

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ AMMAR TLEIDJI LAGHOUAT



FACULTÉ DE TECHNOLOGIE
DÉPARTEMENT D'ÉLECTROTECHNIQUE

Mémoire de fin de cycle

En vue d'obtention du diplôme de master en Électrotechnique

Option : Électrotechnique Industrielle

Thème

**Dimensionnement d'un relais de
protection électrique**

Réalisée et présentée par

BOUBEKRI Aymen

RETMi Mohammed lamine

Soutenu le 30/09/2020 devant le jury

MEKHANET Mohamed

MCB UAT Laghouat

Président

BOUFLIGHA Messaoud

MCB UAT Laghouat

Encadreur

DAREM El-Moradj

MAA UAT Laghouat

Examineur

Promotion : 2020

REMERCIEMENTS

En terme de rédaction de cette mémoire, nous remercions à tout instant notre dieu qui a toujours éclairé notre vie par le savoir, et nous a guidé au le bon chemin.

Au terme de ce travail, nous tenons à exprimer notre reconnaissance et nos sincères remerciements : à notre encadreur: Mr .M.BOUFLIGHA pour avoir bien nous guider et nous conseiller tout au long de la préparation de notre mémoire. Tous mes enseignants et mes amis qui m'ont encouragé à réaliser ce travail et département de génies électrique.

Aymen / Mohammed lamine

ملخص

الهدف من هذا العمل هو تحجيم المرحل الكهرومغناطيسي ذو التيار المستمر تم توفير المعلومات وبعض البيانات من خلال مراجع مختلفة. تنقسم دراستنا إلى ثلاث فصول رئيسية.

الفصل الأول مخصص للدراسة العامة للمعدات الكهربائية ولا سيما عناصر الحماية.

الفصل الثاني نظري حيث قدمنا الصيغ المختلفة اللازمة لحساب أجزاء المرحل.

الفصل الأخير يضم الحسابات وعرض النتائج باستعمال الصيغ الواردة في الفصل السابق.

كلمات مفتاحية

معدات ; حماية ; مرحل ; اتصال ; دائرة مغناطيسية ; مادة مغناطيسية ; اطار متحرك ; نابض.

RÉSUMÉ

Le but de ce travail est de dimensionner le relais électromagnétique à courant continu. Des informations et quelques données ont été fournies par différentes références. Notre étude est divisée en trois chapitres principaux.

Le premier chapitre est dédié à l'étude générale de l'appareillage électrique, notamment des éléments de protection.

Le deuxième chapitre est théorique, où nous avons donné les différentes formules nécessaires pour calculer les parties notre relais.

Le dernier chapitre est réservé aux calculs et la présentation des résultats obtenus en utilisant les formules données au chapitre précédent.

MOTES CLÉS

Appareillage ; protection ; relais ; contact ; circuit magnétique ; matériau ferromagnétique ; armature mobile ; ressort de rappel.

Liste des symboles

Symbole	Unité	Désignation
F_{ch}	[gf]	Force du choc
m_c	[g]	Masse du contact mobile
v_c	[cm/s]	Vitesse de fermeture du contact mobile
l_c	[cm]	Déplacement du contact mobile
F_r	[N]	Effort de répulsion
r_c	[cm]	Rayon du contact
K_p	–	Coefficient de poisson
M_e	[N/m ²]	Module d'élasticité
D	[N/mm ²]	Dureté du matériau
R_s	[Ω]	Résistance de striction
ρ_0	[Ω * cm]	Résistivité du contact
a	[cm]	Rayon de striction
ΔR	[Ω]	Résistance électrique
ΔR_T	[°K/W]	Résistance thermique
r	[Ω]	Rayon de la surface considérée
λ_T	[W/cm * °K]	Coefficient de conductivité thermique
T_c	[°C]	Température du contact
U_c	[V]	Chute de tension du contact
R_c	[Ω]	Résistance du contact
I_c	[A]	Courant du contact
$\Delta\theta$	[°C]	Surélévation de la température
W_a	[J]	Energie développée dans l'arc
U_a	[V]	Tension de l'arc

Liste des symboles

I_a	$[A]$	Courant de l'arc
W_d	$[j]$	Energie de déformation
M	$[N * m]$	Moment de flexion
j	$[mm^4]$	Moment d'inertie
L_m	$[mm]$	Longueur de la lame
M_Y	$[N/m^2]$	Module de Young
h	$[mm]$	Epaisseur du ressort
P_c	$[gf]$	Force de pression
P_b	$[gf]$	Force de pression initiale
b	$[mm]$	Largeur du ressort
f	$[mm]$	Flèche
c	$[gf/mm]$	Constante élastique
P_s	$[gf]$	Force de ressort supplémentaire
δ_i	$[cm]$	Entrefer maximal
δ_0	$[cm]$	Entrefer minimal
\mathcal{R}_m	$[1/H]$	Reluctance
ϕ	$[Wb]$	Flux magnétique
fmm	$[AT]$	Force magnétomotrice
I	$[A]$	Courant de la bobine
R	$[\Omega]$	Résistance de la bobine
N	–	Nombre de spires
ρ_e	$[\Omega * m]$	Résistivité
ρ_m	$[cm/H]$	Reluctivité
μ_r	$[H/cm]$	Perméabilité relative
μ_0	$[H/cm]$	Perméabilité absolue du vide
L	$[H]$	Inductance de la bobine

Liste des symboles

G_{δ}	$[wb/A]$	Permeance d'entrefer
G_m	$[wb/A]$	Permeance de fuite
B	$[T]$	Induction magnétique
H	$[A/cm]$	Intensité du champ magnétique
G_e	$[1/(\Omega)]$	Conductibilité électrique
l	$[m]$	Longueur de la bobine
$K_{ré}$	–	Coefficient de réserve
K_s	–	Coefficient de dispersion
s	$[m^2]$	Section du fil de la bobine
σ_s	–	Coefficient de fuite du système
σ_{δ}	–	Coefficient de fuite de l'entrefer
δ	$[cm]$	Entrefer
V_{bob}	$[m^3]$	Volume disponible de la bobine
V_{cu}	$[m^3]$	Volume de bobinage
K_r	–	Coefficient de remplissage
U	$[V]$	Tension de la bobine
P	$[W]$	Puissance dissipée
S_{lat}	$[cm^2]$	Surface latérale
P_{adm}	$[W]$	Puissance admissible
P_{em}	$[gf]$	Force électromagnétique
t_1	$[s]$	Temps de fermeture
T_e	$[s]$	Constante de temps de la bobine
I_n	$[A]$	Courant nominal
U_n	$[V]$	Tension nominale
F_{mt}	$[gf]$	Force moyen travail
F_{dec}	$[gf]$	Force de déclenchement

Liste des symboles

t_2	[s]	Temps d'ouverture
I_{dec}	[A]	Courant de déclenchement
g	[m/s ²]	Accélération de la pesanteur

Liste des figures

Numéro	Titre	Page
Fig. I.1	Illustration des sectionneurs porte-fusibles.	4
Fig. I.2	Symbole d'un sectionneur porte-fusibles.	4
Fig. I.3	Différents formes d'interrupteurs.	4
Fig. I.4	Symbole d'un interrupteur.	5
Fig. I.5	Interrupteurs-sectionneurs.	5
Fig. I.6	Symbole d'un interrupteur-sectionneur.	5
Fig. I.7	Formes des contacteurs.	6
Fig. I.8	Symbole d'un contacteur.	6
Fig. I.9	Fusibles.	7
Fig. I.10	Symbole d'un fusible.	7
Fig. I.11	Courbe de fusion des fusibles.	8
Fig. I.12	Disjoncteurs magnétothermique.	8
Fig. I.13	Symbole d'un disjoncteur magnétothermique triphasé.	8
Fig. I.14	Principe de fonctionnement d'un disjoncteur.	9
Fig. I.15	Relais statique.	10
Fig. I.16	Relais thermique.	10
Fig. I.17	Symbole d'un relais thermique.	11
Fig. I.18	Relais électromagnétique.	11
Fig. I.19	Symbole d'un relai électromagnétique.	12
Fig. I.20	Principe de fonctionnement d'un relais électromagnétique.	12
Fig. II.1	Échauffement d'un joint.	13
Fig. II.2	Effort de répulsion dans les contacts dû à la répartition du courant.	15

Liste des figures

Fig. II.3	Résistance de jonction en fonction de la force de pression.	18
Fig. II.4	Point de contact.	19
Fig. II.5	Schéma global du relais en étude.	24
Fig. II.6	Exemple d'un circuit magnétique.	28
Fig. II.7	Courbe d'aimantation.	29
Fig. II.8	Cycle d'hystérésis.	29
Fig. II.9	Flux de fuite.	30
Fig. II.10	Schéma du circuit magnétique étudié.	32
Fig. II.11	Illustration des dimensions de la bobine.	35
Fig. II.12	Schéma d'une coupe de la bobine.	36
Fig. II.13	Schéma équivalent du circuit magnétique.	39
Fig. II.14	Etablissement du courant dans la bobine du relais.	43
Fig. II.15	Temps de réponse lors de la mise sous tension.	44
Fig. II.16	Temps de réponse lors de la coupure du courant.	45
Fig. III.1	Caractéristique mécanique en fonction de δ .	55
Fig. III.2	Force électromécanique en fonction de $\sum F$.	66
Fig. III.3	Différence entre la caractéristique mécanique et la force électromécanique.	66
Fig. III.4	Force électromécanique en fonction de δ .	66

Liste des tableaux

Numéro	Titre	Page
Tab. II.1	Différentes caractéristiques des métaux des contacts.	14
Tab. II.2	Choix les plus courants des métaux pour contacts du relais.	14
Tab. II.3	Valeur du coefficient K_p pour différent formes géométriques des deux contacts.	17
Tab. II.4	Caractéristique d'aimantation de l'acier	29
Tab. III.1	Valeurs du diamètre du contact et de l'entre-gain suivant le courant I_c .	49
Tab. III.2	Valeur du coefficient a et matériau correspondant.	49
Tab. III.3	Valeur du coefficient b selon la forme géométrique des deux contacts.	50
Tab. III.4	Valeurs numériques pour le calcul des ressorts.	51
Tab. III.5	Valeurs numériques pour le calcul de la caractéristique mécanique.	53
Tab. III.6	Valeurs nécessaires pour le traçage de la caractéristique mécanique.	55
Tab. III.7	Valeurs numériques pour le calcul du circuit magnétique.	56
Tab. III.8	Valeurs numériques pour le calcul de la bobine.	58
Tab. III.9	Coefficient de remplissage et le diamètre du fil avec isolation en fonction du diamètre de fil sans isolation.	60
Tab. III.10	Valeurs numériques pour le calcul des permeances.	62
Tab. III.11	Valeurs des permeances pour différentes valeurs de δ .	64
Tab. III.12	Valeurs des coefficients de fuites pour différentes valeurs de δ .	65
Tab. III.13	Forme générale du calcul des forces magnétomotrices.	65
Tab. III.14	Forces magnétomotrices pour $\delta = 0.0861 \text{ cm}$, $\phi_\delta = 0.14 * 10^{-4} \text{ wb}$.	65
Tab. III.15	Calcul de la force d'attraction.	65
Tab. III.16	Valeurs numériques pour le calcul des temps.	66

Table des matières

Introduction générale..... 1

Chapitre I

Appareillage et éléments de protection

I.1. Introduction..... 2

I.2. Choix de l'appareillage électrique..... 2

I.3. Principales fonctions de l'appareillage..... 2

I.4. Classification de l'appareillage électrique..... 3

 I.4.1. Introduction..... 3

 I.4.2. Appareillage de connexion..... 3

 I.4.3. Appareillage de commande..... 4

 I.4.3.1. Interrupteurs..... 4

 I.4.3.2. Interrupteurs-sectionneurs..... 5

 I.4.3.3. Contacteur..... 6

 I.4.4. Eléments de protection..... 7

 I.4.4.1. Fusible..... 7

 I.4.4.2. Discontacteurs..... 8

 I.4.4.3. Disjoncteur magnétothermique..... 8

 I.4.4.4. Relais..... 9

 I.4.4.4.1. Relais statique..... 9

 I.4.4.4.2. Relais thermique..... 10

 I.4.4.4.3. Relais électromagnétique..... 11

I.5. Conclusion..... 12

Chapitre II

Eléments théoriques de base pour le dimensionnement d'un relais électromagnétique

II.1. Introduction..... 13

II.2. Contacts..... 13

 II.2.1. Caractéristiques d'un contact..... 13

Table des matières

II.2.2.	Matériaux pour contacts électriques.....	14
II.2.2.1.	Condition à remplir.....	14
II.2.2.2.	Matériaux utilisés.....	14
II.2.2.3.	Choix des matériaux.....	14
II.2.3.	Phénomène de l'établissement du courant aux contacts.....	15
II.2.4.	Effort de répulsion des contacts.....	15
II.2.5.	Modélisation du contact métallique.....	16
II.2.5.1.	Notion de striction.....	16
II.2.5.2.	Détermination du rayon de la striction.....	16
II.2.5.3.	Résistance de striction.....	17
II.2.6.	Films isolants sur les contacts.....	19
II.2.7.	Surélévation de température dans les contacts.....	19
II.2.8.	Dimensionnement des contacts.....	21
II.2.9.	Energie développée dans l'arc.....	21
II.3.	Ressorts.....	22
II.3.1.	Généralités.....	22
II.3.1.1.	Type de ressort.....	22
II.3.1.2.	Force exercée par un ressort.....	22
II.3.2.	Matériaux utilisés.....	22
II.3.2.1.	Acier.....	22
II.3.2.2.	Alliage de cuivre.....	23
II.3.2.3.	Alliage de nickel.....	23
II.3.3.	Choix des matériaux.....	23
II.3.4.	Energie de déformation.....	23
II.3.5.	Dimensionnement des ressorts.....	24
II.3.6.	Autre éléments de rappel.....	25
II.4.	Caractéristiques mécaniques.....	25
II.4.1.	Définition de la caractéristique mécanique.....	25
II.4.2.	Détermination de la caractéristique mécanique.....	25
II.4.3.	Conversion électromécanique.....	27
II.5.	Rappel sur le circuit magnétique.....	28
II.5.1.	Définition.....	28
II.5.2.	Analogie entre circuit magnétique et circuit électrique.....	28

Table des matières

II.5.3.	Matériau pour le circuit magnétique.....	29
II.5.3.1.	Milieu ferromagnétique.....	29
II.5.3.2.	Cycle d'hystérésis d'un matériau ferromagnétique.....	29
II.5.4.	Notions fondamentales de la théorie des circuits magnétiques.....	30
II.5.5.	Lois de Kirchhoff.....	30
II.5.6.	Loi du courant total.....	31
II.6.	Circuit magnétique du relais.....	32
II.6.1.	Dimensionnement du circuit magnétique.....	32
II.6.2.	Dimensionnement de la bobine.....	35
II.6.2.1.	Définition du coefficient de remplissage.....	35
II.6.2.2.	Détermination du coefficient de remplissage.....	35
II.6.2.3.	Dimensionnement des différentes grandeurs et éléments de la bobine.....	36
II.6.2.4.	Vérification du fonctionnement normal.....	39
II.6.3.	Schéma équivalent d'un circuit magnétique.....	39
II.6.4.	Permeances.....	40
II.6.5.	Coefficients des fuites.....	42
II.6.6.	Forces magnétomotrices.....	42
II.6.7.	Force d'attraction.....	42
II.6.8.	Etablissement du courant dans la bobine du relais.....	43
II.6.8.1.	Temps de réponses lors de la mise sous tension.....	44
II.6.8.2.	Temps de réponse lors de la coupure du courant.....	44
II.6.8.3.	Fonctionnement d'un relais à courant continu.....	45
II.6.8.4.	Détermination des temps.....	46
II.7.	Conclusion.....	48

Chapitre III

Calcul des différents constituants du relais électromagnétique

III.1.	Introduction.....	49
III.2.	Calcul des contacts.....	49
III.3.	Calcul des ressorts.....	51
III.4.	Calcul de la caractéristique mécanique.....	53

Table des matières

III.5. Circuit magnétique du relais	56
III.5.1. Calcul du circuit magnétique.....	56
III.5.2. Calcul de la bobine.....	58
III.5.3. Calcul des permeances.....	62
III.5.4. Calcul des coefficients des fuites.....	65
III.5.5. Calcul des forces magnétomotrices.....	65
III.5.6. Calcul de la force d'attraction.....	65
III.6. Calcul des temps.....	66
III.6.1. Temps de fermeture.....	67
III.6.2. Temps d'ouverture.....	67
III.7. Conclusion.....	68
Conclusion générale.....	69

Introduction générale

Introduction générale

La maîtrise de l'énergie électrique exige la possession de tous les moyens nécessaires à la commande et au contrôle de la circulation du courant dans les circuits depuis la production jusqu'à l'utilisation. Cette mission est attribuée à l'appareillage électrique, en particulier celui destiné à la protection.

L'appareillage de protection peut entraîner des modifications sur la configuration du réseau électrique. Il assure la protection contre les accidents qui peuvent perturber le fonctionnement ou constituer un danger pour les utilisateurs.

Les dispositifs de protection, y compris les relais évoluent vers la simplicité, la fiabilité, l'amélioration des performances. En vers 1960, la technologie de silicium a été mise au point des premières réalisations industrielles utilisant ce nouveau composant on fait leur apparition.

Actuellement les applications de l'électronique est prépondérante. Ces applications utilisent des relais statique, des relais à maximum d'intensité, des relais temporisés basée sur les éléments électroniques.

Toutefois, il est bon de noter que le matériel électromagnétique continuera à se fabriquer et à servi encore. Il ne faut donc pas le négliger, on ne peut plus imaginer une installation sans prévoir un système de protection et toutes les machines électriques disposent d'un dispositif électromagnétique.

C'est pour cette raison que le relais est un appareil d'une importance considérable en électrotechnique. Son étude présente donc un intérêt considérable.

Dans ce travail, nous nous sommes engagé à présenter une étude profonde sur un relais électromagnétique à courant continu menant à un dimensionnement de ce relais. Nous avons divisé cette mémoire en trois chapitres et une conclusion générale.

Le premier chapitre est dédié à l'étude générale de l'appareillage électrique.

Le deuxième chapitre est pour déterminer les formules nécessaires pour les calculs.

Le troisième chapitre est réservé pour réaliser et présenter les calculs de dimensionnement du relais.

Les perspectives liées à ce travail sont données en conclusion générale

Chapitre I

Appareillage et éléments de protection

I.1. Introduction

Sous la dénomination appareillage électrique, nous rangeons l'ensemble des matériels permettant d'interrompre, assurer les fonctions de connexion, de commande et de protection. La protection d'un circuit contre les accidents et les anomalies peut entraîner une interruption de service. [1]

Ce premier chapitre, est réservé à rappeler des généralités de l'appareillage électrique en particulier celui destiné à la protection.

I.2. Choix de l'appareillage électrique

Le choix de l'appareillage électrique demande une bonne connaissance des caractéristiques du récepteur et son comportement dans des conditions normales de fonctionnement. L'appareillage doit être conforme aux normes correspondantes et convenir à leur application en cas de surcharges, courts circuits et surtensions. Nous rappelons que l'appareillage électrique est destiné à fonctionner dans les niveaux de tensions suivantes

- Niveau TBT (≤ 50 V)
- Niveau BTA ($50 < U \leq 500$ V)
- Niveau BTB (500 V $< U \leq 1$ kV)
- Niveau HTA (1 kV $< U < 50$ kV)
- Niveau HTB ($U < 50$ kV)
- Niveau THT ($U > 50$ kV)

I.3. Principales fonctions de l'appareillage

Les principales fonctions de l'appareillage électrique peuvent être classées comme suit

- **Sectionnement** : C'est l'isolation de tout ou une partie des circuits, des récepteurs de leur source d'énergie afin de pouvoir intervenir en garantissant la sécurité des intervenants.
- **Interruption** : Alors que l'installation est en service, il est parfois aussi nécessaire d'interrompre l'alimentation en pleine charge d'un récepteur
- **Protection contre les courts-circuits** : Les installations et les récepteurs peuvent être le siège d'incidents électriques se traduisant par une élévation rapide et importante du courant absorbé comme les courants de court-circuit. Afin d'éviter la détérioration des installations et des appareillages, les perturbations sur le réseau d'alimentation

et les risques d'accidents humains, il est indispensable de détecter ces courts-circuits et d'interrompre rapidement le circuit concerné.

- **Protection contre les surcharges** : Les surcharges provoquent une augmentation importante du courant absorbé, conduisant à un échauffement excessif du récepteur, ce qui réduit fortement sa durée de vie et peut aller jusqu'à sa destruction.
- **Commutation** : son rôle devrait être d'établir et de couper le circuit d'alimentation du récepteur.

I.4. Classification de l'appareillage électrique

I.4.1. Introduction

L'appareillage électrique doit parfois couper l'alimentation, par conséquent, il existe des principes et des techniques de coupure diversifiés et efficaces utilisant différents environnements d'isolement et de coupure. Nous pouvons résumer les environnements suivants sélectionnés pour la coupure ; l'air à la pression atmosphérique, l'huile, l'air comprimé, l'hexafluorure de soufre et le vide. Des phénomènes subsistent pendant l'évolution de la coupure : en particulier l'amorçage d'un arc entre deux contacts, lors de la coupure d'un courant. [1]

Après cet aperçu sur la technique de coupure nous évoquons une simple classification de l'appareillage électrique.

I.4.2. Appareillages de connexion

Les appareils de connexion sont conçus pour exécuter la fonction de connexion ou la séparation de tout ou une partie d'une installation de la source d'énergie électrique. [2]

Le sectionneur porte-fusibles (**Fig. I.1**) est un dispositif qui permet la séparation de tout ou partie d'une installation électrique de sa source d'alimentation, afin de permettre la maintenance, la vérification des défauts et les réparations. [1]



Fig. I.1 Illustration des sectionneurs porte-fusibles.

Un sectionneur peut être schématisé de la façon suivante (Fig. I.2)

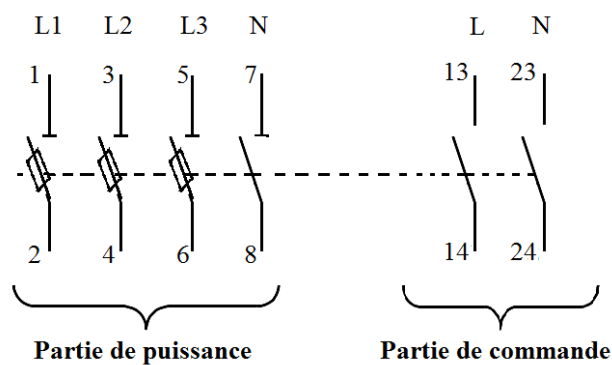


Fig. I.2 Symbole d'un sectionneur porte-fusibles.

I.4.3. Appareillages de commande

Les appareils de commande permettent de fournir ou couper l'énergie électrique d'un côté du circuit à ou d'un autre côté. Cela se fait manuellement ou automatiquement.

I.4.3.1. Interrupteurs

Un interrupteur (Fig. I.3) est un organe assurant la connexion, capable d'établir, de supporter et d'interrompre des courants dans des conditions normales et éventuellement les conditions spécifiées de surcharge en service. [2]



Fig. I.3 Différents formes d'interrupteurs.

Un interrupteur peut être représenté comme suit (Fig. I.4)

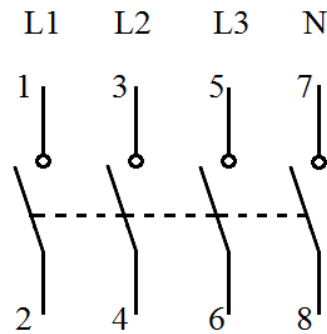


Fig. I.4 Symbole d'un interrupteur.

I.4.3.2. Interrupteurs-sectionneurs

Les interrupteurs-sectionneurs (Fig. I.5) satisfont les applications d'interrupteurs par la fermeture et la coupure en charge.



Fig. I.5 Interrupteurs-sectionneurs.

Un interrupteur-sectionneur peut être représenté comme suit (Fig. I.6)

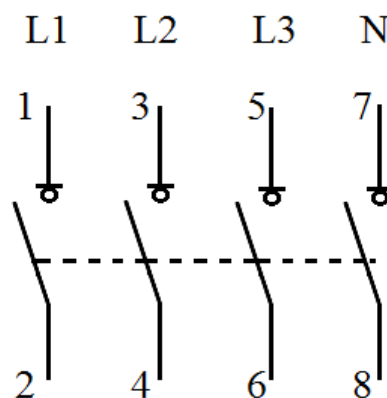


Fig. I.6 Symbole d'un interrupteur-sectionneur.

I.4.3.3. Contacteur

Un contacteur (**Fig. I.7**) est un dispositif de raccordement ayant une seule position de repos, commandé automatiquement à distance, capable d'établir, de supporter et d'interrompre de l'énergie électrique dans des conditions normales du circuit, y compris aussi les conditions spécifiées de surcharge en service. [2]

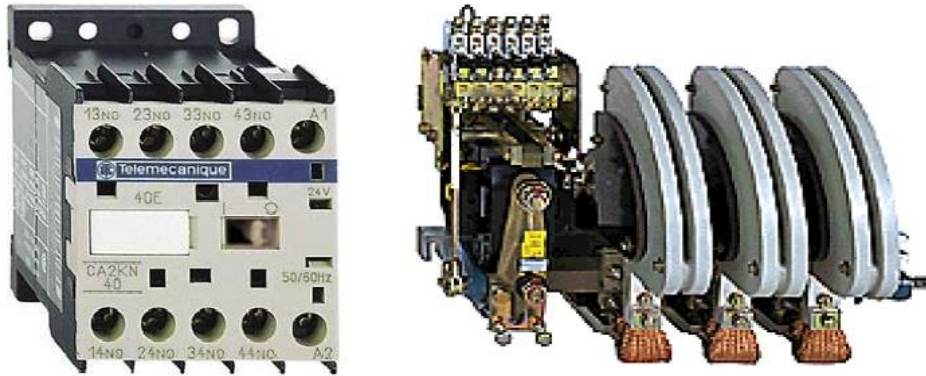


Fig. I.7 Formes des contacteurs.

Un contacteur peut être représenté comme suit (**Fig. I.8**)

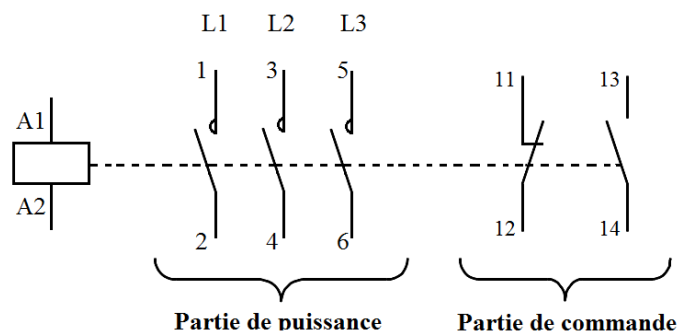


Fig. I.8 Symbole d'un contacteur.

Le choix d'un contacteur est basé sur les critères suivants

- Catégorie d'emploi
- Courant d'emploi I_e
- Tension d'emploi U_e
- Pouvoir de coupure
- Pouvoir de fermeture
- Endurance électrique (durée de vie)
- Facteur de marche
- Puissance
- Tension de commande U_c

I.4.4. Eléments de protection

I.4.4.1. Fusible

Un fusible (**Fig. I.9**) est un organe de sécurité dont le rôle est d'ouvrir un circuit électrique lorsque le courant électrique dans celui-ci atteint une valeur d'intensité donnée pendant un certain temps. [2]. Son nom vient du fait qu'il y a fusion d'un filament conducteur sous l'effet de son élévation de température provoquée par la surintensité. [4]



Fig. I.9 Fusibles.

Un fusible peut être schématisé comme suit (**Fig. I.10**)

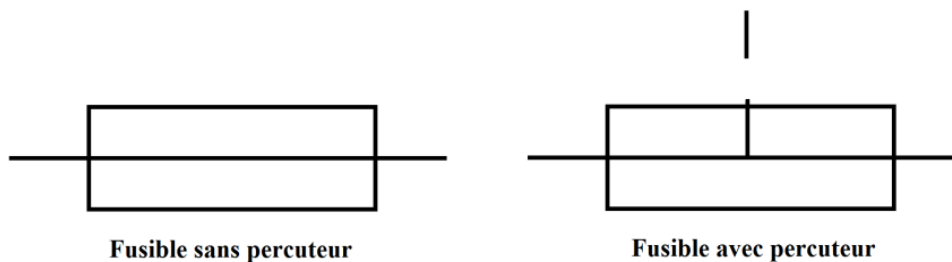


Fig. I.10 Symbole d'un fusible.

Les principales caractéristiques des fusibles sont les suivantes

- Courant nominal ou calibre d'une cartouche fusible I_n
- Tension nominale d'une cartouche fusible U_n
- Courant de fusion I_f
- Courant de non fusion I_{nf}
- Pouvoir de coupure d'une cartouche fusible
- Contraintes thermiques d'une cartouche fusible I_{2t}
- Temps de pré-arc, temps d'arc et temps de coupure
- Caractéristiques temps/courant d'une cartouche fusible

(**Fig. I.11**) représente la courbe du courant de fusion et de non fusion

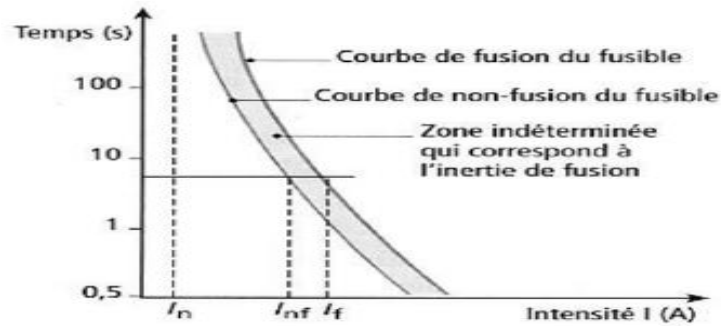


Fig. I.11 Courbe de fusion des fusibles.

I.4.4.2. Discontacteurs

Le discontacteur est constitué d'un contacteur équipé d'un relais thermique destiné à la garantie de la protection contre les surcharges. [1]

I.4.4.3. Disjoncteur magnétothermique

Un disjoncteur (Fig.I.12) est un dispositif capable d'établir, de supporter et d'interrompre des courants dans les conditions normales du circuit, ainsi que d'établir, de supporter pendant une durée spécifiée et d'interrompre des courants dans des conditions anormales spécifiées telles que celles du court-circuit ou de la surcharge. [3.6]

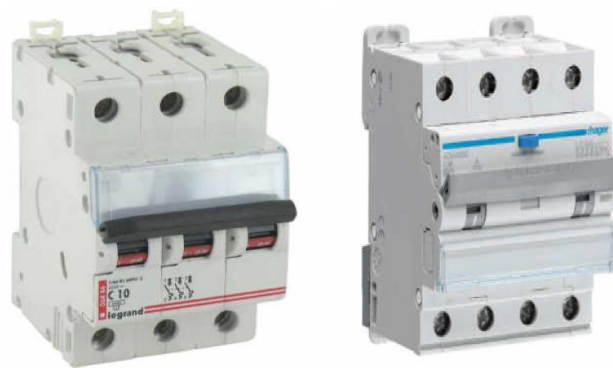


Fig. I.12 Disjoncteurs magnétothermique.

Un disjoncteur peut être schématisé comme suit (Fig. I.13)

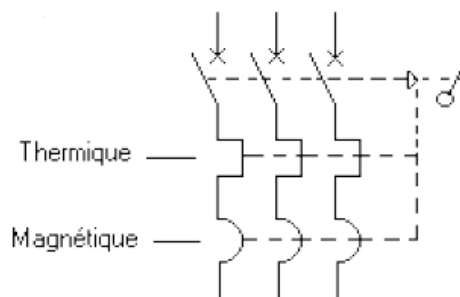


Fig. I.13 Symbole d'un disjoncteur magnétothermique triphasé.

Le principe de fonctionnement du disjoncteur magnétothermique est basé sur deux principes (**Fig. I.14**)

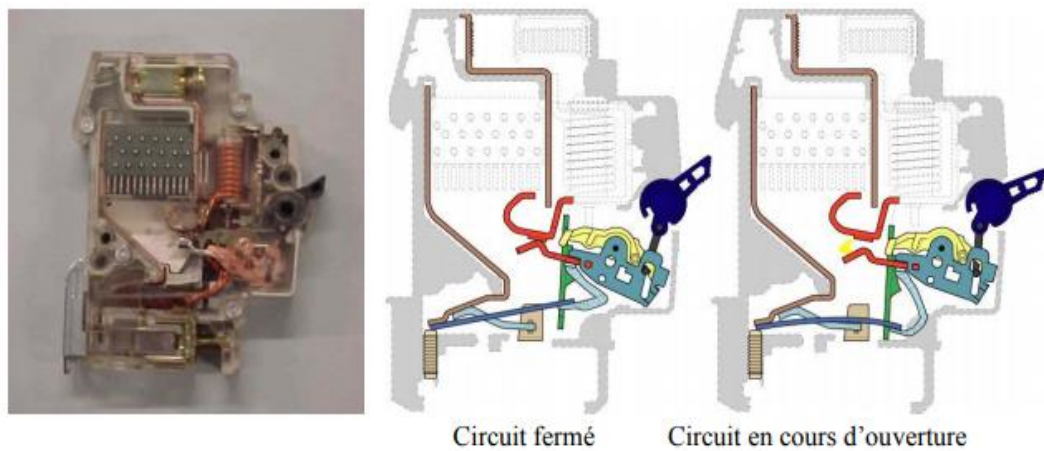


Fig. I.14 Principe de fonctionnement d'un disjoncteur.

- **Principe thermique :** Une lame bimétallique (bilame) est parcourue par le courant. Le bilame est calibré de telle manière qu'avec un courant nominal, elle ne subisse aucune déformation. Par contre si des surcharges sont provoquées par les récepteurs, en fonction du temps, la lame va se déformer et entraîner l'ouverture du contact.
- **Principe magnétique :** En service normal, le courant nominal circulant dans la bobine, n'a pas assez d'influence magnétique (induction magnétique) pour pouvoir attirer l'armature mobile fixée sur le contact mobile. Le circuit est fermé. Si un défaut apparaît dans le circuit aval du disjoncteur, l'impédance du circuit diminue et le courant augmente jusqu'à atteindre la valeur du courant de court-circuit. Dès cet instant, le courant de court-circuit provoque une violente aimantation de l'armature mobile. Cela a comme conséquence d'ouvrir le circuit aval du disjoncteur.

I.4.4.4. Relais

Les relais sont des interrupteurs que l'on peut actionner à distance. La fonction de coupure est dissociée de la fonction de commande. La tension et le courant de commande, ainsi que le pouvoir de commutation dépendent du relais. Il faut choisir ces paramètres en fonction de l'application désirée. Il faut choisir des relais différents selon qu'il faut commuter des signaux, des tensions ou des courants. [5.7]

I.4.4.4.1. Relais statique

Un relais statique (**Fig. I.15**), ne possède pas de pièce en mouvement. Le circuit de commande est généralement constituée d'une source lumineuse (LED), et le circuit de

puissance est élaborée autour d'un ou de plusieurs éléments photosensibles, tel que phototriac, phototransistor ou photodiode associée à un circuit de contrôle. [5]



Fig. I.15 Relais statique.

I.4.4.2. Relais thermique

Le relais thermique (**Fig. I.16**) est un dispositif qui protège le récepteur contre les surcharges et les coupures de phase. En cas de surcharge, le relais thermique n'agit pas directement sur le circuit de puissance. Un contact du relais thermique ouvre le circuit de commande d'un contacteur qui coupe le courant dans le récepteur. [3]



Fig. I.16 Relais thermique.

Le relais thermique utilise un bilame formé de deux lames minces de métaux ayant dilatation thermique différents. Le bilame s'incurve lorsque sa température augmente. Si le récepteur est en surcharge, l'intensité I qui traverse le relais thermique augmente, ce qui a pour effet de déformer davantage les trois bilames. Un système mécanique, lié aux bilames, assure l'ouverture du contact auxiliaire qui figure au niveau circuit de commande. [8]

Un relais thermique peut être schématisé comme suit (Fig. I.17)

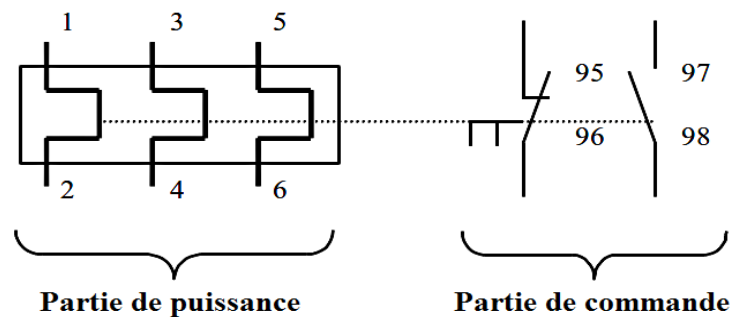


Fig. I.17 Symbole d'un relais thermique.

En cas de coupure de phase ou de déséquilibre sur les trois phases d'alimentation d'un moteur, le dispositif dit différentiel agit sur le système de déclenchement du relais thermique. [3]

I.4.4.3. Relais électromagnétique

Un relais électromagnétique est doté d'un bobinage. La tension appliquée à ce bobinage va créer un courant, ce courant produisant un champ électromagnétique. Ce champ magnétique va être capable de faire déplacer un élément mécanique métallique monté sur un axe mobile, qui déplacera alors des contacts. Encore appelé relais de protection à maximum de courant, le relais électromagnétique est un relais unipolaire dont le rôle est de détecter l'apparition d'un court-circuit. La coupure est effectuée par ses contacts auxiliaires utilisés dans le circuit de commande pour assurer l'ouverture du circuit de puissance du récepteur et signaler le défaut.

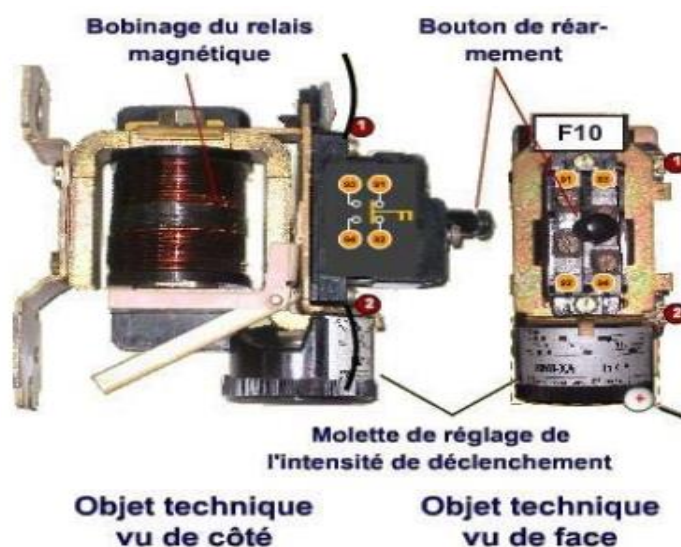


Fig. I.18 Relais électromagnétique.

Un relais électromagnétique peut être schématisé comme suit (**Fig. I.19**)

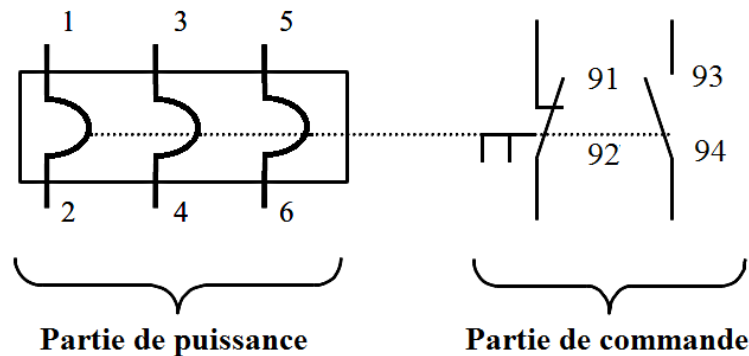


Fig. I.19 Symbole d'un relais électromagnétique.

Comme il est illustré sur (**Fig. I.20**), la bobine est constituée d'un grand nombre de spires. Quand cette bobine est parcourue par un courant suffisant, un champ magnétique attire la partie mobile vers lui, et déplace par le biais d'un axe des contacts. Lorsqu'aucun courant ne circule dans la bobine, les contacts reprennent leur position de repos grâce à un ressort de rappel.

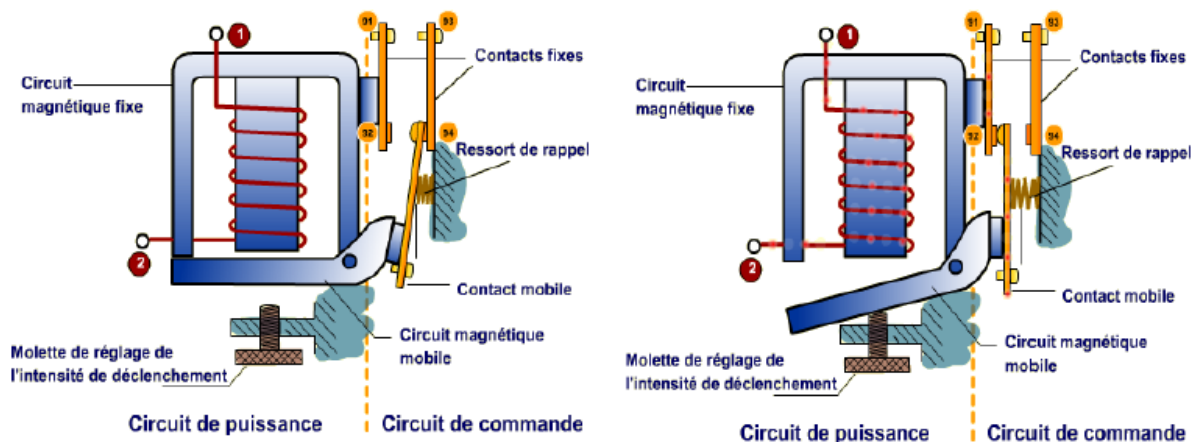


Fig. I.20 Principe de fonctionnement d'un relais électromagnétique.

I.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné un aperçu sur l'appareillage électrique classé selon plusieurs catégories. Vu que la protection est une importante fonction dans un réseau et installation électrique nous avons pointé sur les éléments de protection et en particulier le relais électromagnétique à courant continu à cause de ces avantages. Le deuxième chapitre est donc réservé à une étude profonde menant à dévoiler les éléments de base théorique pour un dimensionnement du relais.

Chapitre II

**Éléments théoriques de base pour le
dimensionnement d'un relais
électromagnétique**

II.1. Introduction

Dans ce deuxième chapitre, nous présenterons les différents éléments théoriques de base permettent le dimensionnement d'un relais électromagnétique. Nous proposerons aussi un choix des matériaux entrant dans la fabrication des éléments du relais en particulier ceux du circuit magnétique, des contacts et du ressort.

II.2. Contacts

Les liaisons électriques s'effectuent par des contacts. Ces derniers jouent le rôle de conducteur quelle que soit leurs qualités. Les contacts sont destinés à réunir deux parties d'un circuit électrique. Ils ne sont jamais parfaits et consomment une certaine quantité d'énergie qui se dissipe le plus souvent sous forme de chaleur. [10]

II.2.1. Caractéristiques d'un contact

La loi d'ohm ne s'applique pas aux résistances des contacts. Ces résistances dépendent d'autres facteurs que la résistivité du métal, la section et la longueur du matériau de fabrication. Ces facteurs sont

1. Pression mécanique, exercée sur les pièces en contact, appelée pression de contact
2. Nature des pièces : cuivre, charbon, argent, laiton
3. Forme et la section du contact
4. Température et la nature du milieu ambiant
5. Intensité du courant
6. Sens du courant
7. Etat des surfaces en contact (poli, propreté...)

Les résistances des contacts donnent lieu à plusieurs phénomènes dont le principal est l'échauffement par effet joule, dû à la résistance de contact qui se traduit par un écoulement de chaleur le long des conducteurs (**Fig. II.1**).

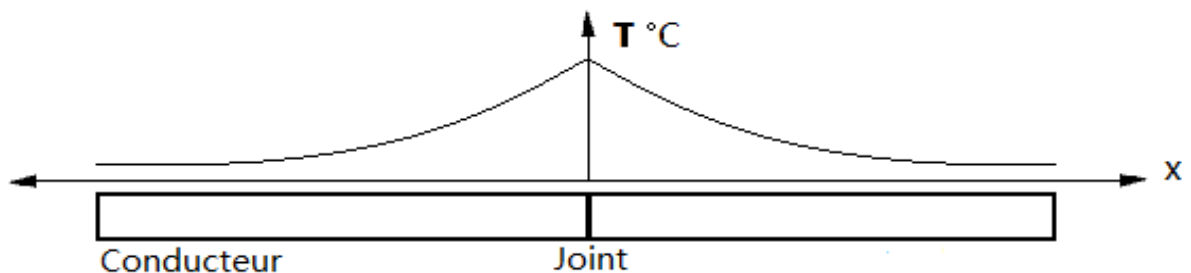


Fig. II.1 Échauffement d'un joint.

II.2.2. Matériaux pour contacts électriques

II.2.2.1. Condition à remplir

Les propriétés nécessaires pour assurer le passage du courant sans échauffement excessif et permettre un grand nombre d'ouverture et de fermeture sans détérioration exagérées sont

- Propriétés physiques ; densité élevée, point de fusion élevé, bon conductance thermique.
- Propriétés électriques ; faible résistivité, résistance de contact faible et constant, résistance à l'érosion par l'arc, intensité et tension limités d'arc aussi élevée que possible.
- Propriétés chimiques ; résistance à l'oxydation et à la corrosion.
- Propriétés mécaniques ; grande dureté, résistance à l'usure et à l'écrasement, facilité de mise en œuvre.

II.2.2.2. Matériaux utilisés

Les différentes caractéristiques des métaux pour la fabrication des contacts et les métaux utilisés sont regroupées respectivement dans (**Tab. II.1**) et (**Tab. II.2**) voir **Annexe.1** et **Annexe.2**. Quelles que soient les conditions d'emploi les matériaux les plus intéressants sont

- L'argent et le cuivre pour leur bonne conductance électrique et thermique.
- Le tungstène et le molybdène pour leur point de fusion élevé, la grande dureté et leur résistance à l'érosion par l'arc.
- L'or, l'argent, le platine, le palladium et le rhodium pour leur résistance à l'oxydation et à la corrosion.

II.2.2.3. Choix des matériaux

Le choix dépend des conditions d'emploi suivantes

- Tension ; de quelques volts dans les appareils de mesure, à des dizaines de kilovolts dans les disjoncteurs haute tension.
- Intensité ; du milliampère dans les relais sensibles, à des dizaines de milliers d'ampères dans certains disjoncteurs.
- Pression de contact ; de quelques *gf* à plusieurs *kgf*.
- Fréquence de manœuvre ; de quelques manœuvres par jour ou par semaines à 150 par seconde.

II.2.3. Phénomène de l'établissement du courant aux contacts

Le rôle des pôles est d'établir le courant dans le circuit. Sous l'action mécanique suite à l'attraction électromagnétique, tout l'ensemble de la partie mobile du contacteur subit un choc très fort qui peut exprimer par

$$F_{ch} = \frac{1}{2} * \frac{m_c * v_c}{l_c} \quad (II. 1)$$

Où F_{ch} est la Force du choc, m_c est la masse du contact mobile, v_c est la vitesse de fermeture et l_c est le déplacement du contact mobile.

Ce choc doit être absorbé sans peine de provoquer des rebondissements amorçant alors une série de coupure du courant d'où jaillissement d'arc. Cette absorption mécanique se fait par

- Elasticité du métal du contact en mouvement.
- Elasticité du dispositif support (amortisseurs, ressorts ...).

II.2.4. Effort de répulsion des contacts

La totalité du courant doit passer à travers des petites surfaces. Il existe deux composantes de courant, l'une radiale et l'autre axiale, (**Fig. II.2**). Les forces résultantes qui s'exercent sur chaque contact sont répulsives en raison de sens contraire des composantes tangentielles des lignes de courant de part et d'autre de la surface des contacts.



Fig. II.2 Effort de répulsion dans les contacts dû à la répartition du courant.

La détermination de l'effort de répulsion a fait l'objet de nombreuses études. Dans ce contexte, plusieurs formules ont été proposées. Parmi ces formules nous rappelons celle proposée par I. Molnar, qui propose un calcul mathématique de la force de répulsion dans les cas simples où les deux pièces sont des cylindres de diamètre $2b$, sa détermination au voisinage de la surface de contact de diamètre $2a$ par un cône d'angle au sommet 2β .

$$F_r = \frac{\mu_0 * I^2}{4\pi} * (1 - \cos \beta) * \ln \frac{b}{a} \quad (II. 2)$$

Où I_c est le courant transversal le contact, μ_0 est la perméabilité du vide et F_r est la force en Newton.

Alors que R. Home a proposé la relation suivante, semblable à la précédente pour la même force de contacts.

$$F_r = \frac{\mu_0 * I_c^2}{4\pi} * \ln \frac{b}{a} \quad (\text{II. 3})$$

Il est bon de noter que les principaux facteurs ayant une influence sur la force de répulsion sont les dimensions du contact et l'intensité du courant.

II.2.5. Modélisation du contact métallique

II.2.5.1. Notion de striction

Dans les contacts électriques, la surface de portée est toujours inférieure à la surface apparente, il y a donc une très forte concentration des lignes de courant à travers ces surfaces relativement faibles que l'on appelle striction de contact. [10]

II.2.5.2. Détermination du rayon de la striction

Pour cela, on partira d'un modèle simplifié de contacts lisses, homogènes ou la striction est circulaire.

- a. Déformation élastique ; elle se produit aux efforts faibles et l'on peut utiliser pour le calcul de la surface d'appui les formules de Hertz, les contacts sont supposés de surface sphérique et lorsque les matériaux et les rayons sont identiques d'où (II. 5) est la formule simplifiée du rayon de striction

$$\frac{1}{E_0} = \frac{2(1 - K_p^2)}{M_e} \quad (\text{II. 4})$$

$$a_e = K_p * \sqrt[3]{\frac{r_c * F_{ch}}{M_e}} \quad (\text{II. 5})$$

Où F_{ch} est la force de contact, $\frac{1}{E_0}$ est le coefficient d'élasticité, r_c est le rayon des contacts, K_p est le coefficient de poisson et M_e est le module d'élasticité.

Pour les métaux : $0.24 < K_p < 0.44$

Tab. II.3 Valeur du coefficient K_p pour différentes formes géométriques des deux contacts.

K_p	Forme des contacts
0.84 ÷ 0.89	Sphère/Sphère
1.065 ÷ 1.122	Sphère/Plan

- b. Déformation plastique ; elle apparait quand l'effort de contact augmente, en utilisant la dureté D caractéristique du matériau, elle est donnée par

$$a_p = \sqrt{\frac{F_{ch}}{\pi * D}} \quad (\text{II. 6})$$

II.2.5.3. Résistance de striction

Pour un modèle sphérique on peut faire une première estimation de la résistance de striction R_s , celle-ci est défini comme le supplément dû à la présence de la striction, par rapport à la valeur qui correspond au conducteur sans striction.

Un cas limité est obtenu par une coupure réalisée autour de la striction et correspond au minimum de R_s .

Quand la striction est très petite on peut supposer le volume illimité de part et d'autre, avec une résistance propre nulle.

Le modèle sphérique remplace le contact plat de rayon « a » par une sphère infiniment conductrice de rayon « b », correspondant à des lignes de courant radiales.

Donc la résistance totale de part et d'autre de la striction sera

$$R_{s0} = 2 \int_b^{\infty} \frac{\rho_0 * d\pi}{2\pi * M^2} = -\frac{\rho_0}{\pi} * \left[\frac{1}{M} \right]_b^{\infty} \quad (\text{II. 7})$$

Donc

$$R_{s0} = \frac{\rho_0}{\pi * b} \quad (\text{II. 8})$$

Où ρ_0 est la résistivité, supposée constante.

Le rayon de striction a est donné par

$$a = \sqrt{\frac{F_{ch}}{\pi * D}} \quad (\text{II. 9})$$

La résistance de striction avec l'introduction de a , devient

$$R_s = \rho_0 * \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi * D}{F_{ch}}} \quad (\text{II. 10})$$

En posant

$$K = \rho_0 \frac{\sqrt{\pi * D}}{2} \quad (\text{II. 11})$$

On aura

$$R_s = \frac{K}{\sqrt{F_{ch}}} \quad (\text{II. 12})$$

(**Fig. II.3**) nous donne la dépendance obtenue par expérience de la résistance de jonction en fonction de la force de pression F_c pour différents matériaux de contact.

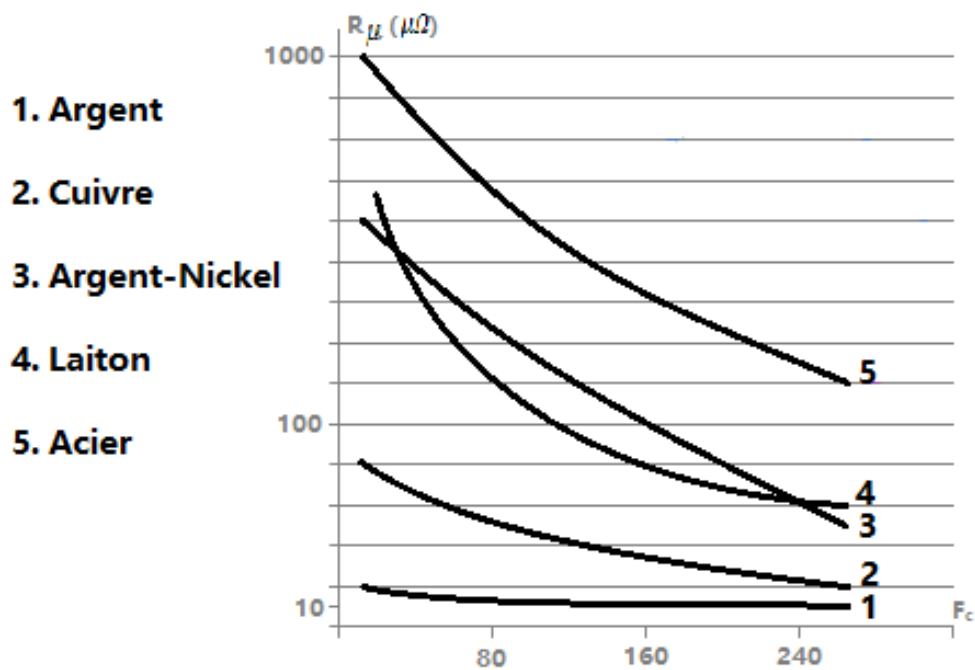


Fig. II.3 Résistance de jonction en fonction de la force de pression.

II.2.6. Films isolants sur les contacts

Des films isolants peuvent se former à la surface des contacts, sous faibles tensions d'emploi ils peuvent empêcher la conduction. A courant fort, ils peuvent entraîner la destruction des contacts par échauffement exagéré. La pollution peut se produire sous différentes formes

- A l'état ouvert ; dépôts de poussière, couches de corrosion.
- A l'état fermé ; corrosion accélérée par échauffement des contacts, accompagnées d'associations ou de dissociations chimiques.
- A l'ouverture avec l'arc ; réaction chimique à haute température.

II.2.7. Surélévation de température dans les contacts

Le passage d'un courant nominal pour une longue durée provoque la surélévation de la température qui ne doit pas conduire à une destruction des films entre les pièces en contacts. Les températures de chauffage admissibles des contacts ne doivent pas dépasser celles de recristallisation du matériau (120°C pour le cuivre, 150°C pour l'argent). La théorie de la thermodynamique concernant le transfert de chaleur nous permet de déterminer la température de chauffage d'un point de contact à courant de longue durée (**Fig. II.4**). La résistance électrique offerte par deux surfaces demi-sphériques équipotentielles se trouvant à une distance Δr l'une de l'autre est donnée par

$$\Delta R = \frac{\rho * \Delta r}{2\pi * r^2} \tag{II.13}$$

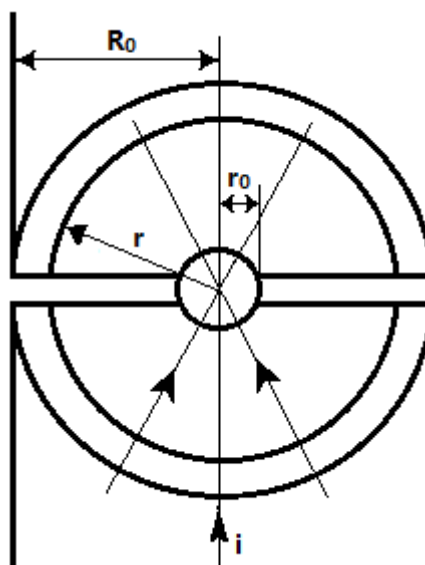


Fig. II.4 Point de contact.

Où r est le rayon de la surface considérée. Par analogie, la résistance thermique entre ces deux surfaces est exprimée par

$$\Delta R_T = \frac{1}{\lambda_T} * \frac{\Delta r}{2\pi * r^2} \quad (\text{II. 14})$$

Où λ_T est le coefficient de conductivité thermique. Selon l'équation (II. 13), on pourra écrire :

$$\frac{\Delta r}{2\pi * r^2} = \frac{\Delta R}{\rho} \quad (\text{II. 15})$$

Il en résulte que

$$\Delta R_T = \frac{\Delta R}{\lambda_T * \rho} \quad (\text{II. 16})$$

On sait que chacune des deux pièces est le siège d'une moitié de la puissance thermique dégagée au point de contact. Au sein de chaque pièce de contact le flux thermique du aux pertes par effet joule est $(R * I^2)/2$. Où R est la résistance de la zone de rétrécissement.

Il en résulte que la différence de température entre les surfaces considérées est égale au produit du flux calorifique par la résistance thermique est donnée par

$$\Delta T = \frac{R * I^2}{2} \Delta R_T \quad (\text{II. 17})$$

En se servant de l'équation (II. 16) on pourra écrire que

$$\Delta T = \frac{I^2}{2\lambda_T * \rho} R * \Delta R_T \quad (\text{II. 18})$$

La surélévation de la température à la surface de contact est égale à la différence entre la température T_1 et la température de la pièce de contact T_c est donnée par

$$T_1 - T_c = \frac{U_1^2}{2\lambda_T * \rho} \quad (\text{II. 19})$$

$$T_1 - T_c = \frac{U_c^2}{8\lambda_T * \rho} \quad (\text{II. 20})$$

Où U_c est la tension ($U_c = 2U_1$).

II.2.8. Dimensionnement des contacts

a. Résistance de contact

La résistance de contact est donnée empiriquement par

$$R_c = \frac{a}{P_c^b} = R_\mu \quad (\text{II. 21})$$

Où a dépend de la nature du matériau, b dépend de la forme géométrique des deux contacts et P_c est la force de pression elle est en fonction du courant I_c .

b. Chute de tension équivalente

La chute de tension équivalente est donnée par

$$U_c = R_c * I_c \quad (\text{II. 22})$$

c. Surélévation de la température

La surélévation de la température est donnée par

$$\Delta\theta = \frac{U_c^2}{8\lambda_T * \rho} \quad (\text{II. 23})$$

Où λ_T est la conductibilité thermique, ρ est la résistivité et U_c est la chute de tension du contact.

II.2.9. Energie développée dans l'arc

L'énergie électrique développée dans l'arc se dissipe entièrement en chaleur, cette énergie est d'autant plus grande que le courant, et la tension sont élevées. L'énergie développée pendant une durée t_a est donnée par

$$W_a = \int_0^{t_a} u_a * i_a dt \quad (\text{II. 24})$$

Avec la connaissance des paramètres U , I on pourra tracer la courbe $u_a = f(i_a)$. L'expression empirique donnant la caractéristique statique d'un arc est donnée par

$$U_a = a + b * \Delta_{12} + \frac{(c * \Delta_{12} + d)}{I_a} \quad (\text{II. 25})$$

Où Δ_{12} est la longueur de l'arc, a, b, c et d sont des constantes qui dépendent de la nature du matériau constituant le contact.

II.3. Ressorts

II.3.1. Généralités

II.3.1.1. Type de ressort

Il existe beaucoup de formes de type de ressort

- a.** Ressort soumis à la traction ou à la compression (ressort en caoutchouc)
- b.** Ressort soumis à la flexion
 - 1. Ressort hélicoïdaux
 - 2. Ressort à lame encastré
 - 3. Ressort à lame
- c.** Ressort soumis à la torsion
 - 1. Ressort cylindriques
 - 2. Ressort coniques
 - 3. Ressort barres
 - 4. Ressort bandes de torsion

II.3.1.2. Force exercée par un ressort

Elle est proportionnelle à la déformation. Pour exercer une force importante il faudra donc avoir une déformation importante.

II.3.2. Matériaux utilisés

Les matériaux utilisés pour la construction de ressorts sont

II.3.2.1. Aciers

- a.** Acier non alliés ; ce sont les plus économiques on utilise des aciers des classes C et XC a teneur en carbone importante, par exemple XC55-XC65-XC70-XC95.
- b.** Aciers alliés
 - 1. Acier au silicium ; charge limite élastique élevée.
 - 2. Acier au chrome ; résistance et endurance élevée (camions, voitures).
 - 3. Acier inoxydable ; acier 18.8 ou Cr-Ni.

II.3.2.2. Alliages de cuivre

- a. Bronze phosphoreux ; charge limite élastique importante, bonne conductibilité électrique, amagnétique, résistance à la corrosion. On peut le placer dans une atmosphère corrosive, ressort conducteur (cas de notre relais).
- b. Cuivre (ou bronze) au béryllium ; ressorts conducteurs.
- c. Cuivre au chrome ou au cadmium

II.3.2.3. Alliages de nickel

Grande résistance à la corrosion par les produits chimiques, résistance mécanique élevée, mais matériaux coûteux

- a. Métal monel.
- b. Métal inconel.

II.3.3. Choix des matériaux

Du point de vue technologique et économique, le matériau s'adaptant à la fonction des contacts est le bronze phosphoreux. Ce dernier présente les avantages suivants

- Grande résistance à la corrosion
- Bonne conductibilité électrique
- Amagnétique
- Charge limite élastique importante

II.3.4. Energie de déformation

Quand une force extérieure agit sur un corps élastique elle le déforme. Le travail effectué par la force est emmagasiné dans le corps sous la forme d'énergie de déformation. Par exemple l'énergie interne d'une lame élastique est donnée par

$$W_d = \frac{M^2 * L_m}{2(M_Y * j)} \quad (\text{II. 26})$$

Où M est le moment de flexion, L_m est la longueur de la lame, M_Y est le module de Young et j est le moment d'inertie de la section autour de l'axe neutre.

De plus, selon le théorème de CASTIGLIANO, le déplacement est égal au dérivé partiel de l'énergie interne totale de déformation par rapport à une force extérieure P_{ex} . Le déplacement du à l'application de la force est donné par

$$\delta_n = \frac{\partial W_d}{\partial P_{ex}} = f_n \quad (\text{II. 27})$$

II.3.5. Dimensionnement des ressorts

Les dimensions des ressorts et des autres parties de notre relais sont représentés dans (Fig. II.5) voir Annexe.3.

a. Epaisseur du ressort

L'épaisseur du ressort h est donnée par

$$h = \sqrt[3]{\frac{4P_c * L_a^3}{M_Y * b * f}} \quad (\text{II. 28})$$

Où L_a est la longueur active du ressort, M_Y est le module de Young, P_c est la force de pression, b est la largeur du ressort et f est la flèche.

b. Constante élastique du ressort

Lorsque la caractéristique est linéaire, le coefficient d'élasticité est appelé constante élastique et elle est donnée par

$$c = \frac{3M_Y * j}{L_m^3} \quad (\text{II. 29})$$

Où j est le moment d'inertie de la lame constituant le ressort et exprimé par

$$j = \frac{b * h^3}{12} \quad (\text{II. 30})$$

c. Flèches

Les expressions des flèches f_1 et f_2 sont données respectivement par

$$f_1 = \frac{P_b * L_b^3}{6M_Y * j_1} * (3L_a - L_b) \quad (\text{II. 31})$$

De même par

$$f_2 = \frac{P_b * L_b^3}{3M_Y * j_2} \quad (\text{II. 32})$$

Où P_b est la force de pression initiale.

II.3.6. Autres éléments de rappel

Après disparition de la cause ayant déterminé le fonctionnement du relais, la partie mobile de celui-ci doit revenir rapidement à sa position initiale pour être prête à fonctionner à nouveau, un organe doit donc rappeler la partie mobile du relais à zéro. La création de force de rappel peut être obtenue en utilisant des ressorts simples.

II.4. Caractéristiques mécaniques

II.4.1. Définition de la caractéristique mécanique

La Caractéristique mécanique d'un relais électromagnétique exprime la dépendance de la force de rappel en fonction de l'entrefer. [10]

II.4.2. Détermination de la caractéristique mécanique

Pour sa détermination, différents éléments sont nécessaires tels que

L_c est la longueur du ressort supplémentaire, P_b est la force de pression due au poids de l'armature et P_s est la force due au ressort supplémentaire.

Les coefficients $K_a = (0.9 \div 1.3)$, K_1 et K_2 sont donnée par

$$K_1 = \frac{f_2}{f_1} \quad (\text{II. 33})$$

$$K_2 = \frac{1}{K_1} = \frac{f_1}{f_2} \quad (\text{II. 34})$$

Les valeurs numériques de f_1 et f_2 sont donnée dans la partie ressort.

a. Déplacement du ressort (1)

Le déplacement du ressort 1 est donné par

$$F_{b1} = \frac{\Delta_{12}}{K_2} \quad (\text{II. 35})$$

b. Déplacement de l'armature mobile

Le déplacement de l'armature mobile est donné par

$$\delta_1 = \frac{F_{b1}}{K_a} \quad (\text{II. 36})$$

c. Déplacement supplémentaire du ressort (1)

Le déplacement supplémentaire est donné par

$$F_{22} = \frac{P_c - P_s}{c_2} \quad (\text{II. 37})$$

d. Déplacement de l'armature jusqu'à la courbure des deux ressorts

Le déplacement de l'armature jusqu'à la courbure des deux ressorts sera

$$\delta_2 = \frac{F_{22}}{K_2 * K_a} \quad (\text{II. 38})$$

e. Forces agissantes sur l'armature mobile

La force initiale est donnée par

$$P_{0\delta} = K_a * P_b \quad (\text{II. 39})$$

La force qu'on doit fournir pour courber le ressort mobile jusqu'au contact avec le ressort fixe, comme suit

$$P_{1\delta} = K_a \left(P_b + \frac{\Delta_{12} * c_1}{K_2} \right) \quad (\text{II. 40})$$

La force qu'on doit fournir pour vaincre la force du ressort supplémentaire est donnée par

$$P_{2\delta} = P_{1\delta} + P_s * \frac{K_a}{K_1} \quad (\text{II. 41})$$

$$P_{3\delta} = P_{2\delta} + \frac{F_{22} * c_2 * K_a}{K_2} \quad (\text{II. 42})$$

L'entrefer maximale totale donné par

$$\delta_i = \delta_0 + \delta_1 + \delta_2 \quad (\text{II. 43})$$

Où δ_0 c'est l'épaisseur de la cale amagnétique.

Remarque : La cale amagnétique fixée sur l'armature mobile, a pour but d'éviter le collage de l'armature mobile sur l'armature fixe, due à l'induction rémanente après désexcitation de la bobine et en dernier lieu d'éviter l'usure de l'armature mobile lorsqu'elle percute l'armature fixe.

II.4.3. Conversion électromécanique

Dans une transformation d'énergie électrique en énergie mécanique il apparait également une conversion d'énergie électrique en énergie thermique par effet joule. Le bilan énergétique faisant intervenir les formes électriques, mécaniques et thermiques n'est généralement pas équilibré en particulier lors du régime transitoire, d'où l'existence d'une quatrième forme d'énergie associé à la conversion magnétique.

Bilan d'énergie : Le bilan énergétique associé à la conversion électromécanique peut être exprimé par

$$dW_{él} = dW_{mec} + dW_{th} + dW_{mag} \quad (\text{II. 44})$$

Où on

a. L'expression de la variation de l'énergie électrique est donnée par

$$dW_{él} = \sum_{j=1}^n u_j * i_j * dt \quad (\text{II. 45})$$

b. L'expression de la variation de l'énergie mécanique est donnée par

$$dW_{mec} = \sum_{m=1}^n F_m * dx_m \quad (\text{II. 46})$$

c. L'expression de la variation de l'énergie thermique est donnée par

$$dW_{th} = \sum_{j=1}^k R_j * i_j^2 * dt \quad (\text{II. 47})$$

d. L'expression de la variation de l'énergie magnétique est donnée par

$$dW_{éa\Sigma} = \int e * I dt \quad (\text{II. 48})$$

Où e désigne la force électromotrice créée par une bobine de N spire traversé par un flux

$$e = -N * \frac{d\phi}{dt} \quad (\text{II. 49})$$

II.5. Rappel sur le circuit magnétique

II.5.1. Définition

Un circuit magnétique est un volume fermant toutes les lignes des forces du champ magnétique. Dans tous les domaines où on aura à utiliser des phénomènes magnétiques. On sera donc amené à canaliser ces lignes de forces dans un circuit bon conducteur du flux magnétique, ce circuit est constitué par des matériaux ferromagnétiques. (**Fig. II.6**). [11]

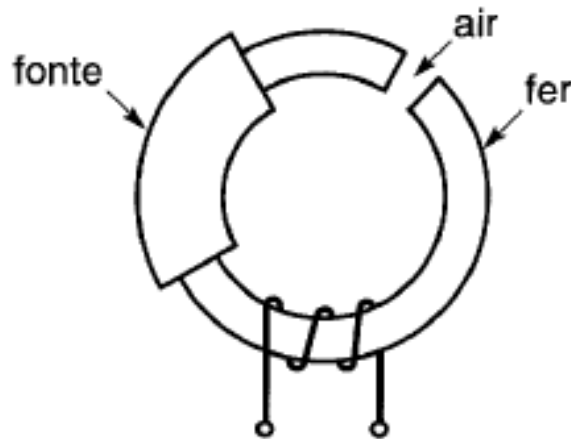


Fig. II.6 Exemple d'un circuit magnétique.

II.5.2. Analogie entre circuit magnétique et circuit électrique

Dans un circuit électrique, le générateur est la source de courant, sa force électromotrice E produit un courant $I = E/R$ dans un circuit de résistance R . De même, dans un circuit magnétique, la bobine est la source du champ. La force magnétomotrice fmm , produit un flux ϕ dans un circuit de réluctance magnétique \mathcal{R}_m définie par

$$\mathcal{R}_m = \frac{l}{\mu * s} \quad (\text{II. 50})$$

Où l , s sont respectivement la longueur et la surface de la section du circuit magnétique et μ et la perméabilité du matériau.

Le flux magnétique est dû au courant I parcourant la bobine. Le produit de l'intensité par le nombre de spire N définit la force magnétomotrice donnée par

$$fmm = N * I \quad (\text{II. 51})$$

II.5.3. Matériau pour le circuit magnétique

II.5.3.1. Milieu ferromagnétique

On dit qu'un milieu est ferromagnétique, lorsqu'il est fortement modifié par l'excitation magnétique (fer doux, acier, nickel, chrome, ferrites, cobalt, etc.). Dans ce milieu, le champ d'induction magnétique dépend de l'intensité de l'excitation magnétique et du passé magnétique du milieu. (Fig. II.7). [12]

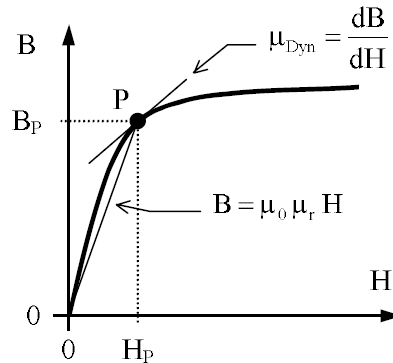


Fig. II.7 Courbe d'aimantation.

Nous avons choisi comme matériau, l'acier électrotechnique de type E qui est paramagnétique et qui a une courbe d'aimantation $B = f(H)$, (Tab. II.4) voir Annexe.4.

II.5.3.2. Cycle d'hystérésis d'un matériau ferromagnétique

Lorsqu'un champ magnétique H est appliqué à un matériau, il se crée dans ce matériau une induction magnétique B qui suit la relation suivante

$$B = \mu * H \tag{II.52}$$

La courbe d'aimantation est donnée par (Fig. II.8) appelée, cycle d'hystérésis.

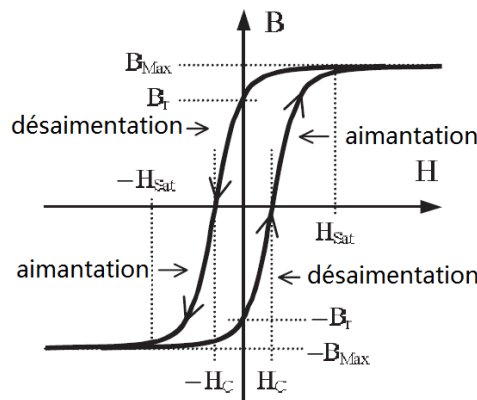


Fig. II.8 Cycle d'hystérésis.

Les paramètres caractérisant cette courbe sont définis comme suit

- **Saturation d'un matériau ferromagnétique :** Dès que l'intensité H de l'excitation magnétique dépasse H_{Sat} (intensité de saturation) en valeur absolue, l'intensité B de l'induction magnétique ne croît plus, le matériau est saturé.
- **Induction rémanente :** Si on supprime le champ magnétique ($H = 0$), il subsiste une induction magnétique non nulle, appelée induction rémanente (B_r). Cette propriété est utilisée pour fabriquer les aimants permanents et les supports d'enregistrements magnétiques (Effet mémoire).
- **Désaimantation d'un matériau ferromagnétique :** Pour annuler l'induction rémanente, il faut appliquer une excitation opposée, dite excitation coercitive (H_C). Mais sa suppression, ré-aimante le matériau dans l'autre sens. La seule solution consiste à parcourir plusieurs fois le cycle d'hystérésis, en diminuant progressivement l'intensité H , jusqu'à l'annuler.

II.5.4. Notions fondamentales de la théorie des circuits magnétiques

Flux de fuite : dans les circuits magnétiques industriels, les lignes de flux ne sont pas toutes canalisées à l'intérieur du circuit. Une partie de ces lignes passe en dehors du fer et de l'entrefer (**Fig. II.9**) Le flux correspondant à ces lignes se nomme flux de fuite, ce flux de fuite prend plus d'importance quand le circuit magnétique devient saturé. Le phénomène est connu sous le nom de dispersion. [11]

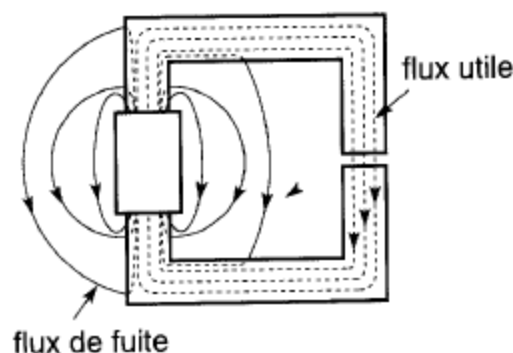


Fig. II.9 Flux de fuite.

II.5.5. Lois de Kirchhoff

Première loi : La somme algébrique des flux magnétique traversant une section d'un noyau magnétique est nulle. [11]

$$\sum \phi_K = 0 \quad (\text{II.53})$$

Deuxième loi : Dans tout circuit fermé, la somme des chutes de potentiel magnétique est égale à la force magnétomotrice résultante de ce circuit, est donnée par l'expression suivante

$$\oint \phi * d\mathcal{R}_m = N * I \quad (\text{II. 54})$$

Pour un circuit magnétique sans dérivation la loi peut être écrite

$$\phi * \mathcal{R}_m = N * I \quad (\text{II. 55})$$

II.5.6. Loi du courant total

La circulation de champ magnétique le long d'un circuit fermé est égale à la force magnétomotrice résultante de ce circuit elle est donnée par

$$\int H * dl = N * I \quad (\text{II. 56})$$

Pour un champ homogène cette circulation est exprimée comme ci-dessous

$$H * l = N * I \quad (\text{II. 57})$$

De plus, on sait que

$$N * \phi = L * I \quad (\text{II. 58})$$

Où L est l'inductance qui peut être donnée par

$$L = \frac{N * \phi}{I} = \frac{N^2}{\mathcal{R}_m} = N^2 * G_m \quad (\text{II. 59})$$

Où G_m est la perméance.

Lorsque l'armature est repoussée, les entrefers utiles ont une longueur maximale et leur reluctance dépasse de loin celle de l'acier. En ce cas l'inductance L peut être exprimée par \mathcal{R}_δ ou par la perméance de l'entrefer G_δ , comme suite

$$L' = \frac{N^2}{\mathcal{R}_\delta} = N^2 * G_\delta \quad (\text{II. 60})$$

La réluctance \mathcal{R}_m et la perméance G_m des parties ferromagnétiques du circuit s'expriment respectivement en fonction de la perméabilité μ , de la longueur l et de la section transversale s du matériau [9]. Elles sont données respectivement par

$$\mathcal{R}_m = \frac{1}{G_m} \quad (\text{II. 61})$$

La perméance G_m est donnée par

$$G_m = \frac{\mu * S}{l} \quad (\text{II. 62})$$

II.6. Circuit magnétique du relais

II.6.1. Dimensionnement du circuit magnétique

Le circuit magnétique du relais est représenté dans (Fig. II.10). [13.14]

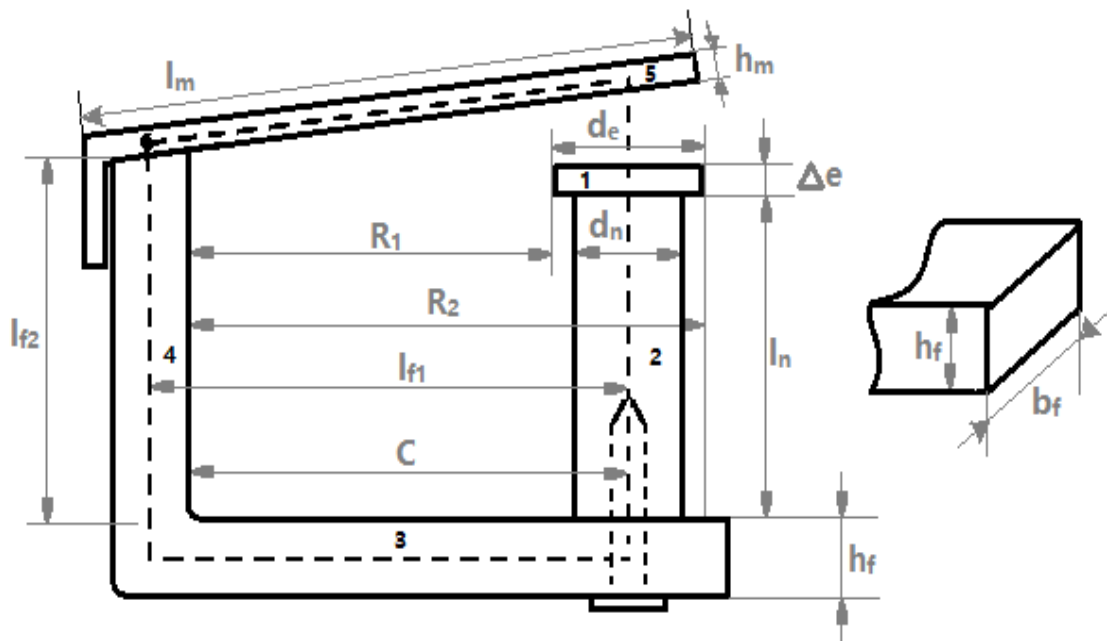


Fig. II.10 Schéma du circuit magnétique étudié.

Remarques

- Les formules empiriques présenter pendant le calcul sont des formules théoriques qui peuvent être démontrées mais à des constantes pratique prés.
- Les intervalles présentés pour différentes valeurs sont nommées industriellement, chaque valeur prise de cette fourchette est toujours dans le bon choix.

a. Section d'épanouissement

L'épanouissement c'est la zone de contact entre les deux armatures, son section est donnée par

$$S_e = \frac{P_{ac}}{4.06 * B_\delta^2} \quad (\text{II. 63})$$

Avec

$$P_{ac} = P_c * K_{ré} \quad (\text{II. 64})$$

Où $K_{ré}$ est le coefficient de réserve, P_c est la force de rappel au point C (**Fig. III.1**) voir **Chapitre III** et B_δ est l'induction dans l'entrefer généralement.

On peut déterminer le diamètre d'épanouissement qui est donné par

$$d_e = \sqrt{\frac{4S_e}{\pi}} \quad (\text{II. 65})$$

b. Epaisseur d'épanouissement

L'épaisseur d'épanouissement, $\Delta e = (0.3 \div 0.5) \text{ cm}$

c. Section du noyau

La section du noyau est donnée par

$$S_n = \frac{B_\delta * K_s * S_e}{B_n} \quad (\text{II. 66})$$

Où K_s est le coefficient de dispersion du système et B_n est l'induction dans le noyau.

On peut déterminer le diamètre du noyau qui est donné par

$$d_n = \sqrt{\frac{4 * S_n}{\pi}} \quad (\text{II. 67})$$

d. Section de l'armature fixe

La section de l'armature fixe est donnée par

$$S_f = (1 \div 2) * S_n \quad (\text{II. 68})$$

e. Largeur de l'armature fixe

La largeur de l'armature fixe est donnée par

$$b_f = (1 \div 1.2) * D_{ext} \quad (\text{II. 69})$$

$$D_{ext} = (1.4 \div 4) * d_n \quad (\text{II. 70})$$

f. Epaisseur de l'armature fixe

L'épaisseur de l'armature fixe est donnée par

$$S_f = h_f * b_f \quad (\text{II. 71})$$

$$h_f = \frac{S_f}{b_f} \quad (\text{II. 72})$$

g. Longueur du noyau

La longueur du noyau est donnée par

$$l_n = (7 \div 10) * d_n \quad (\text{II. 73})$$

h. Longueur de la deuxième partie de l'armature fixe

La longueur de la deuxième partie de l'armature fixe est donnée par

$$l_{f2} = l_n + \Delta e \quad (\text{II. 74})$$

i. Section de l'armature mobile

La section de l'armature mobile est donnée par

$$S_{am} = (0.6 \div 1) * S_n \quad (\text{II. 75})$$

j. Largeur de l'armature mobile

La largeur de l'armature mobile est donnée par

$$b_{am} = b_f \quad (\text{II. 76})$$

k. Epaisseur de l'armature mobile

L'épaisseur de l'armature mobile est donnée par

$$h_{am} = \frac{S_{am}}{b_{am}} \quad (\text{II. 77})$$

II.6.2. Dimensionnement de la bobine

II.6.2.1. Définition du coefficient de remplissage

Le coefficient de remplissage K_r est donné comme le rapport entre la section totale nette du cuivre et la section transversale de la bobine complète. [13.14]

II.6.2.2. Détermination du coefficient de remplissage

Considérons une bobine dont la carcasse (Fig. II.11) est de diamètres intérieur D_{int} , de diamètres extérieur D_{ext} , d'épaisseur h_b et de longueur L .

De plus

$$D_{ext} - D_{int} = 2 * h \quad (II.78)$$

Le volume disponible de la bobine s'exprime par

$$V_{bob} = l_b * (D_{ext}^2 - D_{int}^2) * \frac{\pi}{4} \quad (II.79)$$

Le coefficient de remplissage peut aussi être donné par le rapport entre le volume de cuivre et le volume disponible de la bobine est exprimé par

$$K_r = \frac{V_{cu}}{V_{bob}} \quad (II.80)$$

On peut démontrer aisément que se rapport à pour limite maximale

$$K_r = 1.15 * \frac{\pi}{4} \approx 0.9 \quad (II.81)$$

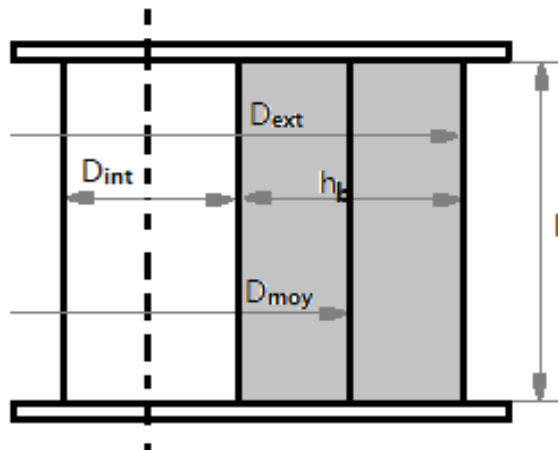


Fig. II.11 Illustration des dimensions de la bobine.

II.6.2.3. Dimensionnement des différentes grandeurs et éléments de la bobine

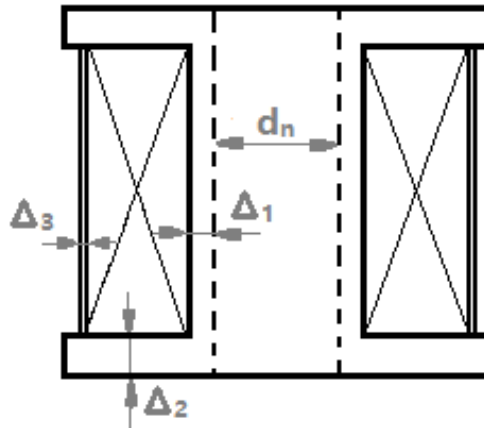


Fig. II.12 Schéma d'une coupe de la bobine.

Où Δ_1 est l'épaisseur de la carcasse de la bobine, Δ_2 est l'épaisseur de la carcasse de la bobine et Δ_3 est l'épaisseur de l'isolant supérieur de la bobine.

a. Diamètre intérieur de la bobine

Le diamètre intérieur de la bobine est donnée par

$$D_{int} = d_n + 2\Delta_1 \quad (\text{II. 82})$$

b. Diamètre extérieur de la bobine

Le diamètre extérieur de la bobine est donnée par

$$D_{ext} = D_{int} + 2h_b + 2\Delta_3 \quad (\text{II. 83})$$

$$h_b = (0.5 \div 0.8) * d_n \quad (\text{II. 84})$$

c. Longueur de la bobine

La longueur de la bobine est donnée par

$$l_b = l_n - (0.5 \div 1)cm \quad (\text{II. 85})$$

d. Distance entre l'axe du noyau et la deuxième partie de l'armature fixe

La distance entre l'axe du noyau et la deuxième partie de l'armature fixe est donnée par

$$C = \frac{D_{ext}}{2} + h_0 \quad (\text{II. 86})$$

Où h_0 est la distance entre la bobine et l'armature fixe.

e. Longueur de la première partie de l'armature fixe

La longueur de la première partie de l'armature fixe est donnée par

$$l_{f1} = C + \frac{h_f}{2} \quad (\text{II. 87})$$

f. Longueur de l'armature mobile

La longueur de l'armature mobile est donnée par

$$l_{am} = C + h_f \quad (\text{II. 88})$$

g. Longueur moyen d'une spire

La longueur moyen d'une est donnée par

$$l_{moy} = \pi * \frac{D_{ext} + D_{int}}{2} \quad (\text{II. 89})$$

h. Section du fil de la bobine

La section du fil de la bobine est donnée par

$$s = \frac{\rho * N * l_{moy} * I}{U} \quad (\text{II. 90})$$

Avec

$$R = \rho * \frac{l}{s} \quad (\text{II. 91})$$

$$l = N * l_{moy} \quad (\text{II. 92})$$

$$l = N * \pi * \frac{D_{ext} + D_{int}}{2} \quad (\text{II. 93})$$

Donc

$$s = \rho * N * \pi * \frac{D_{ext} + D_{int}}{2 * R} \quad (\text{II. 94})$$

i. Diamètre du fil

Le diamètre de fil est donnée par

$$d = \sqrt{\frac{4S}{\pi}} \quad (\text{II. 95})$$

Avec

$$S = \frac{\pi * d^2}{4} \quad (\text{II. 96})$$

j. Nombre de spire

Ayant la valeur de K_r pour le diamètre utilisé, on peut calculer à partir de cette expression le nombre de spires N qui sera donné par

$$N = \frac{4K_r * h_b * l}{\pi * d^2} \quad (\text{II. 97})$$

k. Résistance du bobinage

Ayant la valeur du nombre de spires N on peut calculer la résistance du bobinage donnée par

$$R = \frac{\rho * l_{moy} * N}{\frac{\pi * d^2}{4}} \quad (\text{II. 98})$$

l. Courant d'alimentation

Le courant parcourant la bobine est donnée par

$$I = \frac{U}{R} \quad (\text{II. 99})$$

m. Puissance dissipée

La puissance dissipée peut être écrite comme suit

$$P = \frac{U^2}{R} \quad (\text{II. 100})$$

n. Puissance admissible

La puissance maximale admissible dépend essentiellement de la grandeur de la surface latérale de la bobine, cette dernière est donnée par

$$S_{lat} = \pi * (D_{ext} + D_{int}) * L_b \quad (\text{II. 101})$$

Le coefficient σ_0 met en évidence la surface participante à l'évacuation vers le milieu extérieur, et sa valeur dépend le rapport de la longueur de la bobine à son diamètre extérieur L_b/D_{ext} .

En fin, la puissance admissible est donnée par

$$P_{adm} = \frac{S_{lat}}{\sigma_0} \quad (II.102)$$

II.6.2.4. Vérification du fonctionnement normal

La vérification du fonctionnement normal se fait sur le critère de puissance dissipée qui ne doit pas dépasser une certaine puissance maximale admissible, il faut que :

$$\frac{U^2}{R} \leq P_{adm} \quad (II.103)$$

II.6.3. Schéma équivalent d'un circuit magnétique

Le circuit magnétique du relais est représenté par son schéma équivalent dans la figure suivante. [13]

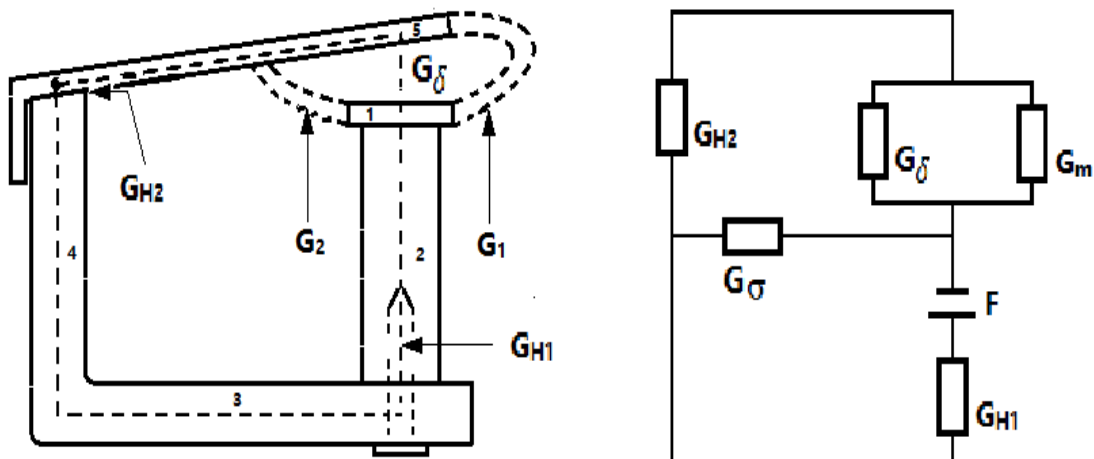


Fig. II.13 Schéma équivalent du circuit magnétique.

G_m : Permeance due aux fuites dans l'entrefer

G_{H1} : Permeance due aux fuites dans le circuit magnétique

G_{H2} : Permeance due à l'entrefer entre l'armature mobile et l'armature fixe

G_δ : Permeance d'entrefer

G_σ : Permeance due à la fuite entre le noyau et l'armature fixe

F : Force magnétomotrice fmm

II.6.4. Permeances**a. Permeance d'entrefer**

La permeance d'entrefer est donnée par

$$G_{\delta} = \frac{2\pi * \mu_0 * l_{am}}{\delta} * (l_{am} - \sqrt{R_1 * R_2}) \quad (\text{II. 104})$$

Avec

$$R_1 = C - \frac{d_e}{2} \quad (\text{II. 105})$$

$$R_2 = C + \frac{d_e}{2} \quad (\text{II. 106})$$

b. Permeance due aux fuites dans l'entrefer

La permeance due aux fuites dans l'entrefer est donnée par

$$G_m = G_1 + G_2 \quad (\text{II. 107})$$

$$G_1 = 0.58 * \left(5.14 * \frac{d_e}{2} + 1.57 * \delta \right) * \mu_0 \quad (\text{II. 108})$$

$$G_2 = 2 * \Delta e * \mu_0 * \left[1 + \frac{\frac{2d_e}{2}}{\sqrt{\left(\frac{\Delta e}{2} + R_1 * tg\alpha\right) \left(\frac{\Delta e}{2} + R_2 * tg\alpha\right)}} \right] \quad (\text{II. 109})$$

Avec

$$\alpha = \frac{57.4 * \delta}{l_2} \quad (\text{II. 110})$$

Et

$$l_2 = l_{am} + \frac{d_e}{2} \quad (\text{II. 111})$$

c. Permeance due aux fuites dans le circuit magnétique

La permeance due aux fuites dans le circuit magnétique est donnée par

$$G_{H1} = G_2 + \frac{G'_3 * G'_1}{G'_3 + G'_1} \quad (\text{II. 112})$$

Tel que

$$G'_1 = \frac{\pi * dv * h_f * \mu_0}{\Delta_5} \quad (\text{II. 113})$$

$$G'_2 = \frac{\pi * (r_n^2 - r_v^2) * \mu_0}{\Delta_6} \quad (\text{II. 114})$$

$$G'_3 = \frac{\pi * dv * h_v * \mu_0}{\Delta_4} \quad (\text{II. 115})$$

Avec

$$r_v = \frac{dv}{2} \quad (\text{II. 116})$$

Où dv est le diamètre de la vis, Δ_4 est la profondeur du filet et h_v est la hauteur de la vis, Δ_5 et Δ_6 sont des dimensions de vis.

d. Permeance due à l'entrefer entre l'armature mobile et celle fixe

La permeance due à l'entrefer entre l'armature mobile et celle fixe est donnée par

$$G_{H2} = G''_3 + G'_4 \quad (\text{II. 117})$$

Tel que

$$G''_3 = \frac{\mu_0 * b_{am}}{\alpha 1} * \ln \frac{R'_2}{R'_1} \quad (\text{II. 118})$$

$$G'_4 = 0.52 * \mu_0 * b_{am} \quad (\text{II. 119})$$

Avec

$$R'_1 = \frac{\Delta H}{\alpha 1} \quad (\text{II. 120})$$

$$\alpha 1 = \frac{\delta}{l_{am}} \quad (\text{II. 121})$$

$$R'_2 = R'_1 + h_f \quad (\text{II. 122})$$

e. Permeance due à la fuite entre le noyau et l'armature fixe

La permeance due à la fuite entre le noyau et l'armature fixe est donnée par

$$G_{\sigma} = \frac{2\pi * \mu_0 * b_{am}}{\left(\ln \frac{c + \sqrt{c^2 + r_n^2}}{r_n}\right)} \quad (\text{II. 123})$$

II.6.5. Coefficients des fuites

a. Coefficient de fuite de l'entrefer

Le coefficient de fuite de l'entrefer est donné par

$$\sigma_{\delta} = \frac{G_{\delta} + G_m}{G_{\delta}} \quad (\text{II. 124})$$

b. Coefficient de fuite du système

Le coefficient de fuite du système est donné par

$$\sigma_s = \frac{G_{\delta} + G_m + G_{\sigma}}{G_{\delta}} \quad (\text{II. 125})$$

II.6.6. Forces magnétomotrices

Pour notre cas on adopte la méthode de calcul direct, on connaît le flux utile dans l'entrefer ϕ_{δ} qui crée la force portant F_{δ} et on détermine la *fmm* de la bobine.

II.6.7. Force d'attraction

La force d'attraction qui s'exerce entre l'armature fixe et l'armature mobile est donnée par

$$P_{em} = 5.1 * F_{\delta}^2 * \frac{dG_{\delta}}{d\delta} \quad (\text{II. 126})$$

Avec

$$F_{\delta} = \frac{G_{\delta}}{\phi_{\delta}} \quad (\text{II. 127})$$

Cette expression dérive de la formule de maxwell suivante

$$P_{em} = \frac{B_{\delta}^2 * s}{2 * \mu_0} \quad (\text{II. 128})$$

II.6.8. Etablissement du courant dans la bobine du relais

Dans le circuit de la bobine soumit à une tension E donnée par

$$U = R * i + L * \frac{di}{dt} \quad (\text{II. 129})$$

La solution de cette dernière équation peut être écrite sous la forme suivante

$$i = \frac{U}{R} * \left(1 - e^{-\frac{R}{L} * t}\right) \quad (\text{II. 130})$$

(**Fig. II.14**) montre l'allure de la variation ou l'établissement du courant i . D'abord l'armature étant à l'appel, en supposant l'inductance indépendante du temps. On a alors une montée en courant. Lorsque i augmente, le champ magnétique augmente jusqu'à la saturation (**courbe I**).

Le courant a augmenté jusqu'à créer une force suffisante pour vaincre l'effort appliqué à l'armature mobile ou sa propre inertie et celle-ci est rapidement amenée à la position de collage.

Ensuite, le circuit magnétique se referme, l'inductance augmente rapidement. Les variations de flux dans le temps sont si importantes que la force électromotrice ainsi engendré dans la bobine provoque une diminution du courant (**courbe II**).

Enfin, lorsque le circuit magnétique est fermé on se retrouve avec une inductance à peu près constante et on assiste à une nouvelle montée en courant mais moins rapide (**courbe III**).

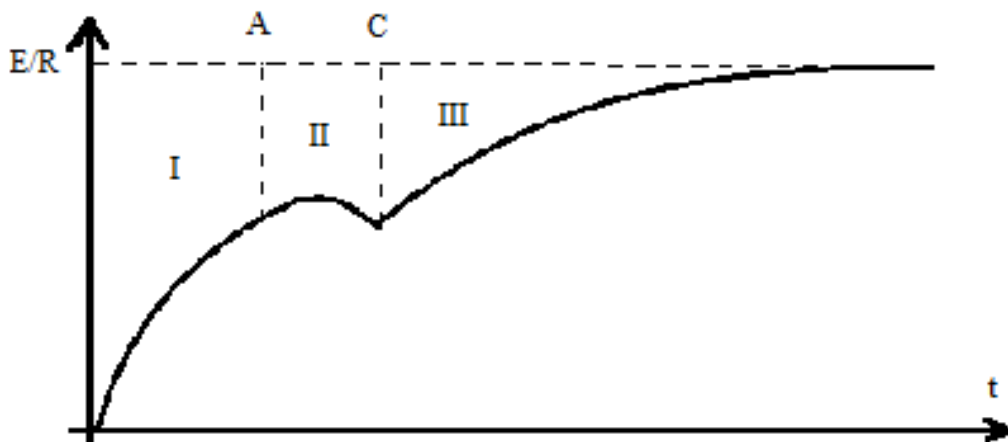


Fig. II.14 Etablissement du courant dans la bobine du relais.

Où A est la position de départ et C est la position de collage.

II.6.8.1. **Temps de réponses lors de la mise sous tension**

(Fig. II.15) représente clairement les différentes durées des phases de fermeture du relais ainsi que le déplacement δ de l'armature mobile sur la même échelle de temps. Ces durées peuvent être définies par

- Durée du retard de réaction, (t_{11}) : C'est l'intervalle de temps entre l'instant de la fermeture du circuit d'excitation et le début du mouvement de l'armature mobile.
- Durée de mouvement, (t_{12}) : C'est l'intervalle de temps compris entre le début du mouvement de l'armature quittant sa position de départ et la fin de la course.
- Durée d'attraction, (t_1) : C'est la somme de la durée du retard de réaction et de la durée du mouvement.

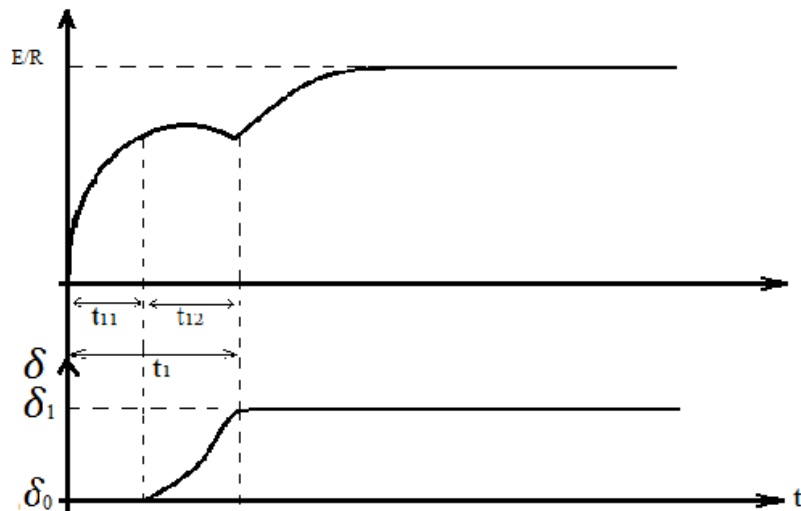


Fig. II.15 Temps de réponse lors de la mise sous tension.

II.6.8.2. **Temps de réponse lors de la coupure du courant**

De même (Fig. II.16) représente les différentes durées des phases d'ouverture du relais.

Elles sont définies comme ci-dessous

- Durée du retard à la retombée, (t_{21}) : C'est l'intervalle de temps compris entre l'instant de coupure du circuit d'excitation et le début du mouvement de l'armature.
- Durée de retour, (t_{22}) : C'est l'intervalle de temps compris entre le début du mouvement et celle-ci est revenue à son point de départ.
- Durée de rappel, (t_2) : C'est la somme de la durée du retard à la retombée et de la durée du retour.

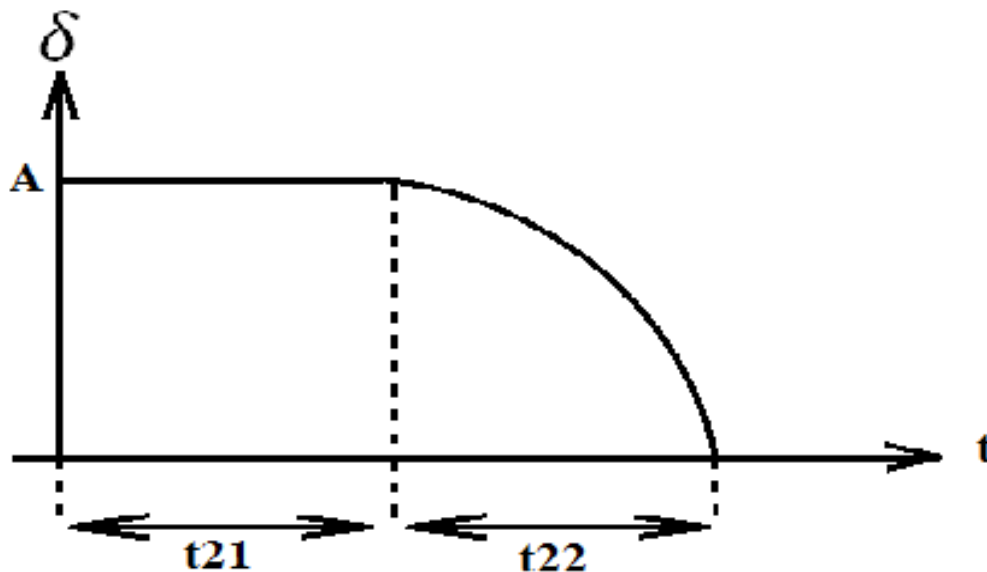


Fig. II.16 Temps de réponse lors de la coupure du courant.

II.6.8.3. Fonctionnement d'un relais à courant continu

Alimenté sous tension constant étudions la variation de l'intensité à la fermeture et à l'ouverture de l'armature mobile.

1. Fermeture : Après fermeture du circuit, le courant croît d'abord rapidement de 0 à I_f sans que l'armature bouge. Le courant I_f étant suffisant pour que l'armature soit attirée, mais la réduction de l'entrefer produit une diminution de la reluctance du circuit magnétique, d'où une augmentation de l'inductance (celle-ci étant inversement proportionnelle à la reluctance), le courant cesse alors de croître pendant un court instant.

Quand la fermeture est terminée, le courant augmente de nouveau mais moins rapidement, car l'inductance est plus élevée, et il se stabilise à sa valeur de régime I_n supérieur à I_f .

2. Appareil fermé : I_n est supérieur à l'intensité I_f nécessaire pour fermer l'armature mobile.
3. Ouverture : A l'ouverture, le courant décroît rapidement, l'armature est libérée et s'ouvre sous l'action des ressorts de rappel.

II.6.8.4. Détermination des temps

a. Détermination du temps de fermeture

Le temps de fermeture est donné par

$$t_1 = t_{11} + t_{12} \quad (\text{II. 131})$$

L'expression de t_{11} est donné par

$$t_{11} = (T_e + T_f) * \ln \frac{I_n}{I_n - I_d} \quad (\text{II. 132})$$

Où T_e est la constante du temps de la bobine du relais qui prend la forme

$$T_e = \frac{L_e}{R} \quad (\text{II. 133})$$

Avec

$$T_e + T_f = \beta * T_e \quad (\text{II. 134})$$

$$L_e = N^2 * G_\delta * \sigma_\delta \quad (\text{II. 135})$$

Et

$$G_m + G_\delta = G_\delta * \sigma_\delta \quad (\text{II. 136})$$

Donc

$$L_e = N^2 * (G_m + G_\delta) \quad (\text{II. 137})$$

Le courant I_n est exprimé par

$$I_n = \frac{U_n}{R} \quad (\text{II. 138})$$

De même, le courant I_d est donné par

$$I_d = \frac{Fm}{N} \quad (\text{II. 139})$$

La valeur de t_{12} est donnée par

$$t_{12} = \sqrt{\frac{2g_m * \delta'}{(P_{em} - P_m) * g}} \quad (\text{II. 140})$$

Avec

$$\delta' = \delta_i - \delta_o \quad (\text{II. 141})$$

L'expression de g_m sera donc donnée par

$$g_m = h_m * l_{am} * b_m * \gamma * s * 10^{-3} \text{ Kgf} \quad (\text{II. 142})$$

Où γ est le poids spécifique de l'acier électrotechnique de type E.

Alors que la quantité $P_{em} - P_m$ peut-être écrite de la façon suivante

$$P_{em} - P_m = \frac{E_P * E_\delta * \sum_1^n S_k}{\delta_i - \delta_o} \quad (\text{II. 143})$$

Où E_P est l'échelle de P , E_δ est l'échelle de δ et $\sum_1^n S_k$ c'est la différence entre la caractéristique électromécanique et la caractéristique mécanique.

b. Détermination du temps d'ouverture

Le temps d'ouverture est donné par

$$t_2 = t_{21} + t_{22} \quad (\text{II. 144})$$

La durée t_{21} est donnée par

$$t_{21} = (T_e + T_f) * \ln \frac{I_n}{I_{dec}} \quad (\text{II. 145})$$

Où I_{dec} est le courant qui correspond à la fmm de déclanchement, il est donné par

$$I_{dec} = \frac{F_{dec}}{N} \quad (\text{II. 146})$$

Et F_{dec} c'est la fmm que correspond à l'intersection de la caractéristique mécanique et la caractéristique électromécanique.

La durée t_{22} est donnée par

$$t_{22} = \sqrt{\frac{2 * g_m * \delta'}{g * P_{m \text{ moy}}}} \quad (\text{II. 147})$$

II.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une description théorique complète du relais menant éventuellement à son dimensionnement. Le chapitre suivant fera l'objet des calculs des différents éléments du relais et ses caractéristiques.

Chapitre III

**Calcul des différents constituants du relais
électromagnétique**

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous effectuons et présentons tous les calculs nécessaires, tout en choisissant les valeurs appropriées pour le dimensionnement du relais, y compris le calcul du circuit magnétique, de la bobine, du ressort. En fin nous terminerons avec le calcul des différents temps de notre dispositif de protection, à travers les lois du deuxième chapitre.

III.2. Calcul des contacts

a. Résistance du contact

- Tension du contact : $U_c = 48 V$
- Courant qui traverse le contact : $I_c = 2.5 A$
- Matériaux de contact : Ag (argent)
- Forme des contacts : contact ponctuel (sphère/sphère)
- Diamètre de contact : $3 mm$; entre-gain : $0.5 mm$

Le diamètre de contact et l'entre-gain, ces deux grandeurs sont choisies suivant la valeur du courant I_c , d'après le tableau ci-dessous.

Tab. III.1 Valeurs du diamètre du contact et de l'entre-gain suivant le courant I_c .

Courant commué I_c [A]	Diamètre du contact [mm]	Entre-gain [mm]
2	1 ÷ 2	0.2 ÷ 0.4
2 ÷ 5	2 ÷ 4	0.2 ÷ 0.7
5 ÷ 10	3 ÷ 5	0.7 ÷ 1.3
10 ÷ 20	5 ÷ 8	1.3 ÷ 1.6

Tab. III.2 Valeur du coefficient a et matériau correspondant.

Nature du matériau	a
Ag	0.06
Cu	0.08 ÷ 0.14

Tab. III.3 Valeur du coefficient b selon la forme géométrique des deux contacts.

Forme de contact	b
Plan (plan/plan)	1.0
Ponctuel (sphère/sphère)	0.5

Pour : contact (sphère/sphère), $b = 0.5$

Donc la résistance est égale à

$$R_c = \frac{0.06}{30^{(0.5)}}$$

$$R_c = 10.9544m \Omega$$

b. Chute de tension équivalente

La chute de tension équivalente est égale à

$$U_c = (0.0109544) * 2.5$$

$$U_c = 27.386mV$$

c. Surélévation de la température

La surélévation de la température est égale à

$$\Delta\theta = \frac{(0.027386)^2}{8 * 4.18 * 1.67 * 10^{-6}}$$

$$\Delta\theta = 13.429 \text{ } ^\circ C$$

Pour A_g : $\lambda_T = 4.18 W/cm \text{ } ^\circ K$

On remarque que $\Delta\theta$ est assez faible, ceci est un effet positif pour la protection des contacts du relais.

d. Expression de la caractéristique de l'arc

Pour l'argent comme matériau de contact on a

$$a = 14.9 \quad b = 3.64 \quad c = 19.01 \quad d = 11.36$$

La caractéristique de l'arc est donnée par

$$U_a = 14.9 + 3.64 * \Delta_{12} + \frac{(19.01 * \Delta_{12} + 11.36)}{I_a}$$

En reportant ces valeurs dans l'expression empirique de la caractéristique, on trouve

$$U_a = 16.36 + \frac{18.96}{I_a}$$

III.3. Calcul des ressorts

Les valeurs nécessaires pour ce calcul, sont regroupées dans (**Tab. III.4**).

Tab. III.4 Valeurs numériques pour le calcul des ressorts.

Grandeur	Valeur numérique
$L_a = (30 \div 45)mm$	45 mm
$b = (4 \div 6) mm$	4 mm
$f = (0.7 \div 1.5) mm$	0.7 mm
M_Y	$12 * 10^6 kg/mm^2$
P_c	30gf
$L_b = (30 \div 45)mm$	35 mm
$P_b = (10 \div 15)gf$	13gf

a. Epaisseur du ressort

Les ressorts (1) et (2) sont identiques en nature et en dimensions, donc l'épaisseur du ressort est égale à

$$h_1 = h_2 = \sqrt[3]{\frac{4 * 30 * 45^3}{12 * 10^6 * 4 * 0.7}}$$

$$h_1 = h_2 = 0.687mm$$

b. Constante élastique du ressort

La constante élastique du ressort est égal à

$$j_1 = \frac{4 * (0.687)^3}{12}$$

$$j_1 = j_2 = 0.108 \text{ mm}^4$$

Donc

$$c_1 = \frac{3 * 12 * 0.108 * 10^6}{35^3}$$

$$c_1 = 90.68 \text{ gf/mm}$$

Et

$$c_2 = \frac{3 * 12 * 0.108 * 10^6}{45^3}$$

$$c_2 = 42.66 \text{ gf/mm}$$

c. Flèches

Les flèches sont égales à

$$f_1 = \frac{13 * 35^3}{6 * 12 * 10^6 * 0.108} * (3 * 45 - 35)$$

$$f_1 = 0.20479 \text{ mm}$$

Et

$$f_2 = \frac{13 * 35^3}{3 * 12 * 10^6 * 0.108}$$

$$f_2 = 0.143 \text{ mm}$$

III.4. Calcul de la caractéristique mécanique

Les valeurs nécessaires pour ce calcul, sont regroupées dans (**Tab. III.5**).

Tab. III.5 Valeurs numériques pour le calcul de la caractéristique mécanique.

Grandeur	Valeur numérique
K_1	0.7
K_2	1.428
Δ_{12}	0.5 mm
$K_a = (0.9 \div 1.3)$	1.2
$P_s = (10 \div 20) gf$	$P_s = 16 gf$
$\delta_0 = (0.1 \div 0.5) mm$	$\delta_0 = 0.2 mm$

a. Déplacement du ressort 1

Le déplacement du ressort 1 est égal à

$$F_{b1} = \frac{0.5}{1.428}$$

$$F_{b1} = 0.35 \text{ mm}$$

b. Déplacement de l'armature mobile

Le déplacement de l'armature mobile est égal à

$$\delta_1 = \frac{0.35}{1.2}$$

$$\delta_1 = 0.29 \text{ mm}$$

c. Déplacement supplémentaire du ressort 1

Le déplacement supplémentaire du ressort 1 est égal

$$F_{22} = \frac{30 - 16}{1.2}$$

$$F_{22} = 0.328 \text{ mm}$$

d. Déplacement de l'armature mobile jusqu'à la courbure des deux ressorts

Le déplacement de l'armature mobile jusqu'à la courbure des deux ressorts est égal

$$\delta_2 = \frac{0.328}{1.428 * 1.2}$$

$$\delta_2 = 0.191 \text{ mm}$$

e. Forces agissantes sur l'armature mobile

Les forces agissantes sont égales à

$$P_{0\delta} = 1.2 * 13$$

$$P_{0\delta} = 15.6 \text{ gf}$$

Et

$$P_{1\delta} = 1.2 * \left(13 + \frac{0.5 * 90.68}{1.428}\right)$$

$$P_{1\delta} = 53.7 \text{ gf}$$

Et

$$P_{2\delta} = 53.7 + 16 * \frac{68}{0.7}$$

$$P_{2\delta} = 81.128 \text{ gf}$$

Et

$$P_{3\delta} = 81.128 + \frac{0.328 * 42.66 * 1.2}{1.428}$$

$$P_{3\delta} = 92.9 \text{ gf}$$

L'entrefer total sera égal à

$$\delta_i = \delta = 0.2 + 0.29 + 0.191 = 0.681 \text{ mm}$$

$$\delta_i = 0.681 \text{ mm}$$

Explication de la caractéristique mécanique : le point A correspond à la force de rappel $P_{0\delta}$ due au poids de l'armature et la réaction du ressort avant la fermeture $\delta = \delta_i$.

Après l'excitation de la bobine du relais une force d'attraction est exercé sur l'armature mobile qui a son tour exerce une force sur la lame (1) du ressort d'où la partie AB qui traduit l'évaluation de la force de rappel du ressort (lame 1) en fonction de l'entrefer, jusqu'au contact sans pression entre les pastilles.

Pour mettre en mouvement le deuxième ressort (lame 2) on doit vaincre la force de rappel persistant d'où la nécessité d'une force supplémentaire. En effet, cette force ne dépend pas beaucoup de l'entrefer, ce qui explique le saut de la force de rappel (traçons BC).

La troisième partie de la caractéristique (traçons CD) correspond à la dépendance de la force de rappel en fonction de l'entrefer lors de la contribution de la réaction du deuxième lame qui subira une courbure jusqu'à ce que $\delta = \delta_0$. D'où la création d'une pression entre les deux contacts.

Avec le tableau ci-dessous, on trace la caractéristique mécanique, (**Fig. III.1**)

Tab. III.6 : Valeurs nécessaires pour le traçage de la caractéristique mécanique.

P_m [gf]	92.9	8.128	53.7	15.6
δ [mm]	0.2	0.391	0.391	0.681

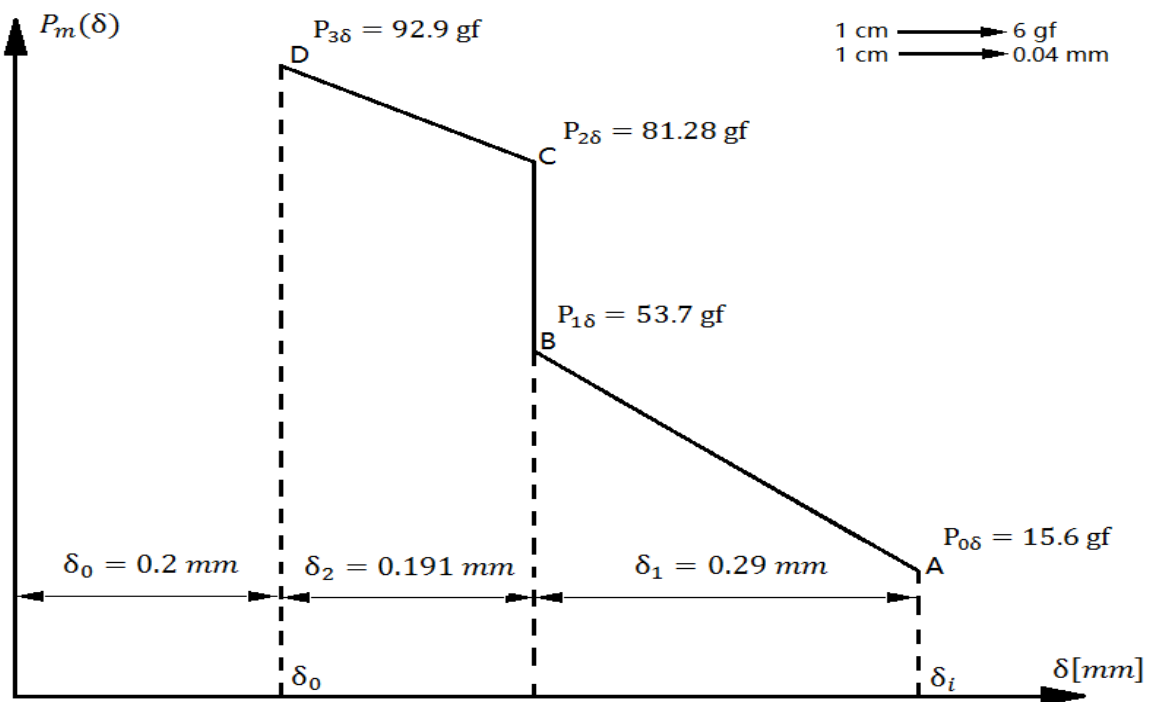


Fig. III.1 Caractéristique mécanique en fonction de δ .

III.5. Circuit magnétique du relais

III.5.1. Calcul du circuit magnétique

Les valeurs nécessaires pour le calcul du circuit magnétique, sont regroupées dans (Tab. III.7).

Tab. III.7 Valeurs numériques pour le calcul du circuit magnétique.

Grandeur	Valeur numérique
$K_{ré} = (2 \div 3)$	2.5
$P_c = P_{2\delta}$ (Au point C)	81.128 gf
$B_\delta = (0.1 \div 0.4) * 10^{-4} \text{ wb/cm}^2$	$0.2 * 10^{-4} \text{ wb/cm}^2$
P_{ac}	0.20282 Kgf
K_s	1.5
$B_n = (0.7 \div 1) * 10^{-4} \text{ wb/cm}^2$	$0.8 * 10^{-4} \text{ wb/cm}^2$

a. Section d'épanouissement

La section d'épanouissement est égal à

$$S_e = \frac{0.20282 * 10^{-8}}{4.06(0.2 * 10^{-4})^2}$$

$$S_e = 1.248 \text{ cm}^2$$

Le diamètre d'épanouissement est égal à

$$d_e = \sqrt{\frac{4 * 1.248}{\pi}}$$

$$d_e = 1.26 \text{ cm}$$

b. Epaisseur d'épanouissement

On prend comme valeur $\Delta e = 0.4 \text{ cm}$

c. Section du noyau

La section du noyau est égal à

$$S_n = \frac{0.2 * 10^{-4} * 1.5 * 1.248}{0.8 * 10^{-4}}$$

$$S_n = 0.462 \text{ cm}^2$$

Le diamètre du noyau est égal à

$$d_n = \sqrt{\frac{4 * 0.468}{\pi}}$$

$$d_n = 0.772 \text{ cm}$$

d. Section de l'armature fixe

On choisit : $S_f = 1.5 * S_n$

$$S_f = 1.5 * 0.468$$

$$S_f = 0.702 \text{ cm}^2$$

e. Largeur de l'armature fixe

On choisit : $D_{ext} = 3.505 * d_n$

$$D_{ext} = 3.505 * 0.772$$

$$D_{ext} = 2.706 \text{ cm}$$

On choisit : $b_f = 1.1411 * D_{ext}$

$$b_f = 1.1411 * 2.706$$

$$b_f = 3.088 \text{ cm}$$

f. Epaisseur de l'armature fixe

L'épaisseur de l'armature fixe est égal à

$$h_f = \frac{0.702}{3.088}$$

$$h_f = 0.227 \text{ cm}$$

g. Longueur du noyau

On choisit : $l_n = 10 * d_n$

$$l_n = 10 * 0.772$$

$$l_n = 7.72 \text{ cm}$$

h. Longueur de la deuxième partie l'armature fixe

La longueur de la deuxième partie l'armature fixe est égal à

$$l_{f2} = 7.72 + 0.4$$

$$l_{f2} = 8.12 \text{ cm}$$

i. Section de l'armature mobile

On choisit $S_{am} = 0.9 * S_n$

$$S_{am} = 0.9 * 0.468$$

$$S_{am} = 0.421 \text{ cm}^2$$

j. Largeur de l'armature mobile

La largeur de l'armature mobile est égal à

$$b_m = b_f = 3.088 \text{ cm}$$

k. Epaisseur de l'armature mobile

L'épaisseur de l'armature mobile est égal à

$$h_{am} = \frac{0.421}{3.088}$$

$$h_{am} = 0.136 \text{ cm}$$

III.5.2. Calcul de la bobine

Les valeurs nécessaires pour ce calcul, sont regroupées dans (**Tab. III.8**).

Tab. III.8 Valeurs numériques pour le calcul de la bobine.

Grandeur	Valeur numérique
$\Delta_1 = (0.1 \div 0.2) \text{ cm}$	0.2 cm
$\Delta_2 = (0.1 \div 0.2) \text{ cm}$	0.15 cm
$\Delta_3 = (0.5 \div 0.15) \text{ cm}$	0.15 cm
h_0	0.491 cm
F	145 At
U	127 V

a. Diamètre intérieur de la bobine

Le diamètre intérieur de la bobine est égal à

$$D_{int} = 0.772 + 0.2 * 2$$

$$D_{int} = 1.172 \text{ cm}$$

b. Diamètre extérieur de la bobine

Nous devons d'abord calculer la hauteur de la bobine, on choisit, $h_b = 0.8 * d_n$

$$h_b = 0.8 * 0.772$$

$$h_b = 0.617 \text{ cm}$$

Le diamètre extérieur de la bobine est égal à

$$D_{ext} = 1.172 + 2 * 0.617 + 2 * 0.15$$

$$D_{ext} = 2.706 \text{ cm}$$

c. Longueur de la bobine

On choisit : $l_b = l_n - 0.72 \text{ cm}$

$$l_b = 7.72 - 0.72$$

$$l_b = 7 \text{ cm}$$

d. Distance entre l'axe du noyau et la deuxième partie de l'armature fixe

La distance entre l'axe du noyau et la deuxième partie de l'armature fixe est égal à

$$C = \frac{2.706}{2} + 0.491$$

$$C = 1.844 \text{ cm}$$

e. Longueur de première partie de l'armature fixe

La longueur de première partie de l'armature fixe est égal à

$$l_{f1} = 1.844 + \frac{0.227}{2}$$

$$l_{f1} = 1.957 \text{ cm}$$

f. Longueur de l'armature mobile

La longueur de l'armature mobile est égal à

$$l_m = 1.844 + 0.227$$

$$l_m = 2.071 \text{ cm}$$

g. Longueur moyenne d'une spire

La longueur moyenne d'une spire est égal à

$$l_{moy} = 3.14 * \frac{1.172 + 2.706}{2}$$

$$l_{moy} = 60.91 \text{ mm}$$

h. Section du fil de la bobine

La section du fil de la bobine est égal à

$$s = \frac{23.4 * 10^{-3} * 60.91 * 145 * 10^{-3}}{127}$$

Avec la résistivité du cuivre à 105 °C est donnée comme $\rho = 23.4 * 10^{-3} (\Omega * mm^2)/m$.

$$s = 0.001627 \text{ mm}^2$$

i. Diamètre du fil

Le diamètre du fil est égal à

$$d = \sqrt{\frac{4 * 0.001627}{\pi}}$$

$$d = 0.0455 \text{ mm}$$

j. Coefficient de remplissage

Pour $d = 0.0455 \text{ mm}$ on a $K_r = 0.401$ (**Tab. III.9**) voir (**Annexe.5**).

k. Nombre de spires

Le nombre de spires est égal à

$$N = \frac{4 * 0.401 * 6.17 * 70}{\pi * (0.0455)^2}$$

$$N = 106516 \text{ spires}$$

l. Résistance du bobinage

La résistance de la bobine est égal à

$$R = \frac{4 * 23.4 * 10^{-3} * 60.91 * 106516 * 10^{-3}}{\pi * (0.0455)^2}$$

$$R = 93310 \Omega$$

m. Courant d'alimentation

Le courant d'alimentation est égal à

$$I = \frac{127}{93310}$$

$$I = 1.361 \text{ mA}$$

n. Puissance dissipée

La puissance dissipée est égale à

$$P = \frac{127^2}{93310}$$

$$P = 172.8 \text{ mW}$$

o. Surface latérale de la bobine

La surface latérale de la bobine est égale à

$$S_{lat} = \pi * (2.706 + 1.172) * 7$$

$$S_{lat} = 85.2816 \text{ cm}^2$$

Le coefficient σ_0 est donnée suivant le rapport L_b/D_{ext} . Comme suit

$$L_b/D_{ext} < 1 \Rightarrow \sigma_0 = 8 \text{ cm}^2/W$$

$$L_b/D_{ext} = 1 \Rightarrow \sigma_0 = 10 \text{ cm}^2/W$$

$$L_b/D_{ext} > 1 \Rightarrow \sigma_0 = 12 \text{ cm}^2/W$$

$$\frac{L_b}{D_{ext}} = \frac{7}{2.706} = 2.58 > 1$$

Donc

$$\sigma_0 = 12 \text{ cm}^2/W$$

p. Puissance admissible

La puissance admissible est égal à

$$P_{adm} = \frac{85.2816}{12}$$

$$P_{adm} = 7.106 \text{ W}$$

La puissance dissipée $P = \frac{u^2}{R}$ ne doit pas dépasser une certaine puissance maximale admissible. Donc pour que le fonctionnement reste dans les limites prescrites il faut que

$$P = 0.1728 \text{ W} < P_{adm} = 7.106 \text{ W}$$

Donc les résultats adoptés jusqu'ici sont acceptables.

III.5.3. Calcul des permeances

En choisissant $\delta = 0.0681 \text{ cm}$, les valeurs nécessaires pour le calcul des permeances sont regroupées dans le tableau (**Tab. III.10**).

Tab. III.10 Valeurs numériques pour le calcul des permeances.

Grandeur	Valeur numérique
μ_0	$1.256 * 10^{-8} \text{ H/cm}$
R_1	1.214 cm
R_2	2.474 cm
l_2	2.701 cm
α	$21.25 * \delta$
dv	0.2 cm
r_v	0.1 cm
r_n	0.386 cm
$h_v = (1 \div 1.5) \text{ cm}$	1.3 cm
$\Delta_4 = (0.008 \div 0.012) \text{ cm}$	0.012 cm
Δ_5	0.02 cm
Δ_6	0.006 cm
ΔH	0.008
α_1	0.033
R'_1	0.242 cm
R'_2	0.469 cm

a. Permeance d'entrefer

La permeance d'entrefer est égal à

$$G_{\delta} = \frac{(2\pi * 1.256 * 10^{-8} * 2.071)}{0.0681} * (2.071 - \sqrt{1.214 * 2.474})$$

$$G_{\delta} = 81.108 * 10^{-8} \text{ wb/A}$$

b. Permeance due aux fuites dans l'entrefer

Calcul de G_1

$$G_1 = (2.36 + 1.143 * 0.0681) * 10^{-8} \text{ wb/A}$$

$$G_1 = 2.44 * 10^{-8} \text{ wb/A}$$

Calcul de G_2

$$G_2 = \left[1.005 + \frac{1.2666}{\sqrt{(0.2 + 1.214 * \text{tg}(21.25 * 0.0681)) * (0.2 + 2.474 * \text{tg}(21.25 * 0.0681))}} \right] * 10^{-8}$$

$$G_2 = 6.13 * 10^{-8} \text{ wb/A}$$

Calcul de G_m

$$G_m = (2.44 + 6.13) * 10^{-8}$$

$$G_m = 8.57 * 10^{-8} \text{ wb/A}$$

c. Permeance due aux fuites dans le circuit magnétique

Calcul de G'_1

$$G'_1 = \frac{\pi * 0.2 * 0.227 * 1.256 * 10^{-8}}{0.02}$$

$$G'_1 = 8.957 * 10^{-8} \text{ [wb/A]}$$

Calcul de G'_2

$$G'_2 = \frac{\pi * [(0.386)^2 - (0.1)^2] * 1.256 * 10^{-8}}{0.006}$$

$$G'_2 = 91.409 * 10^{-8} \text{ [wb/A]}$$

Calcul de G'_3

$$G'_3 = \frac{\pi * (0.2 * 1.3) * 1.256 * 10^{-8}}{0.012}$$

$$G'_3 = 85.49 * 10^{-8} [wb/A]$$

Calcul de G_{H1}

$$G_{H1} = \left(91.409 + \frac{85.49 * 8.957}{85.49 + 8.957} \right) * 10^{-8}$$

$$G_{H1} = 99.516 * 10^{-8} wb/A$$

d. Permeance due à l'entrefer entre l'armature mobile et celle fixe

Calcul de G'_4

$$G'_4 = 0.52 * 1.256 * 10^{-8} * 3.088$$

$$G'_4 = 2.016 * 10^{-8} [wb/A]$$

Calcul de G''_3

$$G''_3 = \frac{1.256 * 10^{-8} * 3.088}{0.033} * \ln \frac{0.469}{0.242}$$

$$G''_3 = 77.766 * 10^{-8}$$

Calcul de G_{H2}

$$G_{H2} = (77.766 + 2.106) * 10^{-8}$$

$$G_{H2} = 79.782 * 10^{-8} [wb/A]$$

e. Permeance due à la fuite entre le noyau et l'armature fixe

La permeance due à la fuite entre le noyau et l'armature fixe est égal à

$$G_\sigma = \frac{2\pi * 1.256 * 3.088}{\left(\ln \frac{1.844 + \sqrt{1.844^2 + (0.386)^2}}{0.386} \right)}$$

$$G_\sigma = 7.262 * 10^{-8} wb/A$$

On remarque que les expressions précédentes relatives aux permeances dépendent essentiellement de la valeur $\delta = (0.01 \div 0.08) \text{ cm}$, (**Tab. III.11**) voir (**Annexe.6**).

III.5.4. Calcul des coefficients des fuites

a. Coefficient de fuite de l'entrefer

Le coefficient de fuite de l'entrefer est égal à

$$\sigma_{\delta} = \frac{(81.108 + 8.593) * 10^{-8}}{81.108 * 10^{-8}}$$

$$\sigma_{\delta} = 1.1$$

b. Coefficient de fuite du système

Le coefficient de fuite du système est égal à

$$\sigma_s = \frac{(81.108 + 8.593 + 7.262) * 10^{-8}}{81.108 * 10^{-8}}$$

$$\sigma_s = 1.195$$

Tab. III.12 : Valeurs des coefficients de fuites pour différentes valeurs de δ .

δ [cm]	σ_{δ}	σ_s
0.01	1.017	1.030
0.03	1.049	1.089
0.05	1.079	1.145
0.0681	1.106	1.195
0.08	1.122	1.227

III.5.5. Calcul des forces magnétomotrices

Pour notre cas on adapte la méthode de calcul direct, on connaît le flux utile dans l'air ϕ_{δ} qui crée la force portante F_{δ} et on détermine la *fmm*.

La valeur de flux $\phi_{\delta} = 0.14 * 10^{-4}$ wb

Les formes du calcul des forces magnétomotrices sont données dans (**Tab. III.13**) voir (**Annexe.7**), et les calculs de notre cas dans (**Tab. III.14**) voir (**Annexe.8**).

III.5.6. Calcul de la force d'attraction

De la connaissance des valeurs de $dG_{\delta}/d\delta$ et F_{δ} en fonction de δ nous pouvons déterminer les valeurs de P_{em} , (**Tab. III.15**) voir (**Annexe.9**).

III.6. Calcul des temps

Les valeurs nécessaires pour ce calcul, sont regroupées dans (**Tab. III.16**).

Tab. III.16 Valeurs numériques pour le calcul des temps.

Grandeur	Valeur numérique
G_{δ_i}	$81.101 * 10^{-8} \text{ wb/A}$
L_e	10176 H
T_e	0.109 s
$\beta = (1.1 \div 1.3)$	1.1
$T_e + T_f$	0.12 s
I_n	1.361 mA
I_d	1.09 mA
γ	7.8 gf/cm^3
g_m	0.01047 Kgf
$\sum_{K=1}^4 S_K$	129.678 cm^2
$P_e - P_m$	64.704 gf
δ'	0.0481 cm
F_{dec} , (Fig. III.2) voir (Annexe.10)	65.6 AT
I_{dec}	0.6158 mA
g	981 cm/s^2
$P_m \text{ moy}$	60.82 gf

En plus, pour faciliter la tâche de calcul nous avons divisé notre section en quatre parties (**Fig. III.3**) et (**Fig. III.4**) Voir (**Annexe.11**) et (**Annexe.12**).

$$\text{Où : } S_1 = 8.6 * 2.5 + 1.95 * \frac{2.5}{2} = 23.937 \text{ cm}^2$$

$$S_2 = 7.4 * 2.275 + 1.2 * \frac{2.275}{2} = 18.2 \text{ cm}^2$$

$$S_3 = 11.9 * 2.275 + 0.1 * \frac{2.275}{2} = 32.563 \text{ cm}^2$$

$$S_4 = 11.9 * 4.525 + 0.5 * \frac{4.525}{2} = 54.978 \text{ cm}^2$$

III.6.1. Temps de fermeture

Calcul de la durée de retard de réaction t_{11}

$$t_{11} = 0.12 * \ln \frac{1.361}{(1.361 - 1.09)}$$

$$t_{11} = 0.194 \text{ s}$$

Calcul de la durée de mouvement t_{12}

$$t_{12} = \sqrt{\frac{2 * 0.01047 * 0.481}{(64.704) * 981}}$$

$$t_{12} = 0.00398 \text{ s}$$

Calcul du temps de fermeture t_1

$$t_1 = 0.194 + 0.00398$$

$$t_1 = 0.198 \text{ s}$$

III.6.2. Temps d'ouverture

Calcul de la durée de retard à la retombée t_{21}

$$t_{21} = (0.12) * \ln \left(\frac{1.361}{0.6158} \right)$$

$$t_{21} = 0.0951 \text{ s}$$

Calcul de la durée de retour t_{22}

$$t_{22} = \sqrt{\frac{2 * 0.01047 * 0.0481}{9.81 * 60.82}}$$

$$t_{22} = 0.0041 \text{ s}$$

Calcul du temps d'ouverture t_2

$$t_2 = 0.095 + 0.0041$$

$$t_2 = 0.0992 \text{ s}$$

III.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons enfin calculé et présenté les résultats de dimensionnement du relais électromagnétique à courant continu.

Ces calculs sont basés sur un choix arbitraire et peuvent être modifiés en fonction des conditions de fonctionnement et d'emploi. Nous signalons qu'un programme Matlab a été élaboré pour achever ces calculs.

Conclusion générale

Conclusion générale

Notre travail a été réservé au dimensionnement d'un relais électromagnétique classique. Ces types de relais permettent des réalisations importantes, mais ils présentent comme même des inconvénients.

Il y a formation d'arc électrique à l'ouverture ou à la fermeture des contacts, ce qui peut entraîner un danger en atmosphère explosive (mines, raffinerie de pétrole, etc...) d'où la nécessité d'un montage en coffret blindé, de plus il y a détérioration des contacts par choc à chaque fermeture et sensibilité à la poussière.

Pour éviter ces inconvénients on fait appel à un autre type de relais ne présentant ces derniers défauts ils ne comportent aucun organe mobile d'où leur nom de « relais statique ».

Ce travail nous a aidé et renseigné sur la conception de ce type de relais et nous a permis de dévoiler les précautions, les calculs, les matériaux qu'il faut en tenir compte pour la fabrication de ces types de dispositifs.

Notre travail nécessite un développement et une amélioration. Les perspectives qu'on peut suggérer sont

- L'amélioration des caractéristiques du relais (mécanique électromécanique).
- Diminution des temps (temps de fermeture et d'ouverture).
- Diminution de l'échauffement de la bobine.

Bibliographies

- [1] Support de cours, Schémas et Appareillage électrique, Dr Benaired Noredine, 2014.
- [2] Broust Jacques Marie, Appareillages et installations électriques industriels, conception, coordination, mise en œuvre, maintenance-Dunod (2008).
- [3] Support de cours, Schémas et Appareillage électrique, Dr Benameur Afif, 2016-1017.
- [4] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Fusible_\(%C3%A9lectricit%C3%A9\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Fusible_(%C3%A9lectricit%C3%A9)) (27/05/2020 11h).
- [5] https://www.sonelec-musique.com/electronique_theorie_relais.html (23/03/2020 21h).
- [6] B.Saint Jean, Eyrolles, Electrotechnique et machines électriques.
- [7] H.Boyer, Construction du matériel électrique Tome II.
- [8] TEAV, Appareils électrique d'automatisme et de commande, Edition Moseau.
- [9] M.Billier, Delagrave, Machines électriques, Formation professionnelle.
- [10] A.Bianciotto, P.Boye, Delagrave, La construction normalisée en électrotechnique Tome 1.
- [11] Théodore Wildi, avec la collaboration de Gilbert Sybille, Electrotechnique 3^{ème} édition.
- [12] Guy Chateigner, Michel Boës, Daniel Bouix, Jacques Vaillant, Daniel Verkindère, Manuel de génie électrique, Paris, 2006.
- [13] A.Capliez, P.Heiny, Foucher Electricité technologie et schéma Tome 2.
- [14] S.Ovseplan, Méthode de calcul d'un relais électromagnétique.

Annexes

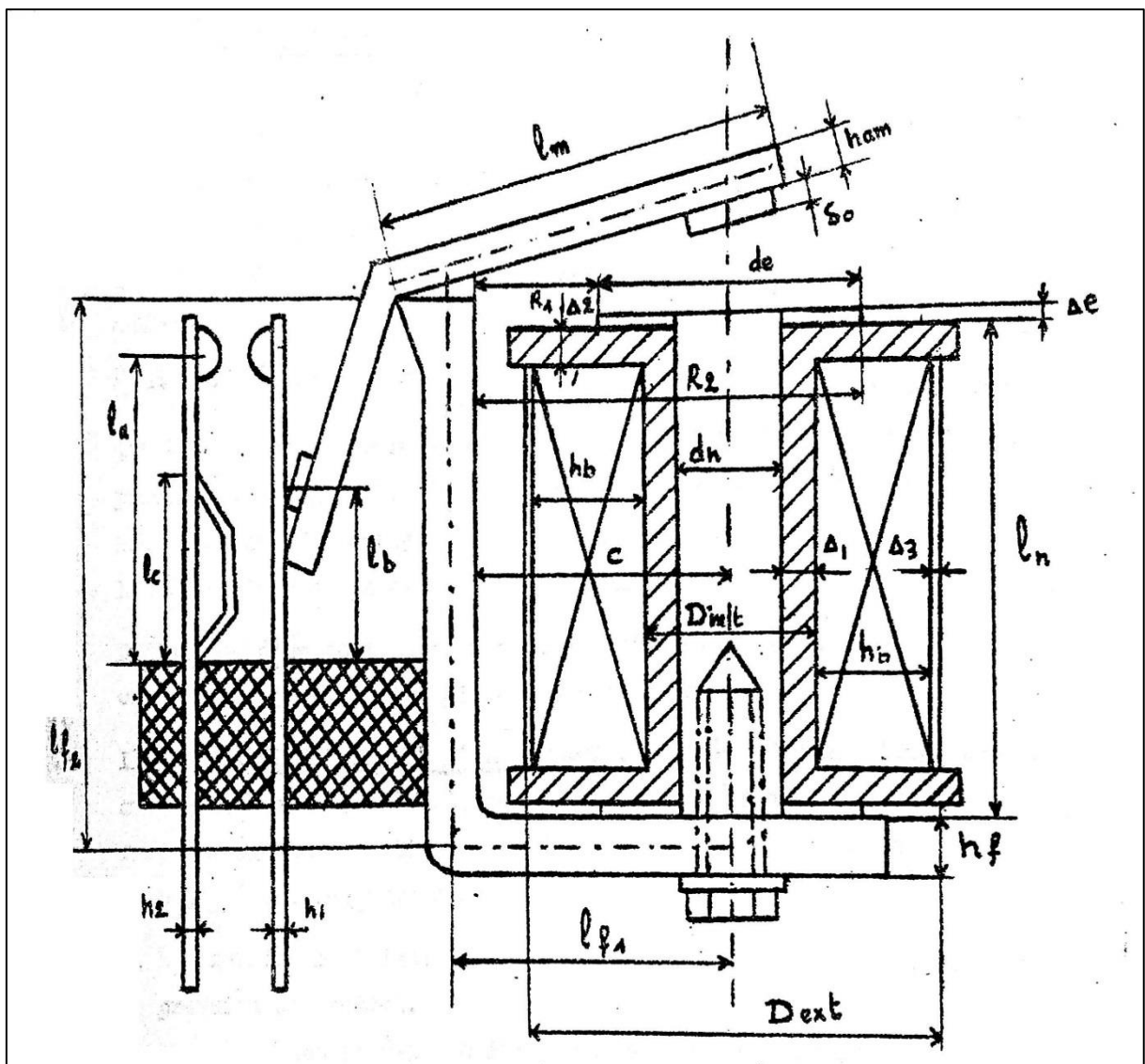
Annexe.1 : Tab. II.1 Différentes caractéristiques des métaux des contacts.

Métaux	Densité	Point de fusion (°)	Conductibilité thermique	Résistivité à (20°)	Résistance à l'oxydation	Dureté brinell	
						Recuit	Écroui
Argent	10.5	960	1	1.59	bonne	27	85
Cuivre	8.9	1083	0.93	1.72	Assez bonne	42	100
Tungstène	19.3	3410	0.31	5.50	passable	280	400
Molybdène	10.2	2620	0.35	5.8	Passable	190	255
Nickel	8.9	1455	0.23	6.80	Bonne	100	210
Or	19.3	1063	0.71	2.10	T. Bonne	25	58
platine	21.5	1773	0.165	10.60	T. Bonne	40	100
Iridium	22.4	2443	0.14	4.90	Bonne	170	350
Palladium	12	1554	0.17	10.60	Bonne	40	100
Rhadium	12.4	1960	0.21	4.20	Bonne	120	260

Annexe.2 : Tab. II.2 Choix les plus courants des métaux pour contacts du relais.

Appareils	Puissance ou (intensité)	Matériaux recommandés	Matériaux possibles
Relais	Faible	Argent	Ag - cad
		Argent cuivre	Ag-Cu-cad-Ni
	Moyenne	Argent cardium	Ag-oxyde de cad
	Forte	Argent - oxyde de cardium	Tungstène -Ag Carbure de tungstène-Ag
	Thermostatiques	Argent cardium	Ag-oxyde de cadmium

Annexe.3 : Fig. II.5 Schéma général du relais en étude.



Annexe.4 : Tab. II.4 Caractéristique d'aimantation de l'acier.

$B * 10^4$ [wb/cm ²]	H [A/cm]	$B * 10^4$ [wb/cm ²]	H [A/cm]
0.10	0.60	0.90	2.00
0.15	0.75	0.95	2.20
0.20	0.80	1.00	2.30
0.25	0.90	1.05	2.60
0.30	1.00	1.10	2.70
0.35	1.10	1.25	3.50
0.40	1.20	1.30	4.00
0.45	1.30	1.35	5.00
0.50	1.35	1.40	5.5
0.55	1.40	1.45	7.00
0.60	1.45	1.50	9.00
0.65	1.50	1.55	13.00
0.70	1.60	1.60	18.00
0.75	1.70	1.65	25.00
0.80	1.75	1.70	40.00
0.85	1.80	1.75	50.00

Annexes

Annexe.5 : Tab. III. 9 Coefficient de remplissage et le diamètre du fil avec isolation en fonction du diamètre de fil sans isolation.

d [mm]	d_i [mm]	K_r	d [mm]	d_i [mm]	K_r
0.02	0.033	0.218	0.16	0.180	0.617
0.03	0.040	0.252	0.17	0.190	0.621
0.04	0.050	0.390	0.18	0.200	0.624
0.05	0.065	0.410	0.19	0.210	0.626
0.06	0.075	0.420	0.20	0.225	0.628
0.07	0.085	0.468	0.21	0.240	0.630
0.08	0.095	0.497	0.23	0.255	0.634
0.09	0.105	0.522	0.25	0.275	0.636
0.10	0.120	0.543	0.27	0.305	0.638
0.11	0.130	0.561	0.29	0.325	0.642
0.12	0.140	0.576	0.31	0.350	0.644
0.13	0.150	0.584	0.33	0.370	0.646
0.14	0.160	0.601	0.35	0.390	0.648
0.15	0.170	0.611	0.38	0.420	0.650

Annexes

Annexe.6 : Tab. III.11 Valeurs des permeances pour différentes valeurs de δ .

δ [cm]	$G_\delta * 10^{-8}$ [wb/A]	$G_1 * 10^{-8}$ [wb/A]	$G_2 * 10^{-8}$ [wb/A]	$G_m * 10^{-8}$ [wb/A]	$G_{H1} * 10^8$ [wb/A]	$G_4' * 10^{-8}$ [wb/A]	$G_3'' * 10^{-8}$ [wb/A]	$G_{H2} * 10^{-8}$ [wb/A]
0.01	552.300	2.371	7.128	9.499	99.516	2.016	103.138	105.154
0.03	184.100	2.394	6.751	9.145	99.516	2.016	92.192	94.208
0.05	110.460	2.417	6.419	8.836	99.516	2.01	83.826	85.842
0.0681	81.108	2.44	6.153	8.593	99.516	2.016	77.766	79.782
0.08	69.037	2.451	5.990	8.441	99.516	2.016	74.307	76.323

Annexe.7 : Tab. III. 13 Forme générale du calcul des forces magnétomotrices.

$\phi_{\delta i} * 10^{-4}$ [Wb]	partie	$B = \phi/s * 10^{-4}$ [wb/cm ²]	H [A/cm]	$F = H * L$ [A]
ϕ_{δ}	1	B_e	H_e	$F_e = H_e * \Delta e$
ϕ_{δ}	2	B_n	H_n	$F_n = (H_n + H'_n) * \frac{l_n}{2}$
$\sigma_s * \phi_{\delta}$		B'_n	H'_n	
$\sigma_s * \phi_{\delta}$	3	B_{f1}	H_{f1}	$F_{f1} = H_{f1} * l_{f1}$
ϕ_{δ}	4	B_{f2}	H_{f2}	$F_{f2} = (H_{f2} + H'_{f2}) * \frac{l_{f2}}{2}$
$\sigma_s * \phi_{\delta}$		B'_{f2}	H'_{f2}	
ϕ_{δ}	5	B_m	H_m	$F_m = H_m * l_m$
ϕ_{δ}	G_{δ}			$F_{\delta} = \frac{\phi_{\delta}}{G_{\delta}}$
$\sigma_s * \phi_{\delta}$	G_{H1}			$F_{H1} = \frac{\sigma_s * \phi_{\delta}}{G_{H1}}$
ϕ_{δ}	G_{H2}			$F_{H2} = \frac{\phi_{\delta}}{G_{H2}}$
				$F_T = \sum F_i = fmm$

Annexes

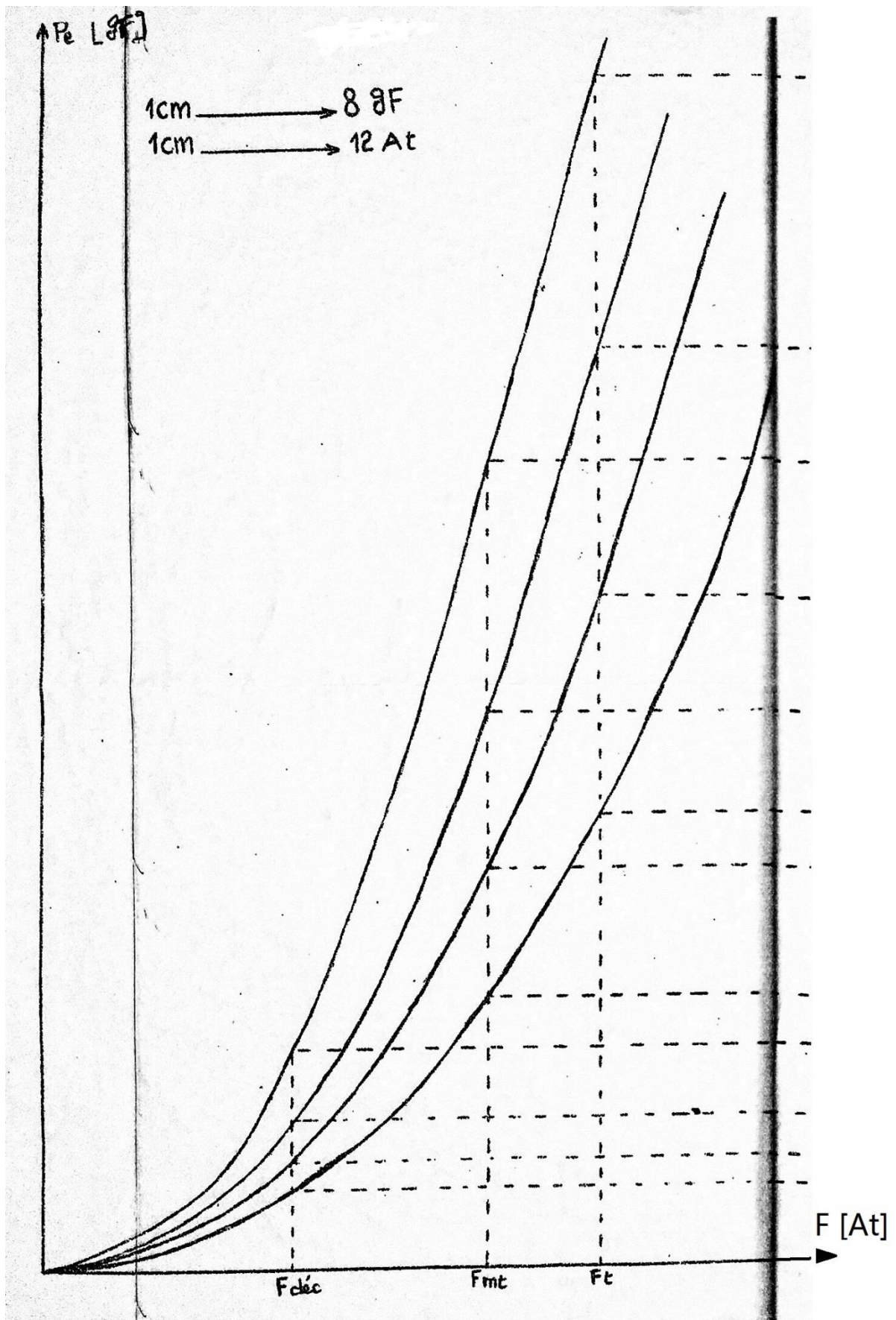
Annexe.8 : Tab. III. 14 Forces magnétomotrices pour $\delta = 0.0861 \text{ cm}$,
 $\phi_{\delta} = 0.14 * 10^{-4} \text{ wb}$.

$\phi_{\delta i}$ [Wb]	partie	$B = \phi/s$ [wb/cm ²]	H [A/cm]	$F = H * L$ [A]
0.14*10 ⁻⁴	1	0.112*10 ⁻⁴	0.63	0.252
0.14*10 ⁻⁴	2	0.299*10 ⁻⁴	1.00	8.144
0.166*10 ⁻⁴		0.355*10 ⁻⁴	1.11	
0.166*10 ⁻⁴	3	0.236*10 ⁻⁴	0.86	1.683
0.14*10 ⁻⁴	4	0.199*10 ⁻⁴	0.80	6.739
0.166*10 ⁻⁴		0.236*10 ⁻⁴	0.86	
0.14*10 ⁻⁴	5	0.332*10 ⁻⁴	1.05	2.174
0.14*10 ⁻⁴	80.83 * 10 ⁻⁸			17.32
0.166*10 ⁻⁴	99.516*10 ⁻⁸			16.68
0.14*10 ⁻⁴	79.872*10 ⁻⁸			17.53
				$\Sigma F = 70.53$

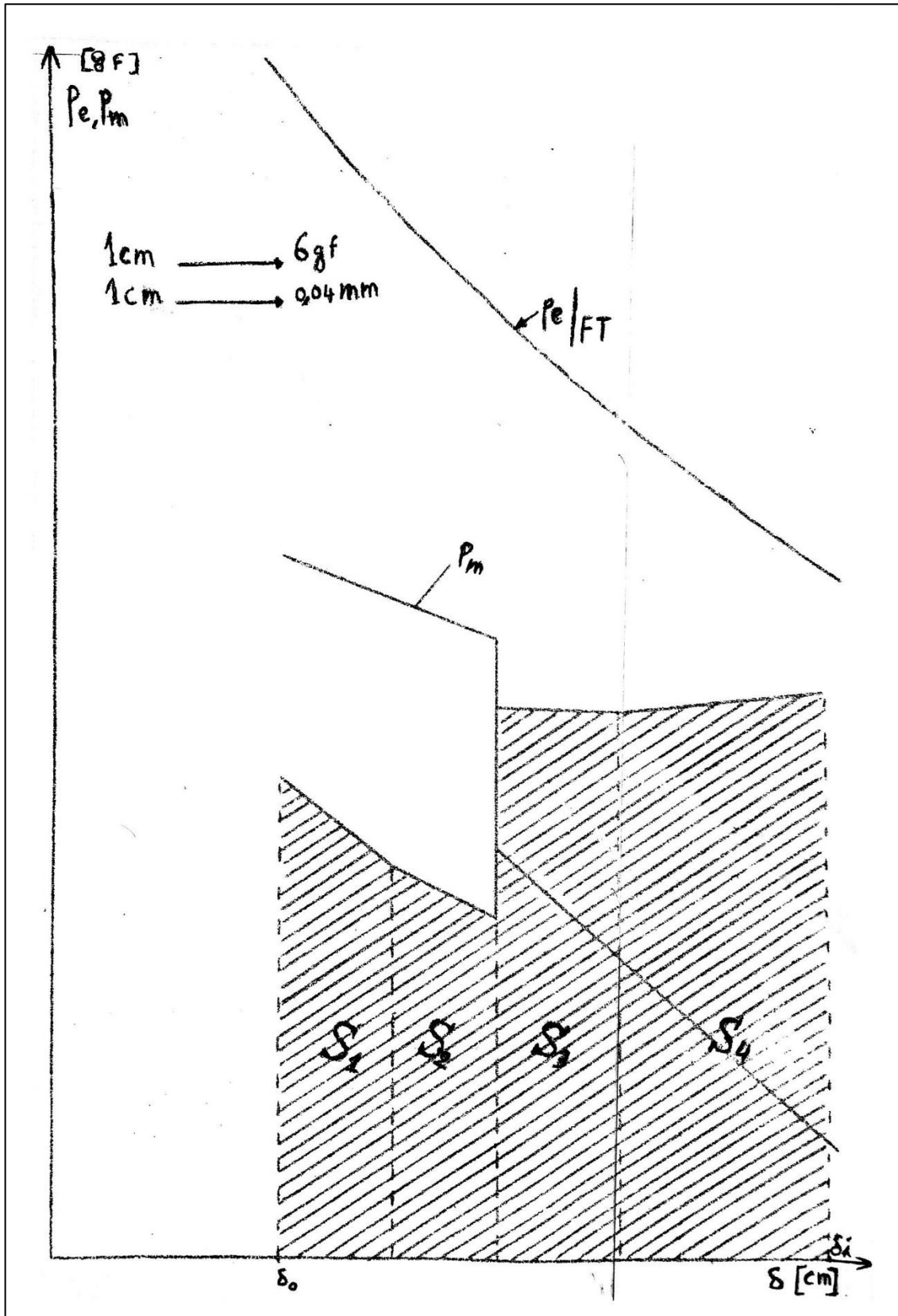
Annexe.9 : Tab. III. 15 Calcul de la force d'attraction.

$\phi_{\delta i} * 10^{-4} [Wb]$	$\delta [cm]$	$dG_{\delta}/d\delta * 10^6$	$\sum F [A]$	$F_{\delta} [AT]$	$P_{em} [gf]$
0.14	0.01	522.300	49.965	2.680	19.132
0.14	0.03	61.366	56.360	7.604	18.096
0.14	0.05	22.092	64.750	12.674	18.098
0.14	0.0681	11.87	70.53	17.32	18.16
0.14	0.08	8.6296	75.048	20.278	18.097

Annexe.10 : Fig. III.2 Force électromécanique en fonction de ΣF .



Annexe.11 : Fig. III.3 Différence entre la caractéristique mécanique et la force électromécanique.



Annexe.12 : Fig. III.4 Force électromécanique en fonction de δ .

