

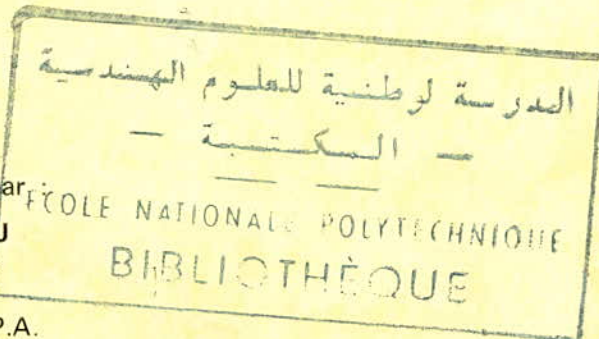
DEPARTEMENT ELECTRICITE
FILIERE D'INGENIEUR EN ELECTROTECHNIQUE



PROJET DE FIN D'ETUDES

CONSTRUCTION D'UN
TRANSFORMATEUR 2500 KVA

Proposé et dirigé par
Mr. VALERY STIRBU
Docteur - Ingénieur
Professeur à l'E.N.P.A.



Etudié par :
S. BELKHIR

DEPARTEMENT ELECTRICITE
FILIERE D'INGENIEUR EN ELECTROTECHNIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

CONSTRUCTION D'UN
TRANSFORMATEUR 2500 KVA

Proposé et dirigé par :

Mr. VALERY STIRBU

Docteur - Ingénieur

Professeur à l'E.N.P.A.

Etudié par :

S. BELKHIR

DEDICACE

A la mémoire de mon père, à ma famille et amis, je dédie
cette thèse. Ainsi qu'à tous ceux qui ont directement ou indirectement contri-
bués à l'élaboration de ce projet.

REMERCIEMENTS

Qu'il me soit permis d'exprimer ici, avec le plus grand respect, ma reconnaissance à Monsieur VALERY STIRBU [REDACTED] Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique et promoteur de ce projet pour sa clairesvoyance et ses efforts déployés pour me permettre d'accomplir cette étude.

Que tous les autres Professeurs de l'Ecole qui ont contribué à ma formation universitaire, y trouvent l'expression de ma profonde gratitude.

Mes remerciements, aussi à tous ceux qui ont apportés une *aide* bénéfique à la réalisation de ce polycopé.

SOMMAIRE

INTRODUCTION..... 5
LISTE DES SYMBOLES..... 7
CAHIER DE CHARGES.....12

I - DONNÉES PRINCIPALES

II - PUISSANCES , TENSIONS ET COURANTS NOMI-
-NAUX.

PREMIERE PARTIE 14

PREDETERMINATION ET DETERMINATION DES DIMENSIONS PRINCIPALES.

A- PREDETERMINATION..... 15

I- DIAMETRE DE LA COLONNE : D..... 15

1°- Tension réactive de court-circuit..... 15
2°- Facteur de sveltesse..... 15
3°- Canal de fuite rapporté..... 16
4°- Facteur de ROGOWSKI..... 16
5°- Facteur d'utilisation..... 16
6°- Induction magnétique de crête..... 17
7°- Valeurs numérique du diamètre..... 17

II- CALCUL DES ENROULEMENTS..... 17

1°- Hauteurs des enroulements..... 17
1.1- Diamètre moyen..... 17
1.2- Hauteurs des enroulements. 18
2°- Tension par spire..... 18
2.1- Section utile de la colonne.18
2.2- Tension par spire..... 18
3°- Nombre de spires des enroulements..... 18
3.1- Enroulements basse tension
3.2- Enroulements haute tension

4°- Section et choix des conducteurs.....	19
4.1- Densité moyenne du courant.	19
4.2-Section des conducteurs.....	19
4.3-Formes de la section des conducteurs.....	20
4.4-Isolation des conducteurs..	20
5°- Choix du type d'enroulement.....	21
6°- Espace occupé par les enroulements.....	21
6.1- Nombre de galettes et de spires par galette.....	21
6.2- Largeur des bobines.....	22
III- VERIFICATION DES PARAMETRES PRICIPAUX DE BASE.	23
1°- Hauteur des enroulements.....	23
2°- Facteur de sveltesse recalculé.....	23
3°- Tension de court-circuit.....	23
4°- Conclusion du calcul préliminaire.....	25
B- DETERMINATION DEFINITIVE.....	26
I- GRANDEURS DEFINITIVES DES ENROULEMENTS.....	26
1°- Enroulements basse tension	
2°- Enroulements haute tension	
II- CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES ET MECANIQUES DES ENROULEMENTS.....	29
1°- Enroulements basse tension	29
2°- Enroulements haute tension.....	31
3°- Pertes joules dues à la charge.....	33
4°- Conclusion.....	33
III- GEOMETRIE ET CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES DU CIRCUIT MAGNETIQUE.....	33
1°- Longueur de la fenêtre.....	33
2°- Hauteur de la fenêtre.....	33
3°- Longueur entre axes de deux colonnes succéssives.....	33
4°- Section de la culasse.....	35
5°- Induction magnétique dans la culasse..	35
6°- Géométrie de la section de la colonne.	35
7°- Géométrie de la section de la culasse.	36

8°- Hauteur du circuit magnétique.....	36
9°- Largeur du circuit magnétique.....	36
10°- Poids du circuit magnétique.....	37
11°- Pertes actives à vide dans la circuit magnétique.....	38
12°- Pertes réactives à vide dans le circuit magnétique.....	39
IV- CALCUL DU COURANT DE MARCHÉ A VIDE.....	40
1°- Composantes active	40
2°- Composante réactive.....	41
3°- Courant de marche à vide.....	41
4°- Influence du sens de laminage des tôles..	41
V- FIGURES	42
DEUXIEME PARTIE ::...../	47

<u>CALCUL MECANIQUE</u>	
I- EFFORTS ELECTRODYNAMIQUES SUR LES ENROULEMENTS. 48	
1°- Courant de court-circuit.....	48
2°- Forces électrodynamiques.....	49
3°- Efforts unitaires.....	50
II- VOLUME ET POIDS DU TRANSFORMATEUR.....	52
1°- Volume occupé par les enroulements.....	52
2°- Volume occupé par le circuit magnétique..	53
3°- Volume de la masse découvable.....	54
4°- Dimensions et volume de la cuve.....	54
5°- Volume de l'huile.....	60
6°- Poids du transformateur.....	60
III- DIMENSIONNEMENT DES ACCESSOIRES DE SERRAGE.....	63
1°- Intensité de la force de serrage.....	63
2°- Poutres de serrage.....	63
3°- Boulons de serrage des poutres.....	66
4°- Dimensionnements des tirants.....	68

IV- QUALITES MECANQUES DE L'ISOLANT DES BOULONS DE
SERRAGE ET DE LA CUVE..... 71

1°- Qualité mécanique de l'isolant des bou-
-lons de serrage

2°- Qualité mécanique de la cuve

TROISIEME PARTIE..... 75

CALCUL THERMIQUE

I- CIRCUIT DE TRANSMISSION DE LA CHALEUR ET ECHAUF-
-FEMENTS..... 76

1°- Echauffement du noyau..... 77

2°- Echauffement des enroulements..... 81

3°- Echauffement de l'huile % à la cuve/.... 87

4°- Echauffement de la cuve % à l'air..... 88

5°- Graphique des échauffements..... 89

6°- Températures..... 90

QUATRIEME PARTIE 91

CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES DU TRANSFORMATEUR.

I- RENDEMENTS DU TRANSFORMATEUR..... 92

II- VARIATION DE LA TENSION AU SECONDAIRE..... 94

CINQUIEME PARTIE..... 100

REALISATION ET MONTAGES

I- CIRCUIT MAGNETIQUE..... 102

1°-Assemblage noyaux-culasses..... 102

2°- Préparation des toles..... 102

2.1- Toles des colonnes

2.2- Toles des culasses

3°- Boulons de serrage du circuit magnétique.106.

4°- Tubes isolants entre boulons et toles du circuit magnétique.....	107
5°- Plaques isolantes entre profilés et toles du circuit magnétique.....	107
6°- Préparation des profilés en U.....	108
7°- Préparation des tirants.....	108
8°- Montage du circuit magnétique.....	109
II- ENROULEMENTS	109
III- APPAREILLAGES AUXILLIAIRES A PREVOIR.....	119
PLAQUE SIGNALITIQUE	122

CONCLUSION.....	123

ANNEXES 1.....	124

ANNEXE 2.....	126

BIBLIOGRAPHIE	128

+++++

III INTRODUCTION

L'énergie électrique est produite par des générateurs, dans des centrales Hydroliques, Thermiques ou Nucléaires, sous un voltage généralement de l'ordre de 15 K.V.

Ces centres de productions sont souvent implantés forts éloignés des lieux d'utilisations (Usines - Villes ...). Le transport se fait, pour des raisons d'économie et pour réduire les pertes en lignes, sous tension élevée (60 KV, 90 KV, 150 KV, 230 KV, ...) fonction de l'éloignement. Cette tension (de transport) est délivrée par un transformateur approprié.

Dans une ligne de transport, de la centrale jusqu'aux lieux d'utilisations en rencontre plusieurs postes de transformation, élévateur de tension juste à la sortie de la centrale et plus loin des postes d'interconnexion, de distribution, de répartition, ..., équipés de transformateurs élévateurs ou abaisseurs suivant le rôle du poste.

Ces postes présentent un intérêt économique (pertes lignes réduites), réduisent les problèmes d'isolement vis à vis des appareils d'utilisations qui fonctionnent généralement sous faible tension (^{rôle du} transformateur abaisseur), d'où la sécurité des consommateurs. On voit donc l'intérêt du transformateur et du courant alternatif.

Ce projet fera l'objet d'une étude de construction d'un transformateur de distribution de 15 KV./5,5 KV, ^{2500 KVA} \sqrt{c} est à dire, détermination des dimensions et des caractéristiques de la machine en fonction de son cahier de charge (à partir des normes ou des données imposées par les bénéficiers).

Dans cette étude, on ne doit pas seulement tenir compte des propriétés électromagnétiques, mais faire en sorte que la réalisation et l'exploitation de la machine soit économique et rentable.

Le dimensionnement dépend, tant du point de vue magnétique que du point de vue électrique, d'une série de facteurs liés en parties aux propriétés thermiques des matériaux isolants et par suite à la durée de vie de la machine.

De nos jours, le progrès de la Technologie des matériaux, telles que les tôles magnétiques et les isolants, l'emploi de nouvelles techniques de refroidissement et l'accumulation des expériences dans la construction des machines électriques (transformateurs - Alternateurs - Moteurs - ...), exigeraient la révision de certaines valeurs numériques adoptées dans les calculs pour quelques coefficients de base.

L'étude comportera cinq (5) parties :

- Une première partie pour l'étude et la détermination de toutes les dimensions principales (Grandeurs géométriques, magnétiques, électriques, ...) des différentes parties constituant le transformateur.
- Une deuxième partie qui fera l'objet de calcul mécanique ; détermination des différents efforts, dimensionnement des accessoires de serrages et vérification de la stabilité mécanique des différentes parties du transformateur.
- Une troisième partie pour le calcul thermique : échauffements des différentes zones du transformateur.
- Une quatrième partie pour l'étude des caractéristiques électriques du transformateur : rendement, variation de la tension en fonction de la charge.
- Une cinquième partie consiste à essayer de situer dans ses détails l'étude technologique et la réalisation pratique du transformateur.

LISTE DES SYMBOLES

- A : Longueur de la cuve (100)
- A : Longueur de la cuve (sans ondules)
- A' : Longueur de la cuve (avec ondules)
- (a,b): Dimensions du conducteur élémentaire nu
- (a',b'): Dimension du conducteur élémentaire isolé
- a₁ : Epaisseur de l'enroulement basse tension
- a₂ : Epaisseur de l'enroulement haute tension
- a₁₀ : Distance colonne-enroulement basse tension
- a₁₂ : Largeur du canal de fuite
- a₂₂ : Distance séparant deux bobines haute tension
- a_r : Epaisseur rapportée du canal de fuite
- B : Largeur de la cuve (sans ondules)
- B' : Longueur de la cuve (avec ondules)
- \hat{B}_c : Induction magnétique de crête dans la colonne
- \hat{B}_j : Induction magnétique de crête dans la culasse
- \hat{B}_{coins} : Induction magnétique moyenne de crête dans les coins
- D : Diamètre de la colonne
- D₁₂ : Diamètre du canal de fuite
- D_{m1} : Diamètre moyen de la spire basse tension
- D_{m2} : Diamètre moyen de la spire haute tension
- f : Fréquence d'utilisation
- G : Poids total du matériel actif
- G' : Poids total du circuit magnétique
- G₁ : Poids du matériel actif des enroulements basse tension
- G₂ : Poids du matériel actif des enroulements haute tension
- G_{col} : Poids des colonnes
- G_j : Poids des culasses
- G_{coins} : poids des coins

- g : Nombre de gradins
- h_B : Hauteur des bobines
- h_c : Hauteur du canal de refroidissement
- h_{CM} : Hauteur du circuit magnétique
- h_{col} : Hauteur de la colonne
- h_{g1} : Hauteur d'une galette de l'enroulement basse tension
- h_{g2} : Hauteur d'une galette de l'enroulement haute tension
- (h_{g1}, l_{g1}) : Dimensions du gradin
- h_j : Hauteur de la culasse
- h_{sp} : Hauteur de la spire
- I_o : Courant à vide
- I_{oa} : Composante active du courant à vide : courant active à vide
- I_{or}, I_{op} : Composante réactive du courant à vide ou courant magnétisant à vide
- J_m : Densité moyenne du courant
- J_1 : Densité du courant dans le conducteur de la basse tension
- J_2 : Densité de courant dans le conducteur de la haute tension
- K_g : Coefficient géométrique du circuit magnétique
- K_{mR} : Coefficient de majoration de la résistance en courant alternatif
- K_{mR1} : Coefficient de majoration de la résistance en courant alternatif de l'enroulement basse tension
- K_{mR1} : Coefficient de majoration de la résistance en courant alternatif de l'enroulement haute tension
- K_R : Coefficient de ROGOWSKI
- K_r : Coefficient de remplissage
- K_u : Coefficient d'utilisation de la section du circuit magnétique

- l_{o1} : Moitié de la différence de hauteur colonne-enroulement basse tension (distance entre extrémité bobine BT - Culasse)
- l_{o2} : Moitié de la différence de hauteur colonne enroulement haute tension (distance entre extrémité bobine HT - Culasse)
- l_{cc} : Distance entre axes de deux colonnes successives
- l_{conx} ; **longueur** du conducteur de connexions
- l_F : ~~Largeur~~ de la fenêtre
- l_j : Largeur de la culasse
- l_{t1} : Longueur totale du conducteur des enroulements basse tension
- l_{t2} : Longueur totale des conducteurs des enroulements haute tension
- l_{w1} : Longueur moyenne de la spire basse tension
- l_{w2} : Longueur moyenne de la spire haute tension
- m : Nombre de phases
- m_c : Nombre de colonnes
- n_f : Nombre d'entre-fer
- n_{g1} : Nombre de galettes de l'enroulement basse tension
- n_{g2} : Nombre de galettes de l'enroulement haute tension
- n_t : Nombre de transpositions
- P** : Puissance active
- p : Puissance active spécifique (par unité de masse)
- P_{cu} : Pertes cuivres
- P_{fo} : Pertes principales dans les fers
- P_j : Pertes joules
- P_{so} : Pertes supplémentaires dans le fer
- P_{sup} : Pertes supplémentaires
- P_o : Pertes actives à vide
- Q : Puissance réactive
- Q_o : Pertes réactive à vide
- q : Pertes réactives spécifiques (par unité de masse)

- R_1 : Résistance de l'enroulement basse tension
- R_2 : Résistance de l'enroulement haute tension
- R_{conx} : Résistance du conducteur de connexion
- S_c : Puissance par colonne
- S_{col} : Section de la colonne
- s_{conx} : Section du conducteur de la connexion
- S_j : Section de la culasse
- s_{w1} : Section du conducteur de l'enroulement basse tension
- s_{w2} : Section du conducteur de l'enroulement haute tension
- s_{wen} : Section du conducteur élémentaire normalisée
- U_K : Tension de courtcircuit
- U_{Ka} : Composante active de la tension de courtcircuit ou tension active de courtcircuit
- U_{Kr} : Composante réactive de la tension de courtcircuit ou tension réactive de courtcircuit
- \hat{U}_{sp} : Tension de spire
- w_1 : Nombre de spires de l'enroulement basse tension
- w_2 : Nombre de spires de l'enroulement haute tension
- w'_2 : Nombre total de spires de l'enroulement haute tension (spires de réglage comprise)
- w_{g1} : Nombre de spires par galette des enroulements basse tension
- w_{g2} : Nombre de spires par galette des enroulement haute tension
- w_{el} : Nombre de conducteurs élémentaires
- w_r : Nombre de spires de réglage.

- α : Coefficient de charge
- λ_{conv} : Coefficient de convection
- β : Facteur de SVELTESSE
- γ_1 : Poids spécifique du cuivre
- γ_2 : Poids spécifique du fer
- δ_{iso} : Epaisseur de l'isolation
- λ : Coefficient de transmission de la chaleur
- θ : Echauffement
- η : Rendement
- ρ : Résistivité électrique du conducteur de courant

CAHIER DE CHARGES

I - DONNEES PRINCIPALES

1 - Sujet : Construction d'un transformateur de distribution.

2 - Données :

- Puissance nominale apparente $S_n = 2500$ KVA
- Tensions nominales :
 - enroulement basse tension $U_{1n} = 5,5$ KV
 - enroulement haute tension $U_{2n} = 15$ KV
- Tension de réglage sur enroulement haute tension ~~1,5~~ 7,5 %
- Nombre de phases : 3 phases
- Fréquence d'utilisation $f = 50$ Hz
- Connexions : DYn 11
- Refroidissement naturel dans l'huile

3 - Données complémentaires

Les données qui suivent :

- La tension de court-circuit : $U_k = 6,5$ %
- Pertes dues à la charge $F_k = 24$ KW
- Pertes à vide $P_o = 4,5$ KW
- Courant à vide $I_o = 1,5$ %

Sont tirées de l'expérience. Elles permettent de prévoir le voisinage des résultats de calcul. Surtout dans la première partie préliminaire où on est appelé à faire un dimensionnement optimal du point de vue électrique et économique. Le transformateur une fois réalisé présente un bon rendement de fonctionnement, avec un prix de revient modéré.

II - PUISSANCES, TENSIONS ET COURANTS PAR ELEMENTS

Le calcul se fait sur les grandeurs nominales

1 - Puissance nominale apparente par colonne : S_c

$$S_c = \frac{S_n}{m_c} \quad \text{où } S_n = \text{puissance apparente nominale (KVA)}$$

$m_c =$ nombre de colonnes (3 colonnes)

$S_c =$ puissance apparente par colonne (KVA)

$$S_c = \frac{2500}{3} \quad S_c = 833,3333 \text{ KVA}$$

2 - Tensions nominales des enroulements.

2.1 Enroulements basse tension

Ces enroulements sont connectés en étoile, la tension par phase est donnée par la relation :

$$U_{f_1} = \frac{U_{1n}}{K_f} \quad \text{où } U_{1n} = \text{tension nominale entre phase}$$

$K_f = \text{facteur de phase pour l'étoile, } K_f = \sqrt{3}$

$U_{f_1} = \text{tension nominale par phase}$

$$U_{f_1} = \frac{5,5}{3} \quad U_{f_1} = ~~3,1754~~ \text{ KV} \quad 3,1754 \text{ KV}$$

2.2 Enroulements haute tension

Ces enroulements sont en triangle, alors la tension par phase est égale à la tension entre phase.

$$U_{f_2} = U_{2n} \quad \text{où } U_{2n} = \text{tension nominale entre phase et } U_{f_2} = \text{tension nominale par phase.}$$

$$U_{f_2} = 15 \text{ KV}$$

3. Courants nominaux des enroulements

3.1 Enroulement basse tension

$$I_{f_1} = I_{1n} = \frac{S_c}{U_{f_1}} \quad \text{où } S_c = \text{puissance par colonne (KVA)}$$

$U_{f_1} = \text{tension par phase (KV)}$

$$I_{f_1} = \frac{833,333}{3,1754} \quad I_{f_1} = \text{courants nominal dans la B.T (A)}$$

$I_{f_1} = 262,434 \text{ A}$

I - R E M I E R E P A R T I E

A - PREDETERMINATION DES DIMENSIONS PRINCIPALES

B - DETERMINATION DES DIMENSIONS PRINCIPALES

A - PREDETERMINATION

I - DIAMETRE DE LA COLONNE : D

Le diamètre de la colonne est donné par la relation suivante :

$$D = 1,0674 \sqrt[4]{\frac{\sigma_r \cdot \beta \cdot K_R \cdot S_c}{K_u^2 \cdot \hat{B}_c \cdot U_{kr}}}$$

La démonstration de cette formule est donnée en annexe 1.
La signification et la dimension de ses paramètres sont les suivants :

- U_{kr} = Tension réactive de court circuit s'exprime en(%)
- β = facteur de sveltesse (sans unité)
- a_r = canal de fuite rapporté s'exprime en (m)
- K_R = facteur ROGOWSKI de construction (sans unité)
- K_u = facteur d'utilisation (sans unité)
- \hat{B}_c = Induction magnétique de crête par colonne s'exprime (T)
- D = Diamètre de la colonne s'exprime en (m)

Dans cette phase, le diamètre est déterminé approximativement, car à ce niveau on peut seulement estimer et choisir les valeurs des paramètres de l'expression (1).

1. Tension réactive de court circuit : U_{kr}

La tension de court circuit donnée dans le cahier de charges ^{elle} s'écrit :

$$U_k = (\dot{U}_{ka}^2 + U_{kr}^2)^{1/2} \quad \text{où } U_{ka} = \text{composante active de } U_k$$

$$U_{kr} = \text{composante ractive de } U_k$$

La composante active est égale à : $U_{ka} = \frac{P_k}{S_n} \cdot 100$ où P_k = pertes dues à la charge

$$U_{ka} = \frac{24}{2500} \times 100 ; U_{ka} = 0,960 \%$$

S_n = puissance nominale

La composante réactive est égale à :

$$U_{kr} = (U_k^2 - U_{ka}^2)^{1/2} ; U_{kr} = [(16,5)^2 - (0,960)^2]^{1/2} ; U_{kr} = 6,428 \%$$

2. Facteur de sveltesse β

Ce facteur a une influence directe sur la réalisation et le rendement du transformateur.
Si le facteur β est petit, la hauteur de la colonne serait très grande par rapport au diamètre et on aura un transformateur assez svelte, et inversement si β est grand. De là, suivant le cas on peut penser à la quantité de matériel nécessaire à la réalisation, aux pertes spécifiques, pertes à vide, pertes dues à la charge, tension de court-circuit, rendement, prix de revient . . .

Le tableau T₁ (page 43) donne des indications sur le choix de β en fonction de la puissance par colonne, de la tension de l'enroulement haute tension et de la nature du matériaux utilisés pour le bobinage.

On a : S_c = puissance par colonne (833,333 KVA)

U_{2n} = tension de l'enroulement H.T (15 KV)

bobinage en cuivre

$\beta \in [1,8 \div 3]$ on prend $\beta = 2$

3. Canal de fuite rapporté : a_r

Ce paramètre dépend de la nature des enroulements, pour les enroulements concentriques, qui est le cas de ce transformateur.

On a : $a_r = a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3}$ où a_{12} = largeur du canal de fuite
 a_1 = épaisseur de l'enroulement B.T
 a_2 = épaisseur de l'enroulement H.T

a_{12} est fonction de la tension d'essai de l'enroulement avec la tension la plus grande.

On estime a_{12} du tableau T2 (page 43) qui donne cette valeur pour les transformateurs immergés dans l'huile. $a_{12} = 15$ mm.

Le terme $\frac{a_1 + a_2}{3} = K \sqrt[4]{S_c}$, on peut estimer la valeur du coefficient K du tableau T3 (page 43) - $K = 0,5$

d'où $\frac{a_1 + a_2}{3} = 0,5 \sqrt[4]{833,333}$ $\frac{a_1 + a_2}{3} = 2,68$ cm

et $a_r = 1,5 + 2,68$; $a_r = 4,18$ cm

4. Facteur ROGOWSKI : K_R

Ce facteur est pris égal à : $K_R = 0,95$ dans le calcul préliminaire.

5. Facteur d'utilisation : K_u

Ce facteur met en évidence la section du fer fictive qui participe à la circulation du flux magnétique dans la colonne.

$K_u = K_r \cdot K_g$ où K_r = coefficient de remplissage fonction du type de l'isolation et de l'épaisseur des tôles.

En utilisant des tôles d'épaisseur 0,35^{mm} et une isolation à la carlite, du tableau T.4 page (43) on estime $K_r = 0,94$.

K_g = coefficient géométrique, fonction du nombre de gradins formant la colonne et de la puissance par colonne.

En choisissant six gradins, le tableau T.5 (page 44), on estime $K_g = 0,93$

d'où le facteur d'utilisation $K_u = 0,94 \times 0,93$ $K_u = 0,873$

6. Induction magnétique de crête dans la colonne : \hat{B}_c

Son choix est fonction de la puissance par colonne, du type de tôles utilisées. On doit tenir compte aussi de son influence sur les pertes à vide, le courant de marche à vide, les phénomènes de saturation...

En optant pour des tôles laminées à froid, du tableau T.6 (page 44), on choisit une induction magnétique optimale pour donner satisfaction aux clients.

On estime $\hat{B}_c = 1,66 \text{ T}$

7. Valeur numérique du diamètre de la colonne :

$$D = 1,0674 \sqrt[4]{\frac{Q_r \cdot \beta \cdot K_R \cdot S_c}{K_u^2 \cdot \hat{B}_c^2 \cdot U_{kr}}$$

$a_r = 4,18 \text{ cm}$
 $\beta = 2$
 $K_R = 0,95$
 $S_c = 833,333 \cdot 10^3 \text{ VA}$
 $K_u = 0,874$
 $\hat{B}_c = 1,66 \text{ T.}$
 $U_{kr} = 6,428 \%$

$$D = 1,0674 \sqrt[4]{\frac{4,18 \times 2 \times 0,95 \times 833,33 \cdot 10^3}{(0,874)^2 \times (1,66)^2 \times 6,428}}$$

$D = 28,40 \text{ cm}$

II. CALCUL DES ENROULEMENTS

1. Hauteur des enroulements

Pour faciliter le travail lors du montage, tout en assurant un bon serrage des bobines et surtout pour diminuer les forces axiales créées par le flux de fuite qui est important et dangereux lors d'un court-circuit. On donne la même hauteur pour les deux bobinages, (B.T et H.T.). La hauteur notée h_B de la bobine est donnée par la relation :

$$h_B = \frac{\pi D_{12}}{\beta} \quad \text{où } h_B = \text{hauteur de la bobine, } D_{12} = \text{diamètre moyen du canal de fuite.}$$

$\pi = 3,14$
 $\beta = 2$

1.1 Détermination approximative du diamètre moyen : D_{12} .

D'après la figure 1, le diamètre D_{12} est donné par :

$D_{12} = D + 2 a_{10} + 2a_1 + a_{12} \quad (2)$

a_{10} = distance entre la colonne et l'enroulement basse tension, sa valeur est fonction de la tension nominale de l'enroulement haute tension ($U_{2n} = 15 \text{ V}$).

Le tableau T.7 (page 44) nous donne $a_{10} = 1,2 \text{ cm}$.

a_1 = largeur de la bobine basse tension est donné par :

$$a_1 = K_{a1} \sqrt[4]{S_c} \quad \text{où } a_1 : (\text{cm})$$

$S_c : (\text{KVA})$

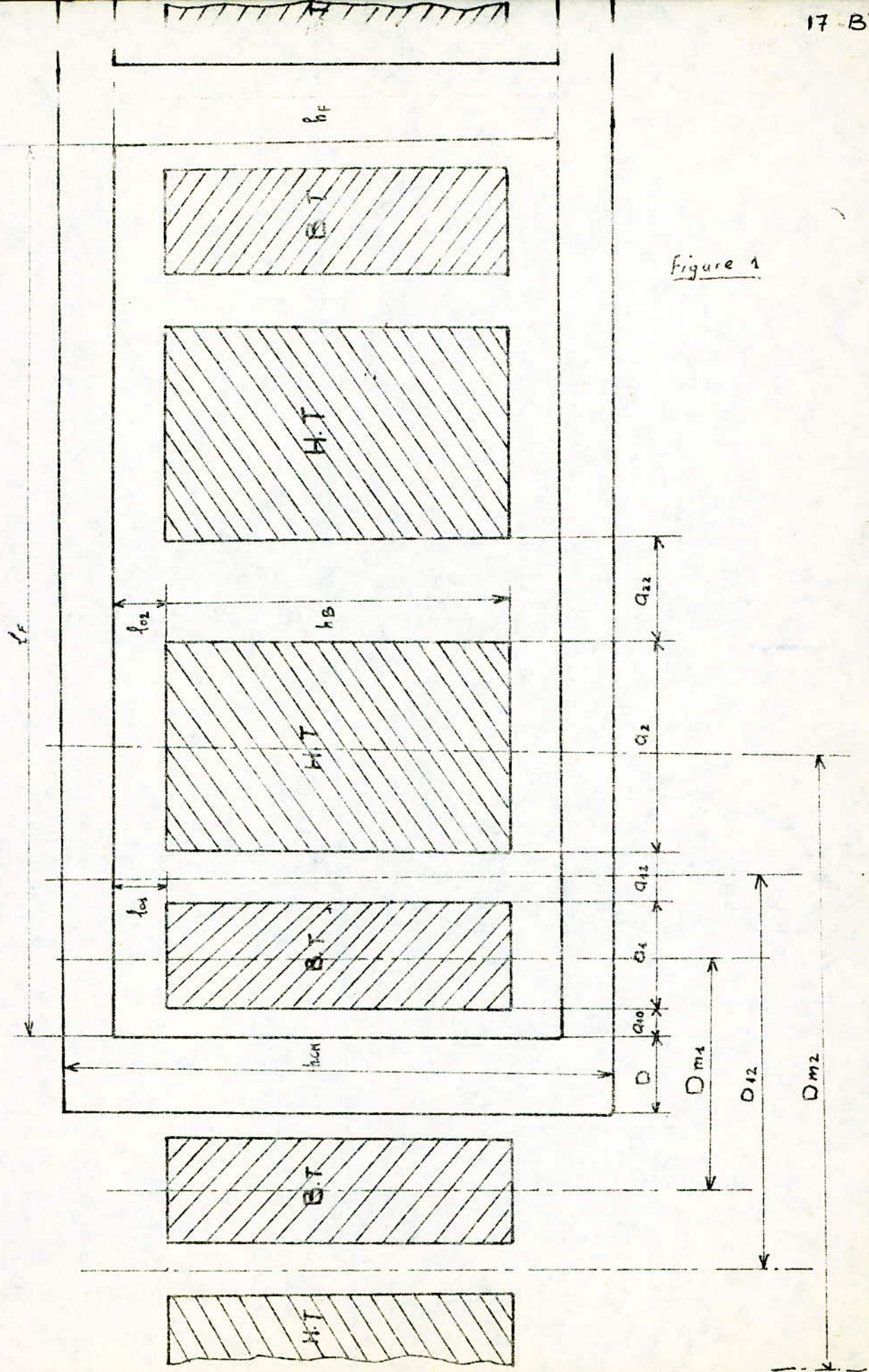


Figure 1

K_{a1} : coefficient qui prend les valeurs suivantes : $K_{a1} = \begin{cases} 0,55 & \text{si } U_{2n} \leq 35 \text{ KV} \\ 0,45 & \text{si } U_{2n} \leq 110 \text{ KV} \end{cases}$

on prend $K_{a1} = 0,55$ et $a_1 = 0,55 \sqrt[4]{833,333}$; $a_1 = 2,96 \text{ cm}$
 d'où $D_{12} = 28,40 + 2 \times 1,2 + 2 \times 2,96 + 1,5$ $D_{12} = 38,22 \text{ cm}$

1.2 Détermination approximative de la hauteur des enroulements

On applique la relation (2) :

$$h_B = \frac{\pi D_{12}}{\beta} \quad D_{12} = 38,22 \text{ cm} \quad h_B = \frac{\pi \cdot 38,22}{2} \quad h_B = 60,03 \text{ cm}$$

$$\pi = 3,14$$

$$\beta = 2$$

2. Tension par spire

Le flux utile est commun aux deux enroulements, on suppose alors qu'ils ont la même tension par spire qui est donnée par la relation :

$$U_{sp} = \sqrt{2} \cdot \pi f \cdot \hat{B}_c \cdot S_{fercol} \quad (3) \quad \text{où } f = \text{fréquence d'utilisation (50 Hz)}$$

\hat{B}_c = induction magnétique de crête
 ($\hat{B}_c = 1,66 \text{ T}$)

S_{fercol} = section utile de la colonne

U_{sp} = tension par spire

2.1 Section utile de la colonne : S_{fercol}

$S_{fercol} = S \times K_u$ où S = section brute de la colonne
 K_u = coefficient d'utilisation

$$S = \frac{\pi D^2}{4} \quad \text{avec } D = 28,4 \text{ cm}$$

$$S_{fercol} = \frac{\pi D^2}{4} \times K_u = \frac{\pi (28,4)^2}{4} \times 0,874 ; S_{fercol} = 553,65 \text{ cm}^2$$

2.2 Tension par spire

On applique la relation (3) on aura :

$$U_{sp} = \sqrt{2} \pi \times 50 \times 1,66 \times 553,65 \cdot 10^{-4} ; U_{sp} = 20,41 \text{ V/spire}$$

3. Nombre de spires des enroulements : W_i

3.1 enroulement basse tension : W_1

$$W_1 = \frac{U_{f1}}{U_{sp}} = \frac{3175,4}{20,41} \quad W_1 = 155,58 \text{ spires}$$

3.2 Enroulement haute tension : W_2

$$W_2 = \frac{U_{f2}}{U_{sp}} = \frac{U_{f1}}{U_{f1}} \times \frac{U_{f2}}{U_{sp}} = W_1 \cdot \frac{U_{f2}}{U_{f1}} = 155,58 \times \frac{15000}{3175,4}$$

$$W_2 = 734,93 \text{ spires.}$$

4. Section et choix des conducteurs

La géométrie de la section du conducteur (circulaire ou méplat) est imposée par les normes. Elle dépend de la grandeur de la section. Cette dernière est calculée en faisant le rapport du courant et de sa densité qui traverse le conducteur. Suivant la valeur trouvée on prend des conducteurs :

- circulaires si la section calculée est inférieure à 6 mm² (1 conducteur élémentaire).
- méplats si la section calculée est supérieure à 6 mm² (1 conducteur élémentaire).
- plusieurs conducteurs méplats en parallèles, chaque conducteur élémentaire d'une section inférieure à 30 mm² si la section calculée est comprise entre 50 et 60 mm².

4.1 Densité moyenne du courant : J_m

La densité moyenne du courant est donnée par la relation ci-dessous. Sa démonstration se trouve en annexe 2 (page A2/6)

$$J_m = 7,34 \frac{1}{K_{pk}} \cdot \frac{P_k}{D_{12}} \cdot \frac{U_{sp}}{S_n} \quad (4)$$

$P_k = 24 \text{ KW}$
 $S_n = 2500 \text{ KVA}$
 $U_{sp} = 20,41 \text{ V/SP}$
 $D_{12} = 0,3822 \text{ m}$

Les termes de la relation de la densité moyenne ~~xx~~ sont connus sauf le terme K_{pk}. Ce dernier met en évidence les pertes supplémentaires, il est fonction de la puissance du transformateur.

Le coefficient K_{pk} est estimé du tableau T.8 page ont prend

$$K_{pk} = 1,08$$

$$\text{d'où } J_m = 7,34 \cdot \frac{1}{1,08} \cdot \frac{24}{0,3822} \cdot \frac{20,41}{2500} ; J_m = 3,48 \text{ A/mm}^2$$

4.2 Section du conducteur s_{wi}

La section est égale au rapport du courant nominal sur la densité du courant.

$$s_{wi} = \frac{I_{fi}}{J_m}$$

$I_f : (\text{A})$
 $J_m : (\text{A/mm}^2)$
 $S_w : (\text{mm}^2)$

4.2.1 Section du conducteur de l'enroulement B.T : s_{w1}

$$s_{w1} = \frac{I_{f1}}{J_m} \quad \text{avec} \quad I_{f1} = 262,43 \text{ A}$$

$$s_{w1} = \frac{262,43}{3,48} \quad s_{w1} = 75,41 \text{ mm}^2$$

4.2.2. Section du conducteur de l'enroulement H.T : s_{w2}

$$s_{w2} = \frac{I_{f2}}{J_m} \quad \text{avec} \quad I_{f2} = 55,55 \text{ A} ; \quad s_{w2} = \frac{55,55}{3,48} \quad s_{w2} = 15,96 \text{ mm}^2$$

3. Formes de la section des conducteurs

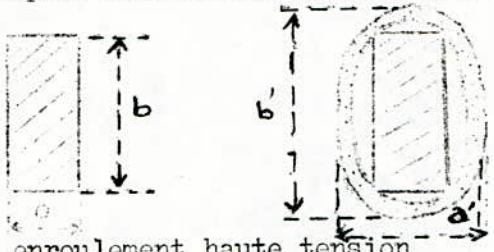
En fonction de la grandeur de la section calculée, on choisit des conducteurs normalisés qui répondent aux exigences des normes. La section normalisée est choisie du tableau T.9 (page 46)

3.1. Enroulement basse tension

Le calcul a donné $s_{w1} = 75,41 \text{ mm}^2$ qui est supérieur à 50 mm^2 . Dans ce cas les normes exigent l'utilisation de plusieurs conducteurs méplats en parallèle, chacun de section inférieur à 50 mm^2 .

Ceci nous conduit à choisir deux conducteurs élémentaires méplats de section normalisées : $s_{w1n} = 2 \times 39,50 \text{ mm}^2$. section du conducteur

méplat élémentaire normalisé : s_{w1en}



$s_{w1en} = 39,50 \text{ mm}^2$ de dimensions
 $a \times b = 4,7 \times 8,6 \text{ mm}^2$
 $s_{w1n} = 2 \times s_{w1en} = 2 \times 39,5 \text{ mm}^2$

B.2 enroulement haute tension

le calcul a donné $s_{w2} = 15,96 \text{ mm}^2$ qui est supérieur à 6 mm^2 ; Dans ce cas les normes exigent l'utilisation d'un conducteur méplat normalisé $s_{w2n} = 16,10 \text{ mm}^2$ de section ; avec les côtes : $a \times b = 2,26 \times 7,40 \text{ mm}^2$

4. Isolation des conducteurs

Les conducteurs méplats sont isolés avec des vernis ou du papier sous forme de ruban (pratiquement on utilise des bandes d'épaisseur de 0,05 mm et de 0,12 mm). On opte pour ce papier en feuille mince car celui-ci présente une meilleure rigidité électrique, donc une épaisseur réduite de l'isolant. L'épaisseur totale de l'isolation est fonction de la section du conducteur et de la tension par spire (donc finalement de la tension nominale des enroulement). Du tableau T.10 (page 45) on estime notre isolation.

4.1 Isolation du conducteur de l'enroulement B.T : δ_{is1}

$s_{w1en} = 39,5 \text{ mm}^2$ on estime $\delta_{is1} = 0,84 \text{ mm}$ normalisée

On réalise cette isolation comme suit :

- 2 rubans de 0,05 mm enroulés avec demi recouvrement donnant une épaisseur totale : $2 (2 \times 0,05) = 0,40 \text{ mm}$
- 1 ruban de 0,12 mm enroulé avec demi-recouvrement donne une épaisseur totale de : $2 (2 \times 0,12) = 0,48 \text{ mm}$

On obtient une épaisseur totale : $\delta_{is1} = 0,40 + 0,48 = 0,88 \text{ mm}$

$\delta_{is1} = 0,88 \text{ mm}$

Le conducteur élémentaire isolé aura pour dimensions :

$a' = a + \delta_{is1} = 4,7 + 0,88$ $a' = 5,54 \text{ mm}$
 $b' = b + \delta_{is1} = 8,6 + 0,88$ $b' = 9,44 \text{ mm}$

4.4.2 Isolation du conducteur de l'enroulement H.T : δ_{is_2}

La section $s_{w2n} = 16,10 \text{ mm}^2$, on estime du même tableau T10 une isolation normalisée $\delta_{is_2} = 0,84 \text{ mm}$ comme pour la basse tension (même tension par spire).

Le conducteur isolé aura pour dimension :

$$a' = a + \delta_{is_2} = 2,26 + 0,84 \qquad a' = 3,10 \text{ mm}$$

$$b' = b + \delta_{is_2} = 7,40 + 0,84 \qquad b' = 8,24 \text{ mm}$$

5. Choix du Type d'enroulement

Le type d'enroulement dépend de la section du conducteur, de la densité du courant, de la tension de l'enroulement et aussi du nombre de gradins formant la colonne.

Le tableau T12 (page 45) nous oriente sur le choix du type d'enroulement compte tenu des résultats déjà trouvés.

De ce tableau on choisit des enroulements en galettes continues pour les deux bobines BT et HT

6. Espace occupé par les enroulements

On a opté pour des raisons de sécurité, ^{Pour} la même hauteur des enroulements B.T et H.T.

La hauteur estimée : $h_B = 600,30 \text{ mm}$ ~~pour~~ permet de déterminer le nombre de galettes de chaque enroulement. De ce dernier on calculera la hauteur définitive des enroulements tout en tenant compte, du nombre de galettes, de leur hauteur et de l'isolation entre galettes

6.1 Nombre de galettes et de spires par galette des enroulements

6.1.1. Nombre de galettes de l'enroulement B.T et nombre de spires par galette.

Le nombre de galettes est calculé par l'expression suivante :

$$h_B = n_{g1} \cdot h_{sp1} + (n_{g1} - 1) h_{c1} + (0,5 \text{ --- } \div \text{ --- } 1,5 \text{ cm})$$

ou h_B représente la hauteur de l'enroulement, h_{sp1} représente la hauteur de la spire (donc de la galette), h_{c1} représente le vide entre deux galettes successives et n_{g1} représente le nombre de galettes ^{et} $(0,5 \text{ --- } \div \text{ --- } 1,5 \text{ cm})$ représente une tolérance.

Le nombre de galettes (n_{g1}) est :

$$n_{g1} = \frac{h_B + h_{c1} - (0,5 \text{ --- } \div \text{ --- } 1,5)}{h_{sp1} + h_{c1}}$$

On prend : $h_{c1} = 5,85 \text{ mm}$ et $h_{sp1} = b' = 9,44 \text{ mm}$
avec $h_B = 600,03 \text{ mm}$ et une tolérance de 10 mm
d'où

$$n_{g1} = \frac{600,3 + 5,85 - 10}{9,44 + 5,85} \qquad n_{g1} = 39 \text{ galettes}$$

Le nombre de spires par galette w_{g1} est :

$$w_{g1} = \frac{w_1}{n_{g1}} = \frac{155,58}{39} = 3,98 \text{ spires / gal.} \quad \text{on prend } w_{g1} = 4 \text{ sp./gal.}$$

6.1.2. Nombre de galettes et nombre de spires par galettes de l'enroulement H.T.

même méthode que précédemment (6.1.1.)

$$n_{g2} = \frac{h_B + h_{c2} - (0,5 \div 1,5)}{h_{sp2} + h_{c2}} \quad \text{avec } h_{c2} = 5,63 \text{ mm}$$

$$h_{sp2} = b' = 8,24 \text{ mm}$$

$$h_B = 600,3 \text{ mm}$$

$$d'où n_{g2} = \frac{600,3 + 5,63 - 10}{8,24 + 5,63} \quad n_{g2} = 43 \text{ galettes}$$

Le nombre de spires par galette est :

$$w_{g2} = \frac{w'_2}{n_{g2}}$$

On doit tenir compte des spires de réglage donnant + 5 %, le nombre de spires maximum est $w'_2 : w'_2 = 1,05 \times w_2$

$$w'_2 = 1,05 \times 735 = 771,75 \text{ spires}$$

$$\text{on obtient } w_{g2} = \frac{771,75}{43} \quad w_{g2} = 18 \text{ sp/galette}$$

6.2 largeur des bobines : a_i

La largeur est donnée par la relation suivante :

$$a_i = a'_i \cdot w_{gi} + (w_{gi} - 1) \cdot \delta_{ci} \quad \text{tirée de la figure 6.2}$$

où a'_i = largeur du conducteur avec isolation de l'enroulement i ($i=1;2$).

w_{gi} = nombre de spires par galette de l'enroulement i

δ_{ci} = canal axial de refroidissement entre spire d'une galette de l'enroulement i ($i = 1;2$).

$i = 1$ correspond à l'enroulement basse tension

$i = 2$ correspond à l'enroulement haute tension

6.2.1. Largeur de la bobine B.T = a_1

$$\text{On estime } \delta_{c1} = 3 \text{ mm avec } a'_1 = 5,54 \text{ mm} \quad a_1 = 5,54 \times 4 + (4-1) \cdot 3$$

$$a_1 = 31,16 \text{ mm}$$

6.2.2 Largeur de la bobine H.T : a_2

On estime $\delta_{c2} = 0$ car, cet enroulement serait bien immergé dans l'huile donc bien refroidi.

$$a_2 = a'_2 w_{g2} \quad a'_2 = 3,10 \text{ mm}$$

$$w_{g2} = 18 \text{ spires} \quad a_2 = 55,8 \text{ mm}$$

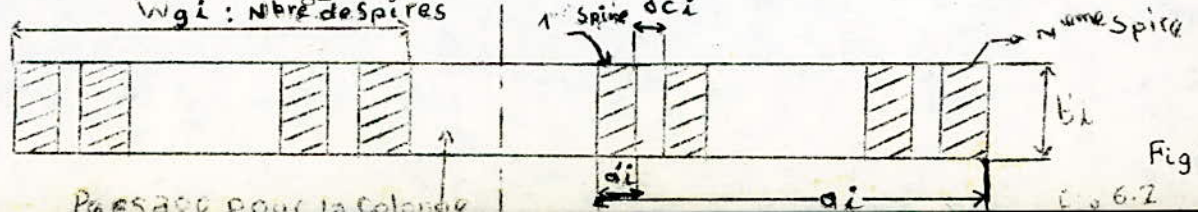


Fig 6.2

III. VERIFICATION DES PARAMETRES PRINCIPAUX ADOPTES

1 - Hauteur des enroulements

On recalcule la hauteur h_{Bi} des enroulements qui a été supposée la même pour les bobines. Cette hauteur est fonction du nombre de galettes, de la hauteur d'une spire et du canal de refroidissement h_{ci} .

$$h_{Bi} = n_{gi} \cdot h_{spi} + (n_{gi} - 1) h_{ci} + 10 \quad \begin{array}{l} i = 1 \text{ enroulement B.T} \\ i = 2 \text{ enroulement H.T} \end{array}$$

$$h_{B1} = 39 \times 9,44 + (39 - 1) \times 5,85 + 10 \quad h_{B1} = 600,9 \text{ mm}$$

$$h_{B2} = 43 \times 8,24 + (43 - 1) \times 5,65 + 10 \quad h_{B2} = 600,9 \text{ mm}$$

Donc les hauteurs des deux enroulements sont égales à $h_B = 600,9 \text{ mm}$

2 - Facteur de sveltesse :

$$\beta_r = \frac{\pi D_{12}}{h_B}, \text{ il nous suffit de recalculer le diamètre}$$

moyen D_{12} qui est donné par la relation :

$$D_{12} = D + 2 a_{10} + 2 a_{11} + a_{12} \quad (\text{tous les autres paramètres sont connus})$$

$$D_{12} = 28,4 + 2 \times 1,2 + 2 \times 3,10 + 1,5 \quad D_{12} = 38,53 \text{ cm}$$

$$h_B = 60,09 \text{ cm}$$

Le facteur de sveltesse recalculé β_r est :

$$\beta_r = \frac{\pi 38,53}{60,09}$$

$$\beta_r = 2,014$$

Les normes exigent que cette nouvelle valeur du facteur de sveltesse ne doit différer de $\pm 20\%$ de sa valeur estimée, sinon on est obligé de reprendre le calcul préliminaire.

On a trouvé $\beta_r = 2,014$ qui reste bien dans la plage exigée.

3 - Tension de court-circuit : U_K

Pour ce paramètre, les normes tolèrent une plage de $\pm 10\%$ de la tension de court-circuit imposée par le cahier de charge.

Sinon on revoit et on modifie le paramétrage précédent en se basant sur

la relation donnant la tension de court-circuit réactive :

$$U_{kr} (\%) = \frac{2 \pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot w_{1r}^2 \cdot a_r \cdot \beta_r \cdot K_{Rr} \cdot I_{f1}}{U_{f1}} \cdot 100$$

$$U_k = \sqrt{U_{ka}^2 + U_{kr}^2} \quad \text{où } U_K = \text{tension de court-circuit}$$

$$U_{Ka} = \text{composante active de } U_K$$

$$U_{Ka} = 0,96 \%$$

Les paramètres de U_{kr} sont
 $f = 50 \text{ Hz}$, fréquence d'utilisation
 $\mu_0 = 4 \pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$

$$\beta_r = 2,014$$

$$I_{f1} = 262,43 \text{ A}$$

$$U_{f1} = 3175,4 \text{ V}$$

w_{1r} , K_{Rr} , a_r respectivement le nombre définitif de spires de l'enroulement basse tension, le facteur de ROGOWSKI calculé et la largeur finale rapportée du canal de fuite, qu'on recalculera.

$$w_{1r} = n_{g1} \cdot w_{g1} = 39 \times 4 \quad w_{1r} = 156 \text{ spires}$$

$$K_{Rr} = 1 - \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{2a_{12} + a_1 + a_2}{h_B} = 1 - \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{2 \times 1,5 + 3,10 + 5,58}{60,09}$$

$$K_{Rr} = 0,969$$

$$a_r = a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3} = 1,5 + \frac{3,10 + 5,58}{3} \quad a_r = 4,4 \text{ cm} = 0,044 \text{ m}$$

d'où finalement la composante réactive U_{kr} est :

$$U_{Kr} (\%) = \frac{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 4 \pi \cdot 10^{-7} \cdot (156)^2 \cdot 0,044 \times 2,014 \times 0,969 \times 262,43}{3175,4} \cdot 100$$

$$U_{Kr} = 6,81 \%$$

$$U_{Ka} = 0,96 \%$$

$$U_K = 6,86 \%$$

$$\text{d'où } U_K = \sqrt{(0,96)^2 + (6,81)^2}$$

Comparons cette nouvelle tension de court-circuit ($U_K = 6,86 \%$) calculée à celle du cahier de charge (6,5 %)

$$\Delta \frac{U_K}{U_K} = \frac{6,86 - 6,5}{6,5} \cdot 100 = 5,5 \% \text{ on voit qu'on reste bien dans la plage } \pm 10 \% \text{ exigée par les normes.}$$

4. Conclusion du calcul préliminaire

Les résultats de calcul des différents paramètres traités restent orientatifs, mais à respecter. Ils présentent des valeurs au voisinage strict de l'optimum.

On peut, tout de même apporter de légères modifications nécessaires dans leurs déterminations définitives.

B : DETERMINATION

I - GRANDEURS DEFINITIVES DES ENROULEMENTS

1° - Enroulements basse tension

- Hauteur de la bobine : $h_{B1} = 600,9 \text{ mm.}$
- Nombre de galettes : $n_{g1} = 39 \text{ galettes.}$
- Nombre de spires par galette : $W_{g1} = 4 \text{ spires/galette}$
- Nombre de spires : $W_1 = n_{g1} \cdot W_{g1} = 39 \times 4 = 156 \text{ spires (au lieu de 155,5 sp)}$
- Tension par spire : $U_{sp1} = \frac{U_{f1}}{W_1} = \frac{3175,4}{156}$; $U_{sp1} = 20,355 \text{ V/sp (au lieu de 20,41)}$
- Induction magnétique de crête par colonne : \hat{B}_c

$$\hat{B}_c = \frac{U_{sp1}}{\sqrt{2} \pi f S_{fercol}} = \frac{20,355 \cdot 10^4}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot 50 \cdot 553,65}$$
 ; $\hat{B}_c = 1,65 \text{ T (au lieu de 1,66)}$
- Largeur de la bobine : $a_1 = 31,16 \text{ mm.}$
- Canal de refroidissement : $h_{c1} = 5,85 \text{ mm.}$
- Distance entre spires successives : $\delta_{c1} = 3 \text{ mm.}$
- Hauteur de la spire : $h_{sp1} = b'_1 = 9,44 \text{ mm.}$
- Dimensions du conducteur méplat élémentaire : $\begin{cases} a_1 = 4,7 \text{ mm.} \\ b_1 = 8,6 \text{ mm.} \end{cases}$
- Epaisseur de l'isolation : $\delta_{is1} = 0,88 \text{ mm.}$
- Nombre de conducteurs élémentaires en parallèles : $W_{el1} = 2 \text{ conducteurs}$
- Section normalisée du conducteur élémentaire : $s_{1en} = 39,5 \text{ mm}^2$
- Section du conducteur : $s_{w1} = 2 \cdot s_{w1en} = 2 \times 39,5 = 79 \text{ mm}^2$
- Courant nominal : $I_{f1} = 262,43 \text{ A}$
- Densité de courant : $J_1 = \frac{262,43}{79}$; $J_1 = 3,32 \text{ A / mm}^2 \text{ (au lieu de 3,48)}$

2° - Enroulements haute tension.

- Hauteur de la bobine : $h_{B2} = 600,9 \text{ mm.}$
- Nombre total de galettes : $n_{g2} = 43 \text{ galettes}$
- Nombre de spires par galette : $W_{g2} = 18 \text{ spires/galette}$

- Le nombre total de galettes est réparti comme suit :

- pour (+ 5%) c'est $n_{g2} (+ 5\%) = 43$ galettes

- pour (0 %) c'est $n_{g2} (0\%) = \frac{W_2}{W_{g2}}$ où $W_2 = W_1 \cdot \frac{U_{f2}}{U_{f1}}$

$$W_2 = \frac{156 \times 15000}{3175,4}$$

$$W_2 = 736,9 \text{ sp.}$$

d'où le nombre de galettes $n_{g2} (0\%) = \frac{736,9}{18}$; $n_{g2} (0\%) = 41$ galettes

- pour (- 5 %) c'est $n_{g2} (- 5\%)$

$$n_{g2} (- 5\%) = \frac{W_2''}{W_{g2}} \quad \text{avec } W_2'' = 0,95 W_2 = 0,95 \times 736,9$$

$$W_2'' = 700 \text{ sp.}$$

d'où $n_{g2} (- 5\%) = \frac{700}{18}$

$n_{g2} (- 5\%) = 39$ galettes

En définitive, on aura :

- pour (5 %) : $n_{g2} = 43$ galettes de 18 spires chacune

$$W_2 = 43 \times 18 = 774 \text{ spires}$$

pour (0 %) : $n_{g2} (0\%) = 41$ galettes de 18 spires chacune

$$W_2 = 41 \times 18 = 738 \text{ spires}$$

- pour (- 5 %) $n_{g2} (-5\%) = 39$ galettes de 18 spires chacune

$$W_2'' = 39 \times 18 = 702 \text{ spires}$$

- Le nombre de spires de réglage est donc : W_r

$$W_r = W_2' - W_2'' = 774 - 702 = 72 \text{ spires, qui lui correspond}$$

un nombre de galettes de réglage n_{gr} ; en prenant toujours 18 spires par galettes

on obtient : $n_{gr} = \frac{W_r}{W_{g2}} = \frac{72}{18} = 4$ galettes de réglage de 18 sp/gal.

on voit qu'on peut obtenir un réglage de $(\pm 2 \times 2,5) \%$ au lieu de $\pm 5 \%$.

Cette répartition nous permet de faire un réglage beaucoup plus précis (5 positions au lieu de 3, (+ 5 %, + 2,5 %, 0 %, - 2,5 %, - 5 %), suivant l'importance de la chute de tension.

On a ainsi réalisé des galettes uniformes de 18 spires chacune et d'une tension égale à 2,5 % de la tension nominale.

- Tension par spire : U_{sp2}

$$U_{sp2} = \frac{U_{f2}}{W_2} = \frac{15\,000}{738}$$

$$U_{sp2} = 20,32 \text{ V/sp.}$$

(L'ECELLEN'EST PAS RIGOUREUSEMENT RESPECTE)

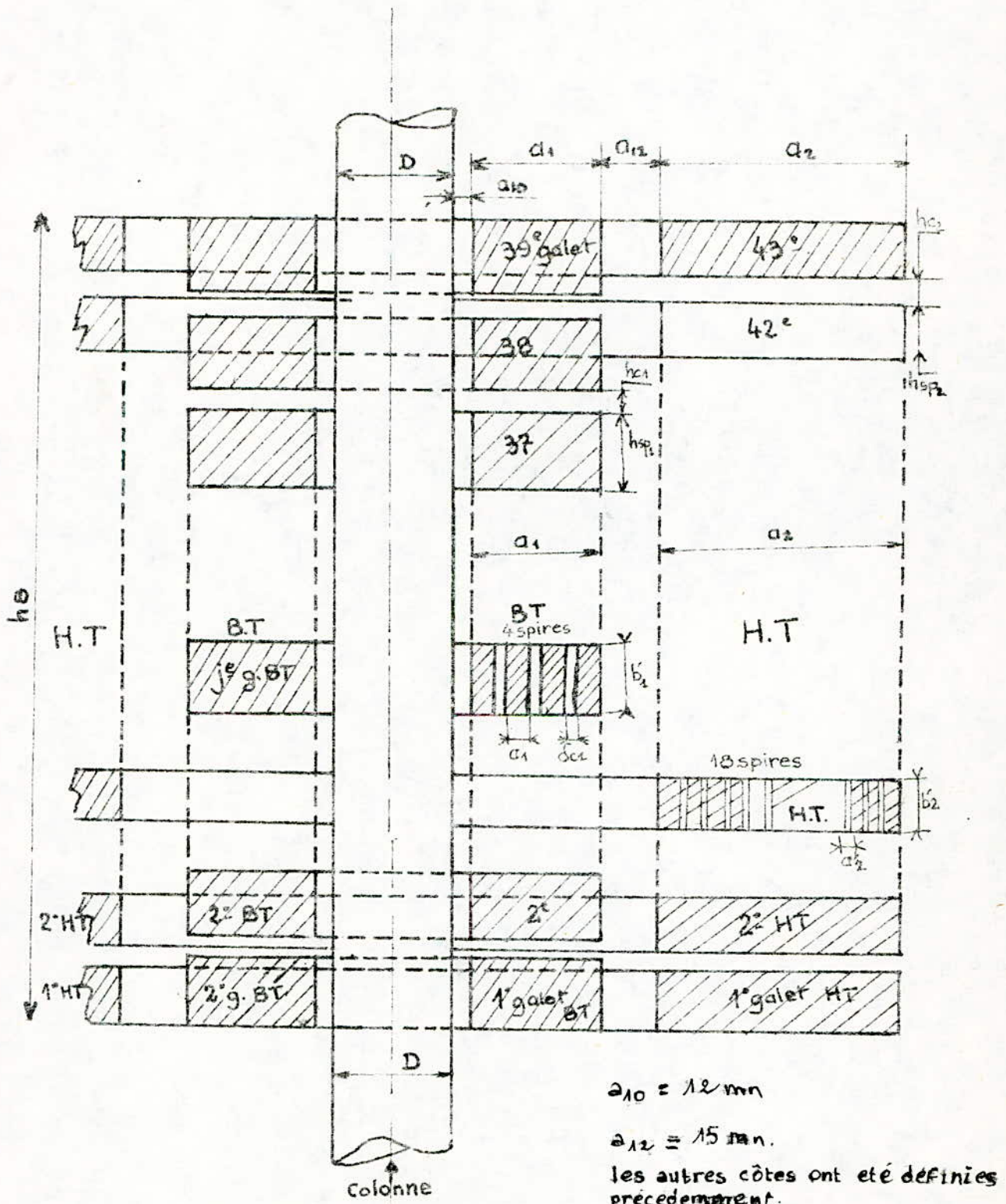


FIGURE B.I.3

- Tension par galette : $U_{gal.}$

- 29 -

$$U_{gal.} = U_{sp2} \times W_{g2} = 20,32 \times 18$$

$$U_{gal.} = 365,76 \text{ V/gal.}$$

- Hauteur de la bobine : a_2

$$a_2 = 55,8 \text{ mm.}$$

- Canal de refroidissement : h_{c2}

$$h_{c2} = 5,63 \text{ mm.}$$

- Distance entre spires successives, on a ~~opté~~ opté pour $\delta_{c2} = 0 \text{ mm.}$

- Hauteur de la spire : h_{sp2}

$$h_{sp2} = b_2' = 8,24 \text{ mm.}$$

- Dimension du conducteur méplat non isolé :

$$\left\{ \begin{array}{l} a = 2,26 \text{ mm.} \\ b = 7,40 \text{ mm.} \end{array} \right.$$

- Section normalisée du conducteur élémentaire :

$$s_{w2n} = 16,20 \text{ mm}^2.$$

- Epaisseur de l'isolation : δ_{is2}

$$\delta_{is2} = 0,84 \text{ mm.}$$

- Dimension du conducteur méplat isolé :

$$a_2' = a + \delta_{is2}$$

$$a_2' = 3,10 \text{ mm.}$$

$$b_2' = b + \delta_{is2}$$

$$b_2' = 8,24 \text{ mm.}$$

- Courant nominal : I_{f2}

$$I_{f2} = 55,55 \text{ A}$$

- Densité de courant : J_2

$$J_2 = \frac{I_{f2}}{s_{w2n}} = \frac{55,55}{16,20}$$

$$J_2 = 3,429 \text{ A / mm}^2$$

II - CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES ET MECANIQUES DES ENROULEMENTS

1° - Enroulements basse tension

1.1 - Résistances électriques des enroulements : $3 R_1$

R_1 est la résistance d'un enroulement qui est donnée par la relation :

$$R_1 = \rho \frac{l_{t1}}{s_{w1}} \quad \text{où} \quad \begin{array}{l} \rho = \text{résistivité du cuivre à } 75^\circ \text{ C} \\ \rho_{75^\circ \text{C}} = 0,0195 \text{ mm}^2 / \text{m} \\ l_{t1} = \text{longueur moyenne du conducteur de l'enroulement B.T} \end{array}$$

$$l_{t1} = W_1 \cdot l_{w1} = \blacksquare$$

s_{w1} = section du conducteur

$$D_{m1} = D + 2 a_{10} + a_1$$

D_{m1} = diamètre moyen d'une spire

$$D_{m1} = 284 + 2 \times 12 + 31,16 = 339,16 \text{ mm.}$$

l_{w1} = longueur moyenne d'une spire

$$l_{w1} = \pi D_{m1} = 3,14 \times 339,16$$

$$l_{w1} = 1,0655 \text{ m}$$

$$l_{t1} = 156 \times 1,0655$$

$$l_{t1} = 166,223 \text{ m}$$

et finalement la résistance de l'enroulement B.T est :

$$R_1 = 0,0195 \times \frac{166,223}{79}$$

$$R_1 = 0,041 ; \quad 3 R_1 = 0,123$$

Le poids du cuivre d'un enroulement noté G_1 est donné par la relation :

$$G_1 = \gamma_{cu} l_{t1} s_{w1} \cdot 10^{-3} \text{ où}$$

$$G_1 = 8,9 \times 166,22 \times 79 \cdot 10^{-3}$$

$G_1 = 116,87 \text{ Kg}$, le poids du cuivre total pour les trois enroulements basse tension est $3 G_1$

γ_{cu} : Densité volumique du cuivre
(Kg/dm³) = 8,9

l_{t1} : (m) ; s_{w1} : (mm²)

G_1 : (Kg)

$$3 G_1 = 3 \times 116,87 = 350,61 \text{ Kg.}$$

1.3 - Pertes actives dans les bobines basse tension : P_{cu1}

On détermine ces pertes en faisant la somme des pertes Joules des enroulements (3 enroulements B.T), des fils de connexion et des pertes supplémentaires. Ces dernières sont dues à l'effet péliculaire (effets de peau) du courant alternatif.

On peut donner la relation de P_{cu1} :

$$P_{cu1} = P_{j1} + P'_{j1} + P_{sp1}$$

où P_{cu1} = pertes actives totales, P_{j1} = Pertes actives des enroulements, P'_{j1} = pertes actives des conducteurs de connexion et P_{sp1} = Pertes actives supplémentaires.

1.3.1 - Pertes Joules des enroulements : P_{j1}

$$P_{j1} = 3 R_1 I_{f1}^2 = 3 \times 0,041 \times (262,43)^2$$

$$P_{j1} = \cancel{8471} \text{ W} \quad 8471 \text{ W}$$

1.3.2 - Pertes joules des conducteurs de connexion : P'_{j1}

$P'_{j1} = R_{conx} \cdot I_{f1}^2$ où R_{conx} représente la résistance électrique totale des conducteurs de connexion (pour les trois enroulements). En estimant la longueur des fils nécessaire à la connexion égale à :

$l_{conx} = 7,5 h_B$ pour un branchement en étoile et une section égale à la section du conducteur des enroulements (s_{w1}), la résistance sera :

$$R_{conx} = \rho \frac{l_{conx}}{s_{w1}}$$

$$l_{conx} = 7,5 \times 0,6009 = 4,5 \text{ m.}$$

$$s_{w1} = 79 \text{ mm}^2$$

$$\rho = 0,0195 \text{ mm}^2 / \text{m.}$$

$$R_{conx} = 0,0195 \frac{4,5}{79}$$

$$R_{conx} = 1,11 \cdot 10^{-3}$$

$$P'_{j1} = 1,11 \cdot 10^{-3} \cdot (262,43)^2$$

$$P'_{j1} = 76,45 \text{ W}$$

1.3.3 - Pertes supplémentaires

Ces pertes sont traduites par une majoration de la résistance des conducteur en courant alternatif (effets de peau).

$P_{sp1} = (K_{MR1} - 1) \cdot P_{j12}$ où P_{j12} = pertes joules des conducteurs (Enroulements plus connexion).

$$P_{j12} = P_{j1} + P'_{j1} = 8471 + 76,45 ; \quad P_{j12} = 8547,5 \text{ W}$$

K_{mR1} = Coefficient de majoration, c'est le rapport $\frac{R_{cc}}{R_{ca}}$; $\left\{ \begin{array}{l} R_{cc} : \text{Résistance } C^{\dagger} \text{ continu} \\ R_{ca} : \text{Résistance } C^{\dagger} \text{ alternatif} \end{array} \right.$

Tout de même on peut calculer ce coefficient K_{mR1} qui est donné pour les enroulements concentriques par la relation :

$$K_{mR1} = 1 + \frac{m_1^2 - 0,2}{9} (\alpha_1 a^4) \quad \text{où } m_1 = \text{nombre de spires par galette } (W_{g1}=4)$$

$$a = \text{largeur du conducteur nu } (a = 4,7 \text{ mm})$$

$$\alpha_1 = \frac{\sqrt{\frac{n_1 \cdot b}{h_F}} \cdot \omega \mu_0}{2 \cdot f} \quad \text{en } (m^{-1})$$

avec n_1 = nombre de galettes ($n_{g1} = 39$ galettes)

b = largeur du conducteur nu ($b = 8,6$ mm.)

$\omega = 2 \pi f$ ($f = 50$ Hz)

$\mu_0 = 4 \pi \cdot 10^{-7}$ H / m.

$f = 0,095 \cdot 10^{-6}$ mm² / m.

h_F = Hauteur de la fenêtre (mm); $h_F = h_B + 2 l_{O2}$

l_{O2} on l'estime du tableau T 11 (page 45), $2l_{O2} = 100$ mm. ; $l_{O2} = 50$ mm.

$h_F = 600,9 + 100 = 700,9$ mm. $h_F = 700,9$ mm.

La valeur de $\alpha_1 = \left(\frac{39 \times 8,6}{700,9} \cdot \frac{314 \times 4 \cdot 10^{-7}}{2 \times 1,95 \cdot 10^{-8}} \right)^{1/2}$

$$\alpha_1 = 72,20 \text{ m}^{-1}$$

d'où $K_{mR1} = 1 + \frac{4^2 - 0,2}{9} (72,20 \cdot (4,7 \cdot 10^{-7}))^4$; $K_{mR1} = 1,023$

Les pertes supplémentaires sont donc : $P_{sp1} = (1,023 - 1) \cdot 8547,5$; $P_{sp1} = 196,6$ W

et finalement : $P_{cu1} = 8471 + 76,5 + 196,6$ $P_{cu1} = 8744$ W

2° - Enroulements haute tension

Pour les mêmes points, on utilise la même méthode (utilisé précédemment, B.T)

2.2. 1 - Résistance des enroulements : $3 R_2$

$$R_2 = \rho \frac{l_{t2}}{s_{w2}}, \quad \text{avec } l_{t2} = W'_2 \cdot l_{w2} ; \quad l_{w2} = \pi D_{m2}$$

$$D_{m2} = D + 2 \cdot a_{10} + 2 \cdot a_{12} + 2 \cdot a_{14} + a_{16}$$

$$D_{m2} = 284 + 2 \times 12 + 2 \times 15 + 2 \times 31,16 + 58,5$$

$D_{m2} = 0,459$ m. diamètre moyen d'une spire de l'enroulement H.T

$$l_{w2} = \pi D_{m2} = 3,14 \cdot 0,459 =$$

$l_{w2} = 1,442$ m. longueur moyenne d'une spire H.T

$l_{t2} = W'_2 \cdot l_{w2}$ où W'_2 nombre de spires total (y compris les spires de réglage de plus 5 %). $W'_2 = 774$ sp.

$$l_{t2} = 774 \times 1,442$$

$$l_{t2} = 1\ 116 \text{ m.}$$

La résistance R_2 d'un enroulement est :

$$R_2 = 0,0195 \times \frac{1\ 116}{16,2}$$

$$R_2 = 1,34 \ \Omega$$

La résistance des trois enroulements est : $3 R_2 = 4,03 \ \Omega$

2.2 - Poids du matériel actif : $3 G_2$

$$G_2 = \gamma l_{t2} \cdot s_{w2} \cdot 10^{-3}, \text{ poids d'un enroulement H.T}$$

$$G_2 = 8,9 \cdot 1\ 116 \cdot 16,2 \cdot 10^{-2}$$

$$G_2 = 161 \text{ Kg.}$$

Le poids des trois enroulements est :

$$3 G_2 = 483 \text{ Kg.}$$

2.3 - Pertes actives : P_{cu2}

2.3.1 - Pertes joules dans les enroulements : P_{j2}

$$P_{j2} = 3 R_2 I_{f2}^2 = 3 \cdot 1,34 (55,55)^2; \quad P_{j2} = 12\ 405 \text{ W.}$$

2.3.2 - Pertes joules dans les conducteurs de connexion : P'_{j2}

$P'_{j2} = R_{conx} \cdot I_{f2}^2$, ici la longueur du conducteur de connexion pour un branchement en triangle est estimée à $14 h_B$, soit : $l_{conx} = 14 \cdot 0,6009 = 8,413 \text{ m.}$

$$R_{conx_2} = 0,0195 \frac{8,413}{16,2}$$

$$R_{conx_2} = 0,010 \ \Omega$$

$$P'_{j2} = 0,010 \times (55,55)^2$$

$$P'_{j2} = 30,86 \text{ W.}$$

2.3.3 - Pertes supplémentaires : P_{sp2}

- Pertes joules dans les conducteurs (bobines plus connexion)

$$P_{j22} = P_{j2} + P'_{j2} = 12405 + 30,86$$

$$P_{j22} = 12435,86 \text{ W.}$$

- Facteur de majorations : K_{mR2}

On utilise les mêmes formules de (2.3) en remplaçant l'indice 1 par 2 correspondant à l'enroulement HT.

$$\text{On trouve } K_{mR2} = 1,023$$

et finalement les pertes supplémentaires sont :

$$P_{sp2} = (K_{mR2} - 1) \cdot P_{j22} = (1,023 - 1) \cdot 12435,86; \quad P_{sp2} = 286 \text{ W.}$$

Les pertes actives dans les enroulements H.T sont donc ;

$$P_{cu2} = 12\ 405 + 30,86 + 286$$

$$P_{cu2} = 12722 \text{ W.}$$

3 - Pertes joules totales dues à la charge : P_K

Ces pertes sont données par la relation suivante : $P_K = K_{P_K} (P_{cu1} + P_{cu2})$

K_{P_K} est un coefficient de majoration qui met en évidence les pertes supplémentaires actives dans le circuit magnétique et même les autres pertes dans les parties mécaniques. Sa valeur est donnée en fonction de la puissance nominale du transformateur dans le tableau T⁸ (page 44), on l'estime à : $K_{P_K} = 1,08$

D'où $P_K = 1,08 (8744 + 12722)$ $P_K = 23183,28$ W. soit 23,184 KW.

4^c - Conclusion

Le cahier de charge indique une perte P_K due à la charge égale à 24 KW. et les normes acceptent ces pertes dans une plage de $\pm 10\%$. (il s'agit des pertes calculées).

Erreur relative : $\frac{\Delta P_K}{P_K} = \frac{|23,184 - 24|}{23,184} \cdot 100 = 3,53\%$

Cette erreur est très acceptable. Les pertes P_K calculées sont inférieures à celles données par le cahier de charge, de ce fait, le rendement du transformateur est amélioré.

III - GEOMETRIE ET CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES DU CIRCUIT MAGNETIQUE

Dans cette partie on dimensionne les différentes côtes du circuit magnétique (figure III - 1) et on calculera les pertes magnétiques actives et réactives. Le circuit magnétique est réalisé à l'aide des tôles d'acier isolées, d'épaisseur $e = 0,35$ mm.

1^c - Longueur de la fenêtre : l_F

de la figure 'a', on tire la relation donnant l_F qui est la suivante :

$l_F = 2(a_{10} + a_1 + a_{12} + a_2) + a_{22}$ où tous les paramètres sont connus.

$l_F = 2(1,2 + 3,116 + 1,5 + 5,58) + 1,7$ $l_F = 24,5$ cm.

2^c - Hauteur de la fenêtre : h_F

Toujours de la figure 'a', on tire la relation de h_F

$h_F = h_B + 2 \cdot l_{02}$ où tous les paramètres sont connus.

$h_F = 60,09 + 2 \cdot 5$ $h_F = 70,1$ cm.

3^c - Longueur entre axes de deux colonnes successives : l_{cc} .

toujours de la figure 'a', on tire $l_{cc} = l_F + D$ où tous les paramètres sont connus.

$l_{cc} = 24,5 + 28,4$ $l_{cc} = 52,9$ cm.

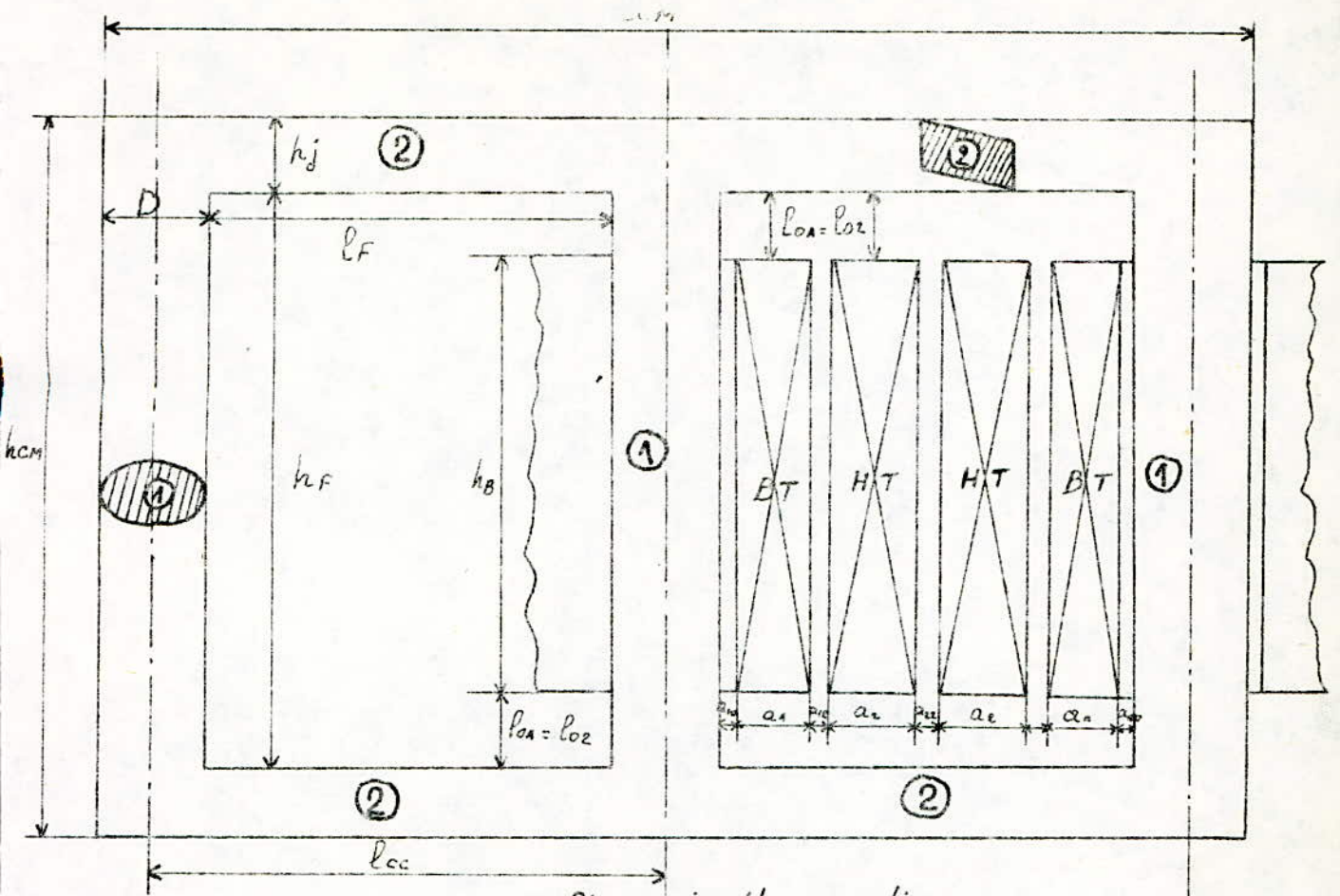


fig a : circuit magnetique

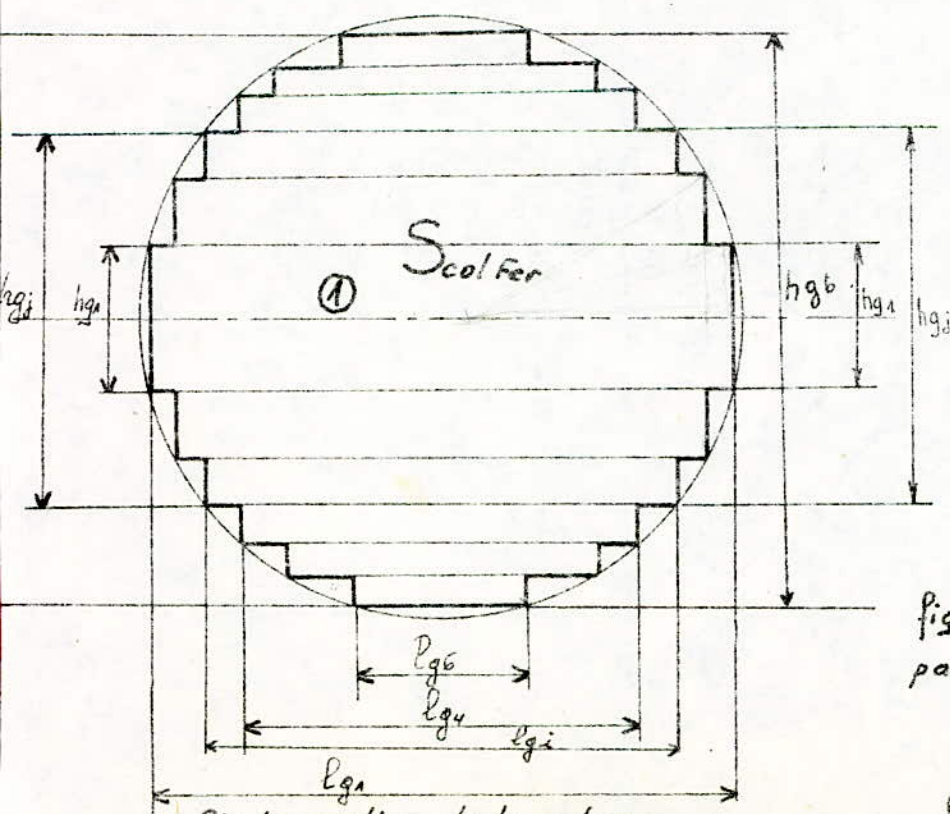


fig b : section de la colonne. partie 1 de la fig a.

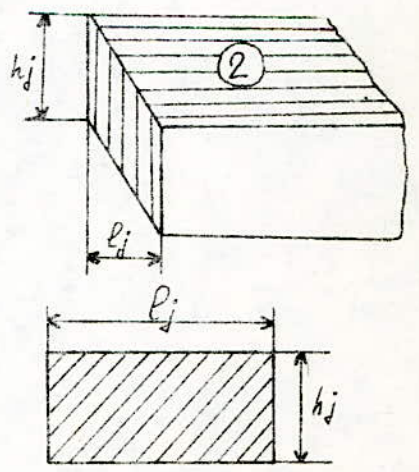


fig c : Section de la culasse. partie 2 de la fig a.

4° - Section de la ~~colonne~~ ^{CULASSE} : S_j (Fig. III^A 'c')

La section de la culasse est estimée à 1,15 fois la section du fer de la colonne, ceci est pour bien canaliser le flux dans le circuit magnétique (donc on diminue les lignes de fuites).

$$S_j = 1,15 \cdot S_{\text{fercol}} \quad \text{avec } S_{\text{fercol}} = 553,65 \text{ cm}^2 = 1,15 \cdot 553,65 ; S_j = 636,70 \text{ cm}^2$$

5° - Induction magnétique dans la culasse : \hat{B}_j

Le flux dans le circuit magnétique est considéré le même. On peut en déduire l'expression de \hat{B}_j .

$$\text{On a } \hat{B}_c \cdot S_{\text{fercol}} = \hat{B}_j \cdot S_j \quad \text{ceci nous donne } \hat{B}_j = \hat{B}_c \frac{S_{\text{fercol}}}{S_j}$$

$$\text{d'où finalement : } \hat{B}_j = \frac{\hat{B}_c}{1,15} = \frac{1,65}{1,15} ; \hat{B}_j = 1,435 \text{ T.}$$

6° - Géométrie de la section de la colonne : (fig. III^A 'b')

La colonne est formée de 6 gradins qu'on proposera de dimensionner. La section de la colonne est donc définie par l'assemblage des paquets de tôles formant ces gradins.

6.1 - Largeur des gradins : l_{gi} ($i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$)

On calcule ces grandeurs en appliquant les relations (6.1) ci-dessous, trouvées par l'expérience. Elles mettent en évidence le coefficient d'utilisation (K_u) de la section de la colonne.

Autrement dit : plus que le rapport du périmètre (πD) de la colonne sur la section utile est petit, le coefficient d'utilisation est meilleur.

$$K_u = \frac{S_u}{S_{\text{brut}}} ; \begin{array}{l} S_u = \text{Section utile de la colonne} \\ K_u : \text{Coef d'UTILISATION} \\ S_{\text{brut}} = \text{section brut de la colonne} : \frac{\pi D^2}{4} \end{array}$$

$$D = 284 \text{ mm.}$$

Relations " 6.1 "

$l_{g1} = 0,960 D$	$l_{g1} = 272,64 \text{ mm.}$
$l_{g2} = 0,885 D$	$l_{g2} = 251,34 \text{ mm.}$
$l_{g3} = 0,775 D$	$l_{g3} = 220,10 \text{ mm}$
$l_{g4} = 0,631 D$	$l_{g4} = 179,20 \text{ mm}$
$l_{g5} = 0,466 D$	$l_{g5} = 132,34 \text{ mm}$
$l_{g6} = 0,280 D$	$l_{g6} = 79,52 \text{ mm}$

6.2 - Hauteurs des gradins : h_{gj} ($j = 1, 2, 3, 4, 5, 6$)

De la figure III.1, on tire la relation donnant la hauteur des gradins. Il suffit d'utiliser le théorème de Pythagore.

Les paquets de tôles sont rectangulaires, donc on peut écrire :

$$\left(\frac{D}{2}\right)^2 = \left(\frac{l_{gi}}{2}\right)^2 + \left(\frac{h_{gj}}{2}\right)^2 \quad ; \text{Théorème de PYTHAGORE.}$$

D'où finalement on tire :

$$h_{gj} = \sqrt{D^2 - l_{gi}^2} \quad i=j=(1,2,\dots,6). \quad D^2 = 80\,656 \text{ mm}^2$$

$$h_{g1} = \sqrt{D^2 - l_{g1}^2} \quad h_{g1} = 79,52 \text{ mm.}$$

$$h_{g2} = \sqrt{D^2 - l_{g2}^2} \quad h_{g2} = 132,22 \text{ mm.}$$

$$h_{g3} = \sqrt{D^2 - l_{g3}^2} \quad h_{g3} = 179,47 \text{ mm.}$$

$$h_{g4} = \sqrt{D^2 - l_{g4}^2} \quad h_{g4} = 220,32 \text{ mm.}$$

$$h_{g5} = \sqrt{D^2 - l_{g5}^2} \quad h_{g5} = 251,28 \text{ mm.}$$

$$h_{g6} = \sqrt{D^2 - l_{g6}^2} \quad h_{g6} = 272,64 \text{ mm.}$$

7° - Géométrie de la section de la culasse (fig. III.1 'c')

La section de la culasse est quadrilatère de côtes h_j et l_j respectivement la hauteur et la largeur.

7.1 - Largeur de la culasse : l_j

La largeur de la culasse doit être égale à la largeur de la tôle la plus large du noyau, c'est l_{g1} (ou h_{g6})

$$l_j = l_{g1} \quad l_j = 272,64 \text{ mm.}$$

7.2 - Hauteur de la culasse : h_j

On a la section S_j de la culasse et la largeur l_j .

la hauteur h_j est donc : $h_j = \frac{S_j}{l_j} = \frac{63670}{272,64} ; h_j = 233,53 \text{ mm.}$

8° - Hauteur du circuit magnétique : $h_{C.M}$

De la figure III.1, on tire la relation de $h_{C.M}$ qui est la suivante :

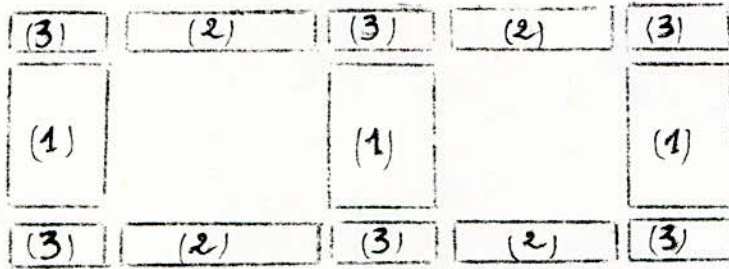
$$h_{C.M} = h_F + 2h_j = 700,9 + 2 \cdot 233,53 \quad h_{C.M} = 1168 \text{ mm} = 1,168 \text{ m.}$$

9° - Longueur du circuit magnétique : $l_{C.M}$ (Figure III.1)

$$l_{C.M} = D + 2l_{C.C} = 284 + 2 \cdot 529 \quad l_{C.M} = 1342 \text{ mm} = 1,342 \text{ m.}$$

10° - Poids du circuit magnétique

Le poids du circuit magnétique est le produit de son volume par la densité volumique des tôles d'acier utilisées ($\gamma = 7,65 \text{ Kg./dm}^3$). Et comme les pertes dans le circuit magnétique ne sont pas les mêmes dans les différentes régions, on propose de partager ce circuit en plusieurs parties simples : Colonnes, Culasses et coins (voir figure ci-dessous). Les pertes suscitées sont données par unité de masse en fonction de l'induction magnétique qui les traverse.



- (1) - Colonnes, au nombre de 3
- (2) - Culasses, au nombre de 4
- (3) - Coins, au nombre de 6

10.1 - Poids des colonnes : G_{col} .

$G_{col} = 3 \gamma_2 V_{col}$ où V_{col} = volume d'une colonne

γ_2 = Densité volumique des tôles.

$V_{col} = S_{col} \cdot h_{col}$ où S_{col} = Section de la colonne ($553,65 \text{ cm}^2$)

h_{col} = Hauteur de la colonne ($70,1 \text{ cm}$)

$V_{col} = 553,65 \cdot 70,1$; $V_{col} = 38,811 \text{ dm}^3$

$G_{col} = 3 \cdot 7,65 \cdot 38,811$; $G_{col} = 890,71 \text{ Kg.}$

10.2 - Poids des culasse : G_{cul}

On a quatre culasses : $G_{cul} = 4 \cdot \gamma_2 \cdot V_j$ où V_j = Volume d'une culasse

$V_j = S_j \cdot l_F$ avec S_j et l_F respectivement la section et la largeur de la culasse ($S_j = 636,70 \text{ cm}^2$; $l_F = 24,50 \text{ cm.}$)

$V_j = 636,70 \cdot 24,50$

$V_j = 15,60 \text{ dm}^3$

$G_{cul} = 4 \cdot 7,65 \cdot 15,60$

$G_{cul} = 477,33 \text{ kg.}$

10.3 - Poids des coins : G_{coins}

Il y a six coins ; $G_{coins} = 6 \cdot \gamma_2 \cdot V_{coins}$; $V_{coins} = S_j \cdot D \cdot 10^{-3}$

$[dm^3]$ $[cm^2]$ $[cm]$

$V_{coins} = 636,70 \cdot 28,40 \cdot 10^{-3}$

$V_{coins} = 18,08 \text{ dm}^3$

et $G_{coins} = 6 \cdot 7,65 \cdot 18,08$

$G_{coins} = 830 \text{ Kg.}$

10.3 - Poids total du circuit magnétique (culasses, collones et coins): $G_{C.M}$

$$G_{CM} = G_{col} + G_{cul} + G_{coins} = 890,71 + 477,33 + 830 \quad ; \quad G_{CM} = 2198 \text{ Kg.}$$

11 - Pertes actives à vide dans le circuit magnétique : P_o

Ces pertes sont données par la relation : $P_o = P_{fo} + P_{so}$

où $P_{fo} = P_h + P_F$ où P_h = Pertes par hystérisis et P_F = Pertes par courant de Foucault; P_{so} = Pertes supplémentaires dans les différentes pièces de serrage, qui sont estimées à (15 % \div 20 %) de P_{fo} .

Le calcul séparé de pertes par hystérisis et de courant de Foucault ne présente pas un grand intérêt et demande des calculs un peu complexes. Les courbes de la figure 1 (page 42) nous donnent globalement ces pertes par unité de masse, avec une bonne précision, en fonction de l'induction, de la nature des tôles, de leur épaisseur, et du sens de laminage α° . Ce dernier paramètre (α°) influence beaucoup sur les pertes spécifiques

On prend $\alpha^\circ = 0^\circ$, sens de laminage fait un angle de 0° (degré) avec le sens de l'induction magnétique. (à titre d'exemple, voir page 41 ; si $\alpha = 10^\circ$ les pertes à vides augmentent considérablement et surtout les pertes réactives).

La relation donnant les pertes fer est donc :

$$P_{fer} = p_{sp} \cdot G \quad \text{où } p_{sp} = \text{pertes spécifiques (W/Kg.) tirées de la courbe}$$

$\alpha^\circ = 0^\circ$ (degré) pour une induction \hat{B}_c et $G =$ poids du matériaux traversé par cette induction. \hat{B}_c

11.1 - Pertes fer dans les colonnes

L'induction dans les colonnes est $\hat{B}_c = 1,65 \text{ T.}$ lui correspond une perte spécifique: $p_{sp \text{ col}} = 1,5 \text{ W / Kg.}$

$$\text{D'où } P_{fercol} = 1,5 \cdot 890,71 \quad ; \quad P_{fercol} = 1336 \text{ W.}$$

11.2 - Pertes fer dans les culasses

L'induction dans les culasses est $\hat{B}_j = 1,435 \text{ T.}$ lui correspond une perte spécifique : $p_{spcul} = 1,1 \text{ W/Kg.}$

$$\text{D'où } P_{fercul} = 1,1 \cdot 477,33 \quad ; \quad P_{fercul} = 525 \text{ W.}$$

11.3 - Pertes fer dans les Coins

Dans cette partie l'induction n'est pas uniforme, on l'estime égale à la moyenne des inductions dans la colonne et la culasse. Cette approximation est acceptable car un calcul précis donne pratiquement les mêmes résultats.

L'induction dans les coins est donc :

$$\hat{B}_{\text{coins}} = \frac{B_{\text{col}} + B_j}{2} ; \quad \hat{B}_{\text{coins}} = 1,54 \text{ T} ; \text{ lui correspond une perte spécifique : } p_{\text{sp coins}} = 1,15 \text{ W/Kg.}$$

$$\text{et } P_{\text{fercoins}} = 1,15 \cdot 830 \quad P_{\text{fercoins}} = 955 \text{ W}$$

11.4 - Pertes supplémentaires : P_{so}

a) Pertes supplémentaires dans les colonnes et les culasses.

On estime ces pertes à 18 % des pertes fer total

$$P_{1\text{so}} = 0,18 (P_{\text{fercol}} + P_{\text{fercul}}) = 0,18 (1336 + 525) ; \quad P_{1\text{so}} = 355 \text{ W.}$$

b) Pertes supplémentaires dans les coins

Ces pertes sont estimées à 50 % des pertes fer dans les coins

$$P_{2\text{so}} = 0,50 \cdot P_{\text{fercoins}} = 0,50 \cdot 955 \quad P_{2\text{so}} = 477,5 \text{ W.}$$

11.5 - Pertes actives à vide : P_o

$$P_o = P_{fo} + P_{so}$$

$$P_{fo} = P_{\text{fercol}} + P_{\text{fercul}} + P_{\text{fercoins}} = 1336 + 525 + 955 = 2816 \text{ W.}$$

$$P_{so} = P_{1\text{so}} + P_{2\text{so}} = 355 + 477,5 = 832,5 \text{ W.}$$

$$P_o = 2816 + 832,5$$

$$P_o = 3648,5 \text{ W.}$$

12 - Pertes réactives ~~à vide~~ dans le circuit magnétique : Q_o

Pour les mêmes raisons que les pertes actives, de la figure 2 (page 42) on estime les pertes réactives spécifiques (q_{sp}) correspondantes aux différentes parties du circuit magnétique déjà définies, sans oublier les pertes dues aux entrefers qui sont considérables.

$$Q_o = q_{\text{sp}} \cdot G$$

où Q_o = Pertes réactives à vide

q_{sp} = pertes réactives spécifiques

G = Poids correspondant.

12.1 - Pertes réactives dans les colonnes : Q_{col}

$$\hat{B}_{\text{col}} = 1,65 \text{ T} \quad \text{lui correspond} \quad q_{\text{sp}} = 3,5 \text{ VAR / Kg.}$$

$$Q_{\text{col}} = q_{\text{sp}} \cdot G_{\text{col}} = 3,5 \cdot 890,71 ; \quad Q_{\text{col}} = 3117,5 \text{ VAR}$$

~~mesure~~ ~~mesure~~ ~~la~~ ~~mesure~~ : Q_{col}

12.2 - Pertes réactives dans les culasses : Q_{cul}

$$\hat{B}_j = 1,435 \text{ T} \quad \text{Lui correspond} \quad q_{sp} = 1,5 \text{ VAR/Kg.}$$

$$Q_{cul} = 1,5 \cdot 477,33 \quad Q_{cul} = 716 \text{ VAR.}$$

12.3 - Pertes réactives dans les coins : Q_{coins}

$$\hat{B}_{coins} = 1,54 \text{ T} \quad \text{Lui correspond} \quad q_{sp} = 1,9 \text{ VAR/Kg.}$$

$$Q_{coins} = 1,9 \cdot 830 \quad Q_{coins} = 1\,557 \text{ VAR?}$$

12.4 - Pertes réactives dans les entrefers : Q_f

Ces pertes sont données par la relation suivante :

$$Q_f = q_o \cdot n_f \cdot S_f \quad \text{où } q_o = \text{pertes spécifiques dans l'entrefer (VAR/cm}^2\text{)}$$

n_f = Nombre d'entrefer.

S_f = Section de l'entrefer (cm²)

La section de l'entrefer est égale à celle de la colonne, le nombre d'entrefer est en moyenne estimé à sept (7). Quant à la perte spécifique on l'estime à 95 % de celle de la colonne - (car $\hat{B}_{col} \approx \hat{B}_{entrefer}$).

On peut écrire alors :

$$Q_f = 0,95 \cdot q_{col} \cdot n_f \cdot S_f = 0,95 \cdot 3,5 \cdot 7 \cdot 555,65 ; \quad Q_f = 12\,933 \text{ VAR.}$$

12.5 - Pertes réactives dans le circuit magnétique : Q_o

$$Q_o = Q_{col} + Q_{cul} + Q_{coins} + Q_f$$

$$Q_o = 3\,117,5 + 716 + 1\,577 + 12\,933 ; \quad Q_o = 18\,343,5 \text{ VAR.}$$

IV - CALCUL DU COURANT DE MARCHÉ À VIDE : I_o

Ce courant I_o est caractérisé par deux (2) grandeurs : un courant actif noté I_{oa} et l'autre réactif noté I_{or} ou I_{om} de marche à vide.

$$\vec{I}_o = \vec{I}_{oa} + \vec{I}_{or}$$

Notre transformateur est abaisseur, le courant de marche à vide est donné par l'enroulement de haute tension.

1° - Courant actif à vide : I_{oa}

Les pertes actives P_o dissipées dans le circuit magnétique sont fonction du courant à vide : I_{oa}

$$P_o = \sqrt{3} \cdot U_2 \cdot I_{oa} \quad \text{d'où } I_{oa} = \frac{P_o}{\sqrt{3} \cdot U_2} = \frac{3\,628,95}{\sqrt{3} \cdot 15000} ; \quad I_{oa} = 0,14 \text{ A.}$$

2° - Courant réactif à vide : I_{or}

La puissance réactive à vide Q_o est liée à I_{or} par :

$$Q_o = \sqrt{3} U_2 \cdot I_{or} \text{ d'où } I_{or} = \frac{Q_o}{\sqrt{3} \cdot U_2} = \frac{18\,343,5}{\sqrt{3} \cdot 15\,000} ; I_{or} = 0,7 \text{ A.}$$

3° - Courant de marche à vide : I_o

$$I_o = (I_{oa}^2 + I_{or}^2)^{1/2} = (0,14^2 + 0,70^2)^{1/2} \quad I_o = 0,714 \text{ A.}$$

En valeur réduite : i_o

$$i_o (\%) = \frac{I_o}{I_{2n}} \cdot 100 = \frac{0,714}{55,55} \cdot 100 \quad i_o (\%) = 1,285 \%$$

4° - Influence du sens de laminage dans la marche à vide :

On prend $\alpha = 10^\circ$ pour sens de laminage (angle entre l'induction et le sens de laminage).

On utilise la même méthode que précédemment, on obtient pour résultats.

a) pertes actives P_o et courant actif I_{oa}

$$P_{fercol} = 2 \cdot 890,71 = 1\,781,5 \text{ W.}$$

$$P_{fercul} = 1,3 \cdot 477,33 = 620,53 \text{ W.}$$

$$P_{fercoins} = 1,64 \cdot 830 = 1\,361 \text{ W.}$$

$$P_{fo} = 3\,763 \text{ W.}$$

$$P_{so} = 1\,113 \text{ W.}$$

$$\text{et finalement } P_o = 4\,876 \text{ W.} ; I_{oa} = 0,187 \text{ A.}$$

b) Pertes réactives Q_o et courant réactif I_{or}

$$Q_{col} = 15 \cdot 890,71 = 13\,360,5 \text{ VAR}$$

$$Q_{cul} = 2,4 \cdot 477,33 = 1\,145,6 \text{ VAR}$$

$$Q_{coins} = 5 \cdot 830 = 4\,150 \text{ VAR.}$$

$$Q_s = 0,95 \cdot 15 \cdot 7 \cdot 553,65 = 55\,226,6 \text{ VAR.}$$

$$\text{et finalement : } Q_o = 73\,882,7 \text{ VAR} ; I_{or} = 2,843 \text{ A.}$$

c) Courant de marche à vide : I_o

$$I_o = 2,845 \text{ A.} ; i_o (\%) = 5,12 \%$$

On voit que pour un angle $\alpha = 10^\circ$, le courant de marche à vide est très important, il sort de la tolérance exigée par les normes. On se voit donc obligé d'utiliser les tôles de bonne qualité $\alpha = 0^\circ$.

V - COURBES ET TABLEAUX UTILISES DANS LE CALCUL PRELIMINAIRE

ALIMENTATION de L'ACIER ' A.R.M.C.O ' . M6

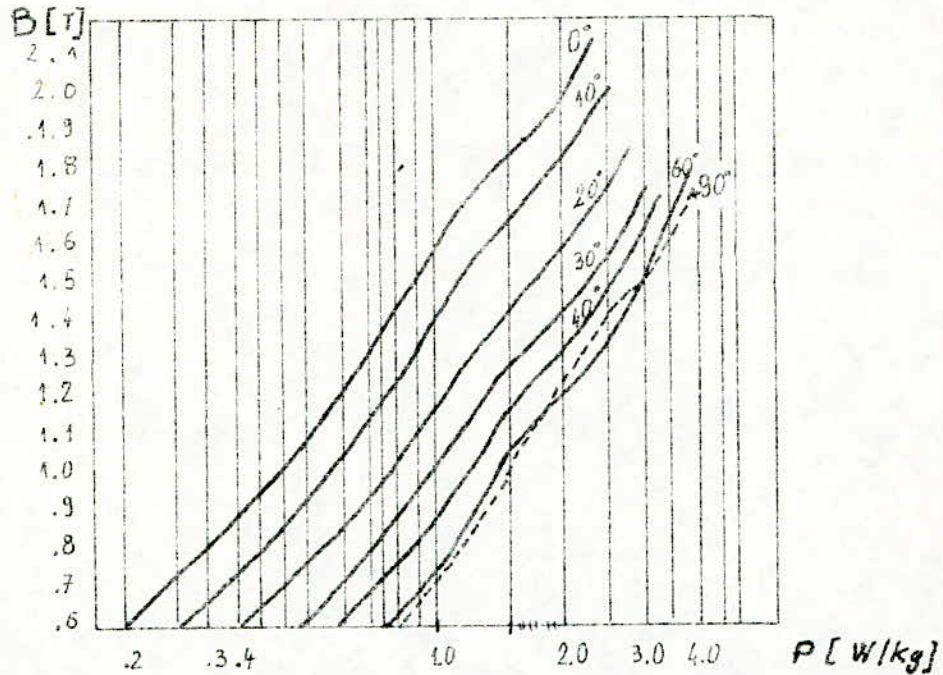


Fig. 1 - Pertes spécifiques actives dans l'aimantation de l'acier ARMCO. N6

B (T) = Induction magnétique; α (en degré) : sens de l'aminage.

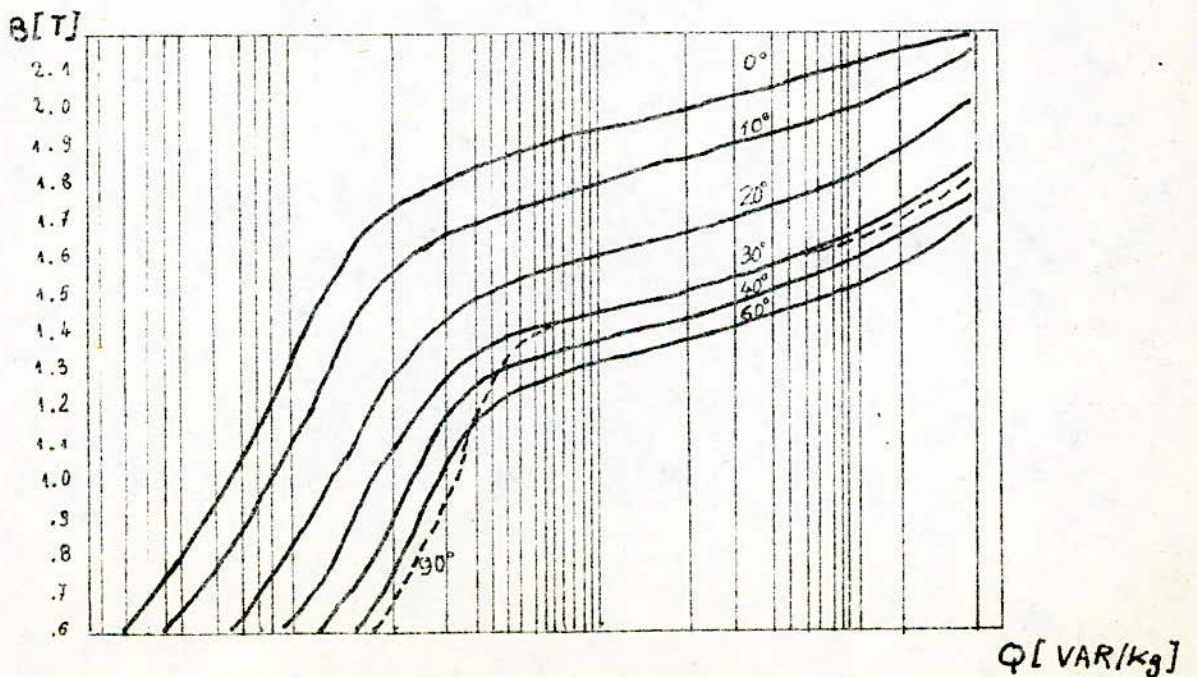


Fig 2 - Pertes spécifiques réactives dans l'aimantation de l'acier ARMCO M6X

TABIEAU T.1 : Coefficient de Svelte β

Sc K.V.A	3 ÷ 2000	3 ÷ 2000	2000 ÷ 20000	2000 ÷ 20000
U KV	6 à 10	35	35	110
β_{cu}	3,4 à 1,75	3 à 1,8	1,8 à 1,3	2 à 1,5
β_{al}	1,8 à 1,15		1,77 à 1,49	

TABIEAU T.2 - a_{12} - pour transformateur immergé dans l'huile

Un KV	3	6	10	15	20	35	110	220
U _{cei} KV	3,5	7,2	12	17,5	24	36	123	245
a_{12} cm	0,6 ÷ 1	0,8 ÷ 1,2	1 ÷ 1,5	1,2 ÷ 1,8	2,1 ÷ 2,7	6 ÷ 8	13 ÷ 22	

TABIEAU T.3 coefficient K

Sc KVA	100	100 ÷ 560	750 ÷ 5600	7500 ÷ 31 500
Un KV	10	10	à 35	
K	0,6 ÷ 0,8	0,48 ÷ 0,6	0,4 ÷ 0,5	0,44 ÷ 0,46

TABIEAU T.4 - Coefficient de remplissage : K_r

Epaisseur de la tôle (mm)	Isolation avec papier (mm)	Isolation à la carli- te (mm)
0,5	0,875	0,97 ÷ 0,98
0,35	0,85	0,94 ÷ 0,95
0,28	-	0,93 ÷ 0,94

Tableau T.5 : K_g : coefficient de géométrie

S_c (KVA)	5	4 . 15	15 . 45	45 . 5000
$n_{gradins}$	2	4	5	6
D approchée (cm)	8	8 . 12	12 . 16	16 . 51
K_g	0,786	0,866	0,910	0,930

Tableau T.6 : Induction magnétique de crête \hat{B}_c dans la colonne du transformateur.

S_c (KVA)	10 . 50	75 . 250	315 . 600	630 . 1000	1000
\hat{B}_c (T) Tôles laminées à froid	1,25 . 1,55	1,55 . 1,65	1,62 . 1,68	1,63 . 1,69	1,64 . 1,70
B_c (T) Tôles laminées à chaud	1,1 . 1,35	1,41 . 1,46	1,42 . 1,47	—	1,43 . 1,48

Tableau T.7 : a_{10} : distance entre colonne et enroulement basse tension

U_{1n} (KV)	1	3	6	10	15	20	35
a_{10} (cm)	0,5	1,2	1,2 . 1,5	1,8	1,8 . 2	2,1 . 2,3	3

Tableau T.8 : K_{PK} : Coefficient de pertes supplémentaires

S_n (KVA)	30	180	600	1000	1600	2000	2500	4000	6000	10000
K_{PK}	1,02	1,025	1,05	1,06	1,07	1,075	1,08	1,09	1,11	1,125

Induction magnétique de crête \hat{B}_c dans la colonne du transformateur.
(voir page 44).

Tableau T.10 :

U_n (KV)	10	20	30	40	60	70	80	90	100	120	140
S_{wmm2}											
	0,64	0,84	0,84	0,94	1,24	1,44	1,44	1,54	1,64	1,84	2,04
dis normal	0,84	0,94	1,04	1,24	1,44	1,64	1,64	1,74	1,83	2,04	2,24
II sm Bobine	0,84	0,94	1,04	1,24	1,84	2,24	2,64	3,04	3,64	4,84	6,24
dis	1,04	1,14	1,24	1,44	2,04	2,44	2,84	3,24	3,84	5,04	6,44
I sm Bobine	0,84	1,14	1,54	1,94	2,94	3,54	4,24	4,84	5,54	7,04	8,64
dis	1,04	1,34	1,74	2,04	3,14	3,74	4,44	5,04	5,74	7,24	8,84

Tableau T.11: l_{02} , a_{22}

U_n (KV)	5	10	20	30
a_{22} (cm)	1	1,4	1,7	2,3
l_{02} (cm)	2,3	3,5	5	6,7,5

Tableau T.12 : Type d'enroulement.

I_F (A)	U_n (KV)	S_w (mm ²)	Welmex	Type d'enroulements
30-50	< 35	10	1-2	stratifié
jusqu'à 250	≤ 0,525	50	1	cylindrique une seule couche
250-800	≤ 0,525	300	5	Cylindre une seule couche
800-1600	≤ 1	600	2	- cylindrique avec 2 fils de conducteurs
			5	- Plusieurs couches < 3
1600-3000	0,525	1200	20	Spiralé
3000-4500	0,525	2400	2 20	HOBART
4500-20000		14.000	8 20	avec conducteur Roebel cylindrique
> 50	> 3,6	400	6	Galettes continues.

a \ b	1,56	1,68	1,81	1,95	2,10	2,26	2,44	2,63	2,83	3,05	3,28	3,53	3,80	4,10	4,40	4,70
3,05	4,55	4,91	5,31	5,74	5,93	6,44	6,96	7,54	8,15	8,72	—	—	—	—	—	—
3,28	4,91	5,30	5,73	6,19	6,44	6,93	7,52	8,15	8,80	9,51	10,30	—	—	—	—	—
3,53	5,30	5,72	6,18	6,67	6,93	7,50	8,13	8,80	9,51	10,30	11,10	12	—	—	—	—
3,80	5,72	6,17	6,67	7,20	7,50	8,11	8,79	9,51	10,30	11,10	12,00	12,90	13,90	—	—	—
4,10	6,19	6,68	7,21	7,79	8,13	8,74	9,52	10,30	11,10	12,00	13,00	14,00	15,10	15,90	—	—
4,20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4,40	6,65	7,18	7,75	8,37	8,76	9,46	10,20	11,00	12,00	12,90	13,90	15,00	16,20	17,10	18,50	—
4,50	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4,70	7,12	7,79	8,30	8,96	9,39	10,10	11,00	11,90	12,80	13,80	14,90	16,10	17,40	18,40	—	21,20
5,10	7,75	8,36	9,02	9,74	10,20	11,00	11,90	12,90	13,90	15,10	16,20	17,50	18,90	20,00	21,50	—
5,50	8,37	9,03	9,75	10,50	11,10	11,90	12,90	14,00	16,10	16,30	17,50	18,90	20,40	21,70	23,30	25
5,90	8,89	9,70	10,50	11,30	11,90	12,80	13,90	15,00	16,20	17,50	18,90	20,30	21,90	23,30	25,90	26,80
6,40	9,77	10,60	11,40	12,30	12,90	14,00	15,10	16,30	17,60	19,00	20,50	22,10	23,80	25,30	27,30	29,20
6,90	10,60	11,40	12,30	13,30	14,00	15,10	16,30	17,70	19,00	20,40	22,10	23,10	25,70	27,40	29,50	31,50
7,40	11,30	12,60	13,30	14,20	15,00	16,20	17,60	19,00	20,40	22,10	23,60	25,60	27,60	29,40	31,70	33,90
8,00	12,30	13,20	14,40	15,40	16,30	17,60	19,00	20,50	22,10	23,90	26,70	27,70	29,90	31,90	34,30	36,70
8,60	13,20	14,20	15,50	16,60	17,60	18,90	20,50	22,10	23,80	25,70	27,70	29,90	32,20	34,40	36,90	39,50
9,30	14,30	15,40	16,60	17,90	19,00	20,50	22,20	24,00	25,80	29,90	30,00	32,30	34,80	37,20	40,50	42,80
10,00	15,40	16,60	17,90	19,30	20,50	22,10	23,00	25,80	27,80	30,00	32,30	34,80	37,50	40,10	43,10	46,10
10,80	16,80	17,90	19,30	20,90	22,20	23,90	25,90	27,90	30,10	32,40	34,90	37,60	40,50	43,10	46,60	49,90
11,60	17,90	19,30	20,80	22,40	23,90	25,70	27,80	30,00	32,30	34,90	37,50	40,50	43,60	46,70	50,10	53,60
12,50	19,80	20,80	22,40	24,20	25,80	27,80	30,00	32,40	34,90	37,60	40,50	43,60	47,00	50,40	54,10	57,90
13,50	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	43,80	—	—	—	—	—

DEUXIEME PARTIE .

CALCUL

MECANIQUE

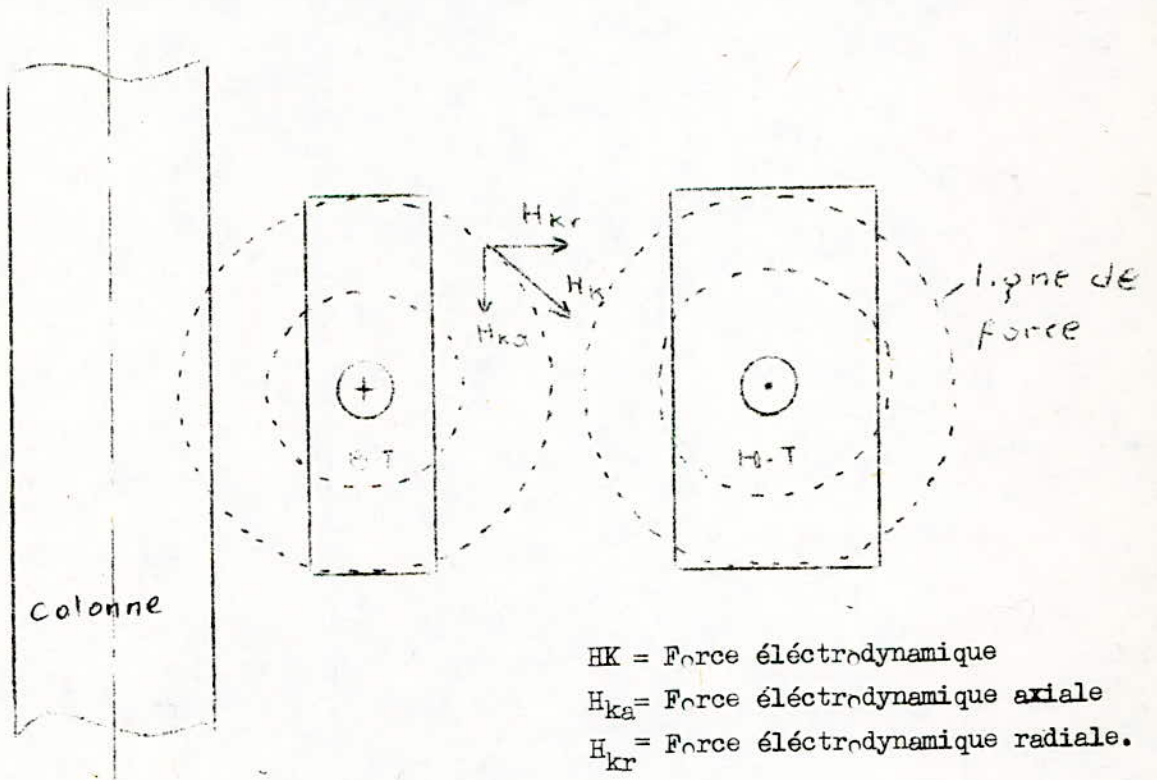
I- EFFORT ELECTRODYNAMIQUE SUR LES ENROULEMENTS

En tenant compte de la loi de Lenz qui dit:

Un conducteur traversé par un courant et se trouvant dans un champ magnétique subit une force appelée force électrodynamique. Cette dernière est en fonction des grandeurs de l'intensité de courant et de l'induction magnétique.

Les enroulements du transformateur subissent ces forces. On étudiera le cas le plus dangereux lors d'un court-circuit. On calculera les différentes forces et vérifiera la stabilité mécanique des bobines.

On présente sur la figure ci-après, les lignes de forces et le vecteur représentant qui est tangent.



I.1 - Courant de court-circuit

Le courant de court-circuit est donné par la relation:

$$i_{kmax} = \sqrt{2} \cdot K_m I_{kdim} \quad (A) \quad \text{où}$$

K_m = coefficient de crête ou d'impulsion

$$K_m = 1 + e^{-\left(\frac{\pi U_{ka}}{U_{kr}}\right)}$$

I_{kdim} = courant stationnaire de court-circuit

En supposant que le reseau est de puissance infinie, le courant stationnaire est calculé par la relation:

$$I_{kdim_i} = \frac{I_{ni}}{U_k} \cdot 100 \quad i=1,2 \quad \text{si} \quad \begin{cases} i=1 \text{ B.T} \\ i=2 \text{ H.T} \end{cases}$$

I1.1 - Courant de court-circuit dans la basse tension:

$$K_m = 1 + e^{-\pi \frac{0,96}{6,8}} \quad K_m = 1,6417$$

$$I_{kdim} = \frac{262,43}{6,86} \times 100 \quad I_{kdim} = 3825,5 \text{ A}$$

$$i_{kmax_1} = \sqrt{2} \cdot 1,6417 \cdot 3825,5 \quad i_{kmax_1} = 8883,4 \text{ A}$$

I1.2 Courant de court-circuit dans la haute tension:

$$K_m = 1,6417$$

$$I_{kdim_2} = \frac{55,55}{6,86} \times 100 \quad I_{kdim_2} = 809,8 \text{ A}$$

$$I_{kmax_2} = \sqrt{2} \cdot 1,6417 \cdot 809,8 \quad i_{kmax_2} = 1880,2 \text{ A}$$

I.2 Forces électrodynamiques:

On calcul séparément les forces électrodynamiques axiales et radiales qui sont donnés par les relations: (Voir fig; 1 I.3 page.52)

a) Forces radiales:

$$F_{ri} = \frac{6,4 (w_i i_{max_i})^2 l_{moy_i} K_r \cdot 10^{-8}}{h_B} \quad (K_{gf})$$

$i=1,2$

où : K_r = COEFFICIENT DE ROGOWSKI $K_r = 0,97$ (calculé)

l_{moy_i} = longueur moyenne de la spire de l'enroulement i. (m): $l w_i$

w_i = nombre de spire de l'enroulement i

h_B = hauteur de la bobine en mètre (m) $h_B = 0,6009 \text{ m}$.

b) Forces axiales:

les bobines basse et haute tension, ont la ^{même} hauteur. Dans ce cas la force axiale est donnée par la relation:

$$F_{a_i} = F_{r_i} \frac{a_r}{2h_B} \quad (\text{Kgf})$$

F_{r_i} = forces radiales de l'enroulement i (kgf)

a_r = largeur du canal de fuite (m) $a_r = 0,044$ m

h_B = hauteur des bobines en (m) $h_B = 0,6009$ m.

I.2.1 - Forces radiales:

I.2.1.1- F_{r_1} : sur l'enroulement B.T.

$$F_{r_1} = \frac{6,4(156.8883,4)^2 \cdot 1,0665 \cdot 0,97}{0,6009} \cdot 10^{-8}$$

$$F_{r_1} = 2,116 \cdot 10^5 \text{ Kgf.}$$

I.2.1.2- F_{r_2} : sur l'enroulement H.T:

$$F_{r_2} = \frac{6,4(774 \times 1880,4)^2 \cdot 1,442 \cdot 0,97}{0,6009} \cdot 10^{-8}$$

$$F_{r_2} = 3,15 \cdot 10^5 \text{ Kg f.}$$

I.2.2 - Forces axiales

I.2.2.1 - F_{a_1} sur l'enroulement basse tension

$$F_{a_1} = 2,116 \cdot 10^5 \cdot \frac{0,044}{2 \cdot 0,6009} \quad F_{a_1} = 7,74 \cdot 10^3 \text{ Kgf}$$

I.2.2.2 F_{a_2} sur l'enroulement haute tension

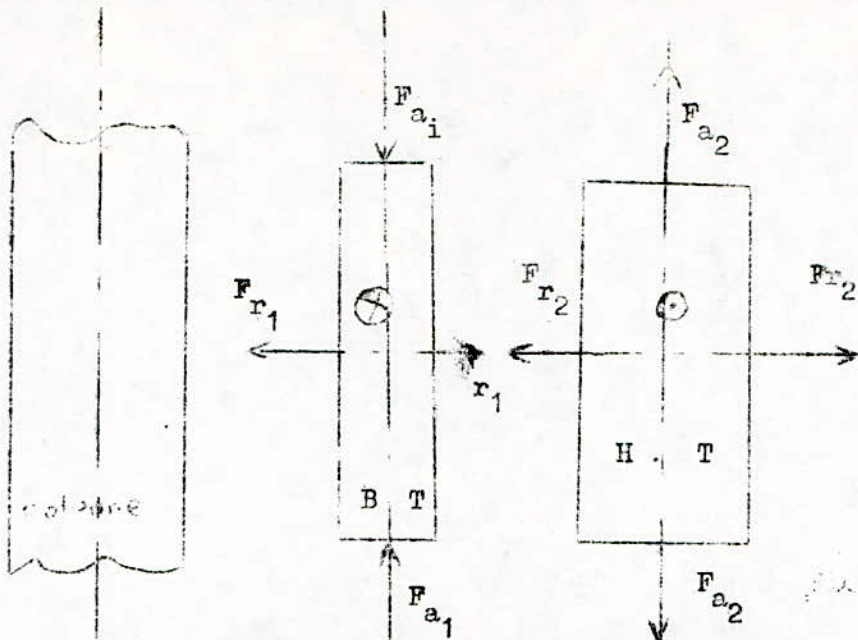
$$F_{a_2} = 3,15 \cdot 10^5 \cdot \frac{0,044}{2 \times 0,6009} \quad F_{a_2} = 11,53 \cdot 10^3 \text{ Kgf.}$$

I.3 - Efforts Unitaires.

On connaît maintenant les forces axiales et radiales, l'effort unitaire est le rapport de la force sur la surface où elle est appliquée. la figure I (montre comment agissent les forces sur les bobines)

fig I (page suivante)

Fig I



Les sens des efforts axiaux et radiaux nous montrent que les bobines de basse tension, sont soumises à une compression, ^{ceux de} haute tension à une extension. Ceci nous oriente à l'endroit où il faut prendre soins du serrage des bobines.

Pour cela on calcule les différents efforts unitaires et on assure la stabilité mécanique à la déformation par un serrage approprié.

I. 3. 1 - Efforts Unitaires Radiaux : σ_{ri}

$$\sigma_{ri} = \frac{F_{ri}}{S_i} \quad i = (1, 2), \quad \begin{matrix} F_{ri} & (\text{Kgf}) \\ S_i & (\text{cm}^2) \end{matrix}$$

$$r_i \quad \left(\frac{\text{Kgf}}{\text{cm}^2} \right)$$

I.3.1.1- σ_{r1} de l'enroulement B.T :

$$\sigma_{r1} = \frac{Fr_1}{S_1} \quad \text{ou} \quad S_1 = 2\pi W_1 SW_1$$

$$S_1 = 2\pi \cdot 156 \cdot 79 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^2$$

$$\sigma_{r1} = \frac{2,116 \cdot 10^5}{2 \cdot 156 \cdot 79} \cdot 10^2 \quad \sigma_{r1} = 7,73 \cdot 10^2 \frac{\text{Kgf}}{\text{cm}^2}$$

I.3.1.2 - σ_{r2} : de l'enroulement H.T

$$\sigma_{r2} = \frac{Fr_2}{S_2} \quad \text{avec} \quad S_2 = 2\pi W_2 SW_2 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^2$$

$$= 2\pi \cdot 774 \cdot 16,2 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^2$$

$$\sigma_{r2} = \frac{3,15 \cdot 10^5}{2 \cdot 774 \cdot 16,2} \cdot 10^2 \quad \sigma_{r2} = 4 \cdot 10^2 \frac{\text{Kgf}}{\text{cm}^2}$$

I.3.2 - Efforts Unitaires Axiaux : σ_{ai}

$$\sigma_{ai} = \frac{F_{a_i}}{S_i} \quad \text{ou} \quad S_i = D_{m_i} \cdot a_i$$

$i = (1, 2)$

I.3.2.1 - σ_{a_1} sur l'enroulement B.T

$$S_1 = D_{m_1} \cdot a_1 = 33,91 \times 3,116 \text{ cm}^2$$

$$a_1 = \frac{7,74 \cdot 10^3}{33,91 \cdot 3,116} \quad \sigma_{a_1} = 22,96 \text{ Kgf/cm}^2$$

I.3.2.2- σ_{a_2} sur l'enroulement H.T

$$\sigma_{a_2} = \frac{F_{a_2}}{S_2} \quad S_2 = D_{m_2} \cdot a_2 = 45,91 \cdot 5,58 \text{ cm}^2$$

$$\sigma_{a_2} = \frac{11,53 \cdot 10^3}{45,91 \cdot 5,58} \quad \sigma_{a_2} = 14,32 \text{ Kgf/cm}^2$$

Verifions ces efforts:

Le cuivre admet un effort $\sigma_{ad} = 700 \text{ Kgf/cm}^2$ et on voit les efforts trouvés une petite $\sigma_{r1}, \sigma_{r2}, \sigma_{a1}, \sigma_{a2}$ restent inferieurs à σ_{ad} (efforts admissibles.)

En conclusion les bobines résistent aux forces electro-dinamiques.

II. VOLUME ET POIDS DU TRANSFORMATEUR.

On calcule le volume et le poids en évaluant le V et les P des differentes parties qui le constituent. (V_i : volume, P_i : poids)

II. 1- Volume occupé par les enroulements.

Le volume est donné par la relation:

$$V_i = 3 l_{t_i} s_{w_i} : 10^{-3} \text{ (dm}^3) \quad i = (1, 2)$$

l_{t_i} () = ...

~~52~~

l_{t_i} (m) = longueur totale du conducteur de l'enroulement i

S_{w_i} (mm²) = section du conducteur de l'enroulement i
3 = nombre d'enroulement B.T ou H.T

II. 1.1 - Volume des Enroulements B.T (i=1)

$$V_1 = 3 l_{t_1} \cdot S_{w_1} \cdot 10^{-3} \qquad V_{t_1} = 39,40 \text{ dm}^3$$

$$V_1 = 3 \cdot 166,22 \cdot 79 \cdot 10^{-3}$$

II. 1.2 - Volume des Enroulements H.T (i=2)

$$V_2 = 3 l_{t_2} \cdot S_{w_2} \cdot 10^{-3} \qquad V_2 = 54,12 \text{ dm}^3$$

$$V_2 = 3 \cdot 1113,15 \cdot 16,2$$

d'où le volume occupé par le cuivre: V cu :

$$V_{cu} = V_1 + V_2$$

$$V_{cu} = 93,52 \text{ dm}^3$$

$$V_{cu} = 39,40 + 54,12$$

II. 2 - Volume occupé par les colonnes et les culasses.

II. 2.1 - Volume occupé par les colonnes: V col.

$$V_{col} = 3 S_{col} \cdot h_{col}$$

S_{col} = section de la colonne

h_{col} = hauteur de la colonne

3 = nombre de colonnes

$$V_{col} = 3 \times 553,65 \times 70,1$$

$$V_{col} = 116,43 \text{ dm}^3$$

II. 2.2 - Volume occupé les Culasses. V j (ici les coins sont compris)

$$V_j = 2 S_j (30 \cdot 2 \text{ lf})$$

$$V_j = 170,90 \text{ dm}^3$$

$$V_j = 2 \cdot 636,70 (3 \cdot 28,4 + 2 \cdot 24,5) \text{ cm}^3$$

le volume du circuit magnétique :

$$V_{em} = V_{col} + V_j = 116,43 + 170,9 = 287,33 \text{ dm}^3$$

II. 3 - Volume de la masse decuvable

Ce volume représente aproximativement le volume minimum que doit avoir l'interieur de la cuve (sans intervalles entre CM et parois)

On estime une majoration de 20% du $(V_{cm} + V_{oi})$ réservée pour les autres accessoires de serrage etc.

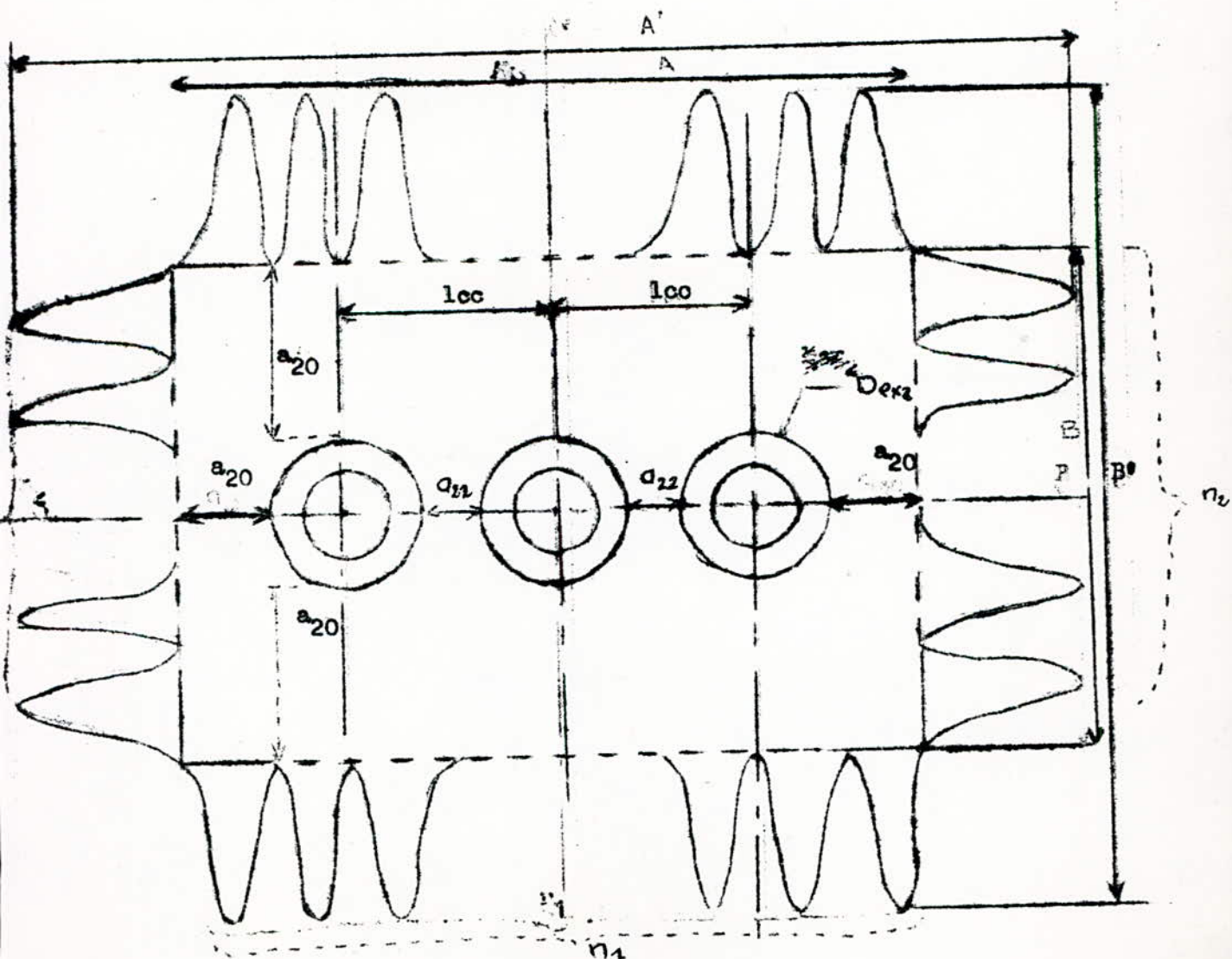
$$V_{decu} = 1,20 (V_{om} + V_{ou})$$

$$V_{decu} = 457 \text{ dm}^3$$

$$V_{decu} = 1,20 (287,33 + 93,52)$$

II. 4 - Dimensionnement et volume de la cuve.

Fig. II. 1 (Vue de dessus simplifiée).



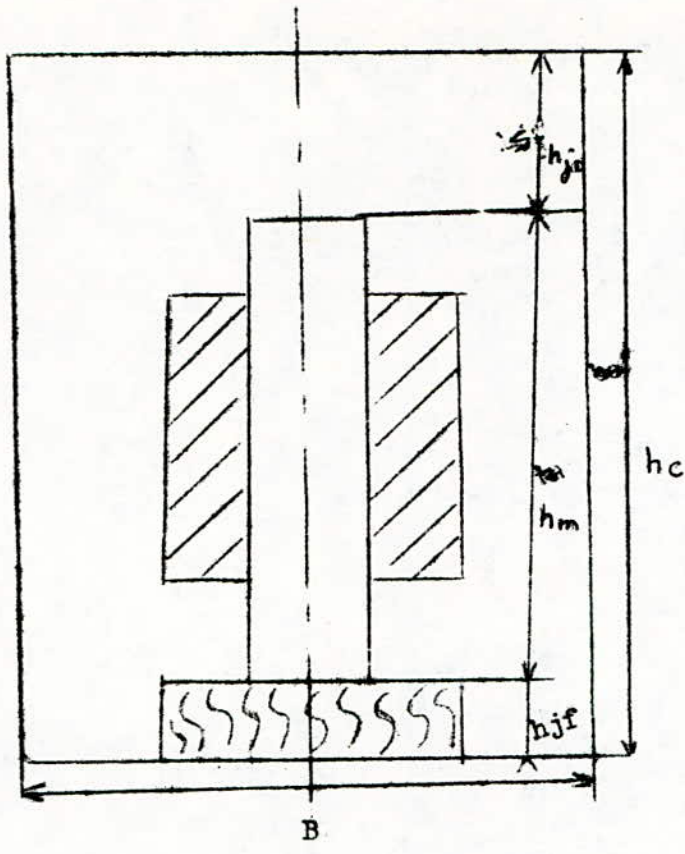


Fig II.2 hauteur hc de la cuve

II. 4. 1 - Dimensionnement de la cuve.

De la figure II. 1 . on tire les relations donnant la longueur A, la largeur B et la hauteur hc de la cuve (sans tenir compte des ondules). On étudie les ondules dans la suite.

$A = 2 l_{oc} + Dex_2 + \frac{20 a_{20}}{20}$

$B = D ex_2 + \frac{20 a_{20}}{20}$

$hc = h_m + h_{j0} + h_{jf}$

ou Dex_2 = diamètre extérieur de l'enroulement H.T

a_{20} = distance entre la surface extérieure de l'enroulement H.T et la face intérieur de la paroi de la cuve du transformateur.

Les valeurs numériques des termes: a_{20}, h_{j0}, h_{jf}

a_{20}, h_{j0} et h_{jf} sont fonction de l'importance du transformateur on les estime du tableau T.2.1 ci-après.

Tableau T . II . 1 .

U (KV)	S_n (KVA)	a_{20} (mm)	h_{j0} (mm)	h_{jf} (mm)
< 20	20 ÷ 160	55	150 ÷ 250	30 ÷ 40
	200 ÷ 1600	65	150 ÷ 300	"
	2 000 ÷ 10 000	90	150 ÷ 350	"
> 20	20 ÷ 160	65	150 ÷ 300	"
< 30	200 ÷ 1 600	75	150 ÷ 300	"
	2 000 ÷ 10 000	120	150 ÷ 350	"

On choisit: $a_{20} = 90$ mm
 $h_{j0} = 3000$ mm
 $h_{jf} = 40$ mm

Déterminons le diamètre extérieur Dex_2 de la bobine H.T.

$$Dex_2 = Di_2 + 2a_2 \text{ où } Di_2 \text{ sont diamètre intérieur.}$$

$$Di_2 = D + 2a_{10} + 2 a_1 + 2a_{12}$$

$$Di_2 = 28,4 + 2 \cdot 1,2 + 2 \cdot 3,116 + 2 \cdot 1,5 \qquad Di_2 = 40,03 \text{ cm}$$

$$Dex_2 = 40,03 + 2 \cdot 5,58 \qquad Dex_2 = 51,20 \text{ cm}$$

a) Longueur de la cuve A

$$A = 2 l_{oc} + Dex_2 + 2a_{20}$$

$$A = 2 \cdot 52,9 + 51,2 + 2 \cdot 9 \text{ cm}$$

$$A = 17,5 \text{ dm}$$

b) Largeur B.

$$B = Dex_2 + 2 a_{20}$$

$$B = 51,2 + 2 \cdot 9 \text{ cm}$$

$$B = 6,92 \text{ Dm}$$

c) hauteur hc

$$hc = hm + hj_0 + hjf$$

$$hc = 116,80 + 30 + 4 \text{ cm}$$

$$hc = 15,08 \text{ dm}$$

Et finalement le volume de la cuve sans celui des ondules est:

$$V_{cuve} = A.B.hc$$

$$V_{cuve} = 17,5 \cdot 6,92 \cdot 15,08$$

$$V_{cuve} = 1826 \text{ dm}^3$$

II.4.2 Épaisseur des parois:

Les parois de la cuve doivent résister à la déformation qui peut être causée par l'augmentation de la pression lors d'un court-circuit, du poids de l'huile, du circuit magnétique, etc...

Les efforts responsables à une déformation sont proportionnels à la puissance du transformateur. Le tableau T.H.2, ~~ci-dessous~~ permet d'estimer les épaisseurs des différentes parois en acier.

Tableau T.H.2

Sn (KVA)	100	125 + 250	315 + 630	630 + 1600	1600 + 3200
Épaisseur du fond Df (mm)	3 + 4	4 + 5	5 + 6	6 + 8	8 + 10
Épaisseur du couvercle Do (mm)	4 + 5	5 + 6	6 + 8	10	10 + 12
Épaisseur des parois latérales Dp (mm)	0,75 + 1	1 + 1,5	1,5	2,5	3,5

On choisit les épaisseurs suivants:

_ pour le fond Df = 10 mm

_ pour le couvercle Do = 12 mm

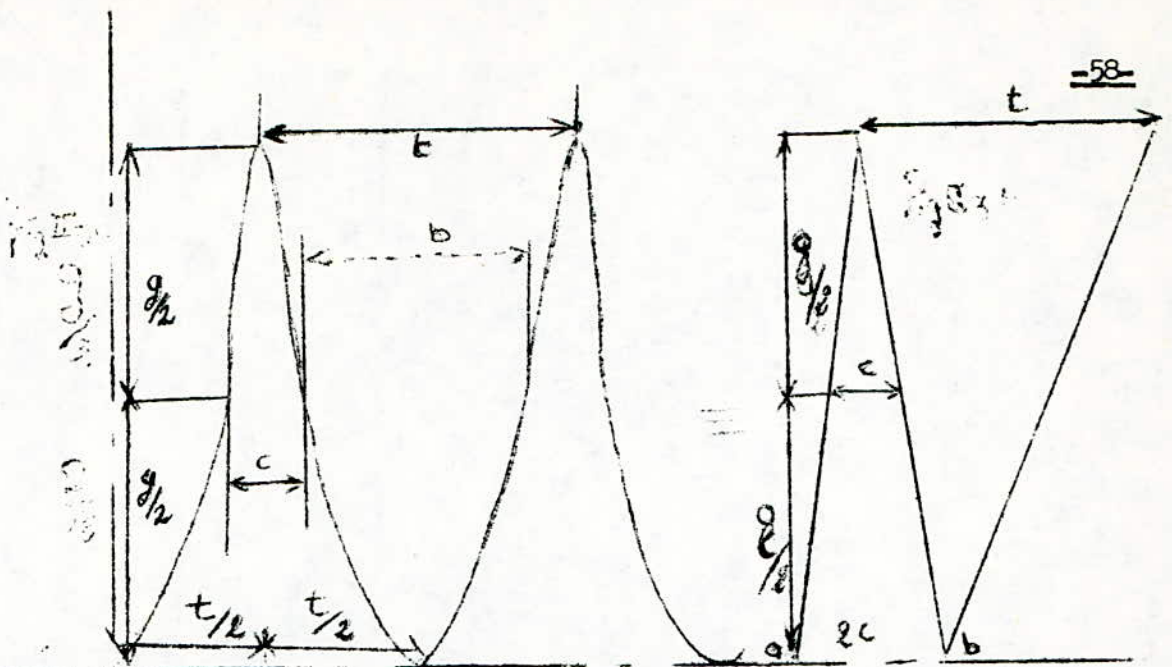
_ pour les parois latérales Dp = 3,5 mm.

II.4.3 Dimensionnement et nombre des ondules:

Pour améliorer le refroidissement on donne une forme ondulaire pour la surface latérale de la cuve.

Et il est nécessaire aussi de définir la forme des ondules ainsi que leur nombre minimum et optimal.

Les ondules adoptées sont des ailettes, la figure II.3a ci-après représente leur géométrie.



Pour ces ailettes on a les indications generales limites:

- t minimum = 40 mm
- g minimum = 300 mm
- b minimum = 30 mm
- c minimum = 10 mm

Fig II.3 a

Fig II.3 b

De la figure on tire: $t = b + c + 2 Dp$

- On choisit:
- t = 40 mm
 - g = 300 mm
 - b = 30 mm
 - c = 10 mm
 - r = 6 mm

a) le perimètre approximatif d'un ondule est:

$$\text{Pond.} = b + 2g + \pi r$$

$$\text{P ond.} = 30 + 2 \cdot 300 + 3,14 \cdot 6$$

$$\text{Pond} = 649 \text{ mm}$$

b) les ondules n'occupent pas toute la surface des parois on harmonise leur hauteur par rapport à celle de la cuve.

$$(\text{fig II} \cdot 4), h_o = h_o - (200 + 50) (\text{mm}); h_o = 1,258 \text{ m}$$

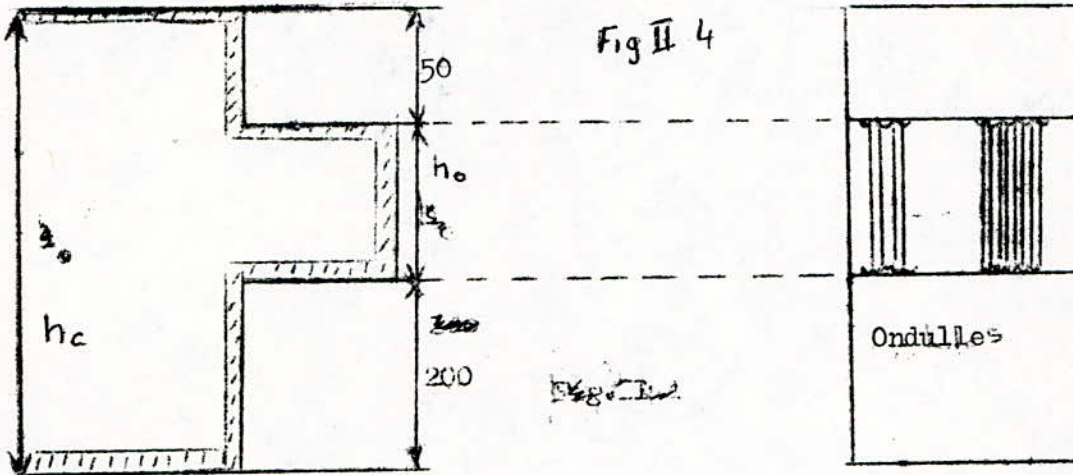
h_o = hauteur des ondules.

c) Nombre des ondules fig II.1

Soit n_1 le nombre d'ondules sur la longueur
 et n_2 le nombre d'ondules sur la largeur

$$n_1 + 1 = \frac{A}{t} = \frac{417 \cdot 50}{40} = n_1 = 43 \text{ ondules}$$

$$n_2 + 1 = \frac{B}{t} = \frac{492}{40} = n_2 = 16 \text{ ondules}$$



II.4.4. Volume des ondules: V ond.

La forme d'une ondule n'est pas d'une géométrie simple du point de vue analytique.

Pour simplifier les calculs, on assimile la surface de base de l'ondule à un triangle fig II .3b.

- Surface assimilée de l'ondule: Sond.

$$S_{\text{ond}} = \frac{2 \cdot c \cdot g}{2} = g \cdot c = 300 \cdot 10 \text{ mm}^2 ; S_{\text{ond}} = 0,30 \text{ dm}^2$$

- le volume de l'ondule est :

$$V_{\text{ond}} = S_{\text{ond}} \cdot h_0 = 0,30 \times 12,58 ; V_{\text{ond}} = 3,774 \text{ dm}^3$$

- le volume total est : V ond

$$V_{\text{ond}} = 2 (n_1 + n_2) V_{\text{ond}} = 2 (43 + 16) \cdot 3,774 , V_{\text{ond}} = 445,33 \text{ dm}^3$$

II.4.5. Volume de la cuve (ondules comprises) : Vcut

V cut = V cu + V ond ou V cu : Volume de la cuve sans ondules

V ond: Volume des ondules

$$V_{\text{cut}} = 1826 + 445,33$$

$$V_{\text{cut}} = 2271 \text{ dm}^3$$

II.5 Volume de l'huile: Vh.

$$V_h = V_{cut} - V_{decu}$$

$$V_h = 2271 - 457$$

$$V_h = 1814 \text{ dm}^3$$

II. 6 Poids

II.6.1. Poids du cuivre: Gcu

$G_{cu} = \gamma_{cu} \cdot V_{cu}$ où γ_{cu} : densité volumique du cuivre $(8,9 \text{ Kg/dm}^3)$
 V_{cu} : Volume du cuivre

$$G_{cu} = 8,9 \times 93,51$$

$$G_{cu} = 832,24 \text{ Kgf}$$

II.6.2. Poids du circuit magnétique G.cm

$G_{.cm} = \gamma_{cm} \cdot V_{cm}$ où γ_{cm} = densité volumique des toles des du
du circuit magnétique (cm)
 V_{cm} = Volume de Cm.

$$G_{.cm} = 7,65 \times 287,32$$

$$G_{.cm} = 2198 \text{ Kgf.}$$

II.6.3 Poids de l'huile Gh

$G_h = \gamma_h \cdot V_h$ où γ_h = densité volumique de l'huile ($0,9 \text{ kgf/dm}^3$)
 V_h = Volume de l'huile

$$G_h = 0,9 \times 1814$$

$$G_h = 1632,6 \text{ Kgf;}$$

d'où finalement le poids total du transformateur sans la cuve et couvercle, isolateurs, etc. (Poids contenu à l'interieur). G_{ti}

$$G_{ti} = G_{cu} + G_{cm} + G_h$$

$$G_{ti} = 832,24 + 2198 + 1632,6 \quad ; \quad G_{ti} = 4663 \text{ Kgf.}$$

II.6.4 Poids des parois

Volume des parois laterales (calculé approximatif par excès)

- Volume des parois de la surface latérale occupée par les ondules: V_{pond}

$$V_{pond} = Pond \cdot 2(n_1 + n_2) \cdot h_o \cdot D_p$$

Pond = périmètre d'une ondule (dm)

h_o = hauteur (dm)

D_p = épaisseur de la parois (dm)

$2(n_1 + n_2)$ = nombre d'ondules.

$$V_{pond} = 6,49 \cdot 2(43 + 16) \cdot 12,58 \cdot 0,035, \quad V_{pond} = 337,2 \text{ dm}^3$$

- Volume des parois latérales lisses: V_{pl}

$$V_{pl} = (50 \cdot 2(A+B) + 200 \cdot 2(A+B)) D_p \text{ tiré de la fig II.4}$$

$$V_{pl} = (50 \cdot 2(1750+692) + 200 \cdot 2(1750 + 629)) \cdot 3,5 \quad V_{pl} = 4,16 \text{ dm}^3$$

- Volume de la parois du fond. V_{pf} .

$$V_{pf} = A \cdot B \cdot D_f \text{ (dm}^3\text{)}, \quad D_f = 10 \text{ mm}$$

$$V_{pf} = 17,5 \cdot 6,49 \cdot 0,1, \quad V_{pf} = 11,36 \text{ dm}^3$$

- Volume de la parois du couvercle; V_{pc}

$$V_{pc} = A \cdot B \cdot D_c, \quad D_c = 12 \text{ mm}$$

$$V_{pc} = 17,5 \cdot 6,49 \cdot 0,12 \quad V_{pc} = 13,63 \text{ dm}^3$$

Et finalement le volume total des parois du transformateur: V_{tpr}

$$V_{tpr} = V_{pond} + V_{pl} + V_{pf} + V_{pc}$$

$$V_{tpr} = 337,2 + 4,16 + 11,36 + 13,63 \quad V_{tpr} = 366,35 \text{ dm}^3$$

En utilisant de l'Acier de densité $\gamma_{ac} = 7,8 \text{ Kg/dm}^3$, le poids des parois G_p .

$$G_p = \gamma_{ac} \cdot V_{tps} = 7,8 \cdot 366,35 = 2857,5 \text{ Kgf.}$$

II.6.5 Poids total du transformateur Gtr

En estimant le poids des traversés, du réservoir d'huile et ^{des} autres petits accessoires électriques (relais, ...) à 250 Kg. le poids du transformateur est estimé à:

$$Gtr = Gt_1 + Gp + 250$$

$$Gtr = 4663 + 2857,5 + 250 = 7770,5 \text{ soit } 7,77 \text{ tonnes.}$$

$$Gtr = 7,77 \text{ tonnes.}$$

III DIMENSIONNEMENT DES ACCESSOIRES DE SERRAGE

le serrage des tôles du circuit magnétique est assuré par des profilets en U, des boulons et des tirants. (fig. III;1)

Le dimensionnement de ces accessoires nécessite la connaissance des efforts correspondants. Pour ce calcul, on part de l'hypothèse que la pression exercée par les boulons se transmet sur les poutres et par conséquent sur les tôles. On considère aussi que la force est uniformément répartie sur la surface de contact poutre-culasse.

III.1 Force de serrage: P

La force de serrage est donnée par la relation:

~~relation~~ où h_j = hauteur des tôles du paquet laterale de la culasse
 l_m = longueur de la culasse
 p = pression spécifique se trouvant entre 2 + 6 Kgf/cm²

$$P = p \cdot h_j \cdot l_m$$

Le produit $h_j \cdot l_m$ représente donc la surface pressée.

En éstimant $p = 4,5$ Kgf/cm² avec $h_j = 23,35$ cm et une longueur $l_m = 2(100 + \frac{D}{2}) = 2(52,9 + 28,4/2)$, $l_m = 134,2$ cm.

On obtient une force p:

$$P = 4,5 \cdot 23,35 \cdot 134,2 \text{ Kgf.} \quad P = 14101 \text{ Kgf.}$$

Cette force P doit être assurée par les boulons de serrage, donc on doit dimensionner les boulons ^{et} choisir les poutres qui résistent à cette pression.

III.2. Poutre de serrage: profilés en U;

Pour choisir les profilés du tableau T.III.2, on calcule d'abord le moment maximal de la poutre qui est donné par la relation:

$$M_{max} = \frac{p \cdot h_j (100 + t_1)^2}{8} \quad \text{où } t_1 = \frac{D}{2} + 3$$

$$M_{max} = 4,5 \cdot \frac{23,35 (52,9 + 17,2)^2}{8} \quad M_{max} = 64542,5 \text{ Kgf.cm}$$

Ensuite on détermine W_y module de résistance sur l'axe y du profilé (voir fig. du profilé) qui est donnée par:

$W_y = \frac{M_{max}}{\sigma_a}$ (cm³) où σ_a : effort unitaire admissible dans l'acier de la poutre.

On utilise un acier A.33 qui a pour charge minimale de rupture de 3300 hf/cm² et un $\sigma_a = 1200$ Kgf/cm²

d'où $W_y = \frac{64542,5}{1200}$

$W_y = 53,78$ cm³

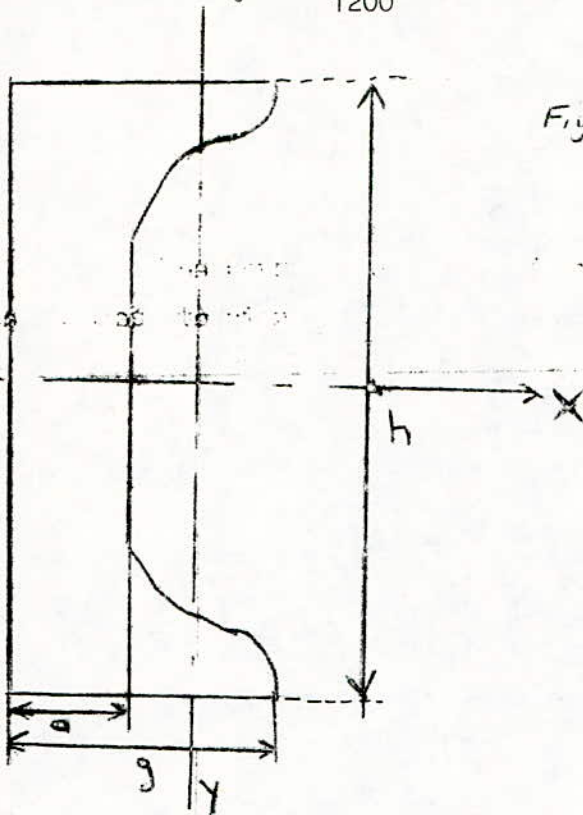


Fig. Profile

on choisit: UPN= 28

h= 28 cm

a = 9,5 cm

g = 10,5 cm

Longueur de la poutre: Lp

$L_p = 2(lcc+t_1+6)$

$L_p = 152,18$ cm

$L_p = 1,53$ m

La longueur lp est inférieure à la grandeur A de la cuve (fig. 1) les poutres peuvent être logées dans la cuve, il reste à vérifier la largeur B de la cuve.

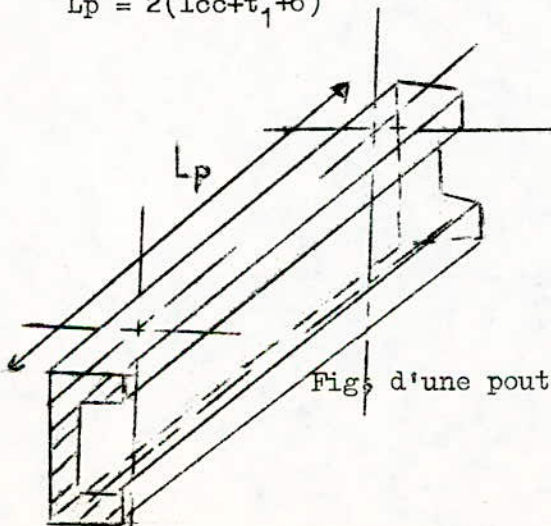


Fig. d'une poutre en perspective.

Tableau T.III.2

des profiles U.P.N d'après N.I.A .45.202 et 45.210.

U.P.N	Dimensions (mm)			sec- tion (mm)	poids Kg/m	sur l'axe X' - X		sur l'axe Y' - Y	
	h	a	e			I _x (mm ⁴)	W _x (cm ³)	I _y (mm ⁴)	W _y (cm ³)
12	120	55	7	17	13,4	364	60,7	43,2	11,1
14	140	60	7	20,4	16	605	86,4	62,7	14,8
16	160	65	7,5	24,0	18,8	925	116	85,3	18,3
18	180	70	8	28,0	22	1350	150	114	22,4
20	200	75	8,5	32,2	25,3	1910	191	148	27
22	220	80	9	37,4	29,4	2690	245	197	33,6
24	240	85	9,5	42,3	33,2	3600	300	248	39,6
26	260	90	10	/	/	/	/	268	45,3
28	280	95	10,5	/	/	/	/	292	54,6
30	300	100	11	/	/	/	/	316	60,6
32	320	105	11,5	/	/	/	/	/	66,3
34	340	110	12	/	/	/	/	/	72,6

Des alésages, pour les boulons et tirants, sont à envisager sur la poutre. Nous verrons ceci dans le chapitre réalisation et montage.

— Largeur fixée par les poutre et culasse, cette grandeur doit être bien inférieure à B de la cuve. Fig. II.1

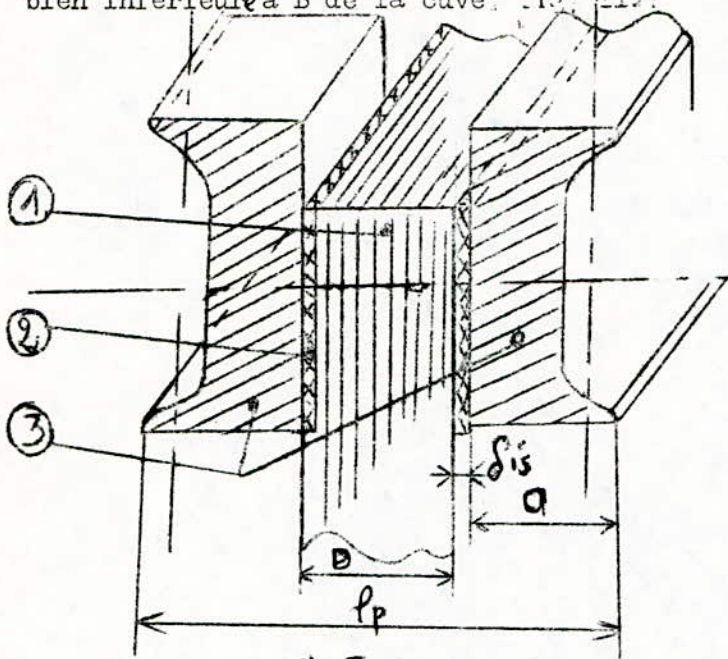


Fig II.1

- (1) Circuit magnétique
- (2) Isolation entre circuit magnétique et profilé :
 $is = 0,5 \text{ cm.}$

- (3) Profilé de la figure ci-contre :
 $lp = D + 2(a + is)$
 $lp =$ largeur fixée par les poutres .

$lp = 28,4 + 2(9,5 + 0,5)$
 $lp = 38,4 \text{ cm}$ reste bien inférieur à $B = 69,2 \text{ cm}$

III. 3 Boulons de serrage des Poutres.

La partie découvable du transformateur (C.M, poutre..) est presque suspendue (avec exagération) au couvercle avec des tirants qui prennent action sur les poutres. De là on voit que les boulons de serrage sont soumis à une flexion et en même temps un cisaillement, provenant du poids $G_{d\acute{e}cu}$ sans oublier aussi la force de réaction des tôles serrées qui exercent une action de traction.

Les boulons doivent résister à ses efforts; (ci-apres un modèle de calcul de dimensionnement des boulons, (figure III. 3.)

On considère que la longueur lp de la poutre est égale à la distance entre les boulons (1) et (3) dans ce cas les forces R_1 et R_2 auront pour expressions ...? ~~Expressions de R_1 et R_2 ?~~

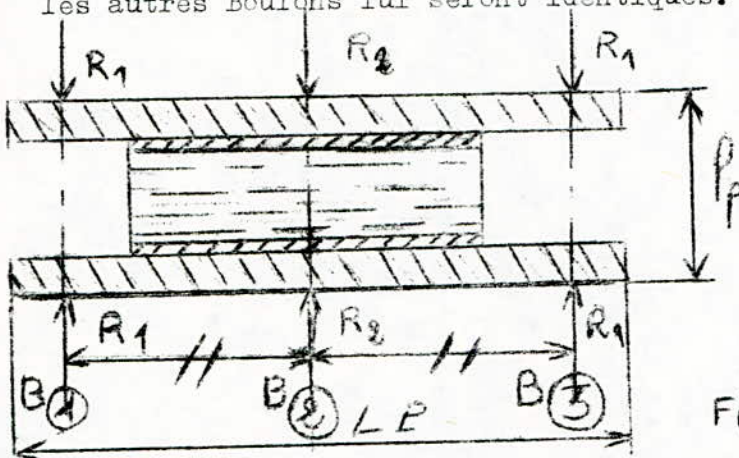
$$R_1 = \frac{3}{16} P \text{ Kgf.}$$

$$R_2 = \frac{5}{8} P \text{ Kgf.}$$

$$R_1 = \frac{3}{16} \cdot 14\,101 = 2\,644 \text{ Kgf.}$$

$$R_2 = \frac{5}{8} \cdot 14\,101 = 8\,813 \text{ Kgf.}$$

On voit que $R_2 > R_1$, alors le boulon du milieu est le plus sollicité. C'est le boulon principal qu'on dimensionnera ; les autres Boulons lui seront identiques.



- 1)- culasse circuit magnetique
- 2)- isolation CM poutre
- 3)- poutre
- B1)- Boulon (1)
- B2)- Boulon (2)
- B3)- Boulon (3)

Fig III 3 (serrage de la culasse du C.M)

III.3.1 Diamètre des Boulons.

En utilisant l'acier A48 présentant une résistance minimale à la rupture de 4800 Kf/cm^2 et une contrainte admissible $\sigma_{at} = 1000 \text{ Kf/cm}^2$. On fait le calcul sur le boulon principal ($R_2 = 8813 \text{ Kgf.}$) pour l'hypothèse des efforts de traction seulement. (σ_t)

$$\sigma_{2t} = \frac{R_2}{S_2} \quad \text{où} \quad S_2 = \text{section du boulon}$$

$$S_2 = \frac{\pi d^2}{4} \quad \text{ad son diamètre extérieur}$$

σ_{2t} doit être inférieur ou égale à σ_{at} sinon le boulon ne tient pas (on a rupture)

$$\sigma_{at} = \frac{4R_2}{\pi d^2} \Rightarrow d = \sqrt{\frac{4R_2}{\pi \cdot \sigma_{at}}} \quad \text{diamètre du boulon.}$$

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot 8813}{\pi \cdot 1000}} = 3,35 \text{ cm} \quad d = 33,5 \text{ mm}$$

Du tableau T.III.3, on choisit un diamètre normalisé par exées

TABLEAU T.III.3

d.ext (mm)	14	16	18	20	22	24	27	30	33	36
d.int (mm)	11,40	13,40	16,75	16,75	18,75	20,10	23,10	25,45		
par du filet (mm)	2	2	2,5	2,5	2,5	3	3	3,5	3,5	

On choisit: d_{e_x} normalisé = 36 mm

~~diamètre~~
pas du filet = 3,5mm

$$\text{et } \sigma_{2_r} = \frac{4 \cdot R_2}{\pi d_n^2} = \frac{4 \cdot 8813}{\pi \cdot (3,6)^2} \quad \sigma_{2_r} = 866 \text{ Kg/cm}^2$$

$$\sigma_{2_r} < 6at$$

III.4. Les Tirants.

Afin d'assurer un bon serrage mécanique avec réglage, possible on utilise quatre tirants courts et quatre longs reliés entre eux par des pièces de liaison. Ils assurent respectivement, à attacher à la partie décuvable au couvercle, et à relier les parties supérieures et inférieures entre elles tout en assurant la compression des bobines et le soulèvement de la partie active. Le réglage se fait à l'aide des dites pièces de liaison. (fig. III, page 70.)

Les tirants sont soumis à la traction, efforts provenant du poids suspendu (poids de la partie décuvable) et desserrage d'une manière générale, en prenant le tirant court comme principal, à la limite, il soulève la partie décuvable. Dans ses conditions le diamètre est donné par la relation suivante:

$$d_{tir} = \frac{4 G_{décu}}{4 \pi \cdot 6at} \quad \text{ou} \quad G_{décu} = \text{poids de la partie décuvable.}$$

$6at =$ contrainte admissible à la rupture. (= 1000 Kg/cm. pour l'acier A48 adopté.)

III.4.1. Diamètre des tirants

Il s'agit tout d'abord de calculer $G_{décu}$

$$G_{décu} = G_{cu} + G_{cm} + G_p \quad \text{ou}$$

G_{cu} = poids du cuivre : 832, 24 Kg

G_{cm} = poids du circuit magnétique 2198 Kg.

G_p = poids des poutres,

on a quatre poutres donc : $G_p = 4 \cdot L_p \cdot G_{pu}$

où L_p = longueur de la poutre = $L_p = 1,52m$

G_{pu} = poids par unité de longueur

$$G_{pu} = 40 \text{ Kg/m}$$

$$G_p = 4 \times 1,52 \times 40$$

$$G_{p_r} = 243,2 \text{ Kg}$$

$$\text{et } G_{\text{decu}} = 822,24 + 2198 + 243,2$$

$$G_{\text{decu}} = 3273,5 \text{ Kg}$$

d'où le diamètre des tirants est:

$$d_{\text{tir}} = \frac{4 \times 3273,5}{4 \pi \cdot 1000}$$

$$d_{\text{tir}} = 1,042 \text{ cm}$$

par mesure de sécurité on choisit $d_{\text{tir}} = 1,2 \text{ cm}$

la contrainte σ_{tir} est de:

$$\sigma_{\text{at}} = \frac{4 \times 3273,5}{4 \pi \cdot 1,2}$$

$$\sigma_{\text{tir}} = 868,32 \text{ Kg/cm}^2$$

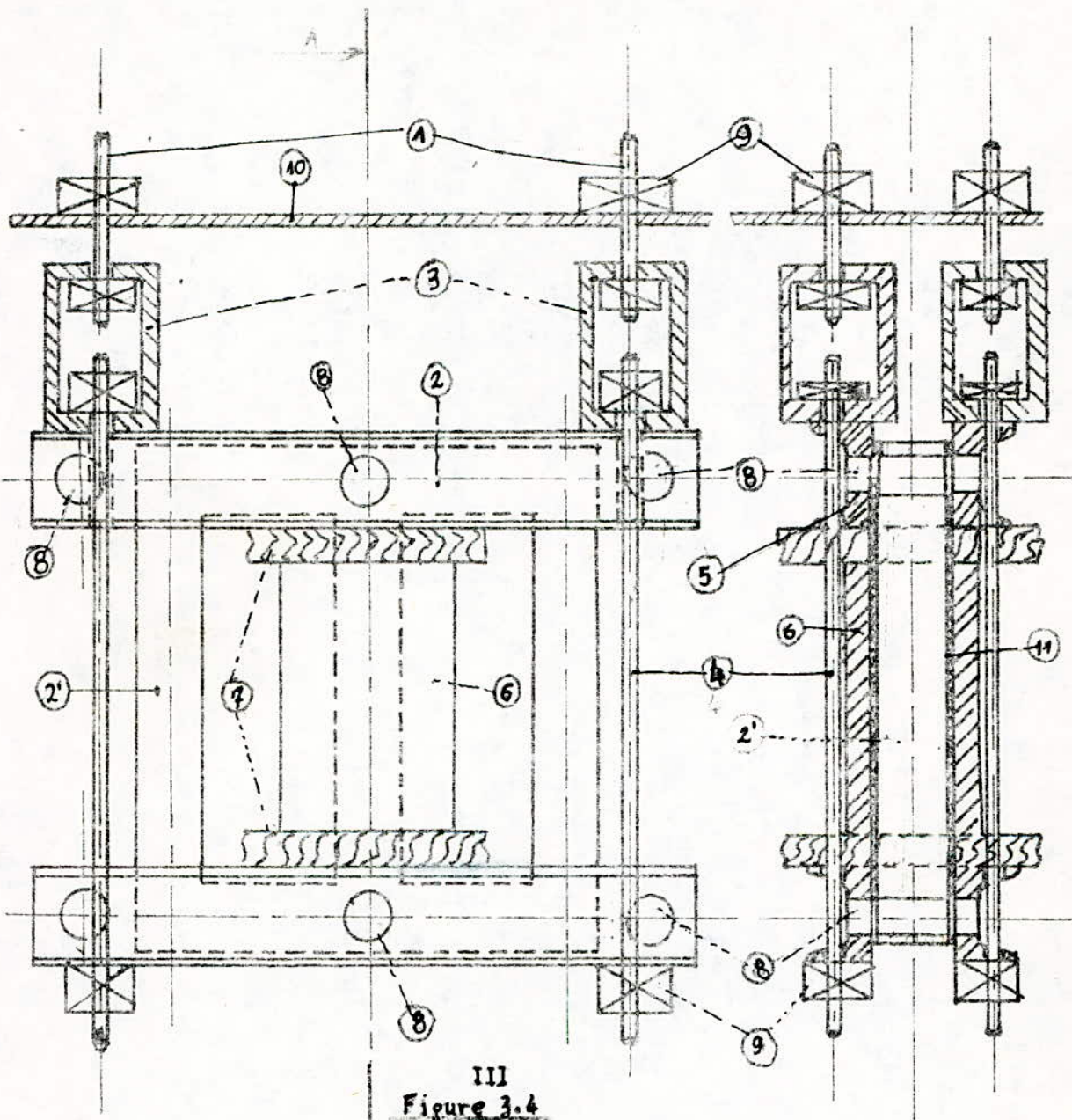
$$\sigma_{\text{tir}} < \sigma_{\text{at}}$$

Le reste de dimensionnement des tirants (longueur totale, longueur du filtage) dépend des autres accessoires (rondelles et écrous) des pièces de liaison.

Voir chapitre réalisation et montage en page. 100.

III. 4. 2. Pièces de liaison.

Les pièces doivent résister à la déformation et à la rupture ; elles sont obtenues par pliage, soudure et perçage. On choisit une épaisseur $e = 16 \text{ mm}$.



III
Figure 3.4

- (1) : Tirants courts
- (2), (2') : Culaasses et colonnes
- (3) : Pieces de Liaison
- (4) : Tirants longs
- (5) : Profiler en U
- (6) : Bobines
- (7) : cales en bois dur

- (8) : Trous de passage pour boulons de serrage des profilets et circuit magnetique
- (9) : Ecroux de serrage des tirants
- (10) : Couvercle
- (11) : Isolent circuit magnetique (colonnes)

IV. Qualités mécaniques de l'isolant des boulons de serrage et de la cuve.

IV. 1. Qualité mécanique de l'isolant des boulons de serrage.

Les tôles du circuit magnétique sont pressés par les poutres, ces dernières sont serrées par des boulons qui traversent les tôles. On voit qu'il est nécessaire d'isoler les boulons, les poutres. Pour éviter tout court-circuit magnétique. Afin de ne pas augmenter les ~~en~~ pertes fer dans le circuit magnétique.

L'isolant serait du papier, présentant un effort au cisaillement supérieur à l'effort sollicité.

Sur la figure IV. 1., on voit que la zone la plus sollicitée est celle qui traverse les parties de serrages. A cet endroit l'isolation est soumise à un effort compression qui tend à écraser et à un effort de cisaillement, ayant pour cause le poids de la partie découvable. Donc on s'intéresse surtout à cet endroit où l'effort de cisaillement est donné par la relation.

$$\sigma_{cis} = \frac{d \cdot p_{cu}}{4 \cdot dg} \quad \text{ou} \quad \begin{aligned} 4 &= \text{nombre de zones dangereuses} \\ d &= \text{diamètre du boulon (3,6 cm)} \\ g &= \text{épaisseur de la poutre (1,05 cm)} \end{aligned}$$

$$\sigma_{cis} = \frac{3273,5}{4 \times 3,6 \times 1,05} \quad \begin{aligned} d \cdot p_{cu} &= 3273,5 \text{ Kg} \\ \sigma_{cis} &= (\text{kg/cm}^2) \end{aligned}$$

$$\sigma_{cis} = 216,50 \text{ Kg/cm}^2$$

On choisit donc un papier isolant normal, de qualité : $\sigma_{a \text{ cis}} = 250 \text{ Kg/cm}^2 = \text{effort maximal admissible.}$

IV. 2. Qualité mécanique de la cuve.

Les épaisseurs de la paroi de la cuve ont été estimées (II.4.2). A présent on connaît la souce des différents efforts, on calcule les contraintes aux endroits les plus défavorables et on assure une sécurité mécanique éventuelle.

En sorte, les dimensions choisies permettent à la cuve de résister seule aux efforts considérables, mais afin d'augmenter la sécurité aux parois latérales, on prévoit des bandages avec méplat de dimensions 30 x 5 mm² tout au tour de la cuve, par soudure.

Les efforts considérables peuvent être multipliés par :
- La pression de l'huile (son poids et surtout en cas de court-circuit électrique).

- Le poids de la partie découvrable
- Autre actions mécaniques de manoeuvre.

Le fond de la cuve est la partie la plus sollicitée (le poids de l'huile, poids découvrable.). C'est à cette zone qu'on fera le calcul en considérant le modèle de la figure IV.2.-

On suppose que la pression est uniformément répartie sur la plaque (fond). Elle est due au poids de l'huile, de la partie découvrable et de son propre poids.

On calcule donc la Flèche: f_1 du milieu de la plaque qui est donnée dans cette considération par la relation:

$$P_f = (\text{kgf} / \text{cm}^2) = \text{pression exercée sur le fond.}$$

$$f_1 = \alpha \frac{P_f B^4}{E (Df)^2}$$

où

E = Module de young

α = Coefficient donné par le tableau T. IV. 1 en fonction du rapport A/B.

B = Largeur de la cuve (cm)

A = Longueur de la cuve (cm)

Df = Epaisseur du fond de la cuve.

a)- Forces exercées sur le fond de la cuve: G_t

$$- G_t = G_{\text{decu}} + G_h + G_f \quad \text{où } G_{\text{decu}} = \text{poids découvrable}$$

G_h = poids de l'huile

G_f = poids propre de la plaque

S = surface de la plaque

γ = densité volumique du matériau

$$- G_f = \gamma \cdot S \cdot Df$$

Avec $S = A \times B$, $\gamma = 7,8 \text{ Kg/dm}^3$ et $Df = 1 \text{ cm} = 0,1 \text{ dm}$

$$S = 175 \times 69,2 = 12110 \text{ cm}^2 = 121,10 \text{ dm}^2$$

$$G_f = 7,65 \times 121,10 \times 0,1 \quad \text{soit } G_f = 93 \text{ Kg.f}$$

$$\text{et } G_t = 3273,5 + 1632 + 93 \quad G_t = 5\,000 \text{ Kg.f avec exé}$$

b)- Pression P_f

$$P_f = \frac{G_t}{S} = \frac{5\,000}{12\,110} \quad \text{soit } P_f = 0,413 \text{ Kgf/cm}^2$$

c)- Coefficient α

$$A/B = \frac{1750}{692}$$

$$A/B = 2,53 \Rightarrow \alpha = 0,0279$$

$$D)- \underline{E = 2,1 \cdot 10^6}$$

F)- La flèche f_1 est donc:

$$f_1 = 0,0279 \cdot \frac{0,413 \times (69,2)^4}{2,1 \cdot 10^6 \cdot 1^2}$$

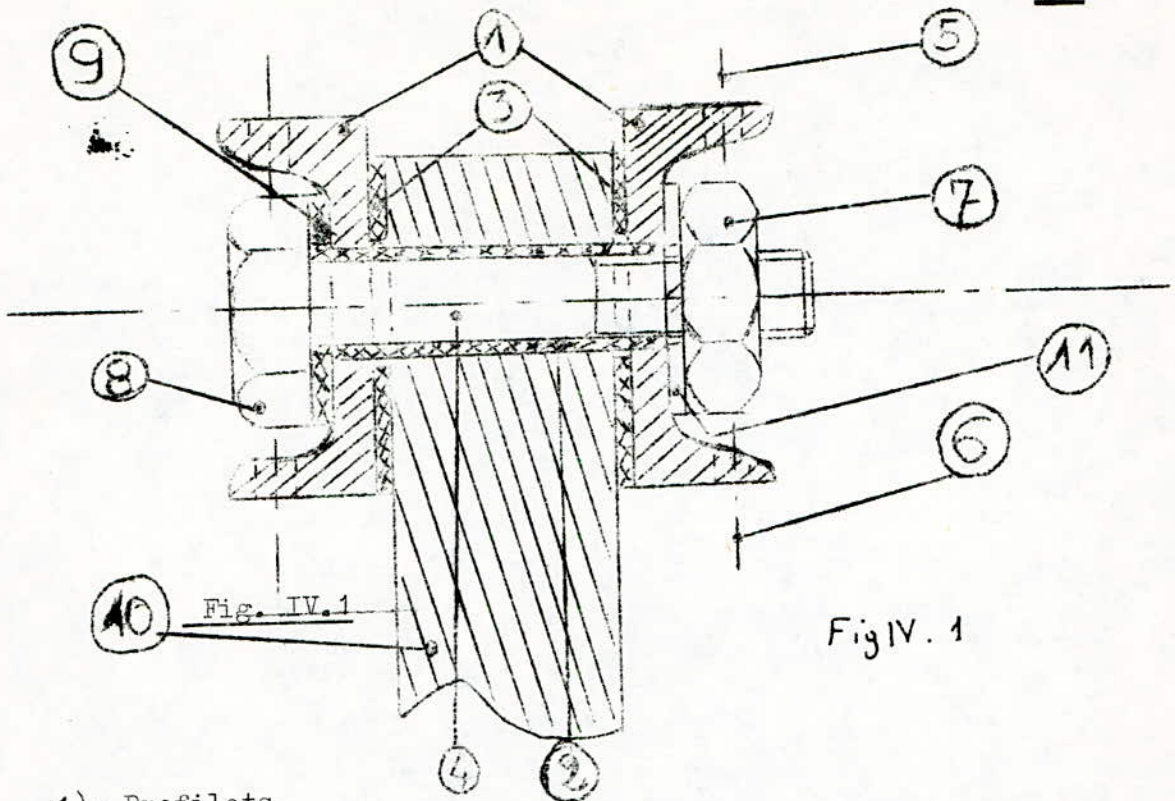
$$f_1 = 0,12 \text{ cm}$$

$$f_1 = 1,2 \text{ mm}$$

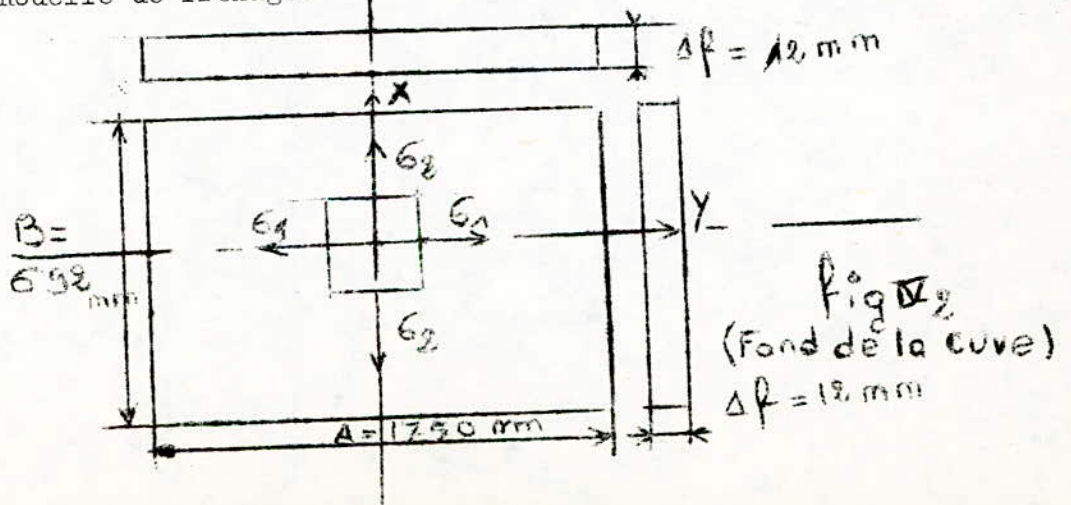
En réalité, la partie décuvable est attachée au couvercle par les tirants courts, la flèche présentée est le cas limité possible. Elle est tout à fait acceptable en conséquence.

TABLEAU T. IV. 1

A/B	α	B ₁	B ₂
1	0,0138	0,0229	0,0229
1,5	0,0241	0,0204	0,0368
2	0,0276	0,0140	0,0399
3	0,0279	0,0130	0,0405
4	0,0282	0,0127	0,0409



- 1)- Profilets
- 2)- Tube isolant en papier entre tige du boulon et tôles du circuit-magnétique.
- 3)- Plaque isolante en papier entre profilets et culasse.
- 4)- Tige du boulon de serrage
- 5)- Axe du tirant court
- 6)- Axe du tirant long
- 7)- Ecrou du boulon
- 8)- Tête du boulon
- 9)- Isolant tête du boulon-profilet (soit une rondelle en papier ou tout simplement rabattement de(2))
- 10)- Circuit magnétique
- 11)- Rodelle de freinage.



TROISIEME PARTIE

CALCUL THERMIQUE

2

I- CIRCUIT de TRANSMISSION de la CHALEUR (voir I-J) et ECHAUFFEMENT

La chaleur produite dans les matériaux actifs du transformateur par les pertes dans le fer et dans le cuivre doit franchir des chemins plus ou moins longs avant d'atteindre la surface refroidie (surface des enroulements et du fer). Notre transformateur est à refroidissement à l'huile, la chaleur doit être essentiellement emportée par le courant d'huile, et par conséquent céder aux parois de la cuve. (fig. I.2) page 81 bis

D'une manière générale, la chaleur est transmise de la surface émissive à l'air ambiant par rayonnement, conduction et convection.

Dans notre cas, seule une partie minime de la chaleur arrive directement, par conduction, aux parois de la cuve. Par l'effet de l'échauffement de l'huile dû aux matériaux actifs, et de son refroidissement le long de la cuve, s'établit une circulation d'huile. La chaleur est emportée par cette huile grâce à l'élévation de température de la source de chaleur par rapport à l'huile et d'autre part, une chute de température entre l'huile et les parois de la cuve. La résistance thermique de ces minces parois est très petite, et donne pratiquement la transmission de chaleur par la surface de la cuve à l'ambiance a lieu par convection et dans une moindre mesure par rayonnement.

La figure I.1 montre l'allure de la répartition de la température aux surfaces de la source thermique dans l'huile et le long des parois de la cuve. Les températures croissent de bas en haut et diminuent de nouveau au voisinage des surfaces horizontales supérieures limites qui dissipent également de la chaleur.

On voit qu'à partir de l'angle inférieur de l'enroulement l'élévation de température de l'huile et des parois diminue rapidement vers le fond de la cuve. La cause de cette chute de température réside dans le fait que la production de chaleur dans la culasse inférieure est minime et qu'aucune circulation d'huile n'est possible au-dessous de cette culasse. Des canaux d'huile de 5mm de largeur environ suffisent à former des surfaces de refroidissement pleinement efficaces. De ce fait, la température moyenne de l'huile dans les canaux verticaux (qui séparent le noyau de fer de l'enroulement ainsi que chacune des parties de l'enroulement) n'est que légèrement supérieure à celle de l'huile située entre l'enroulement et les parois de la cuve.

- a : paroi de la cuve
- b : surfaces de l'enroulement
- c : surface du noyau
- d : huile extérieure à l'enroulement
- e : huile dans le canal de refroidissement

La répartition des flux thermiques et des températures dans les différentes parties d'un transformateur dans l'huile est complexe et difficile à étudier (fera l'étude d'un projet). Pour faciliter les calculs du point de vue échauffement on divise le parcours du flux thermique depuis la partie chauffée jusqu'au milieu réfrigérant en une série de zones naturelles (voir: 1) depuis les points intérieurs les plus chauds de la part partie active donnée du noyau ou de l'enroulement jusqu'à leurs surfaces extérieures baignées par l'huile; 2) depuis la surface extérieure de la partie donnée du transformateur jusqu'à l'huile qui le baigne; 3) depuis l'huile jusqu'à la paroi du réfrigérant, par exemple de la cuve; 4) depuis la paroi de la cuve jusqu'au réfrigérant (l'air).

Dans la zone 1 le transfert de la chaleur a lieu par conductibilité, dans les zones 2 et 3 par convection de l'huile et dans la zone 4 par rayonnement et convection.

Pour simplifier les choses, on admet qu'il n'y a pas d'échange de chaleur entre le noyau et les enroulements, ainsi qu'entre les enroulements mêmes. Ceci résulte du fait qu'ils sont séparés l'un de l'autre par des canaux d'huile.

En partant du noyau vers l'extérieur (air ambiant) on parcourt les couches comme suit:

noyau - huile - bobine basse tension - huile - bobine H.T -
huile - paroi cuve - air ambiant.

1.1 - Echauffement du noyau:

La chaleur qui se dégage dans le noyau peut être transférée dans trois directions (fig. 1 1.1 a, b, et c)

1- suivant l'axe y du noyau le long de la tôle d'acier
fig. I 1.1.0

2- suivant l'axe x à travers le paquet de tôles (fig. I 1.1.3)

3- suivant l'axe z

Les différences de températures des flux du premier et du troisième genre (suivant les axes y et z) ne sont généralement pas prises en considération à cause de la grande conductibilité thermique de l'acier. Par contre, le flux du deuxième genre (axe x) rencontre sur son chemin l'isolation entre les tôles dont la conductibilité thermique est des dizaines de fois plus petite que celle de l'acier.

FIGURE I.2 : CIRCULATION NATURELLE DE L'HUILE

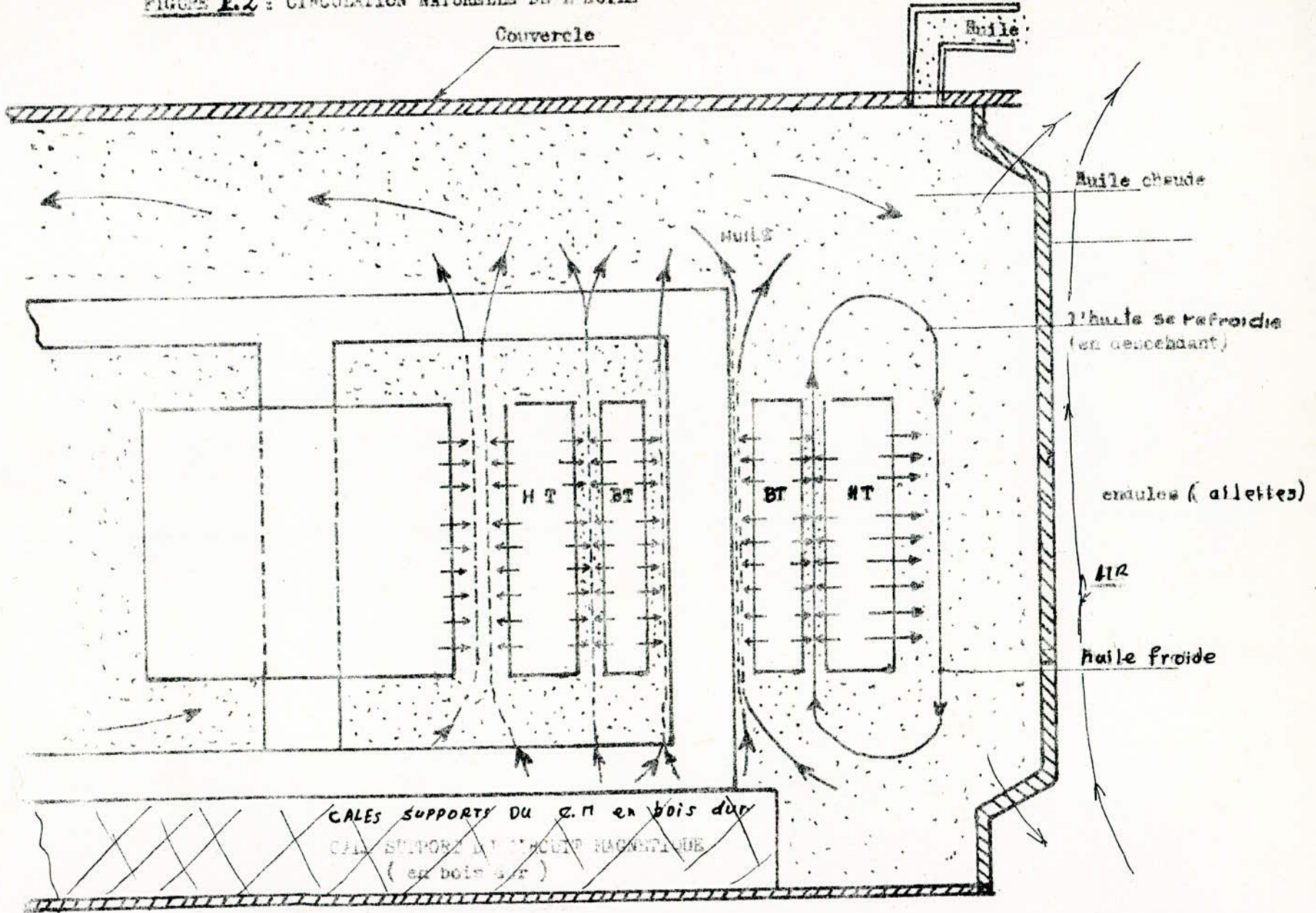
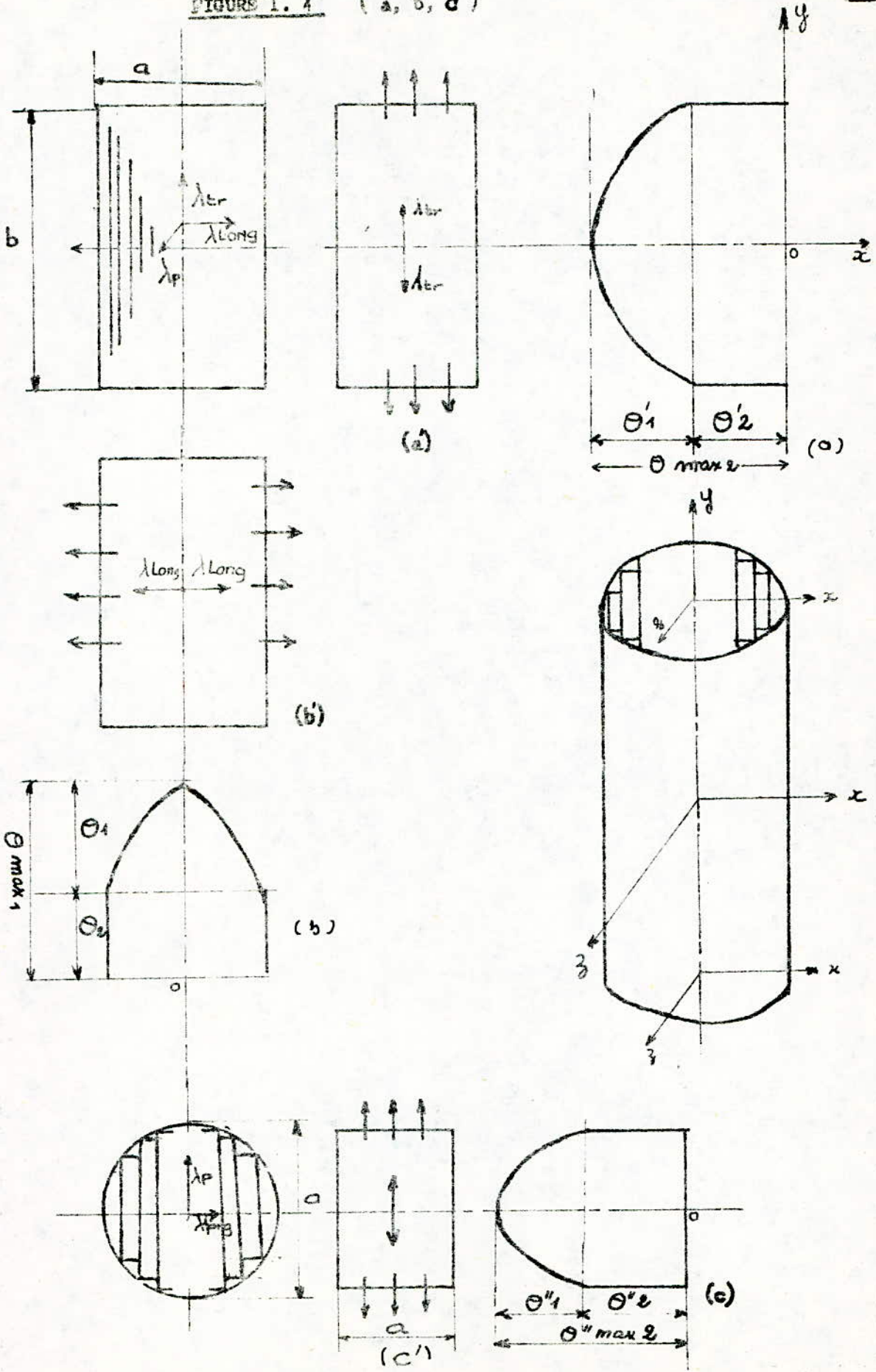


FIGURE I. 4 (a, b, c)



On prend en considération la transmission longitudinale long et transversale. Et pour simplifier ce calcul compliqué on considère que la section de la colonne est un rectangle inscrit dans le cercle de la colonne (fig 1.11 a', b', c') de même on suppose que les pertes sont uniformément réparties. Dans ces hypothèses simplificatrices les températures sont données par les relations suivantes:

$$\theta_1 = P \frac{a^2}{8 \lambda \ell} \quad \text{où } P = \text{pertes spécifiques des tôles par unité de volume (W/m}^3\text{)}$$

$$\theta_2 = P \frac{a}{2 \alpha \text{ con}} \quad a, b: \text{ (m)}$$

$$\theta_{\text{max}1} = \theta_1 + \theta_2$$

λ_1, λ_t (W/m °C) coefficient de transmission longitudinale et transversale
 $\lambda \ell = 20 \text{ W/m}^\circ\text{C}$

$$\theta'_1 = P \frac{b^2}{8 \lambda t}$$

$$\lambda t = 3 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

$$\theta'_2 = P \frac{b}{2 \alpha \text{ con}}$$

$\alpha \text{ con}$: coefficient de convection
 $\alpha \text{ con} = 110 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$

$$\theta_{\text{max}2} = \theta'_1 + \theta'_2$$

$$\theta: \text{ (}^\circ\text{C)}$$

On a $P = P_{\text{sp}} \gamma$ (W/m³) où P_{sp} et γ déjà adoptés

P_{sp} = perte spécifique par unité de masse des tôles ($P_{\text{sp}} = 1,5 \text{ W/kg}$)

γ = densité volumique ($\gamma = 7,65 \text{ kg/dm}^3$)

$$P = 1,5 \times 7,65 \cdot 10^3$$

$$P = 11,5 \cdot 10^3 \text{ W/m}^3$$

Les cotes a et b du rectangle inscrit dans la circonférence du noyau sont :

$$a = 0,9 D$$

$$a = 25,56 \text{ cm}$$

$$b = \frac{S_{\text{col}}}{a} = \frac{553,65}{25,56}$$

$$b = 21,66 \text{ cm}$$

$$\theta_1 = \frac{11,5 \cdot 10^3 \times 0,2556^2}{8 \times 20}$$

$$\theta_1 = 4,7 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\theta_2 = \frac{11,5 \cdot 10^3 \times 0,2556^2}{2 \times 110}$$

$$\theta_2 = 13,4 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\theta_{\max 1} = 4,7 + 13,4$$

$$\theta_{\max 1} = 18,1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\theta'_1 = \frac{11,5 \cdot 10^3 \times 0,2166^2}{8 \times 3}$$

$$\theta'_1 = 22,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\theta'_2 = \frac{11,5 \cdot 10^3 \times 0,2166^2}{2 \times 110}$$

$$\theta'_2 = 11,4 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\theta'_{\max 2} = 22,5 + 11,4$$

$$\theta'_{\max 2} = 33,9 \text{ } ^\circ\text{C}$$

L'échauffement du circuit magnétique par rapport à l'huile est;

$$\theta_{\max \text{CM-h}} = \theta_{\max 2} \frac{\theta'_2 + 1,5 \theta'_1}{\theta'_{\max 2} + \theta'_2 + 1,5 \theta'_1}$$

$$\theta_{\max \text{CM-h}} = 33,9 \cdot \frac{11,4 + 1,5 \cdot 22,5}{33,9 + 11,4 + 1,5 \cdot 22,5}$$

$\theta_{\max \text{CM-H}} = 19,4 \text{ } ^\circ\text{C}$. Cette valeur montre que le circuit magnétique n'est pas excessivement chauffé.

I.2- Echauffement des enroulements (B.T et H.T)

a - La température n'est pas uniforme dans les enroulements. Les conditions de la répartition de la chaleur sont beaucoup plus complexes que celle du noyau et dépendent de plusieurs facteurs (le type d'enroulement, le nombre, les dimensions et l'aménagement des canaux de refroidissement et le mode de refroidissement). Dans l'ensemble la différence de température (échauffement) suivant la largeur de l'enroulement à la même loi de parabole quadratique que le noyau. (fig I 2.1)

Vu que la répartition de la température suivant la largeur et la hauteur n'est pas uniforme on introduit dans le calcul une surélévation moyenne de la température de l'enroulement par rapport à celle de l'huile. (fig I.2.2)

Dans ces conditions, et pour des enroulements à diéque, la température moyenne de l'enroulement par rapport à l'huile est donné par la relation :

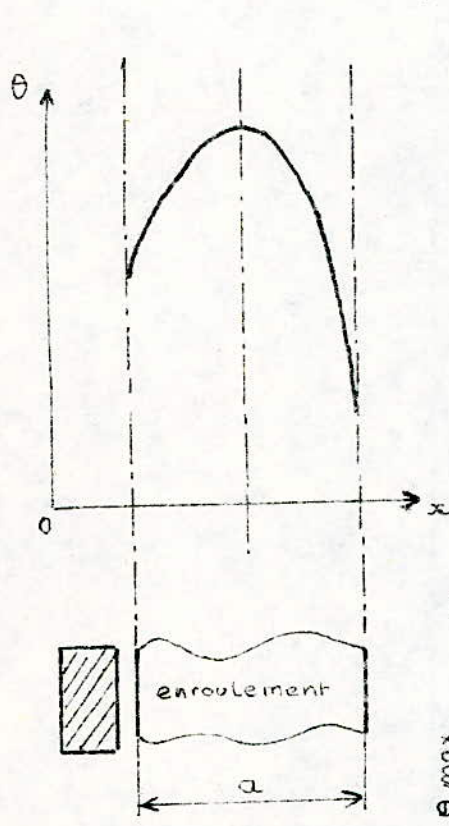
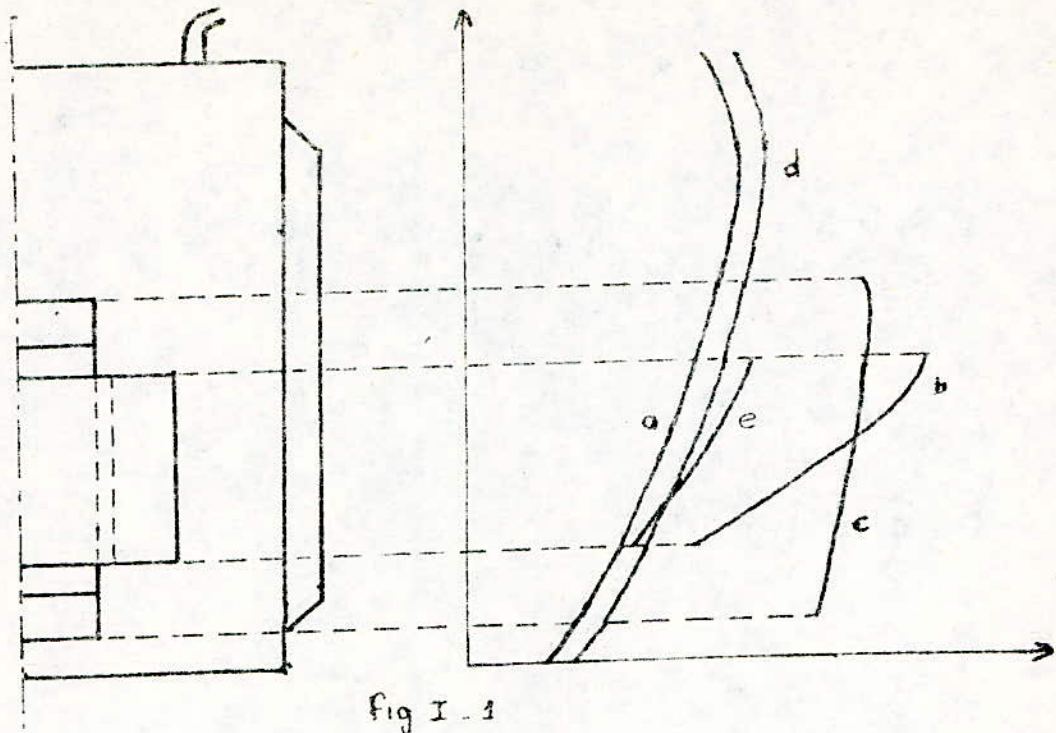


Fig I.2.1

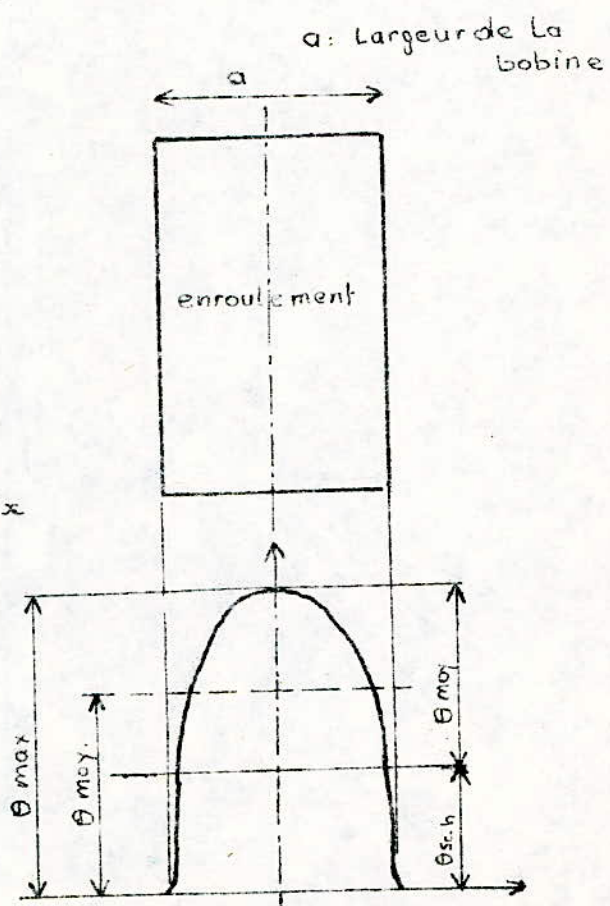


Fig I.2.2

$$\theta_{\text{moy}} - h_{1,2} = q_{1,2} \left(\frac{\delta_{is\ 1,2}}{\lambda_{is\ 1,2}} + \frac{1}{\alpha_{\text{con}}} \right)$$

l'indice 1 correspond à l'enroulement B.T et l'indice 2 à la bobine H.T

$\delta_{is\ 1,2}$: épaisseur de l'isolation de papier d'un seul côté

$\lambda_{is\ 1,2}$ = conductivité thermique du papier ($\lambda_{is\ 1,2} \approx 0,17 \text{ W/m}^\circ\text{C}$)

$q_{1,2}$ = flux thermique spécifique qui traverse l'isolation vers l'huile baignant la galette

$q_{1,2}$ est donné par la relation:

$$q_{1,2} = \frac{500 \text{ Km}_{R1,2} \rho_{J\ 1,2} S_{W1,2} (W_{sp} / gal_{1,2})}{\xi_{1,2} (b'_{1,2} + (W_{sp}/g)_{1,2} - a'_{1,2})} \quad (2)$$

où,

ξ = coefficient qui tient compte d'une partie de la section du contact avec l'huile occupée par les cales coaxiales et radiales. Ce coefficient est donné par la relation:

$$\xi = \frac{\xi_{v1,2} b'_{1,2} + \xi_{n1,2} (W_{sp}/gal)_{1,2} a'_{1,2}}{b'_{1,2} + (W_{sp}/gal)_{1,2} a'_{1,2}} \quad (3)$$

$\xi_{v1,2}$ et $\xi_{n1,2}$ coefficient qui dépendent respectivement des nombres des cales radiales et axiales, ils sont donnés par les relations:

$$\xi_{n1,2} = \frac{\frac{\pi}{4} (D_{e1,2}^2 - D_{i1,2}^2) - N_{\text{cal}1,2} \cdot S_{\text{cal radial}1,2}}{\frac{\pi}{4} (D_{e1,2}^2 - D_{i1,2}^2)} \quad (4)$$

$$\xi_{v1,2} = \frac{\pi D_{e1,2} b'_{1,2} - N_{\text{cal}1,2} S_{\text{cal ax}1,2}}{\pi D_{e1,2} b'_{1,2}} \quad (5)$$

Le nombre des cales est fonction des diamètres des bobines, on l'estime du tableau T I.1

TABLEAU T I.1

D extérieur (mm)	150 à 250	250 à 380	380 à 500	500 à 600	600 à 900	900 à 1200
nombre de cales	6	8	10	12	<u>12</u> à <u>9</u> 14	<u>14</u> à <u>9</u> 18

le coefficient α_{con} de la relation 1 est donné par :

$$\alpha_{con_{1,2}} = \frac{1 + \left(\frac{\alpha_{con h}}{\alpha_{con v}} \cdot (W_{sp/gal}) \cdot \frac{a'}{b'} \cdot \frac{\xi h}{\xi v} \right)_{1,2}}{1 + \left(W_{sp/gal} \cdot \frac{a'}{b'} \cdot \frac{\xi h}{\xi v} \right)_{1,2}} \quad (6)$$

où: $\alpha_{con v_{1,2}}$ = coefficient de transmission par convection par les surfaces verticales (pris entre 100 et 110 W/m² °C)

$\alpha_{con h_{1,2}}$ = coefficient de transmission par convection par les surfaces radiales (environ 0,5 $\alpha_{con_{1,2}}$)
si $hc_{1,2} > \frac{a_{1,2}}{10}$

I. 2.1- Echauffement moyen de l'enroulement B.T par rapport à l'huile (indice 1 dans les relations 1 à 6)

a - Nombre de cales

$D_{ex1} = D + 2 (a_1 + a_{10})$

$D_{ex1} = 284 + 2 (31,16 + 12)$

$D_{ex1} = 370,3 \text{ mm}$

Du tableau T I.2.1, on tire N cal = 8 cales

diamètre intérieur $D_{i1} = D + 2 a_{10}$

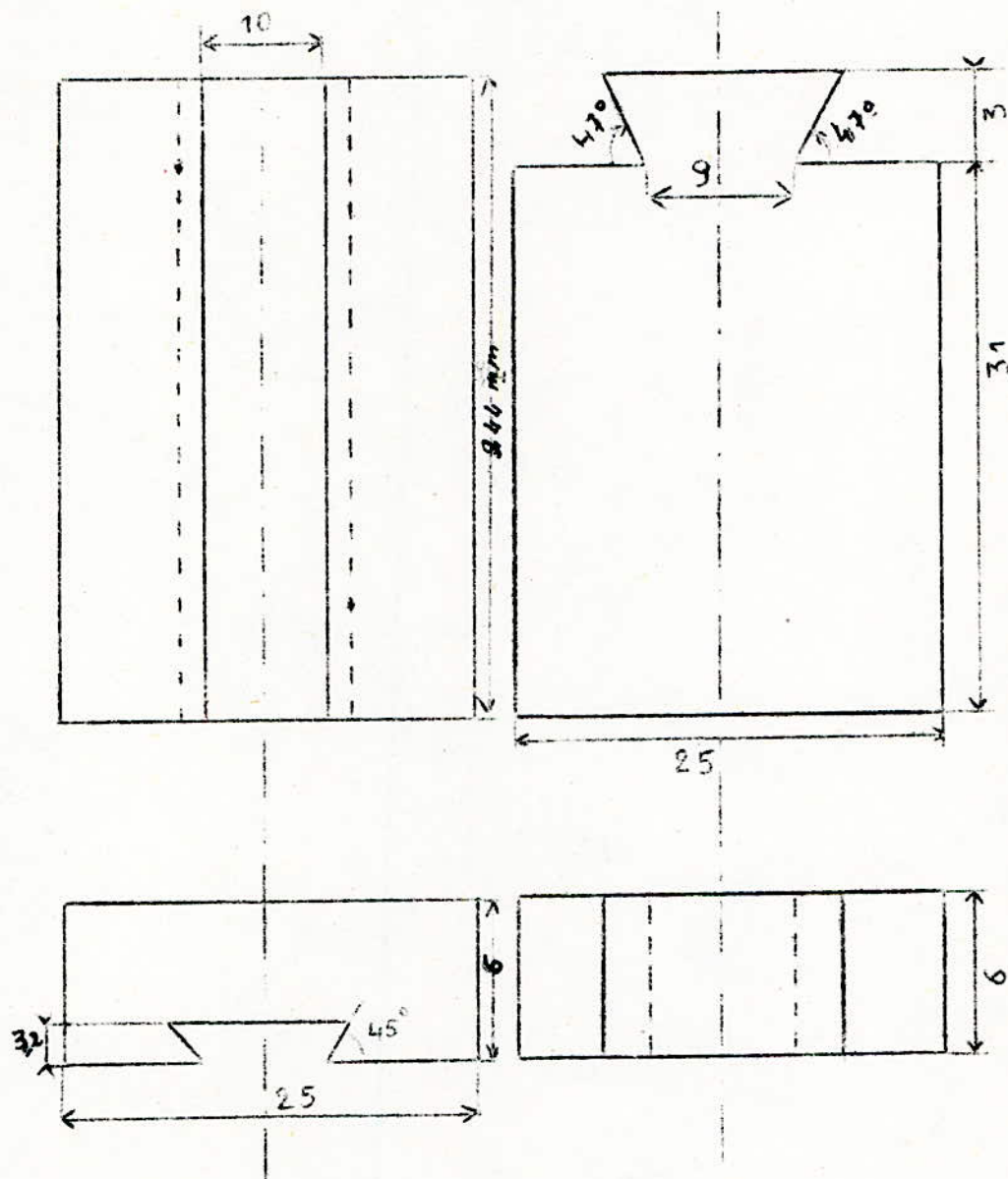
$D_{i1} = 284 + 2 \times 12$

$D_{i1} = 308 \text{ mm}$

Formes des cales:

a -- Cales axiales

b -- cales radiales



Application numérique (de la relation 6 à 1)

$$\epsilon_{h_1} = \frac{\frac{\pi}{4}(370,3^2 - 308^2) - 8,25 \times 31,16}{\frac{\pi}{4}(370,3^2 - 308^2)} \quad \epsilon_{h_1} = 0,81$$

$$\epsilon_{v_1} = \frac{\pi \cdot 370,3 \cdot 9,44 - 8 \cdot 9,44 \times 25}{\pi \cdot 370,3 \cdot 9,44} \quad \epsilon_{v_1} = 0,83$$

$$\epsilon = \frac{0,83 \cdot 9,44 + 0,81 \cdot 4 \times 6}{9,44 + 4 \cdot 5,54} \quad \epsilon = 0,81$$

$$q_1 = \frac{500 \cdot 1,023 \cdot 0,0195 \cdot 3,323^2 \times 79 \times 4}{0,81 (9,44 + 4 \cdot 5,54)} =$$

$$q_1 = 1351,4 \text{ W/m}^2$$

$$\alpha_{com_1} = 110 \cdot \frac{1 + 0,5 \cdot 4 \cdot \frac{6}{9,44} \cdot \frac{0,81}{0,83}}{1 + 4 \cdot \frac{5,54}{9,44} \cdot \frac{0,81}{0,83}}$$

$$\alpha_{com_1} = 71,7 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

et finalement:

$$\theta_{\text{noy-h}_1} = 1351,4 \times \left(\frac{0,44 \cdot 10^{-3}}{0,17} + \frac{1}{71,70} \right) =$$

$$\theta_{\text{noy-h}_1} = 22,4 \text{ } ^\circ\text{C}$$

I.2.2- Echauffement moyen de l'enroulement H.T (l'indice 2 dans les relations 1 à 6)

a- Nombres de cales

$$D_{ex2} = D_{i2} + 2 a_2$$

D_{ex2} = Diamètre extérieur de l'enroulement H.T

$$D_{i2} = D_{12} + a_{12}$$

D_{i2} = Diamètre intérieur de l'enroulement B.T

$$D_{i2} = 385,3 + 15$$

$$D_{i2} = 400,3 \text{ mm}$$

$$D_{ex2} = 400,3 + 2 \times 55,8$$

$$D_{ex2} = 511,9 \text{ mm}$$

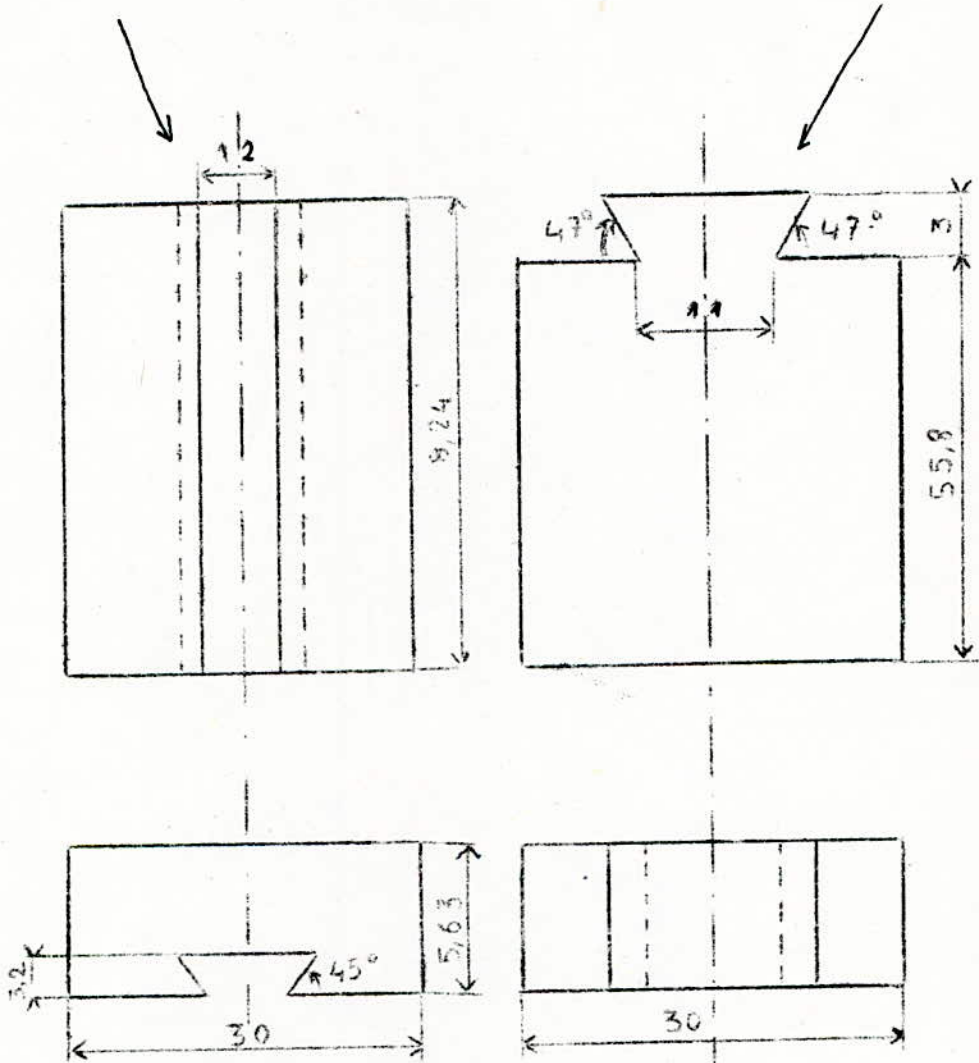
Du tableau TI.1 on déduit le nombre de cales : N cal

$$N_{cal} = 12 \text{ cales}$$

b- Formes de cales:

cales axiales

cales radiales



Application numérique:

$$\epsilon_{h_2} = \frac{\frac{\pi}{4} (512^2 - 400,3^2) - 12 \times 55,8 \times 30}{\frac{\pi}{4} (512^2 - 400,3^2)}$$

$$\epsilon_{h_2} = 0,75$$

$$\epsilon_{v_2} = \frac{\pi \cdot 512 \cdot 8,24 - 12 \cdot 8,24 \cdot 30}{\pi \cdot 512 \cdot 8,24}$$

$$\epsilon_{v_2} = 0,78$$

$$\xi_2 = \frac{0,78 \cdot 8,24 + 0,75 \times 18 \cdot 3,10}{8,24 + 18 \cdot 3,10}$$

$$\xi_2 = 0,75$$

$$q_2 = \frac{500 \cdot 1,023 \cdot 0,0195 \times 3,429^2 \cdot 16,2 \times 18}{0,75 (8,24 + 18,3,1)} \quad q_2 = 712 \text{ W/m}^2$$

$\alpha_{\text{con}_2} = ?$ on estime $\alpha_{\text{con}_v} = 110 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ et

$$\alpha_{\text{con}_h} = 0,5 \alpha_{\text{con}_v} = 55 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\alpha_{\text{con}_2} = 110 \frac{1 + \frac{55}{110} \cdot 18 \cdot \frac{3,10}{8,24} \cdot \frac{0,75}{0,78}}{1 + 18 \frac{3,1}{8,24} \cdot \frac{0,75}{0,78}} = \frac{4,25}{7,5} \cdot 110$$

$$\alpha_{\text{con}_2} = 62 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

d'où l'échauffement moyen de la bobine H.T par rapport à l'huile est :

$$\theta_{\text{moy}_{2-h}} = 712 \left(\frac{0,44 \cdot 10^{-3}}{0,17} + \frac{1}{62} \right)$$

$$\theta_{\text{noy}_{2-h}} = 13,4 \text{ } ^\circ\text{C}$$

I.3- Echauffement de l'huile par rapport à la cuve : θ_{h-c}

La chaleur est transmise par convection naturelle aux parois de la cuve.

Pour la convection naturelle l'échauffement est donné par la relation:

$$\theta_{h-c} = 0,165 \left[\frac{1,05 \cdot (P_o + P_x)}{Sc} \right]^{0,6}$$

où P_o : perte à vide ($P_o = 3628 \text{ W}$) et P_x pertes dues à la charge ($P_x = 23184 \text{ W}$)

Sc = surface de contact avec l'air ambiant.

$Sc = S_{co} + S_{cc}$ ou S_{co} : surfaces des ondules

S_{cc} : surface du couvercle

a- Surface du couvercle: S_{cc}

$$S_{cc} = A \times B$$

$$S_{cc} = 1,75 \times 0,69$$

$$S_{cc} = 1,21 \text{ m}^2$$

b- Surface des ondules: S_{co}

$S_{co} = N_o \cdot P_{\text{ond}} \cdot h_o$ où les termes ont été déjà calculés.

No = nombre d'ondules No = 2(N₁ + N₂) = 2(43+16)

P_{ond} = périmètre d'une ondule (P_{ond} = 649 mm = 649. 10⁻³ mm)

h_o = hauteur de l'ondule (h_o = 1, 258 m)

Sc_o = 2(43 + 16). 0,649 x 1,258

Sc_o = 96m²

et finalement la surface de contact Sc:

Sc = 1,21 + 96

Sc = 97,2 m²

et l'échauffement : θ_{h-c}

θ_{h-c} = 0,165 [1,05 (3628 + 23184) / 97]^{0,6}

θ_{h-c} = 5 °C

I.4- Echauffement de la cuve par rapport à l'air : θ_{c-a}

Dans cette zone, la chaleur est transmise par convection. La relation ci-après nous donne cet échauffement.

θ_{c-a} = [1,05 (P_o + P_k) / (2,8 · S_r + 2,5 · S_c)]^{0,8}

où:

S_r = Surface radiale de la cuve. S_r = 2(A' + B') h_o + S_{cc}, ou 2(A' + B') h_o est la surface enveloppante de la cuve.

A' = A + 2 g. = 1,75 + 2 x 0,3 = 2,35 m
B' = B + 2g = 0,692 + 2x 0,3 = 1,292 m

g = profondeur des ondules (g = 300 mm)

d'où:

S_r = 2 (2,35 + 1,292) . 1,258 + 1,21
S_r = 10,4 m²

Le reste du paramètre de la relation garde cette même signification et la même valeur déjà trouvée.

Et finalement, l'échauffement θ_{c-a} est:

θ_{c-a} = [1,065 (3628 + 23184) / (2,8 · 10,4 + 2,5 · 9,7)]^{0,8}

θ_{c-a} = 41,5 °C

I.5 - Graphique de l'échauffement

I.E. Graphique de l'échauffement

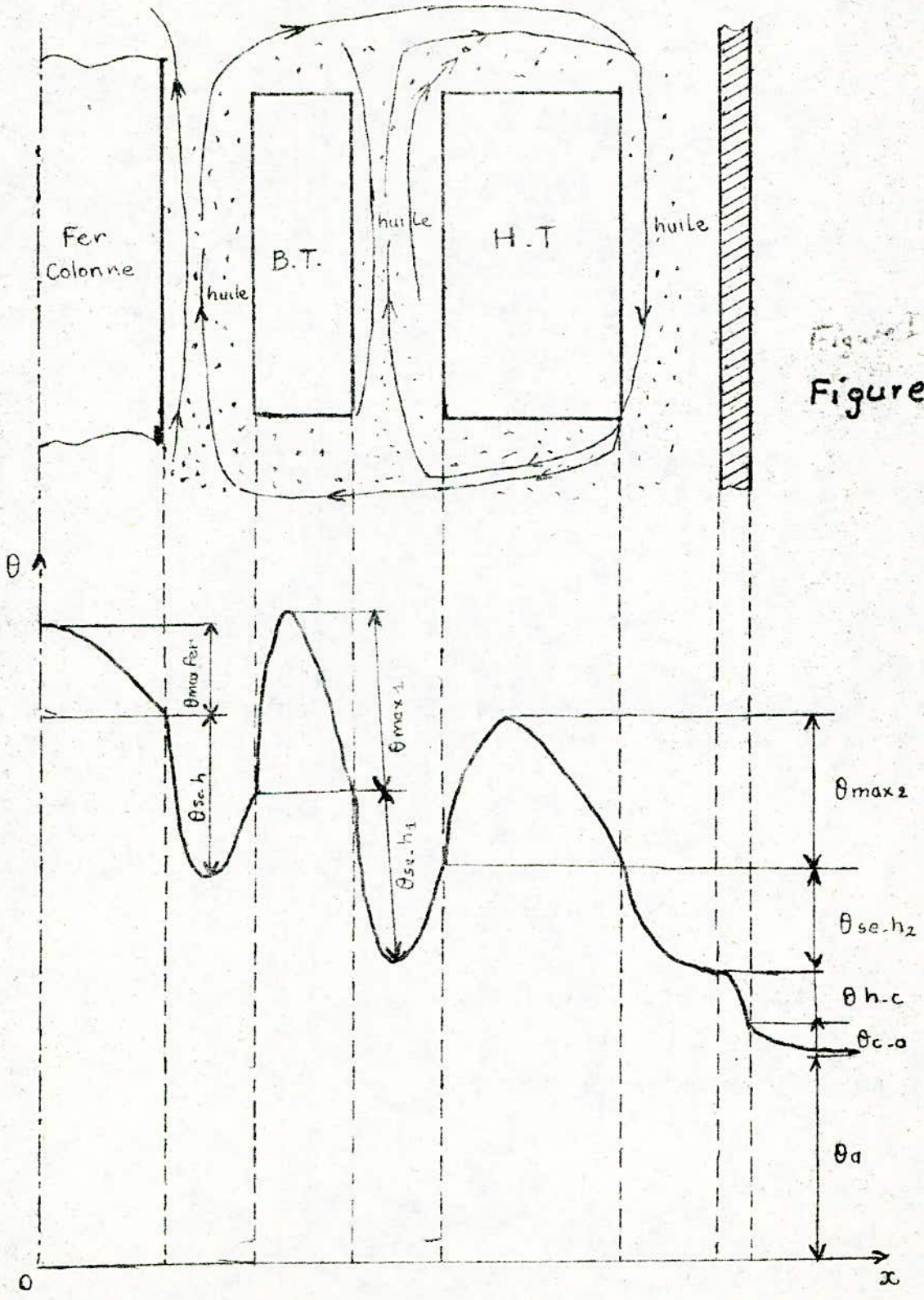


Figure I.5
Figure I.5

$\theta_a = 35^\circ$: temperature de l'air ambiant

θ_a = Température de l'air ambiant

θ_{c-a} = échauffement cuve - air

θ_{h-c} = échauffement huile - cuve

θ_{se-h2} = échauffement surface enroulement haute-tension-huile

θ_{max2} = échauffement enroulement haute-tension - surface

$\theta_{s\ fer-h}$ = échauffement surface fer - huile

$\theta_{max-fer}$ = échauffement fer-surface

θ_{se-h1} = échauffement surface B.T - huile

$\theta_{max\ 1}$ = échauffement B.T - surface

A l'aide des échauffements calculés on détermine les températures des parties essentielles du transformateur.

I.6 - Températures:

On calcule les températures des bobines (basse et haute tension) et du circuit magnétique.

I.6.1 - Température de l'enroulement B.T : t_{e1}

$$t_{e1} = \theta_{moy-h1} + \theta_{h-c} + \theta_{c-a} + \theta_a$$

$$t_{e1} = 22,4 + 5 + 41,5 + 35$$

$$t_{e1} = 104^{\circ}C$$

I.6.2- Température de la bobine H.T : t_{e2}

$$t_{e2} = \theta_{moy-h2} + \theta_{h-c} + \theta_{c-a} + \theta_a$$

$$t_{e2} = 13,4 + 5 + 41,5 + 35$$

$$t_{e2} = 95^{\circ}C$$

I.6.3- Température du circuit magnétique. t_{em}

$$t_{em} = \theta_{ch-h} + \theta_{h-c} + \theta_{c-a} + \theta_a$$

$$t_{em} = 19,4 + 5 + 41,5 + 35$$

$$t_{em} = 101^{\circ}C$$

Conclusion: Les températures trouvées restent inférieures à la température limite admissible par les normes.

Surélévation de température admissible.

partie du transformateur	surélévation de température max (+35°C)		Méthode de mesure
Enroulement	70°C	105°C	Selon la variation de la résistance au thermomètre
noyau à la surface	75°C	110°C	
Huile (dans les couches supérieures)	60°C	95°C	au thermomètre

QUATRIEME PARTIE :

CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES DU TRANSFORMATEUR

I - RENDEMENT DU TRANSFORMATEUR

1 - Expression du rendement

Le rendement est le rapport de la puissance fournie (puissance utile) et de la puissance absorbée.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad \begin{array}{l} P_2 = \text{puissance fournie} \\ P_1 = \text{puissance absorbée} \end{array}$$

$$\eta(\%) = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 \quad \text{. 100 : le rendement est exprimé en pourcent ; \%}$$

$$P_1 = P_2 + P_0 + P_{cu} \quad (\text{puissance utile plus les pertes})$$

$$\eta(\%) = \frac{P_2}{P_2 + P_0 + P_{cu}} \cdot 100 = \left(1 - \frac{P_0 + P_{cu}}{P_2 + P_0 + P_{cu}} \right) \cdot 100$$

P_{cu} : pertes joules dans les résistances des enroulements,

$$P_{cu} = RI^2 = R I^2 \times \frac{I_{cc}^2}{I_{cc}^2} = R I_{cc}^2 \left(\frac{I}{I_{cc}} \right)^2$$

En posant : $\frac{I}{I_{cc}} = \alpha$: coefficient de charge et $R I_{cc}^2 = P_K$

$$\text{On obtient : } P_{cu} = \alpha^2 P_K$$

Le coefficient de charge α est le rapport entre la puissance fournie et la puissance nominale.

$$\alpha = \frac{P_2}{P_1} = \frac{I_2}{I_{2n}} \quad \text{avec } P_n = S_n \quad ; S_n : \text{puissance}$$

apparente nominale.

: facteur de puissance de la charge.

On peut écrire alors :

$$P_{cu} = \alpha^2 P_K \quad \text{et} \quad P_2 = \alpha (S_n \cos \varphi)$$

$$\eta(\%) = \left(1 - \frac{P_0 + \alpha^2 P_K}{\alpha (S_n \cos \varphi) + P_0 + \alpha^2 P_K} \right) \cdot 100$$

Le rendement est maximum lorsque les pertes joule sont égales aux pertes à vide (pertes ferres)

$$\alpha^2 P_K = P_0$$

On déduit le coefficient de charge optimal : $\alpha_{opt} = \left[\frac{P_0}{P_K} \right]^{\frac{1}{2}}$

$$P_0 = 3629 \text{ W} , P_K = 23182 \text{ W} \quad \text{d'où} \quad \alpha_{opt}^2 = 0,1565 \quad \text{et} \quad \alpha_{opt} = 0,3956$$

3 - Tableaux de valeurs

Le rendement est fonction de la fraction de sa charge nominale demandée au transformateur.

$$\eta(\%) = f(\alpha) = f\left(\frac{I_2}{I_{2n}}\right) = f\left(\frac{P_2}{P_{2n}}\right)$$

On déterminera le rendement pour différentes fractions d'une charge résistive $\cos\varphi = 1, \sin\varphi = 0$, d'une charge inductive ou capacitive $\cos\varphi = 0,8$
 $\sin\varphi = \pm 0,6$

$$P_K = 23,184 \text{ KW} , P_0 = 3,628 \text{ KW} \text{ et } S_n = 2500 \text{ KVA}$$

Tableau T.1 : Cas d'une charge résistive

α	$\alpha^2 P_K$ (KW)	$P_0 + \alpha^2 P_K$ (KW)	$\alpha S_n \cos\varphi$ (KW)	$\alpha S_n \cos\varphi + P_0 + \alpha^2 P_K$ (KW)	$\eta(\%)$
1/8	0,362	3,990	312,5	316,490	98,73
1/4	1,449	5,077	625,0	630,077	99,19
0,3956	3,628	7,256	989,0	996,256	99,27
1/2	5,796	9,424	1250,0	1259,424	99,25
3/4	13,041	16,669	1875,0	1891,669	99,11
1	23,184	26,812	2500,0	2526,812	98,93
5/4	36,225	39,853	3125,0	3164,853	98,74
6/4	52,164	55,792	3750,0	3805,792	98,53

Tableau T.2 : Cas d'une charge inductive ou capacitive

α	P_K (KW)	$P_0 + \alpha^2 P_K$ (KW)	$\alpha S_n \cos \varphi$ (KW)	$\alpha S_n \cos \varphi + P_0 + \alpha^2 P_K$ (KW)	η (%)
1/8	0,362	3,990	250,0	253,990	98,42
1/4	1,449	5,077	500,0	505,077	98,99
3/8	3,628	7,256	791,2	798,456	99,09
1/2	5,796	9,424	1000,0	1009,424	99,06
3/4	13,041	16,669	1500,0	1516,669	98,90
1	23,184	26,812	2000,0	2026,812	98,67
5/4	36,225	39,853	2500,0	2539,853	98,43
6/4	52,164	55,792	3000,0	3055,792	98,17

II - VARIATION DE LA TENSION SECONDAIRE

On détermine la variation de la tension secondaire avec la charge pour un facteur de puissance donné.

En triphasé :

$$P_{ch} = \sqrt{3} U_2 I_2 \cos \varphi_2 \quad : \text{puissance de la charge}$$

$$P_n = \sqrt{3} U_{2n} I_{2n} \quad : \text{puissance nominale}$$

On définit la charge comme étant le rapport de sa puissance (P_{ch}) sur la puissance nominale (P_n)

$$\alpha = \frac{P_{ch}}{P_n} = \frac{\sqrt{3} U_2 I_2 \cos \varphi_2}{\sqrt{3} U_{2n} I_{2n}} = \frac{U_2 I_2 \cos \varphi_2}{U_{2n} I_{2n}}$$

La chute de tension au secondaire est définie comme suit, ((en pourcentage)

$$\Delta U (\%) = \frac{U_{2n} - U_2}{U_{2n}} \cdot 100 \quad \text{ou bien} \quad \Delta U (\%) = \frac{U_{2n} - U_2}{U_{2n}} \cdot 100$$

U_2 = tension secondaire pour une charge et un facteur de puissance donné

U_{2n} = tension nominale au secondaire

U'_2 et U'_{2n} = tensions secondaires (U_2 et U_{2n}) ramenées au primaire

$$U'_{2n} = U'_{1n} \quad \text{et} \quad \Delta U' = U'_{1n} - U'_2$$

La relation (1) devient :

$$\Delta U (\%) = \frac{U'_{1n} - U'_2}{U'_{1n}} \cdot 100 \quad , \quad \text{cette chute de tension approximativement est égale à :}$$

$$\Delta U (\%) = \alpha (U_{K_a} (\%) \cos \varphi_2 + U_{K_r} (\%) \sin \varphi_2) \quad (2)$$

avec $U_{K_a} (\%) = 0,96 \%$: chute de tension active ; $U_{K_r} (\%) = 6,8 \%$: chute de tension réactive.

1° - Chutes de tension

On détermine la chute de tension correspondante à des charges de natures différentes.

Propositions : Variation de la tension secondaire, pour une charge résistive de

$\cos \varphi_2 = 1, \sin \varphi_2 = 0$, pour une charge inductive de $\cos \varphi_2 = 0,8$ et $\sin \varphi_2 = 0,6$
 et pour une charge capacitive de $\cos \varphi_2 = 0,8$ et $\sin \varphi_2 = -0,6$

En utilisant l'expression (2) de la chute de tension, on obtient :

- Pour une charge résistive : $\Delta U (\%) = 0,96 \cdot \alpha$
- Pour une charge inductive : $\Delta U (\%) = 4,848 \cdot \alpha$
- Pour une charge capacitive : $\Delta U (\%) = -3,312 \cdot \alpha$

La chute de tension est proportionnelle à la charge α , à l'approximation faite.

2° - Détermination de : $U'_2, U_2, U_2/U_{2n}, I_2/I_{2n}$ et I_2

De ce qui précède on peut écrire :

$$U'_2 = U'_{1n} - \Delta U' \quad \Delta U' = U'_{1n} - U'_2 = \Delta U (\%) \cdot 100$$

$$U_2 = U_{2n} \left(1 - \frac{\Delta U (\%)}{100} \right)$$

$$\frac{I_2}{I_{2n}} = \frac{U_{2n}}{\cos \varphi_2 U_2} \quad (\text{tous les paramètres sont connus})$$

d'où $I_2 = \frac{I_2}{I_{2n}} I_{2n}$; on a $U_{2n} = 5500 \text{ V}$, $U'_{1n} = 15000 \text{ V}$ et $I_{2n} = 55,55 \text{ A}$

α prend des valeurs de (0, , 6/4)

3° - TABLEAU DE VALEURS ET CARACTERISTIQUES : $U_2 = f(I_2)$

TABIEAU " T.1 " : CAS DE CHARGE RESISTIVE

α	$\Delta U(\%)$	$\Delta U' (v)$	$U' (v)$	$U_2 (v)$	$\frac{U}{U_{2n}} \cdot 10^2 (\%)$	$\frac{I_2}{I_{2n}} \cdot 10 (\%)$	$I_2 (A)$
1/8	0,1200	12,00	14988,0	5493,4	98,88	12,48	40,95
1/4	0,2400	24,00	14976,0	5486,8	97,76	24,94	81,80
0,3956	0,3797	37,97	14962,0	5479,1	99,62	39,40	129,27
1/2	0,4800	48,00	14952,0	5473,6	99,52	49,76	163,23
3/4	0,7200	72,00	14928,0	5460,4	99,28	74,46	224,25
1	0,9600	96,00	14904,0	5447,2	99,04	99,04	324,00
5/4	1,2000	120,00	14880,0	5434,0	98,80	123,50	405,12
6/4	1,4400	144,00	14856,0	5420,8	98,66	147,84	484,97

TABIEAU " T22 " : CAS D'UNE CHARGE INDUCTIVE

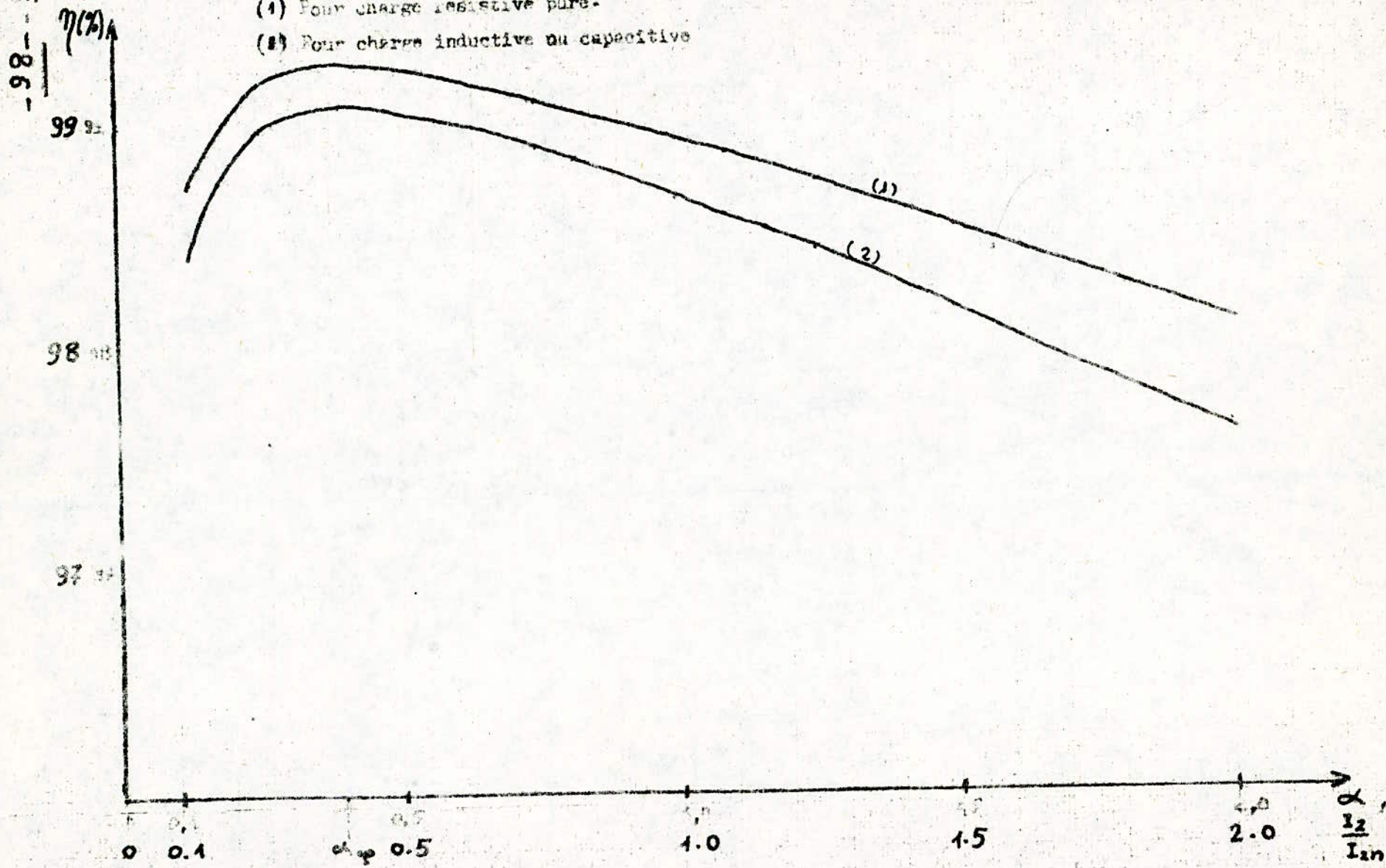
1/8	-0,4140	-41,40	15041,4	5522,7	100,41	12,55	41,17
1/4	-0,8280	-82,80	15082,8	5545,5	100,82	25,20	82,68
0,3956	-1,3102	-131,02	15131,0	5572,0	101,31	40,07	131,47
1/2	-1,6560	-165,60	15165,6	5591,0	101,65	50,82	166,72
3/4	-2,4840	-248,40	15248,4	5636,6	102,48	76,86	252,13
1	-3,3120	-331,20	15381,2	5682,1	103,31	103,31	338,89
5/4	-4,1400	-414,00	15414,0	5727,7	104,14	130,17	427,07
6/4	-4,9680	-496,80	15496,8	5773,2	104,96	157,45	516,46

Tableau ' T.3 ' Cas de charge capacitive

α	ΔU (%) (V)	ΔU_2 (V)	U_2 (V)	U_2 (V)	$\frac{U_2}{U_{2n}} \cdot 10^2$ (%)	$\frac{I_2}{I_{2n}} \cdot 10^2$ (%)	I_2
1/8	0,6060	60,60	14939,4	5466,6	99,39	12,42	40,75 40,75
1/4	1,2120	121,20	14878,8	5433,3	98,78	24,69	81,00 81,00
0,3956	1,9178	191,78	14808,2	5394,5	98,08	38,80	127,28 127,28
1/2	2,4240	242,40	14757,6	5366,6	97,57	48,18	160,03 160,03
3/4	3,6360	363,60	14636,4	5300,0	96,36	72,27	237,07 237,07
1	4,8480	484,80	14515,2	5233,3	95,15	95,15	312,12
5/4	6,0600	606,00	14394,0	5166,7	93,93	117,42	385,19
6/4	7,2720	727,20	14272,8	5100,0	92,72	139,09	456,23

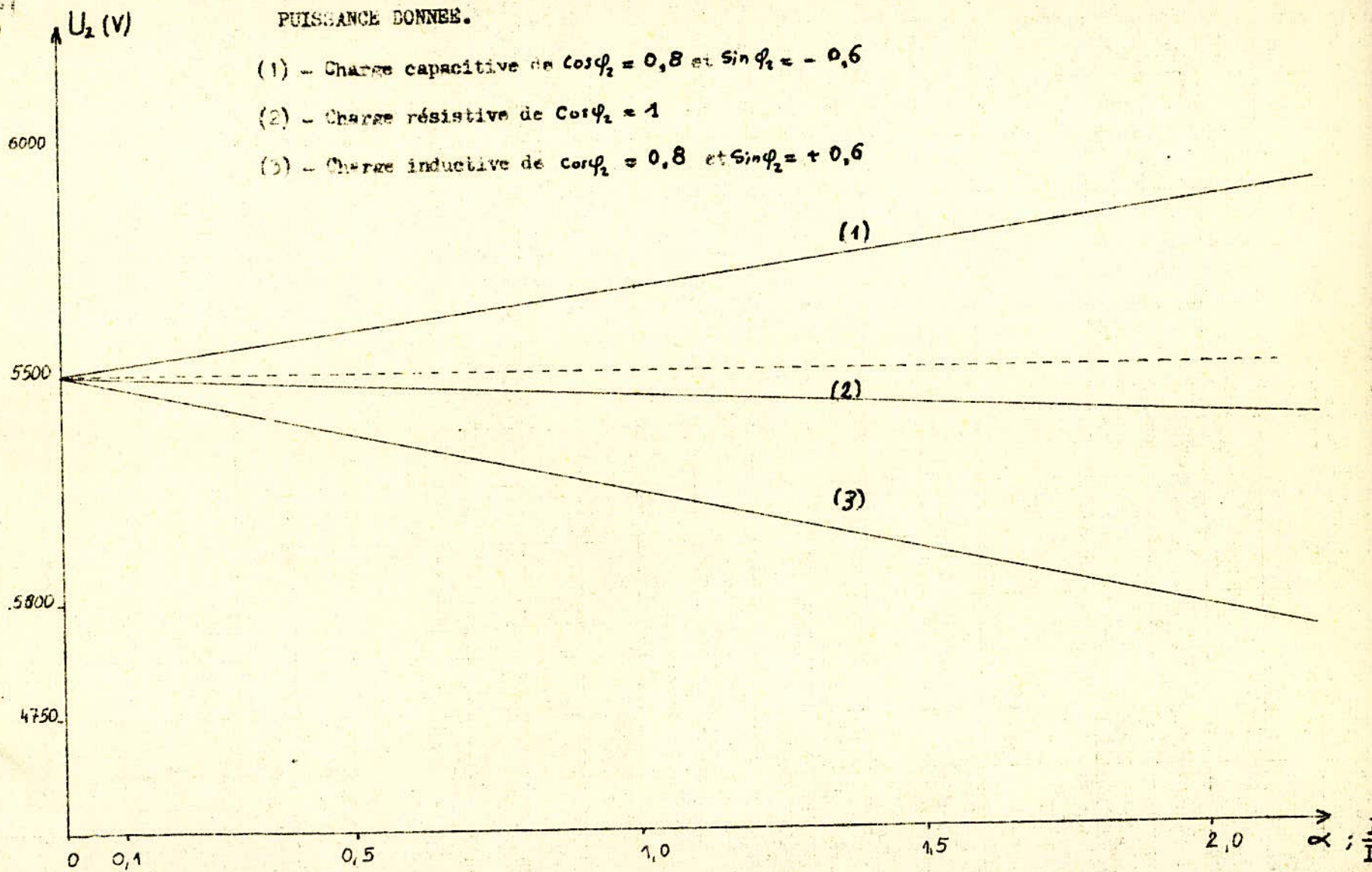
COURBES DE RENDEMENTS

- (1) Pour charge resistive pure.
- (2) Pour charge inductive ou capacitive



- COURBES : VARIATIONS DE LA TENSION AU SECONDAIRE EN FONCTION DE LA CHARGE POUR UN FACTEUR DE PUISSANCE DONNÉE.

- (1) - Charge capacitive de $\cos \phi_2 = 0,8$ et $\sin \phi_2 = - 0,6$
- (2) - Charge résistive de $\cos \phi_2 = 1$
- (3) - Charge inductive de $\cos \phi_2 = 0,8$ et $\sin \phi_2 = + 0,6$



CINQUIEME PARTIE

=====

REALISATION et MONTAGE

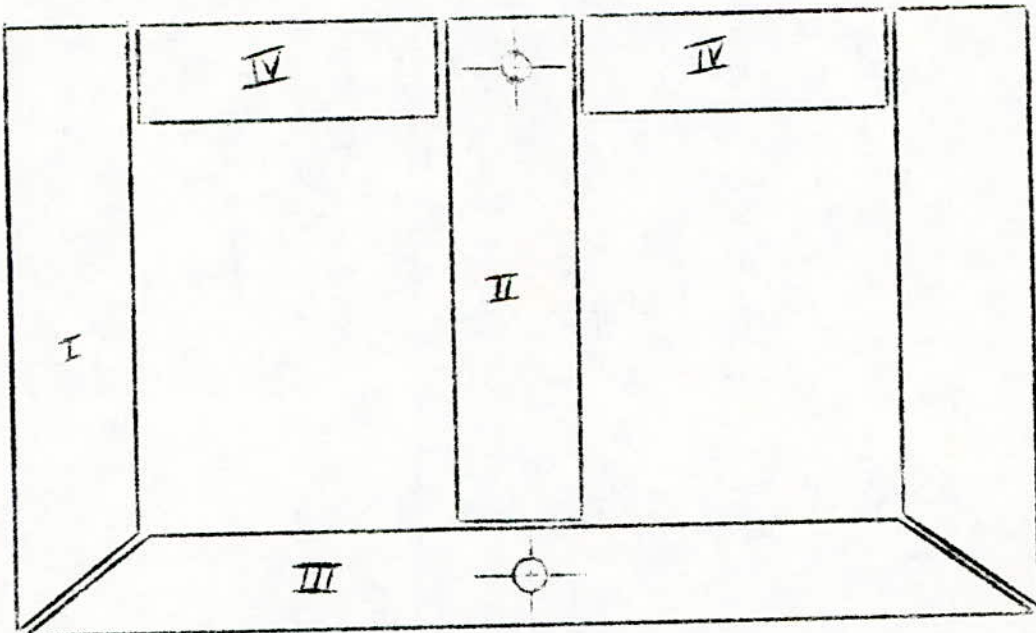
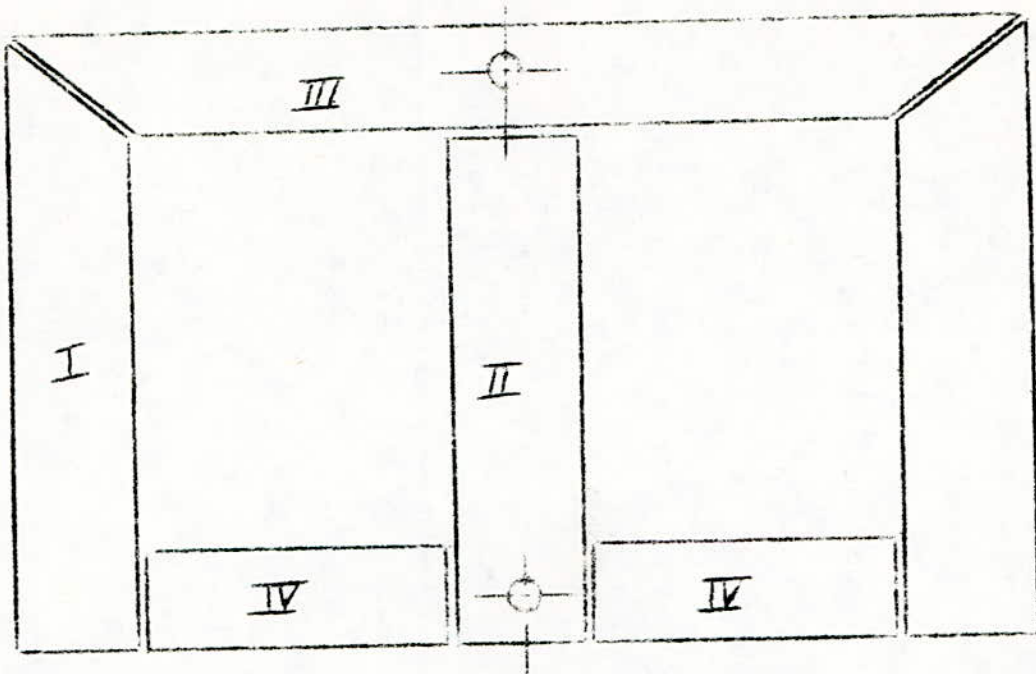


fig I 1.1: Assemblage noyau culasse l'assemblage des paquets de tôles se fait alternativement comme suit:

on pose les tôles des types I, II, III, et IV comme ~~l'indique~~ l'indique la fig (a) et on vient superposer les tôles de la fig (b), puis celles de la fig (a) et ainsi de suite.

1- Assemblage noyaux - culasses

Les noyaux et les culasses sont réunis par enchevêtrement (fig I.1.1) et bloqués par des boulons de serrage. Ces derniers nécessitent un perçage des tôles, donc un désavantage, car la réluctance du circuit magnétique n'est plus homogène d'une part et d'autre part les tiges massives des boulons seront le siège de courants de Foucault. On aura, de ce fait, une augmentation du flux de fuite (entre-fer entre-tiges alésages) et des pertes fer dans le circuit magnétique.

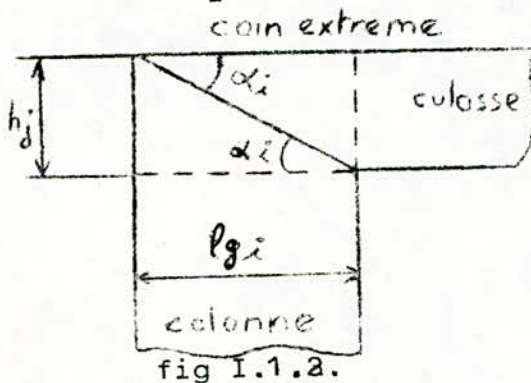
Pour remédier à cet inconvénient, on fait un minimum de trous dans les tôles (permettant d'obtenir un bon serrage).

Dans la partie calcul mécanique, on a opté pour un perçage par les deux coibs (noyau - culasse) de la colonne médiane.

1.1- Assemblage noyaux-culasses extrêmes:

On a 4 coins (2 x 2 noyau-culasse) des deux colonnes extrêmes. Dans ces zones, le perçage n'a pas eu lieu, mais du fait que l'assemblage est par enchevêtrement, des entre-fers prennent naissance. Par conséquent le flux de fuite peut être important. On peut le minimiser en coupant les tôles d'un angle α_i comme le montre la fig I.1.1.

L'angle α_i est calculé comme suit:



$$\begin{aligned}
 h_j &= \text{hauteur de la culasse} \\
 & \quad (h_j = 233,53 \text{ mm}) \\
 l_{g_i} &= \text{largeur de la tôle de la} \\
 & \quad \text{colonne du gradin } i (i=1, \dots, 6) \\
 \operatorname{tg} \alpha_i &= \frac{h_j}{l_{g_i}} = \frac{233,53 \text{ (mm)}}{l_{g_i} \text{ (mm)}} \\
 \alpha_i &= \operatorname{Arc} \operatorname{tg} \frac{233,53}{l_{g_i}}
 \end{aligned}$$

1.2- Assemblage noyaux-culasses médianes:

Ces tôles restent rectangulaires, on les perce seulement (fig. I.1.1)

I.2- Préparation des tôles;

Le tôle est fournie en rouleaux isolés de 0,35mm d'épaisseur. Comme les colonnes sont réalisées en six (6) gradins, on aura six (6) types de tôles de dimensions différentes. La hauteur reste constante, mais la largeur dépend du rang de son gradin, c'est la valeur l_{g_i} .

Donc en premier lieu, on découpe les tôles en bandes rectangulaires du type I, II, III, IV de la fig I.1.1.

2.1- Tôles des colonnes: (type I et II de la fig I 1.1)

soit b = longueur de la tôle = hauteur du noyau = constante
 $b = 700,9 + 233,53 + 1$ $b = 93,54$ cm (voir relation 1 ci-dessous)

h_f = hauteur de la fenêtre - h_j = hauteur de la culasse

1 = tolérance technologique.

a_i = largeur de la tôle du gradin i (l_{g_i} , $i = 1, \dots, 6$)

$a_i = l_{g_i} + 1$ 1 = tolérance technologique.

finalement les tôles rectangulaires, du gradin i , ont pour cotes

$$b = 93,54 \text{ cm}$$

$$a_i = l_{g_i} + 1$$

- Nombre de tôles pour chaque gradins: noté: N_{g_i} pour le gradin i

$$N_{g_i} = \frac{h'_{g_i}}{e} \quad (i=1,2,\dots,6)$$

h'_{g_i} = épaisseur des paquets de tôles du gradin i

e = épaisseur de la tôle (0,35mm)

h_{g_i} = hauteur du gradin i

$$h'_{g_1} = h_{g_1} = 79,52 \text{ mm} \quad (i=1)$$

$$h'_{g_j} = h_{g_j} - h_{g_{j-1}} \quad (j = 2, \dots, 6)$$

relation 1:

$$b = H_{cn} - h_j + 1 = h_f + h_j + 1$$

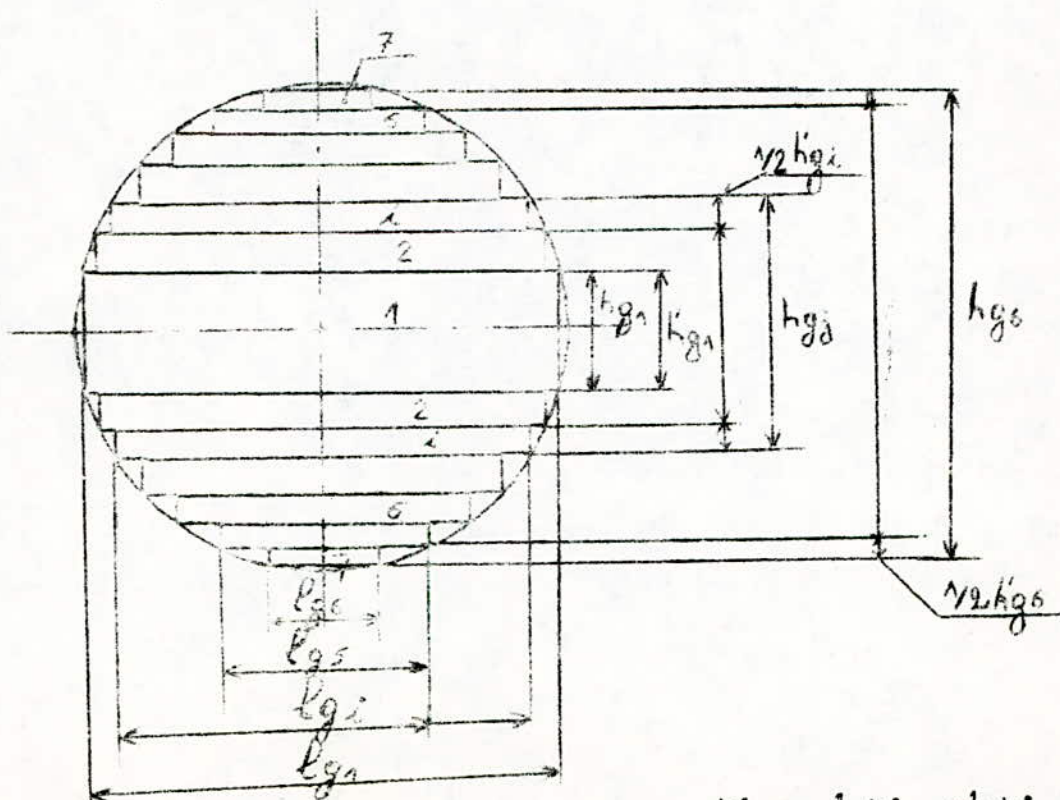
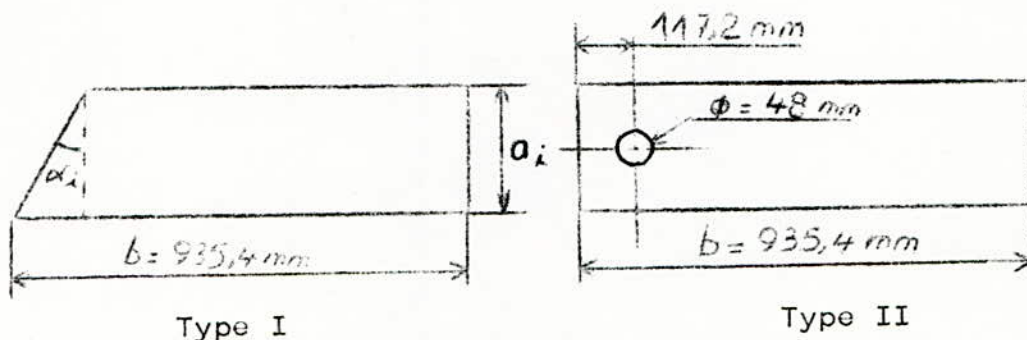


fig I.1.3

$$h'_{g_i} = \frac{1}{2} h'_{g_i} + \frac{1}{2} h'_{g_i}$$

Tôle du type I et II (fig I.1.1)
 épaisseur $e = 0,35 \text{ mm}$

-104-



Tableaux des tôles des types I et II

N° de gradin	l_{gi} (mm)	h_{gj} (mm)	h'_{gi} (mm)	N_{gi} (par colo)	a_i (mm ²)	$(d^o)_i$	Nbre de tôle du type I (2 colon)	Nbre de tôle du type II (1 colon)
1	272,64	79,52	79,52	227	273,64	40,6	454	227
2	251,34	132,22	57,7	150	252,34	42,9	300	150
3	220,10	179,47	47,25	136	221,10	46,7	272	136
4	179,20	220,32	40,84	116	179,20	52,5	232	116
5	132,34	251,28	30,96	88	133,34	60,5	174	88
6	79,52	272,64	21,36	62	80,52	71,2	124	62
							tot ₁ =	tot ₂ =
							1558	779
							tot = 2337 tôles	

Après le découpage et le perçage, contrôle des dimensions, supprimer les bavures résultant, faire un recuit à 800°C dans l'hydrogène, faire un contrôle statique et puis stoker les tôles à l'abri.

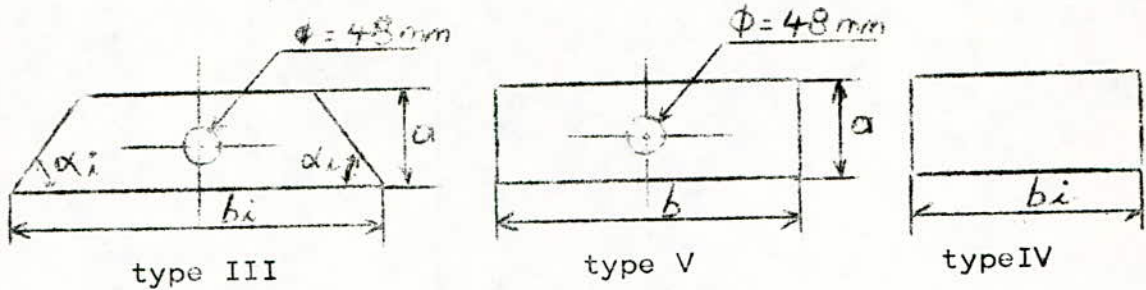
2.2- Tôles des culasses:

On a aussi deux (2) types de tôles pour les culasses (Type III et IV fig I.1.1)

Afin de diminuer les pertes dans le fer, on réalise la culasse d'une section légèrement supérieure à celle du noyau. On est obligé, dans ce cas, d'augmenter le nombre de gradins de plus un (6+1=7 gradins). Ce septième gradin est formé de quelques tôles seulement, qui sont rectangulaires et parcourent tout le long de la culasse. (type V fig I.1.3).

Donc les culasses de tôles destypes III, IV et V (fig I.1.1 pour III et IV)

-Types de tôles: (épaisseur $e = 0,35$ mm)



Type III:

$a = h_j = 233,53 \text{ mm} = \text{cte}$

$b_i = 2(l_{cc} - l_{gi}) \quad i=1, \dots, 6$

$b_i = 2(528,9 - l_{gi})$

$a =$ largeur de la tôle

$b_i =$ longueur de la tôle correspondant au gradin i

l_{cc} et l_{gi} connus ($i:1, \dots, 6$)

Type IV:

leur nombre est de fois le nombre des tôles d'1 colonne ($1_{col} = 779c$)

$a = h_j = 233,53 \text{ mm} = \text{cte}$

nombre type IV = $2 \times 779 = 1558$

$b_i = l_{cc} - l_{gi} = 528,9 - l_{gi}$

Type V:

$a = h_j = 233,53 \text{ mm} = \text{cte}$

$b = 2(l_{cc} + l_{gi}) = 2(528,9 + 79,53) = 1137,32 \text{ mm}$, on prendra 8 tôles de type V. (2 tôles par faces latérales des culasses).

Tableau des tôles des types III, IV et V

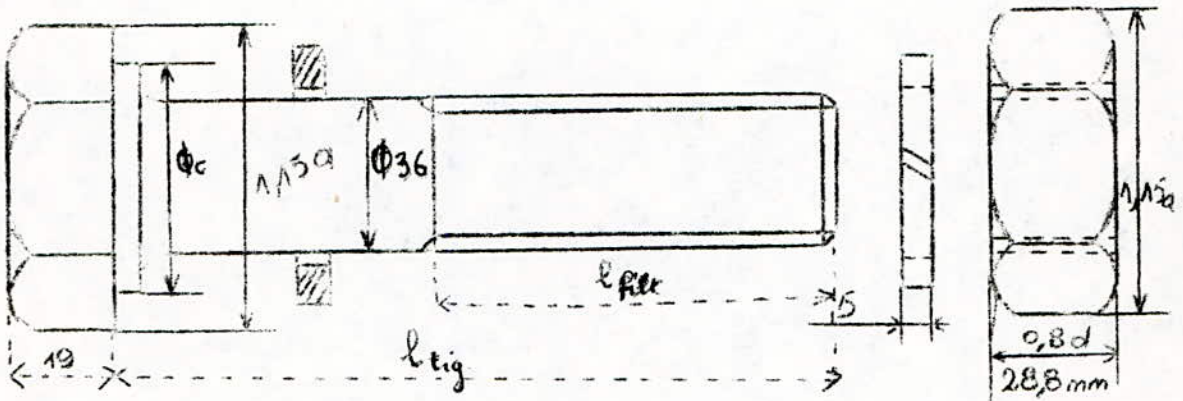
$a = h_j = 233,53 \text{ mm}$

N° de gradin i	l_{gi} (mm)	Type III		Type IV		Type V	
		b_i (mm)	nbre par gradin	b_i (mm)	nbre par gradin	b (mm)	nbre
1	272,64	512,52	40,6 227	256,26	454	/	/
2	251,34	555,12	42,9 150	277,56	300	/	/
3	220,10	617,60	46,7 136	308,80	272	/	/
4	170,20	699,40	52,5 116	358,70	232	/	/
5	132,34	793,12	60,5 88	396,56	176	/	/
6	79,52	899,76	17,2 62	449,38	124	/	/
7	/	1	/ /	/	/	1137,38	8

I.3- Boulons de serrage du circuit magnétique (fig I.4.)

Nous avons déjà déterminé le diamètre de la tige du boulon de serrage (2ème partie: calcul mécanique) (III.3.1) $\phi = 36$ mm il reste à définir la longueur de la tige, la longueur filetée, rondelle, écrou,...

On choisit des boulons usuels à tête hexagonale: symbole H.co à collerette pour haute résistance. NF.E 27-311



figI.3

On choisit un boulon normalisé de $\phi = 36$ mm, avec écrou hexagonal et rondelle grower pour éviter le desserrage.

l_{tig} = longueur de la tige qui dépend de la largeur de la culasse, de l'épaisseur de l'isolation entre culasse, profil, de l'épaisseur des poutres, de rondelle et de l'écrou.

$$l_{tig} = l_j + 1,4 + 2\delta_{is} + 2g + 2,5 + 30 \text{ où}$$

l_j = largeur de la culasse

1,4 = épaisseur des tôles du type V ($1,4 = 8 \times 0,35$)

δ_{is} = épaisseur de l'isolant en c.n- profil et $-(\delta_{is} = 5\text{mm})$

g = épaisseur de la poutre ($g = 10\text{mm}$)

30 = écrou + tolérance

$$\underline{l_{tig} = 344\text{mm}}$$

longueur du filetage: l_{filt}

$$l_{filt} = \delta_{is} + g + 30 + 10$$

$$\underline{l_{filt} = 55 \text{ mm}}$$

Le nombre de boulons est de 6 (avec rondelles, écrous)

I.4- Tubes isolants: (fig I.5)

Les tiges des boulons de serrage sont isolées par un tube bakérisé ou papier kraft, de fait on évite tout court-circuit magnétique entre les tôles du circuit magnétique qui peut engendrer des courants de Foucault considérables.

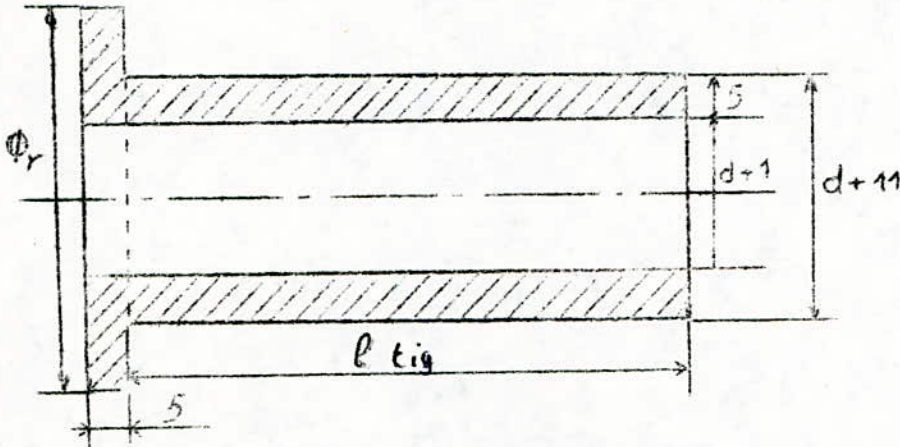


fig I.4

d = diamètre du boulon ($d_b = 36\text{mm}$) et $d + 11 = 47\text{ mm}$

ϕ_r = diamètre extérieur de la rondelle (55 mm)

l_{tig} = longueur du tube isolant

$$= l_j + 1,4 + 2 (\delta_{is} + g)$$

$$= 272,62 + 1,4 + 2 (5 + 10)$$

$$l_{\text{tig}} = 304\text{ mm}$$

I.5- Plaques isolantes entente circuit magnétique (culasse et profilé) :

Pour éviter tout court-circuit et une bonne isolation magnétique on prend des plaques isolantes de 5mm d'épaisseur en papier d'une forme rectangulaire.

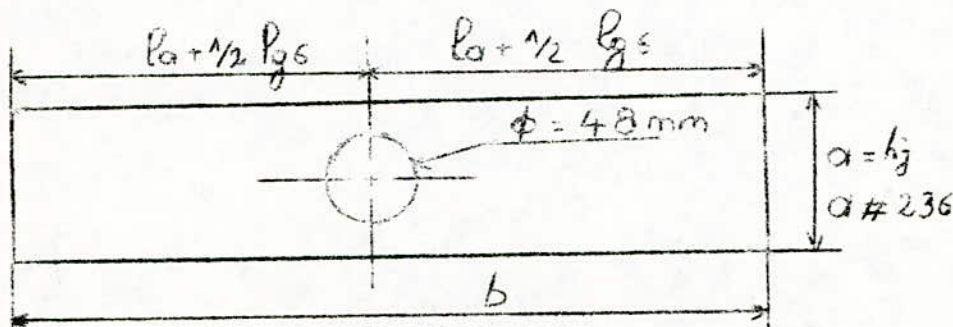


fig.I.5

$$b = 2(l_a + \frac{1}{2} l_{g6}) = \underline{1137\text{ mm}}$$

I.6- Préparation des profilés en U.PN 26 (fig I.6)

-Couper les profilés d'une longueur L_p , et percer les différents trous de passage des boulons de serrage et des tirants.

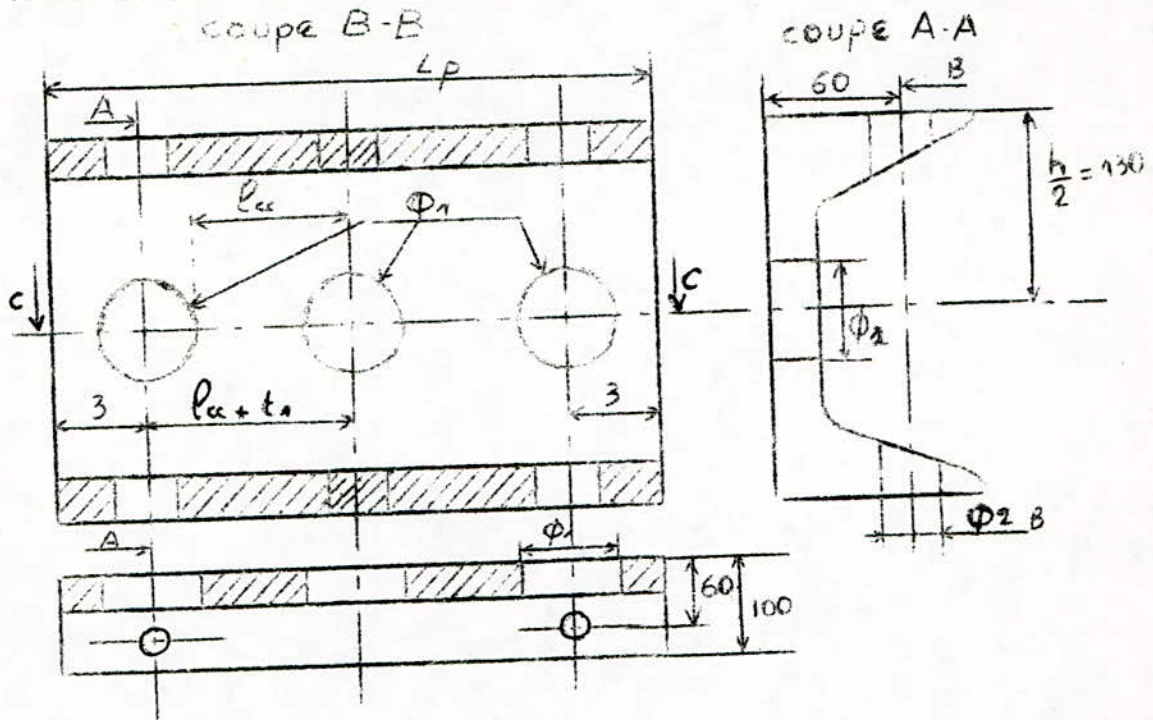


fig.I.6

$$L_p = 2(l_{cc} + l_1 + 6) = 152,18 \text{ cm}$$

ϕ_1 = diamètre des trous des boulons de serrage

ϕ_2 = diamètre des trous pour le passage des tirants

ϕ_1 = diamètre extérieur du tube isolant + 1

$$= d + 11 + 1 = d + 12 = 48 \text{ mm}$$

$$\phi_1 = \frac{48}{\cancel{48}} \text{ mm}$$

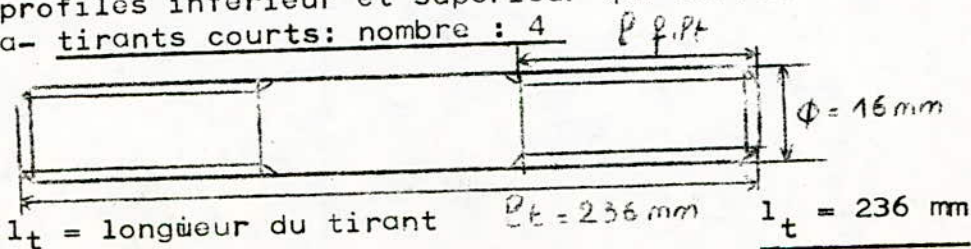
ϕ_2 = diamètre du tirant + 2 + 2 = 16 + 4 = 20

$$\phi_2 = 20 \text{ mm}$$

On a deux profilés UPN 26 (fig.I.7₁)

I.7- Préparation des tirants et de leurs pièces de liaison:
On a quatre tirants courts et quatre longs qui assurent respectivement le serrage couvercle-profilé et la liaison entre profilés inférieur et supérieur qui serrent les culasses.

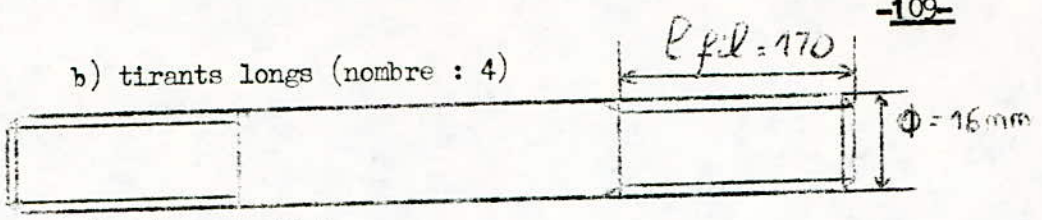
a- tirants courts: nombre : 4



l_{filt} = longueur filetée

$$l_{filt} = 22 \text{ mm}$$

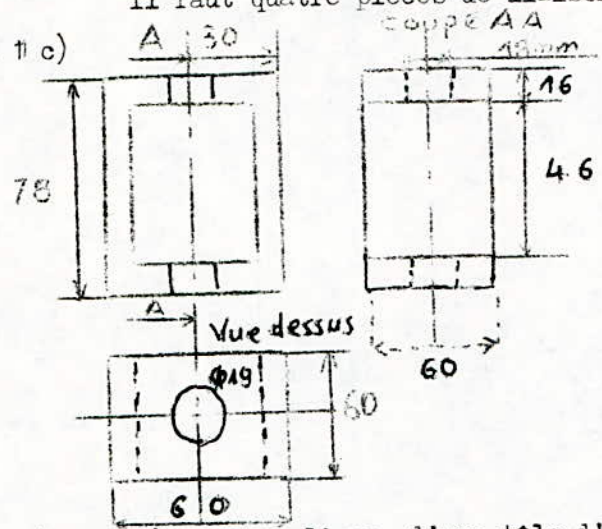
b) tirants longs (nombre : 4)



c) pièces de liaisons

il faut quatre pièces de liaison de forme et de dimensions

(fig. I 1 c)



On obtient ces pièces par pliage, d'une tôle d'épaisseur de 16 mm en forme de rectangulaire et par soudure d'une arrête pour éviter toute déformation et rupture.

I.8 - Montage du circuit magnétique :

réalisation du circuit magnétique comme suit :

- 1 - Assemblage des tôles (fig. 1.1)
- 2 - montage de l'ensemble (fig. 1.8) (profilés, plaques isolantes, boulons de serrage et ~~200~~⁵⁰⁰ tube isolant, tirants longs).
- 3 - Serrer bien les boulons et tirants
- 4 - Faire un desséchage à 80°C pendant 48 h.
- 5 - Stocker à l'abri de toute humidité.

II. ENROULEMENTS

1 °) Exécution des bobinages

Pour la basse tension comme pour la haute tension on utilise un conducteur méplat, qu'on isole en bandes de papier Preshpan.

1.1 Bobine basse tension et haute tension

La bobine basse tension est constituée de 39 galettes continues. Chaque galette comporte quatre spires avec 2 conducteurs élémentaires en parallèle.

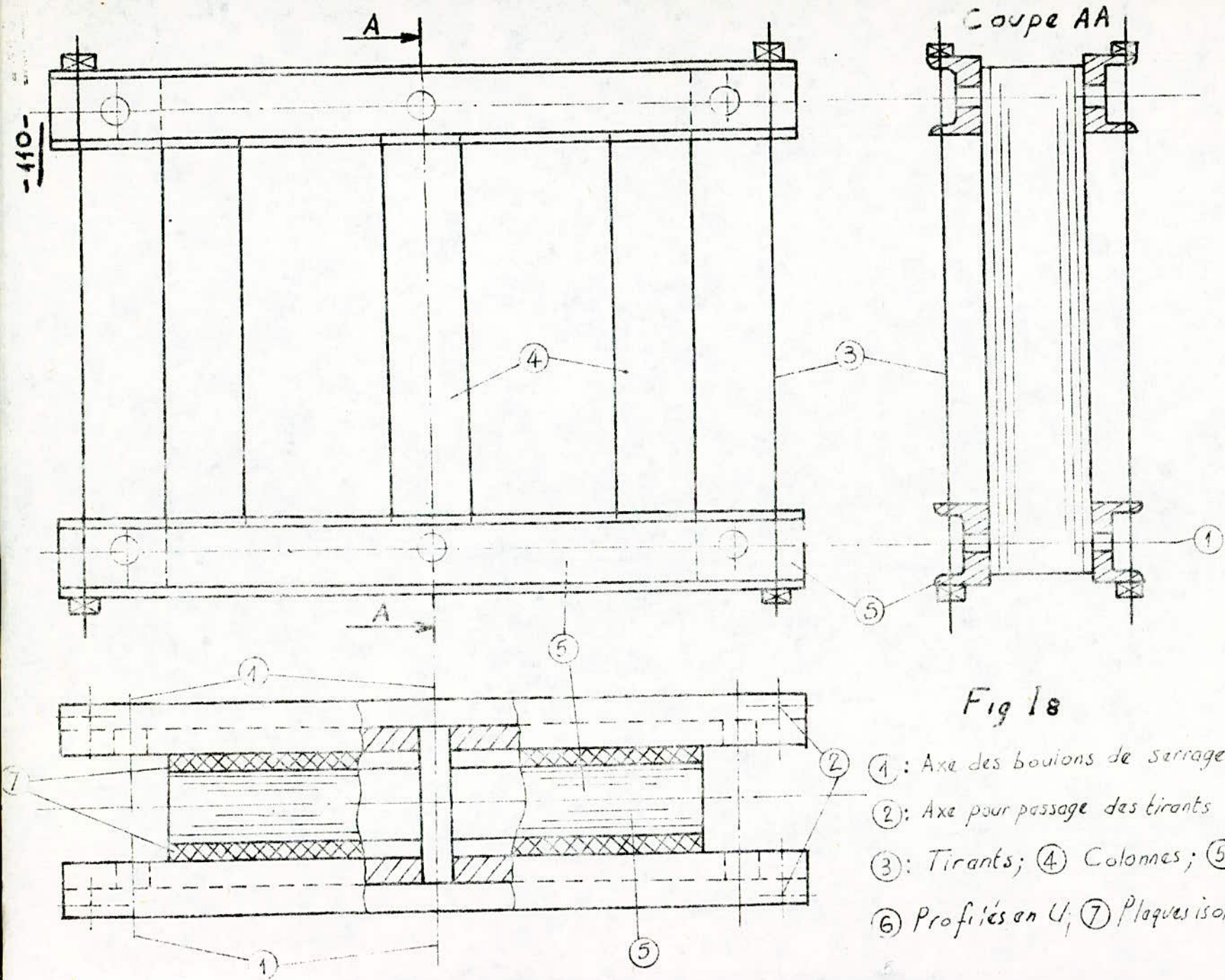
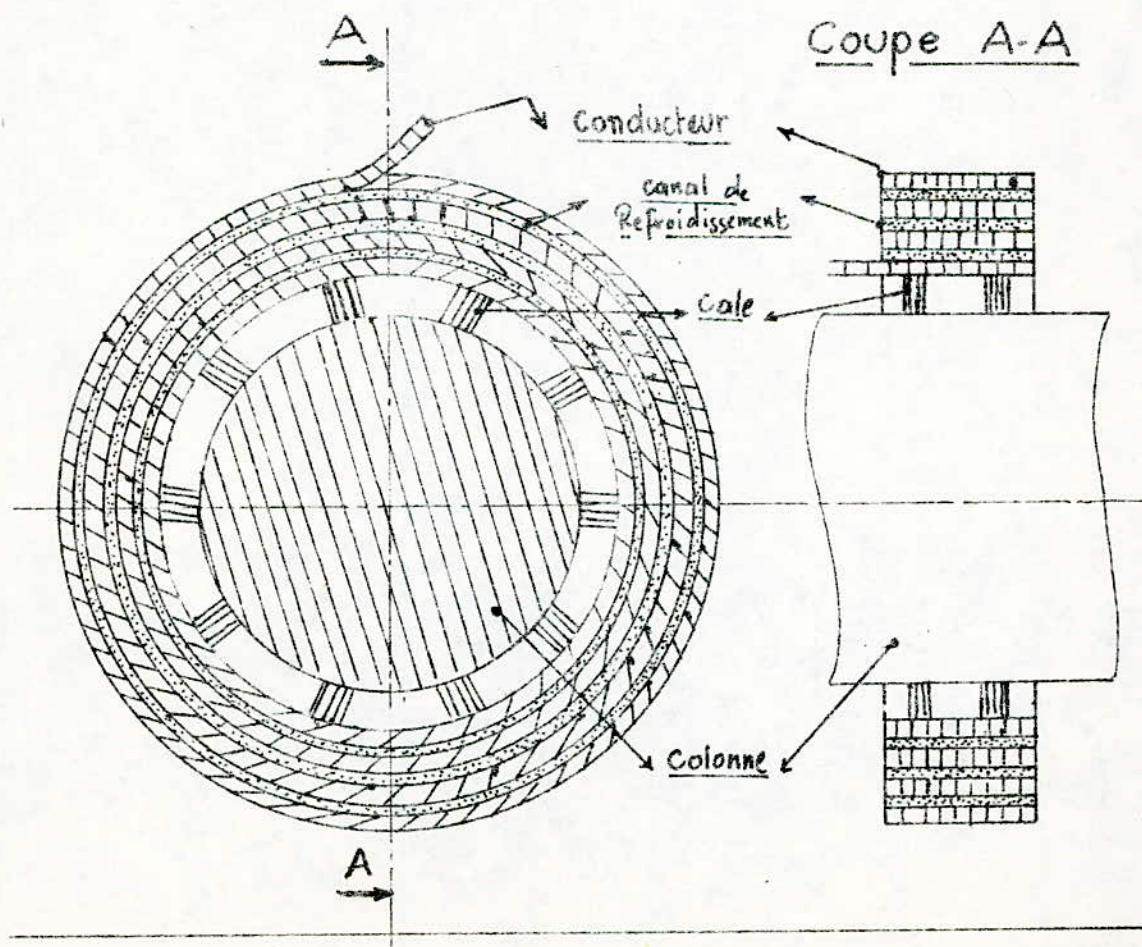


Fig 18

- ① : Axe des boulons de serrage
- ② : Axe pour passage des tirants
- ③ : Tirants; ④ Colonnes; ⑤ Culasses
- ⑥ Profilés en U; ⑦ Plaques isolantes: culassa-profil

Préparation d'une galette

- 4 pp / gol pour la B.T
- 18 pp / gol " " H.T



- Prendre 2 conducteurs aplatis : $a = 4,7 \text{ mm}$, $b = 8,6 \text{ mm}$
- Fixer les conducteurs sur le gabarit : pour les galettes normales *fig 2* et *fig 2* pour les galettes hode. chocs (isolation renforcee).

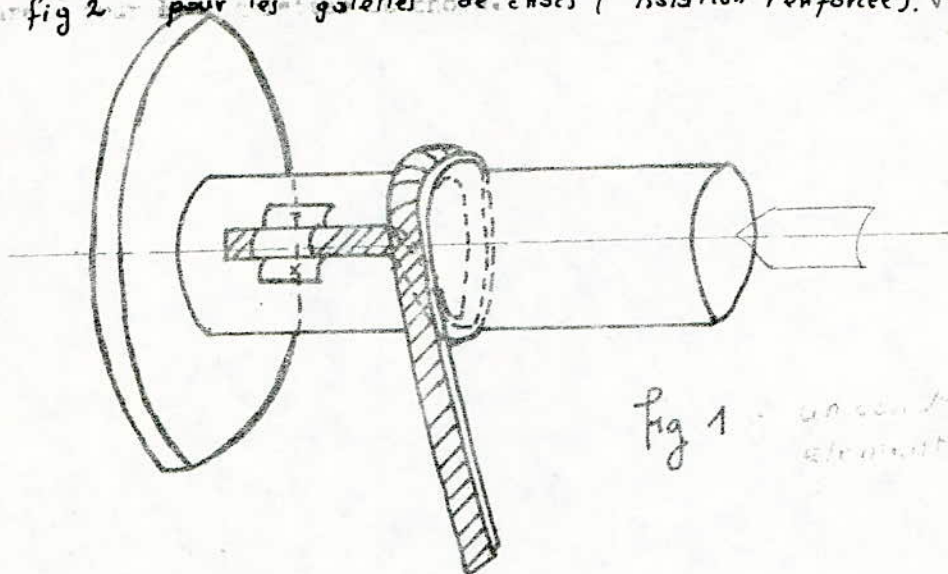


Fig 1 - un conducteur élémentaire

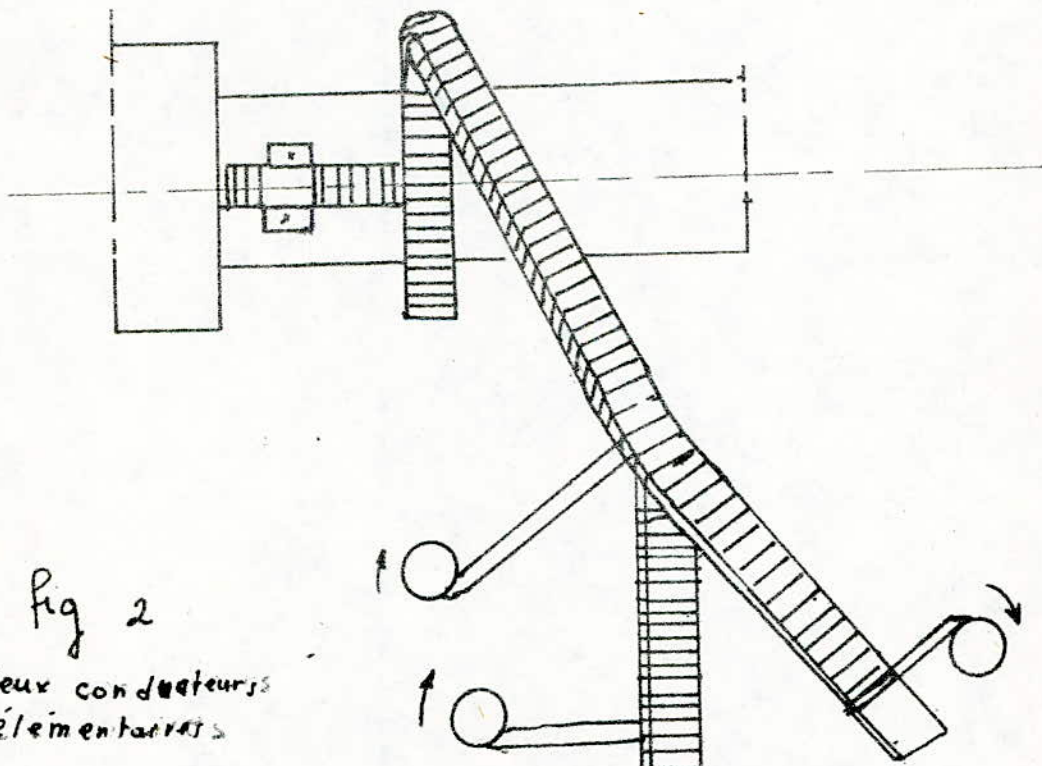


Fig 2
deux conducteurs
élémentaires

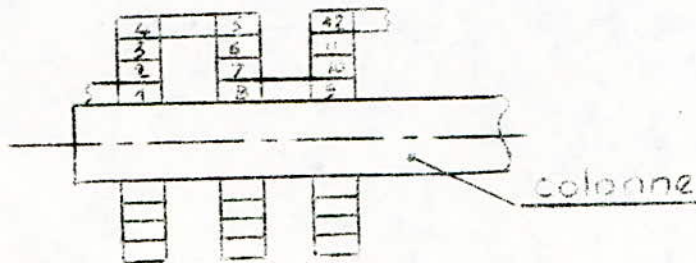
- La transposition des conducteurs pour éviter les pertes supplémentaires et pour harmoniser les résistances des spires s'effectue en passant d'une spire à la suivante.

On prépare 39 galettes continues de 4 spires chacune pour la basse tension et 43 galettes de 18 spires chacune pour la haute tension.

Pour la basse tension on utilise 2 conducteur néplats de dimension $4,7 \times 8,6 \text{ mm}^2$ en parallèle et pour la haute tension un conducteur élémentaire de dimension $2,22 \times 7,40 \text{ mm}^2$.

La grande difficulté provient du passage d'une couche d'une spire à la couche voisine. Si la 1ère couche (1ère galette) est bobinée en passant d'une spire inférieure à une spire supérieures, donc en augmentant le diamètre à chaque tour, sur la couche voisine, (2° galette) que sur toutes les couches paires, on suit l'enroulement en passant d'une spire supérieure à une spire inférieure donc en diminuant le diamètre à chaque tour fig. 2'.

Principe de bobinage continu à fausses galettes . Le schéma ciaprès indique l'ordre de bobinage de spires.



Ce bobinage s'obtient manuellement comme suit :

- Les galettes paires ne doivent pas être trop serrées afin de pouvoir permuter les spires à la main.

1.2 - Montage des enroulements

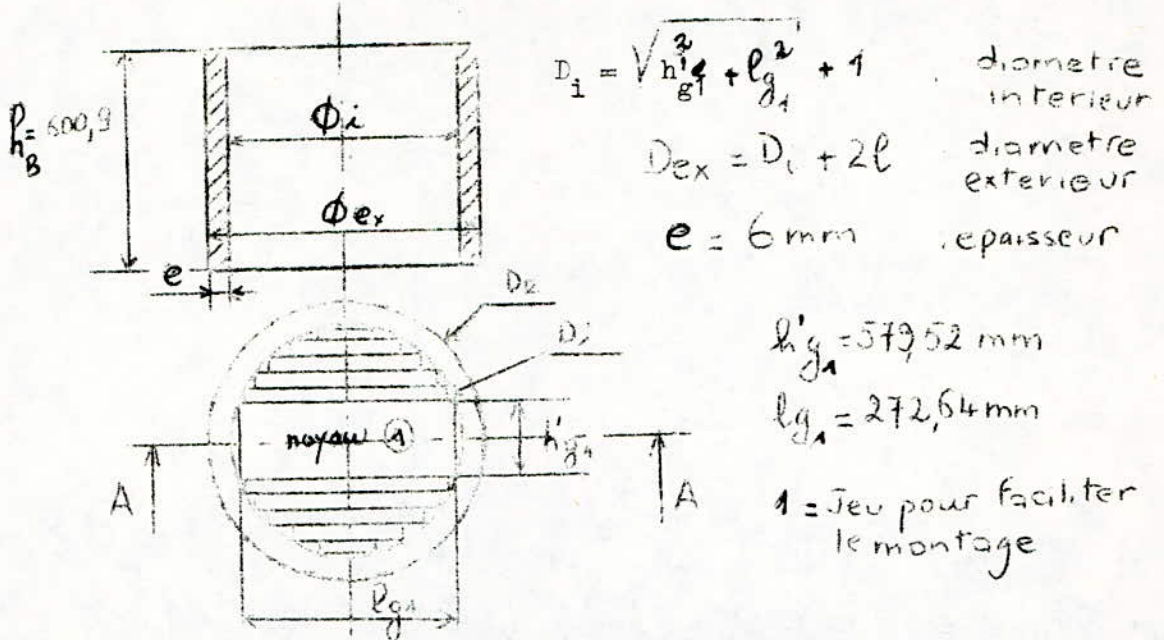
Pour effectuer le montage des enroulements la partie supérieure du circuit doit être enlevée. Les tôles des colonnes sont liées provisoirement par des rubans.

Le travail n'est satisfaisant que si l'on respecte les règles suivantes :

- Assurer la solidité mécanique des enroulements afin de combattre les forces électrodynamiques en présence.
- Disposer les axes horizontaux des enroulements sur la même ligne pour réduire les pertes.
- Faciliter la circulation du fluide de refroidissement en ménageant des espaces entre les bobines.
- Isoler correctement les enroulements entre eux et par rapport à la masse.

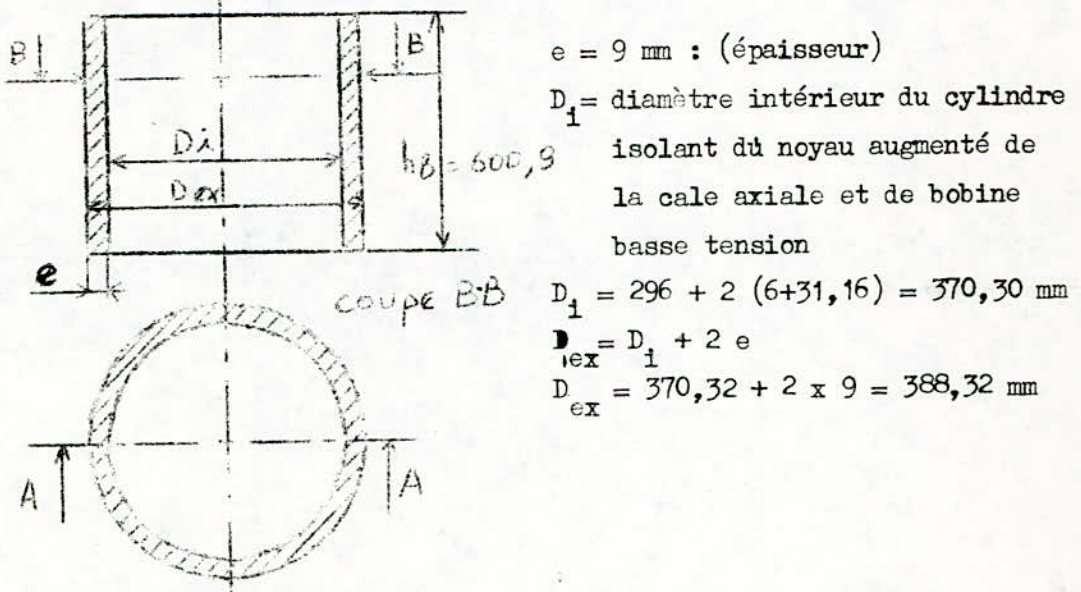
1.3 - Isolation du noyau magnétique (fig. 3)

On isole le noyau magnétique avec un cylindre en papier isolant.



1.4 - Isolation haute tension et basse tension.

On utilise un cylindre de papier



1.5 Suite des opérations.

- 1° - Isoler le noyau avec le cylindre correspondant ($D_1 = 284 \text{ mm}$)
- 2° - On procède ensuite au montage des enroulements basse tension sur le circuit magnétique. Ces enroulements sont solidement maintenus en place et écartés les parties horizontales du circuit magnétique par deux couronnes en bois dur. Les différentes galettes sont écartées des cales ^{par} que nous avons choisies en page
- 3° - Séparer l'enroulement basse tension de l'enroulement haute tension par le cylindre correspondant ($D_1 = 370,32 \text{ mm}$).

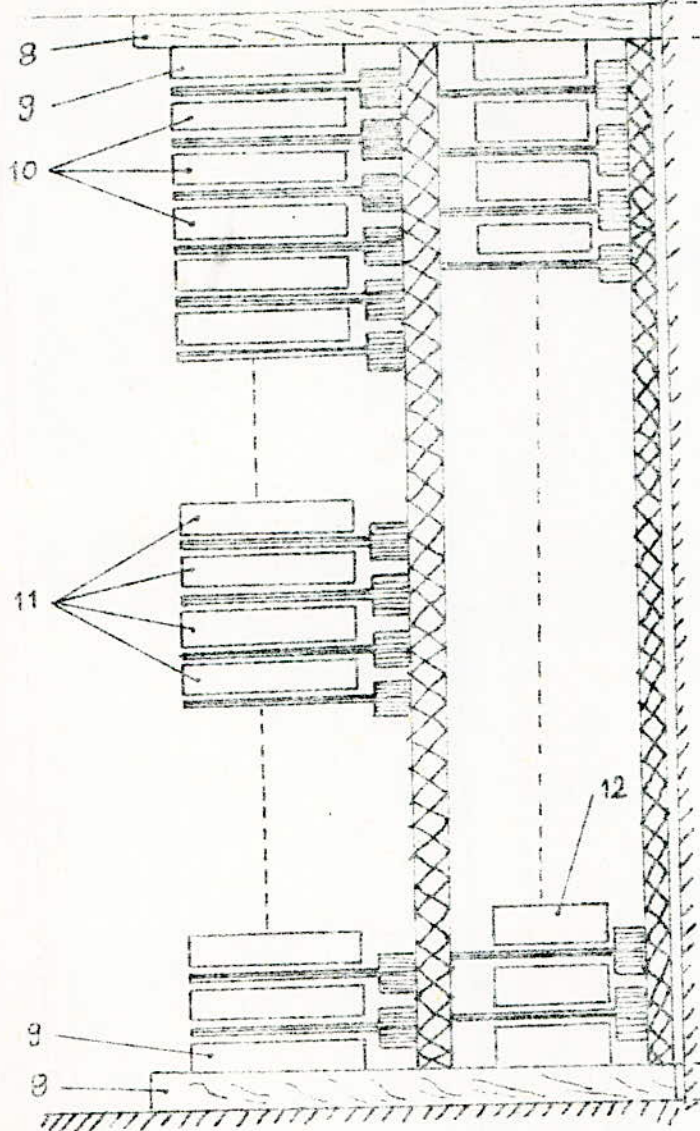
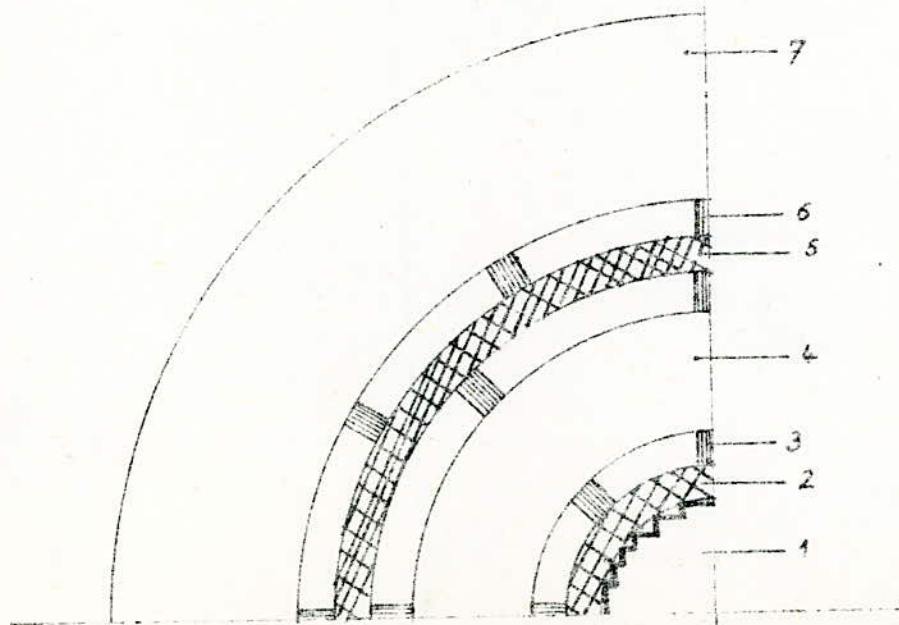


Figure 4

- 1 Circuit magnétique
- 2 Isolant du noyau (tube)
- 3 Cales B.T - Colonne
- 4 Bobine H.T
- 5 Isolant B.T - H.T
- 6 Cales H.T
- 7 Bobine H.T
- 8 Cales en bois (couronne)
- 9 Galettes de choc sur H.T
- 10 Galettes ordinaires H.T
- 11 Galettes de réglage sur H.T
- 12 Galettes ordinaires B.T



4° - Poser les galettes dans l'ordre indiqué par la figure 4.

Ces galettes sont écartées les unes des autres par des cales et disposées de façon à permettre le passage du liquide de refroidissement (l'huile).

5° - Placer la couronne en bois qui sert d'isolant bobine-partie horizontale du circuit magnétique et serrage des bobines.

Remarques :

1° - Disposition des prises de réglages.

Les galettes de réglage n° 11 de la figure 4 sont disposées en milieu d'enroulement.

Elles se réalisent de la même façon que les galettes ordinaires (normales), mais il faut sortir des spires (des enroulements H.T) à la 702^{ème} spire (pour la prise de - 5 %), à la 738^{ème} spire (pour la prise de 0 %) et à la ~~754~~⁷⁷⁴ème spire (pour la prise de + 5 %) figure 5.

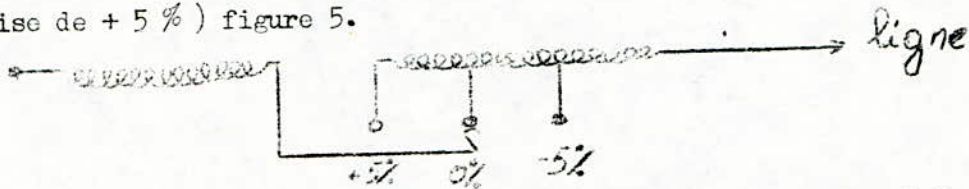


Figure 5 : Prises de réglage sur l'enroulement H.T

Les différentes prises d'une même phase (enroulement) sortent sur la même traversée. Elles seront enfouies dans des gaines isolantes et doivent être assez longues pour atteindre le commutateur de réglage (le réglage se fait à vide).

Le réglage peut s'effectuer soit par suppression ou addition de spires.

Le commutateur de réglage est dénué de pouvoir de coupure, il doit être manoeuvré en l'absence de tension en amont et en aval.

2° - Les galettes n° 9 de l'enroulement H.T (figure 4) ; doivent avoir une isolation renforcée pour les raisons suivantes :

Le transformateur est soumis, en plus de la tension nominale de fonctionnement pour laquelle il a été calculé, à des perturbations atmosphériques qui peuvent provoquer des surtensions considérables.

L'enroulement du transformateur est équivalent au schéma de la figure 6. IL peut être assimilé à une inductance L fermée par le bobinage, et des condensateurs résultant des capacités réparties entre spires et entre spires et masses.

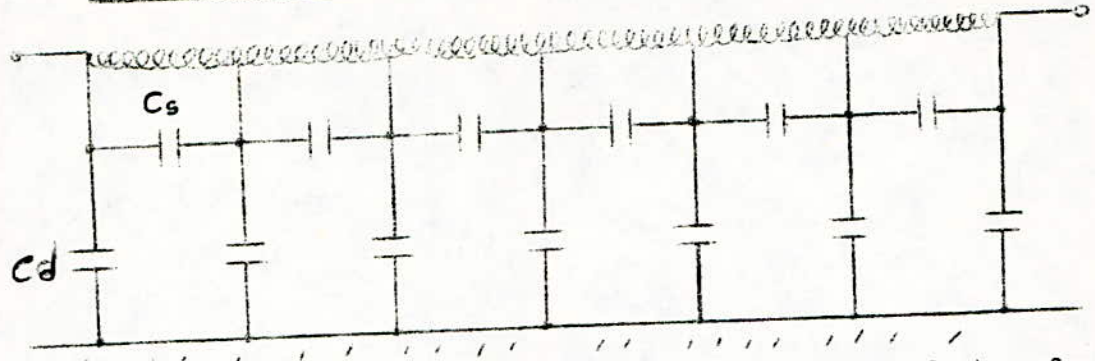


Figure 6 : schéma équivalent d'un enroulement de transformateur (d'après JEUMONT)

A la fréquence industrielle, les capacités sont complètement négligeable et toute tension appliquée entre le début de l'enroulement et la masse se répartira linéairement tout au long de l'enroulement.

Pour une onde de choc à front raide, la réactance inductive est très grande et seules les capacités entrent en lignes de compte. Le courant ne circule pas dans L mais dans les capacités.

La répartition de la tension ne peut être linéaire à cause des capacités réparties, et les galettes terminales peuvent être soumises à des gradients de tension très élevés. Un ordre de grandeur des contraintes peut être trouvé en considérant le schéma simplifié des galettes figure 6.

Soit : $C_p = \frac{1}{43} \times C_s$ capacité longitudinales (éléments en série)

D

$C_t = 43 C_d$ capacité transversale (éléments en parallèle)

$\alpha = \frac{C_t}{C_p}$ avec $\alpha \geq 43$ si $C_t \sim C_p$

La répartition de la tension en fonction de la distance au pied de l'enroulement est donné par la loi hyperbolique.

$$U_x = \frac{U \cdot \text{ch} \alpha \frac{x}{l}}{\text{ch} \alpha}$$

Le gradient de potentiel le plus élevé est obtenu à l'entrée de la première galette, car

$$\frac{\partial U}{\partial x} \Big|_{x=l=h_B} = \alpha \frac{U}{l} = \alpha \frac{U}{h_B}; \quad l = \text{hauteur de la bobine} = h_B$$

La tension d'essai imposée par la norme est : $U = 4 U_i + 30 \text{ KV}$.

Dans notre cas : $U_i = 15 \text{ KV}$ soit $U = 90 \text{ KV}$

$h_B = l = 600,9 \text{ mm}$ et $\alpha \geq 43$ on a donc sur les premières spires un gradient g

$g = \frac{43 \times 90}{600,9} = 6,44 \text{ KV/mm}$, ceci montre qu'il faut bien renforcer l'isolation de cette galette sinon on risque de détériorer le bobinage.

3° - Mode de connexion

La connexion usuelle choisie est : $Dy_n 11$, codifiée par l'U.T.E qui signifie : Transformateur en connexion triangle - étoile avec neutre sorti, le chiffre 11 est appelé indice horaire.

L'indice indique que les f.e.m entre bornes de l'enroulement à basse tension sont déphasées par rapport aux f.e.m entre bornes homologues de l'enroulement haute tension d'un angle compté dans le sens de A vers B et égal au produit de l'indice par 30° (dans notre cas : les tensions entre bornes de l'enroulement basse tension sont en retards de $11 \times 30 = 330^\circ$ par rapport aux tensions homologues de l'enroulement haute tension).

Les lettres A et B (lettres majuscules) repèrent l'enroulement haute tension (par exemple A entrée et B sortie de l'enroulement).

Les enroulements basse tension sont repérés par des lettres minuscules.

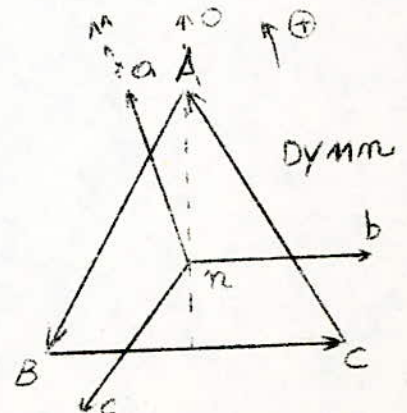
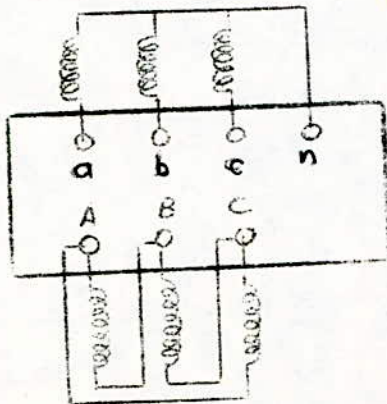
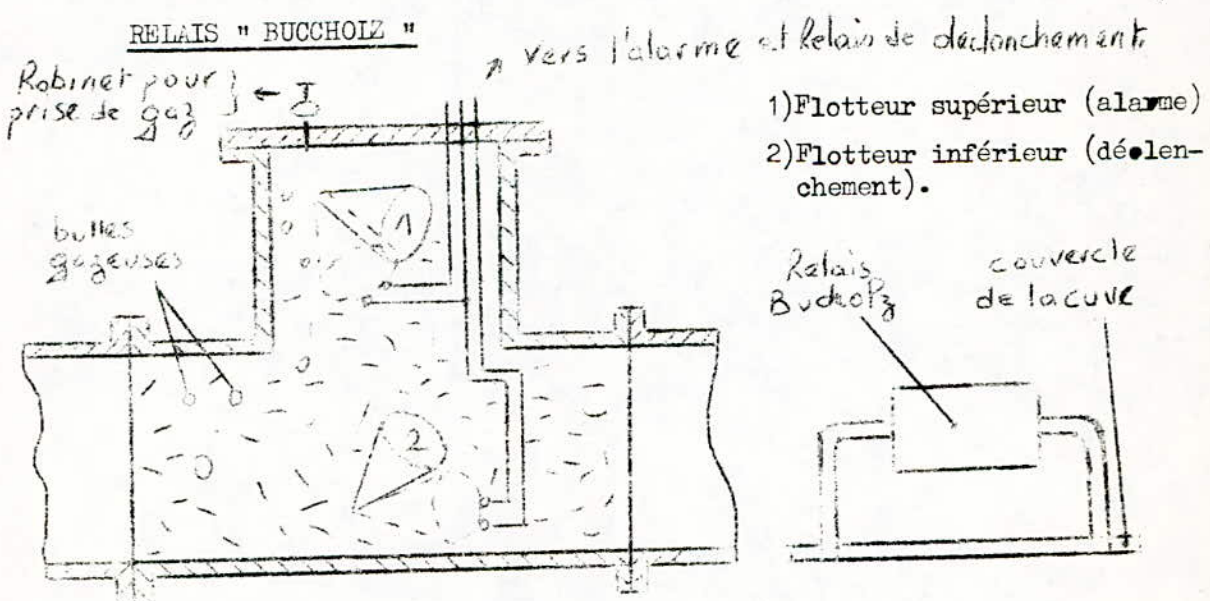


Figure 6 : schéma de connexion : $Dy_n 11$, en admettant que les enroulements de phase sur chaque colonne ont le même sens relatif de bobinage.

III - APPAREILLAGES AUXILIAIRES A PREVOIR

- Commutateur de réglage : Manœuvrable à vide, raccordement réalisé à l'aide d'une barrette.
- Un doigt de gant : Installé sur le couvercle et permettant la mise en place d'un thermomètre pour le contrôle de température.
- Une vanne : Permettant le vidange de la cuve.
- Une borne de terre : A la partie inférieure de la cuve sur laquelle sont reliés tous les points à potentiel nul.
- Un conservateur d'huile : Permettant de ne pas avoir une surface de l'huile trop grande en contact avec l'air (Oxydation).
- Une tubulaire : Fermée par une membrane pouvant en cas de dilatation excessive, se déchirer et permettre aux gazs de s'échapper librement, ce qui évitera les déformations de la cuve.
- Un dessiccateur : Evitant l'humidification de l'huile, contenant du gel de silice absorbant l'humidité de l'air.
- Relai Buccholz : Pour la protection.
- Isolateurs : Pour le raccordement.
- Dispositif de manutention : Pour le levage.



PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU RELAIS BUCCHOLZ

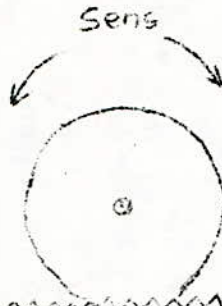
a) En cas d'un défaut non dangereux (surcharge...) l'huile se décompose et dégage des bulles gazeuses qui s'accumulent dans la partie supérieure. La pression augmente alors et le niveau de l'huile s'abaisse et le flotteur supérieur descend et établit un contact commandant généralement un circuit d'alarme.

h) - En cas de défaut dangereux (court-circuit) surcharge excessive,...) l'huile se décompose très excessivement et par conséquent un courant d'huile aura lieu. Alors le flotteur inférieur⁽²⁾ entre en action au moment du passage des grosses bulles gazeuses et provoquent le déclenchement des disjoncteurs.

COMMUTATEUR DE REGLAGE
Sur HT (Δ)

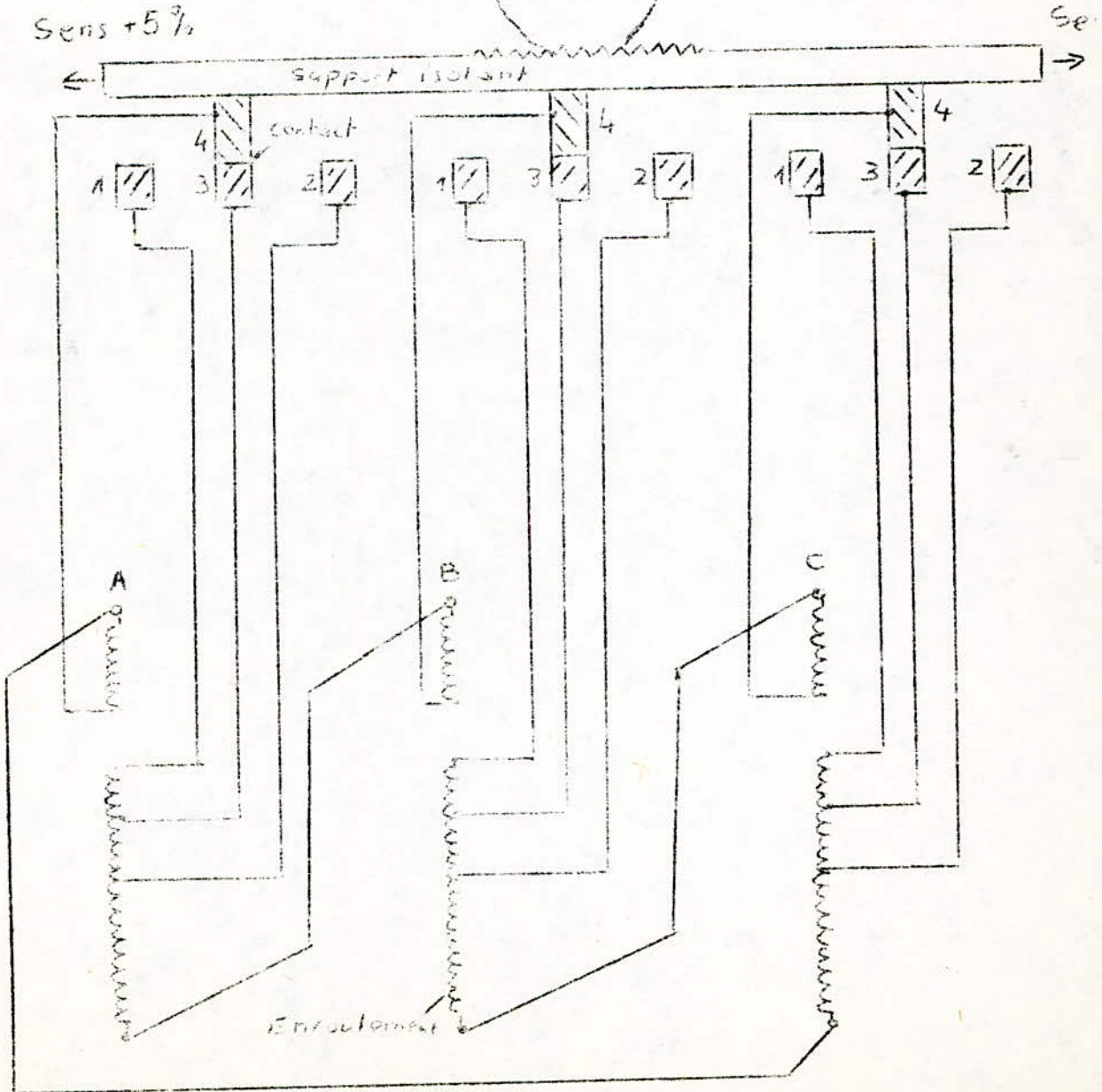
Schema de branchement

(1),(2),(3) contacts fixes
(4) " mobiles



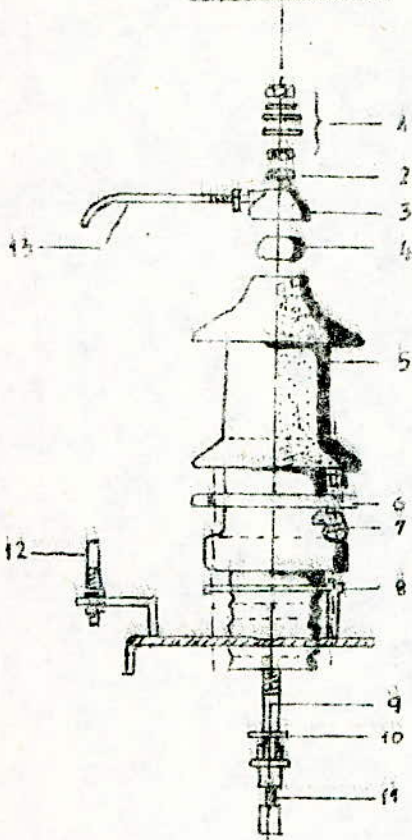
- Positions :
- 1 $\xrightarrow{\text{Prise}} +5\%$
 - 2 $\xrightarrow{\quad} -5\%$
 - 3 $\xrightarrow{\quad} 0\%$

Sens $+5\%$



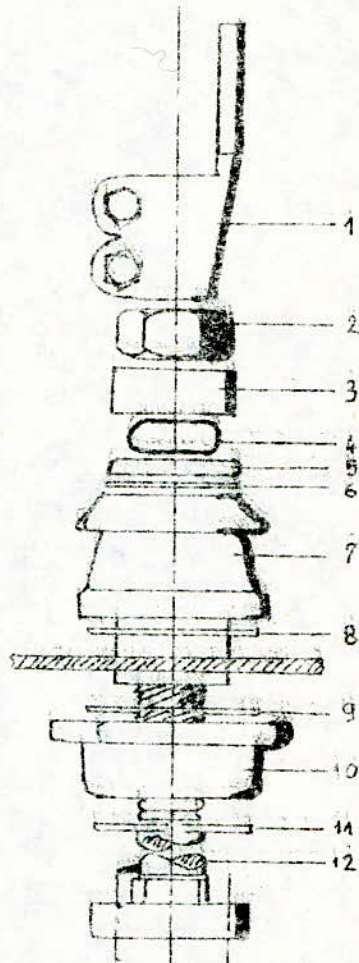
ISOLATEURS

ISOLATEUR H.T.



- 1- Pièces de fixation pour le raccordement extérieur
- 2- Ecrus à 6 pans
- 3- Capuchon de laiton
- 4- Joint annulaire
- 5- corps isolant
- 6- Anneau à boudin
- 7- Pièce de pression
- 8- Joint plat
- 9- Bouton de connexion
- 10- Joint à raccourci
- 11- Fil de connexion isolé
- 12- Corne isolateur inférieure
- 13- Corne isolateur supérieure

ISOLATEUR B.T.



- 1- Pièces de connexion plate
- 2- Ecrus à 6 pans
- 3- Capuchon de laiton
- 4- Joint annulaire
- 5- Rondelle
- 6- Joint plat
- 7- Partie supérieure du corps isolant
- 8- Joint plat
- 9- Joint plat fondu
- 10- Partie inférieure du corps isolant
- 11- Joint plat fondu
- 12- Pièce de connexion

Phases	3
Fréquence	50 Hz.
Couplage	Dyn 11
Puissance	2500 KVA
U_{1n}	5,5 KV
U_{2n}	15 KV
Classe d'isolement	90KV
Rapport de transformation à vide	0,2
Courant à vide	1,28 %
Puissance à vide	3 629 W.
Tension de court-circuit	6,86 %
Pertes dues à la charge	23,18 KW
Chute de tension $\cos \varphi_2 = 1$	96, V
Chute de tension $\cos \varphi_2 = 0,8$	331,20 V
I_{1n}	262,43 A.
I_{2n}	96,22 A.
Service	continu
Mode de refroidissement	Huile minérale:O.N
Isolant	Classe A.
Poids total	7,77 Tonnes.
Poids de l'huile	1 632 Kg.

C O N C L U S I O N

Les résultats de calcul d'une machine électrique ne présentent le maximum d'intérêt qu'avec les conclusions que l'on tire en soumettant le projet à une critique objective.

La méthode utilisée pour l'étude et la réalisation du transformateur m'a permis d'exposer tout au long de ce travail, les problèmes de construction et la manière de concevoir l'étude d'une telle machine électrique.

Après avoir fait et refait des calculs, essayés les différentes solutions en cours, j'ai compris que le travail de l'Ingénieur Electricien n'est jamais limité. La construction des machines électrique est en pleine transformation et suit le rythme de l'évolution de la technologie, de l'élaboration de matériaux de construction.

Pour faire une étude plus précise, il faudrait connaître les conditions réelles de fabrication et d'exploitation de la machine en question.

Comparés aux données du cahier de charge, les résultats obtenus sont plus économiques.

Enfin, je souhaite vivement que ce projet ferait l'objet d'une étude technico-économique, ainsi que la création d'usine de construction de machine électrique en Algérie. Ce domaine occupe actuellement une grande place dans le développement de l'industrie dans tous les pays.

ANNEXE " 1 "

DEMONSTRATION DES RELATIONS DE LA TENSION DE COURT-CIRCUIT ET DU DIAMETRE DE LA COLONNE -

On travaille sur les valeurs rapportées :

Soit u_K : la tension de court-circuit

u_{f1} : la tension par phase de l'enroulement basse tension

1° - La valeur rapportée de la tension de court-circuit est :

$$u_K = \frac{U_K}{U_{f1}} \quad \text{avec} \quad U_K = (U_{Ka}^2 + U_{Kr}^2)^{1/2}$$

U_{Ka} : tension active = $R_1 \cdot I_{f1}$; R_1 : Résistance de l'enroulement

U_{Kr} : tension réactive = $X_{G1} \cdot I_{f1}$; X_{G1} : Réactance de fuite de l'enroulement.

Alors :

$$u_K = \left(\frac{(R_1 \cdot I_{f1})^2 + (X_{G1} \cdot I_{f1})^2}{U_{f1}^2} \right)^{1/2}$$

2° - Composantes réactives rapportées de la tension de court-circuit.

$$u_{Kr} = (u_K^2 - u_{Ka}^2)^{1/2} = \frac{U_{Kr}}{U_{f1}} = \frac{X_{G1} \cdot I_{f1}}{U_{f1}}$$

Pour les transformateurs à enroulement concentrique la réactance de fuite est donnée par :

$$X_{G1} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot W_1^2 \cdot \beta \cdot a_r \cdot K_R}{U_{f1}} \cdot I_{f1}$$

$$\text{Or : } U_{sp} = \frac{U_{f1}}{W_1} = \sqrt{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \hat{B}_c \cdot S_{fercol}} \quad \text{avec} \quad S_{fercol} = \frac{\pi D^2}{4} \cdot K_u$$

$$\text{Alors : } u_{kr} = \frac{2 \pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot W_1^2 \cdot a_r \cdot \beta \cdot K_R \cdot I_{f1} \cdot 4}{\sqrt{2 \cdot \pi^2 \cdot f \cdot \hat{B}_c \cdot K_u \cdot D^2}}$$

$$u_{Kr} = \frac{8 \cdot \mu_0 \cdot W_1 \cdot a_r \cdot \beta \cdot K_R}{\sqrt{2 \cdot \pi^2 \cdot K_u \cdot \hat{B}_c \cdot D^2}} \cdot I_{f1} \quad (1)$$

On sait d'autre part que : $S_c = U_{f1} \cdot I_{f1}$ (2) Puissance par colonne

$$U_{f1} = W_1 \cdot U_{sp} = W_1 \cdot \frac{\sqrt{2}}{4} \cdot \pi \cdot f \cdot \hat{B}_c \cdot K_u \cdot D^2$$

De l'expression (1) on obtient :

$$I_{f1} = \frac{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot K_u \cdot \hat{B}_c \cdot D^2}{8 \mu_0 \cdot W_1 \cdot a_r \cdot \beta \cdot K_R}$$

et l'expression (2) de vient :

$$S_c = \frac{\pi^2 f}{16} \cdot \frac{K_u^2 \cdot \hat{B}_c^2 \cdot D^4}{\mu_0 \cdot a_r \cdot \beta \cdot K_R} \cdot u_{Kr} \quad (3)$$

De l'expression (3) on obtient de diamètre de la colonne " D " :

$$D = \sqrt[4]{\frac{16 \cdot \mu_0 \cdot a_r \cdot \beta \cdot K_R \cdot S_c}{\pi^2 \cdot f \cdot K_u^2 \cdot \hat{B}_c^2 \cdot u_{Kr}}} \quad (4)$$

Pour une fréquence industrielle " f " = 50 Hz. (fréquence d'utilisation, le diamètre de la colonne est donné par :

~~1,524~~ , $D = 1,0674 \sqrt[4]{\frac{a_r \cdot \beta \cdot K_R \cdot S_c}{K_u^2 \cdot \hat{B}_c^2 \cdot u_{Kr}}}$;

D : cm
 a_r : m.
 B_c : T
 S_c : V.A

ANNEXE " 2 "DEMONSTRATION DE L'EXPRESSION DE LA DENSITE MOYENNE DU COURANT : $\frac{J_m}{m}$

- Pertes joules totales : P_K

$$P_K = K_{P_K} \cdot P_j \quad (1) \quad \text{avec } P_j = P_{j1} + P_{j2} \quad (2)$$

$$\text{où } P_{j1} = m R_1 \cdot I_{f1}^2 \quad \text{et } P_{j2} = m R_2 \cdot I_{f2}^2$$

$$P_{j1} = m \rho_1 \frac{l_{t1}}{s_{w1}} \cdot (J_1 \cdot s_{w1})^2 = m \rho_1 \cdot J_1^2 \cdot V1$$

$$P_{j2} = m \rho_2 \frac{l_{t2}}{s_{w2}} \cdot (J_2 \cdot s_{w2})^2 = m \rho_2 \cdot J_2^2 \cdot V2$$

$V1$ et $V2$: respectivement volume du matériel actif des enroulements basse tension et haute tension (en m^3).

J_1 et J_2 respectivement densité de courant dans l'enroulement basse tension et haute tension (en $A. / m^2$).

ρ_1 et ρ_2 : respectivement résistance de l'enroulement basse tension et haute tension (en $\Omega \cdot m$).

$$J_1 = \frac{I_{f1}}{s_{w1}} \quad ; \quad J_2 = \frac{I_{f2}}{s_{w2}} \quad ; \quad s_{w1} \text{ et } s_{w2} \text{ section des conducteurs en } m^2.$$

$$V1 = W_1 \cdot s_{w1} \cdot l_{w1} \quad \text{avec } l_{w1} = \pi D_{m1} \quad ; \quad D_{m1} \text{ et } D_{m2} : \text{Diamètres moyens de la spire}$$

$$V2 = W_2 \cdot s_{w2} \cdot l_{w2} \quad \text{avec } l_{w2} = \pi D_{m2} \quad \text{de l'enroulement B.T et H.T}$$

L'expression (1) devient :

$$P_j = m (\rho_1 \cdot J_1^2 \cdot s_{w1} \cdot \pi \cdot D_{m1} \cdot W_1 + \rho_2 \cdot J_2^2 \cdot s_{w2} \cdot \pi \cdot D_{m2} \cdot W_2); \quad (3)$$

Les enroulements sont réalisés avec les mêmes matériaux (cuivre) alors :

$$\rho_1 = \rho_2 = \rho$$

La densité de courant est considérée la même dans les deux (2) enroulements (B.T et H.T) :

$$J_1 = J_2 = J_m \quad J_m = \text{densité de courant moyenne.}$$

d'autre part :

$$I_{f1} = s_{w1} \cdot J_1 \quad \text{et } I_{f2} = s_{w2} \cdot J_2$$

Le nombre de spires des enroulements est :

$$W_1 = \frac{U_{f1}}{U_{sp1}} \quad \text{et} \quad W_2 = \frac{U_{f2}}{U_{sp2}} \quad \text{avec} \quad U_{sp1} = U_{sp2} = U_{sp}$$

L'expression (3) devient alors :

$$P_j = m \left(\rho \cdot J_m^2 \cdot s_{w1} \cdot \frac{U_{f1}}{U_{sp}} \cdot \pi \cdot D_{m1} + \rho \cdot J_m^2 \cdot s_{w2} \cdot \frac{U_{f2}}{U_{sp}} \cdot \pi \cdot D_{m2} \right)$$

$$P_j = \frac{m \cdot \rho \cdot \pi \cdot J_m}{U_{sp}} \left(I_{f1} \cdot U_{f1} \cdot D_{m1} + I_{f2} \cdot U_{f2} \cdot D_{m2} \right)$$

et comme 'S_c' est égale à :

$$S_c = U_{f1} \cdot I_{f1} = U_{f2} \cdot I_{f2}$$

$$S_n = m_c \cdot S_c$$

$$D_{12} = \frac{D_{m1} + D_{m2}}{2}$$

Il en résulte :

$$P_j = \frac{2 \cdot \pi \cdot \rho \cdot J_m \cdot D_{12} \cdot S_n}{U_{sp}} = \frac{P_K}{K_{PK}}$$

et de là, on obtient : J_m

$$J_m = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \rho \cdot K_{PK}} \cdot \frac{P_K}{S_n} \cdot \frac{U_{sp}}{D_{12}}$$

Pour une résistivité de 75° celcius l'expression J_m s'écrit :

$$J_m = 7,34 \frac{1}{K_{PK}} \cdot \frac{P_K \cdot U_{sp}}{D_{12} \cdot S_n}$$

Avec J_m : A./mm²

P_K : K.W

U_{sp} : V.

D₁₂ : m.

S_n : KVA

ρ : Ω.m

B B I B L I O G R A P H I E

- 1 - Polycope du cours de construction des machines électriques
Rédigé et donné par Monsieur PARLOG (Professeur E.N.P)
- 2 - Livres de Technologie d'électricité tome I et V
HEINY - NAUDY et DAREES
- 3 - Livres : Calcul des machines électriques tome I et II
M. LIWSCHITZ et L. MARET
- 4 - Livres : Machines électriques tome I et II
M. KOSTENKO et L. PIOTROVSKI
- 5 - Catalogues B.B.C , C.E.M
- 6 - Revues B.B.C , R.G.E
- 7 - Normes françaises :
 - N.F.C 52.100 : Transformateur de puissance
 - N.F.C 52.112 : Transformateur électrique
 - N.F.C 27.101 : Huile minérale isolante
 - N.F.C 28.920 : Tôle magnétique laminée à froid