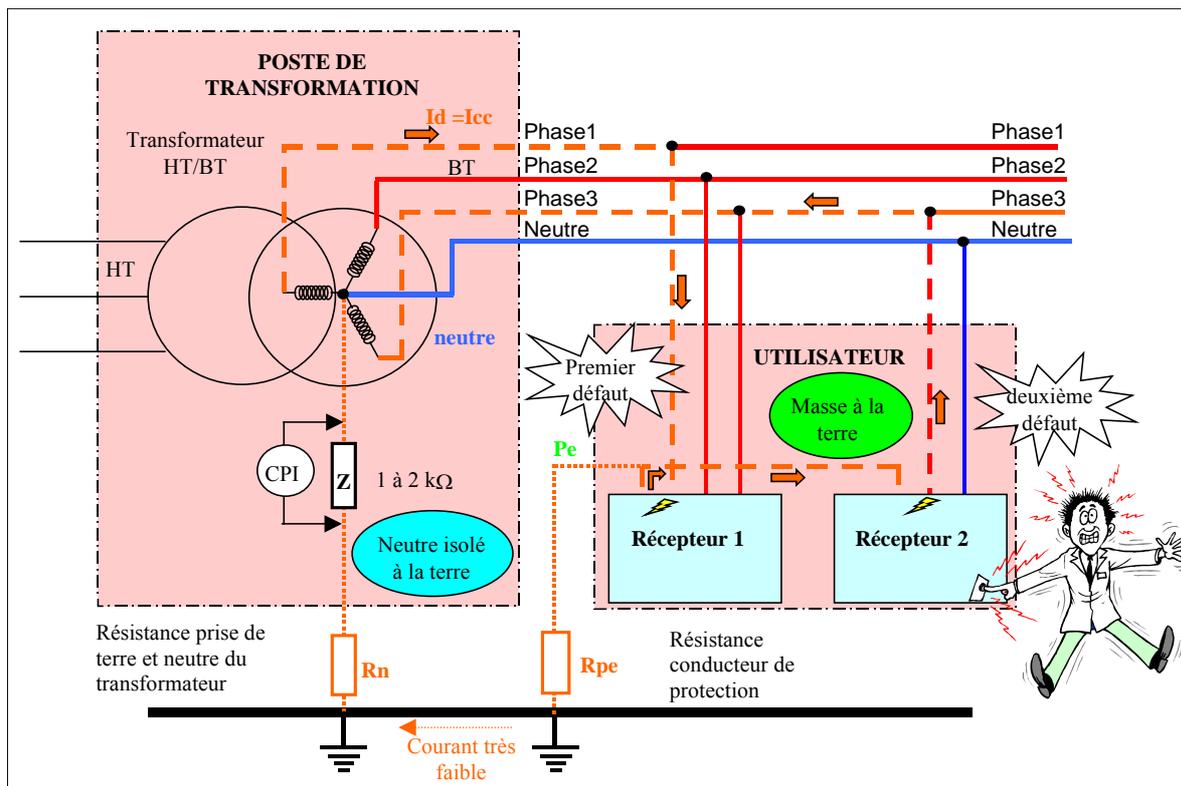


Figure 105 : Exemple de 2 défauts.

6 - Choix du type de protection.

Pour choisir son propre régime de neutre, l'utilisateur doit être propriétaire de son transformateur MT/BT. Ce choix dépend :

- Des caractéristiques de l'installation :
 - Niveau d'isolement.
 - Etendue de l'installation.
 - Lignes extérieures.
 - Vétusté.
- Des conditions d'exploitations : les risques d'incendie ou d'explosion.
- Des impératifs d'exploitations : besoin de continuité de service.
- De la norme : régime TT obligatoire pour les abonnés BT et les établissements scolaires.

Nature du réseau	Imposé	Conseillé	Possible	Déconseillé
Abonné EDF BT	TT			
Etablissement scolaire	TT			
Réseau très étendu avec de bonnes prises de terre		TT	TN	IT
Réseau très étendu avec de mauvaises prises de terre		TT		TN – IT
Réseau perturbé (orages)		TN	TT	IT
Réseau avec lignes aériennes		TT	TN	IT
Locaux avec risques d'incendies		TT – IT		TN
Locaux avec modifications fréquentes		TT	IT	TN
Locaux avec continuité de terre incertaine (locaux anciens)		TT		TN - IT

RESUME

L'énergie électrique est devenue tout ce qui a de plus banal mais elle reste potentiellement très dangereuse pour l'homme. Des dispositifs comme des disjoncteurs ou des interrupteurs différentiels (RCD) ont été développés pour assurer la sécurité des biens et des personnes.

Les travaux de cette thèse ont pour objectif la conception et l'optimisation d'actionneurs électromécaniques polarisés haute sensibilité que nous retrouvons dans les RCD. La démarche de conception se décompose en trois axes. Tout d'abord, l'utilisation de la méthodologie TRIZ qui permet de reformuler les différentes problématiques, de compléter le cahier des charges et de rechercher des pistes de solutions. Ensuite, les modélisations numériques et analytiques sont utilisées pour le dimensionnement et l'optimisation de la structure. Enfin la réalisation de prototypes nous permet de valider les résultats théoriques et le fonctionnement de l'actionneur.

MOTS-CLES

Interrupteur différentiel, actionneur électromécanique, TRIZ, conception, dimensionnement, optimisation sous contraintes.

TITLE

Design and optimization of electromechanics actuators framework of low voltage protection.

ABSTRACT

Electrical power is becoming something common but it remains very dangerous for man. Devices as miniature circuit breakers or residual current devices (RCD) have been developed to keep users and goods safe.

This report deals with RCD or more precisely with electromechanics actuators that we find in these devices. Our work aims therefore at designing and optimizing high sensitivity polarized relay. The design approach is divided in three axes. Firstly, the use of TRIZ methodology allows to define all different problematics, to complete specifications and to find avenues of research. Then, numerical and analytical models are used to size and optimize the structure. Finally, the making of prototypes allows to valid theoretical results and the working of the relay.

KEYWORDS

Residual current devices, electromecanic actuator, TRIZ, design, sizing, constrained optimisation.