

UNIVERSITE D'ALGER

13/79

Ecole Nationale Polytechnique

2 et

DEPARTEMENT ELECTRICITE

PROJET DE FIN D'ETUDES

المكتبة

ECOLE NATIONALE POLYTECHN.QUE
BIBLIOTHÈQUE

Construction d'un Transformateur

315 KVA

10 KV / 0,4 KV

المدرسة الوطنية للعلوم الهندسية

المكتبة

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
BIBLIOTHÈQUE

Proposé et dirigé par :

V. STIRBU Professeur

à L' E. N. P.

Etudié par

S. MEKHTOUB

Promotion 78-79

UNIVERSITE D'ALGER

Ecole Nationale Polytechnique

DEPARTEMENT ELECTRICITE

PROJET DE FIN D'ETUDES

Construction d'un Transformateur

315 KVA

10 KV / 0,4 KV

Proposé et dirigé par :
V. STIRBU Professeur
à L' E. N. P.

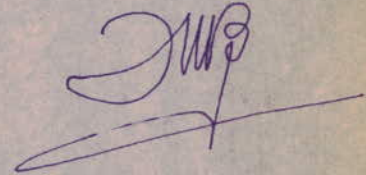
Etudié par
S. MEKHTOUB

Promotion 78-79

DEDICACE

- A la mémoire de ma mère .
- A tous mes parents.
- A tous mes amis .

S. MEKHTOUB



REMERCIEMENTS

A la veille de quitter l'école nationale polytechnique je tiens à remercier tous les professeurs qui ont contribué à ma formation.
Mes remerciements vont plus particulièrement à M^r

Valery-STIRBU professeur à l'EN.P.A qui a bien voulu diriger ce projet.

Je remercie également tous les amis dont l'aide m'a été bénéfique, en particulier M^r B. SEDKAOUI (ingénieur en génie-civil) qui a mis ce projet en plusieurs exemplaires.

CAHIER DE CHARGES

- sujet: Construction d'un transformateur
de 315 KVA 10/0,4 KV pour la distribution

- Puissance nominale $P_n = 315 \text{ KVA}$
- tension nominale primaire $U_{2n} = 10 \text{ KV}$
- tension nominale secondaire $U_{1n} = 0,4 \text{ KV}$
- Reglage $\pm 4\%$
- Connexion ΔY_05
- Pertes en charge $P_k = 3,90 \text{ KW}$
- Pertes à vide $P_0 = 0,77 \text{ KW}$
- tension de court-circuit $U_{cc} = 4\%$
- courant de marche à vide $I_0 = 2\%$
- nombre de phases $m = 3$
- fréquence $f = 50 \text{ Hz}$
- matériel des enroulements **CUIVRE**
- type intérieur avec refroidissement naturel
à l'huile
- Les autres données nécessaires pour le calcul
seront conformes aux normes en vigueur.

PLAN D'ÉTUDE

Introduction

1^{ère} partie : calcul électromagnétique du dimensionnement

I.1 calcul préliminaire des dimensions principales.

I.2 calcul des enroulements

I.3 calcul définitif du circuit magnétique

I.4 calcul des pertes

I.5 calcul du courant de marche à vide

2^e partie : calcul thermique

II.1. schéma des phénomènes thermiques

II.2. échauffement de l'enroulement B.T

II.3 échauffement de l'enroulement H.T

II.4 échauffement du circuit magnétique

II.5 graphique des échauffements

3^e partie : calcul mécanique

III.1 calcul mécanique des enroulements

III.2 calcul mécanique des parties constructives

III.3 calcul mécanique de la cuve

III.4 calcul du poids du transformateur

4^e partie

IV - Rendement du transformateur

- étude technologique

- Conclusion

INTRODUCTION

L'énergie électrique est de plus en plus utilisée dans l'industrie, à cause surtout de sa facilité de transport.

L'énergie étant produite loin de son lieu de consommation (usines, villes.....) par des générateurs au niveau des centrales

Pour des raisons économiques (réduction des pertes en ligne...) le transport se fait toujours en haute tension jusqu'à 220KV réseau national.

La tension produite par les générateurs de la centrale est de l'ordre de 15KV. Pour l'élever jusqu'à 220KV ce sera au transformateur élèveur d'assurer cette première fonction.

Une fois cette énergie est arrivée aux lieux d'utilisation, il est nécessaire d'abaisser cette tension, car il n'est pas question d'alimenter une installation domestique en KV, d'une part c'est très dangereux pour les usagers, d'autre part elle pose des problèmes d'isolation. Cette deuxième fonction sera réalisée par un transformateur abaisseur.

Le but de ce projet est le calcul d'un de ces appareils.

1ere partie.

calcul electromagnetique du dimensionnement

I-1. Calcul preliminaire des dimensions principales

le calcul du circuit magnetique se fait en 2 étapes

la 1ere etape consiste à determiner à partir du cahier de charges les dimensions principales du circuit magnetique et le dimensionnement de celui-ci, c'est le calcul preliminaire.

La 2e etape consiste à partir des resultats trouvés dans le calcul preliminaire, établir toutes les caracteristiques electromagnetiques et geometriques ensuite faire la comparaison avec les données du cahier de charges, c'est le calcul definitif

les dimensions principales sont le diametre de la colonne et la hauteur des bobines.

I-1-1 calcul du diametre de la colonne :

nous commencerons par calculer les differents parametres necessaires à sa determination

1.1 calcul de la puissance par colonne :

$$SC = \frac{S_n}{m_c}$$

S_n : puissance nominale
 m_c : nombre de colonnes

$$SC = \frac{315}{3} = 105 \text{ KVA}$$

$$SC = 105 \text{ KVA}$$

1.2. calcul des tensions par phase des enroulements :

elles dependent du mode de couplage utilisé

Pour la basse tension (connexion etoile)

$$U_{f1} = \frac{U_{in}}{\sqrt{3}}$$

U_{in} : tension nominale : tension developpée ou appliquée en fonctionnement à vide.

$$U_{f1} = \frac{0,4}{\sqrt{3}} = \frac{400}{\sqrt{3}} = 230,95 \text{ V}$$

$$U_{f1} = 230,95 \text{ V}$$

Pour l'enroulement haute-tension : (Connexion triangle)

$$U_{f2} = U_{2n}$$

$$U_{f2} = 10 \text{ KVA.}$$

1-3 courants de phase:

le courant de phase circulant dans l'enroulement basse-tension est:

$$I_{f1} = \frac{SC}{U_{f1}} = \frac{105}{230,95 \cdot 10^3} = 454,64A \quad I_{f1} = 454,64A$$

le courant nominal de phase circulant dans l'enroulement haute-tension est:

$$I_{f2} = \frac{SC}{U_{f2}} = \frac{105}{10} = 10,5A. \quad U_{f2} = 10,5A.$$

1-4 tension de court-circuit:

C'est la tension qu'il faut appliquer aux bornes d'un enroulement pour faire circuler dans l'autre un courant égal au courant nominal.

Elle a deux composantes - active: due à la résistance
- reactive: due à l'inductance

- elle est donnée par la relation

$$U_K = \sqrt{U_{Ka}^2 + U_{Kr}^2}$$

la composante active est donnée par la relation

$$U_{Ka} = \frac{P_K}{S_n} \cdot 100$$

P_K : pertes dues à la charge [KW]

S_n : [KVA]

U_{Ka} : [%]

$$U_{Ka} = \frac{3,90}{3,15} \cdot 100 = 1,23\%$$

$$U_{Ka} = 1,23$$

- valeur de la composante reactive:

$$U_{Kr} = \sqrt{4^2 - (1,23)^2} = 3,80\%$$

$$U_{Kr} = 3,80\%$$

1-5. Relation donnant le diamètre:

$$D = 1,0674 \sqrt{\frac{ar \cdot \beta \cdot Kr \cdot SC}{kU^2 \cdot \beta_c^2 \cdot U_{Kr}}}$$

ar : [m]

SC : [KVA]

β_c : [T]

U_{Kr} : [%]

D : [m]

SC et U_{Kr} sont déduites du cahier de charges

- les autres paramètres feront l'objet d'un choix.

- choix du coefficient de sveltesse β .

$$\beta = \frac{\pi \cdot D_{12}}{h\beta}$$

D_{12} : diamètre du canal de fuite [m]
 $h\beta$: hauteur des bobines

le coefficient de sveltesse influe sur la géométrie du transformateur, selon sa valeur on aura un transformateur sveltu ou trapu. Son choix influe aussi sur le poids du transformateur donc sur le prix de revient, et sur son exploitation. Sa valeur dépend de la puissance par colonne, de la tension la plus grande, du type de matériaux utilisés pour les bobinages.

on le choisit d'après le tableau suivant:

SC (KVA)	3 à 2000	3 à 2000	2000 à 20.000	2000 à 20.000
U (KV)	6 à 10	35	35	110
β (CV)	3,4 à 1,75	3 à 1,8	1,8 à 1,3	2 à 1,5

on prend $\beta = 2,1$

$\beta = 2,1$

- épaisseur rapportée du canal de fuite

$$a_T = a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3}$$

a_{12} : largeur du canal de fuite, elle dépend de la tension la plus grande. On la choisit dans le tableau suivant.

Un (KV)	3	6	10	15	20	35	110	220
a_{12} [cm]	0,6 à	1	0,8-1,2	1-1,5	1,1-1,8	2,1-2,7	6-8	13-22

on prend la valeur $a_{12} = 1,2$

$a_{12} = 1,2 \text{ cm}$

a_1 : épaisseur de l'enroulement basse-tension
 a_2 : épaisseur de l'enroulement haute-tension

le terme $\frac{a_1+a_2}{3}$ est fonction de la puissance du transformateur

$$\frac{a_1+a_2}{3} = K \sqrt[4]{SC}$$

$$\frac{a_1+a_2}{3} : [\text{cm}]$$

$$SC : [\text{kVA}]$$

K est un facteur dependant de la puissance par colonne et de la tension la plus grande. Il est choisit d'apres le tableau suivant:

SC (kVA)	< 100	100 - 560	750 - 5600	7500 - 31500
Un (kV)	< 10	10	α	35
K.	0,6 - 0,8	0,48 - 0,6	0,4 - 0,5	0,44 - 0,46

on prend $K = 0,5$

$$\frac{a_1+a_2}{3} = 0,5 \sqrt[4]{105} = 1,6 \text{ cm}$$

$$\frac{a_1+a_2}{3} = 1,6 \text{ cm}$$

epaisseur rapportee du canal de fuite

$$a_r = 1,2 + 1,6 = 2,8 \text{ cm}$$

$$a_r = 2,8 \text{ cm}$$

- Coefficient de Rogowski: K_r

Ce facteur tient compte du fait que les lignes d'un champ dans le canal de fuite ne sont pas paralleles mais incurvees. On le prend egal a 0,95

- facteur d'utilisation K_u

$$K_r = 0,95$$

$$K_u = K_r \cdot K_g$$

K_r : coefficient de remplissage
 K_g : coefficient geometrique

K_r : depend de l'isolation et de l'epaisseur de la tôle

δ tôle (mm)	isolation avec du papier	isolation a la carlite.
0,5	0,875	0,97 - 0,98
0,35	0,85	0,94 - 0,95
0,28	—	0,93 - 0,94

On prend $K_r = 0,94$ pour l'épaisseur de 0,35 mm à la Carlite.

K_g : dépend du nombre de gradins et de la puissance par colonne. Il est pris du tableau suivant.

SC (KVA)	< 5	4 - 15	15 - 45	45 - 5000
n gradins	2	4	5	6
D app. en cm	< 8	8 - 12	12 - 16	16 - 51
kg	0,786	0,866	0,91	0,93

on prend $K_g = 0,93$

$K_g = 0,93$

on aura $K_u = K_r \cdot K_g = 0,94 \cdot 0,93 = 0,874$

$K_u = 0,87$

- induction magnétique de crête \hat{B}_c .

- Elle est fonction de la puissance par colonne et du type de tôle utilisée, elle influe sur les pertes à vide. Elle est choisie d'après le tableau ci-dessous

SC (KVA)	10 - 50	75 - 250	315 - 600	630 - 1000	> 1000
\hat{B}_c (T) laminées à froid	1,25 - 1,55	1,55 - 1,65	1,62 - 1,68	1,63 - 1,69	1,64 - 1,7
\hat{B}_c (T) laminées à chaud	1,1 - 1,35	1,41 - 1,46	1,42 - 1,47	—	1,43 - 1,48

- en optant pour les tôles laminées à froid on choisit $\hat{B}_c = 1,6T$

- finalement le diamètre aura pour valeur :

$$D = 1,067 \sqrt{\frac{2,8 \cdot 10^{-2} \cdot 2,1 \cdot 0,95 \cdot 105 \cdot 10^3}{(0,874)^2 \cdot (1,6)^2 \cdot 8,8 \cdot 10^{-2}}} = 17,88 \text{ cm}$$

$$D = 17,88 \text{ cm}$$

la valeur de D se trouve dans les limites données par le tableau ci-dessus (1er tableau)

1-6 diametre du canal de fuite :

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

a_{10} : distance entre la colonne et l'enroulement basse-tension
sa valeur depend de la tension nominale de l'enroulement
primaire

U_n (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

on choisit $a_{10} = 0,5$ cm

a_1 epaisseur de l'enroulement basse-tension est estime par

$$a_1 = k_{a1} \cdot \sqrt[4]{Sc} \quad \begin{array}{l} a_1 \text{ [cm]} \\ Sc \text{ [kVA]} \end{array}$$

$$k_{a1} \begin{cases} 0,55 \text{ pour } U_n \leq 35 \text{ KV} \\ 0,45 \text{ pour } U_n \leq 110 \text{ KV} \end{cases} \quad \text{on prend } k_{a1} = 0,55 \quad k_{a1} = 0,55$$

l'epaisseur de l'enroulement sera :

$$a_1 = 0,55 \sqrt[4]{105} = 1,76 \quad a_1 = 1,76 \text{ cm}$$

Valeur du diametre moyen :

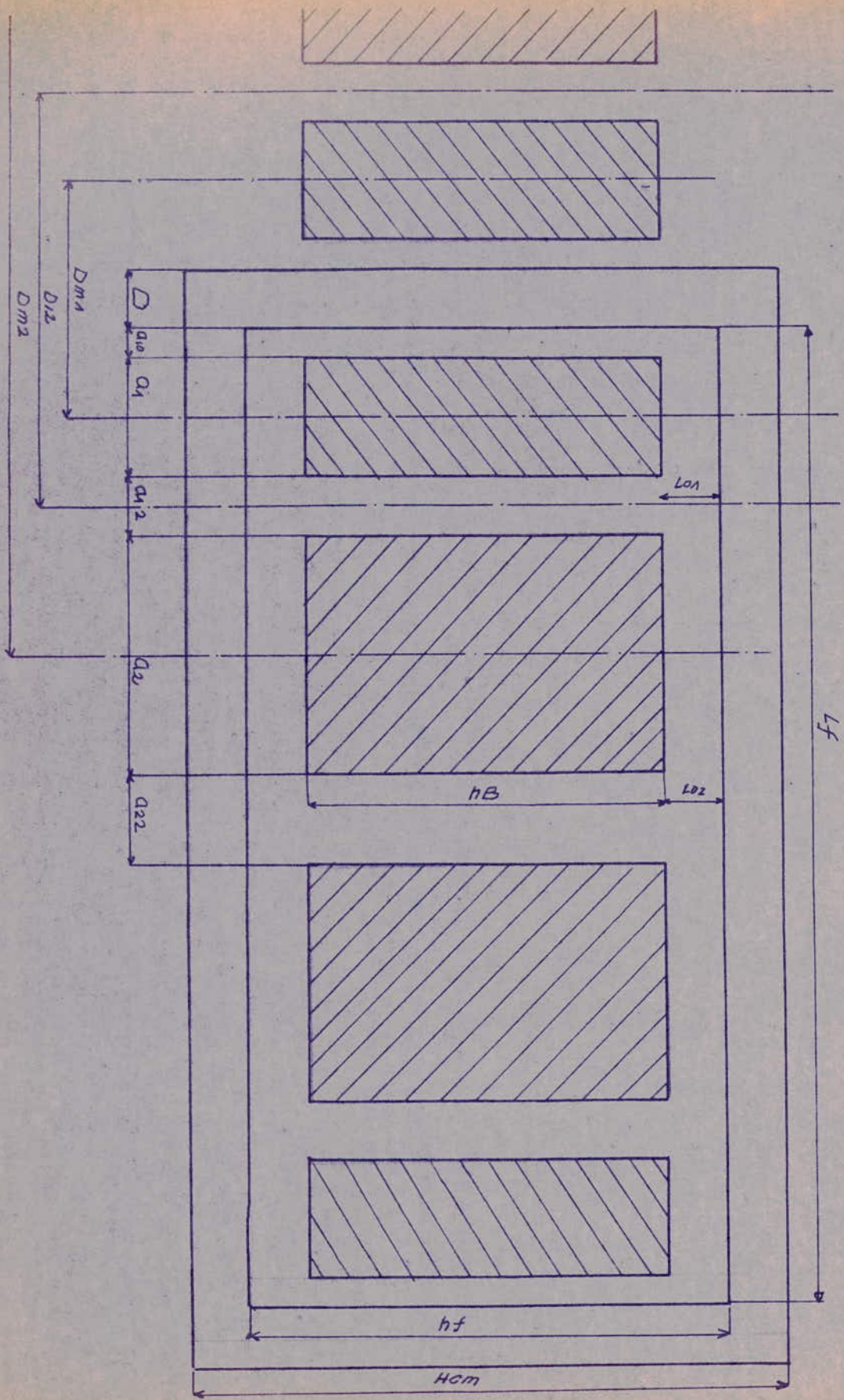
$$D_{12} = 17,88 + 1 + 3,52 + 1,2 = 23,6 \text{ cm} \quad D_{12} = 23,6 \text{ cm}$$

1.7. hauteur des enroulements : Elle est donnee par la relation

$$h_B = \frac{\pi \cdot D_{12}}{\beta} = \frac{\pi \cdot 23,6}{2,1} = 35,28 \text{ cm} \quad h_B = 35,28 \text{ cm}$$

I. 2 calcul des enroulements :

pour definir completement un enroulement
on doit calculer : - le nombre de spires
- la section du conducteur



8'

- l'espace occupé par l'enroulement
- l'isolation de l'enroulement

2.1 section du fer de la colonne

$$S_{\text{fer col}} = \frac{\pi D^2 \cdot k_u}{4} \quad D [\text{cm}] \quad S_{\text{fer col}} [\text{cm}^2]$$

$$S_{\text{fer col}} = \frac{\pi \cdot (17,88)^2}{4} \cdot 0,874 = 219,44 \text{ cm}^2$$

$$S_{\text{fer col}} = 219,44 \text{ cm}^2$$

2.2. tension de la spire

$$U_{\text{sp}} = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot \vec{B}_c \cdot S_{\text{fer col}} \quad \begin{array}{l} U_{\text{sp}} : [\text{V}] \\ \vec{B}_c : [\text{T}] \\ S_{\text{fer}} : [\text{m}^2] \end{array}$$

$$U_{\text{sp}} = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot 50 \cdot 1,6 \cdot 219,44 \cdot 10^{-4} = 7,8 \text{ V}$$

$$U_{\text{sp}} = 7,8 \text{ V}$$

le flux magnétique utile passe essentiellement dans le fer dans la colonne les tensions par spires primaires et secondaires sont les mêmes.

- Nombre de spires de l'enroulement basse-tension

$$|X|_1 = \frac{U_1 f}{U_{\text{sp}}} \quad \begin{array}{l} U_1 f \text{ en } [\text{V}] \\ U_{\text{sp}} \text{ en } [\text{V}] \end{array}$$

$$|X|_1 = \frac{230,95}{7,8} = 29,60 \text{ spires}$$

$$|X|_1 \text{ arrondi } |X|_1 = 30 \text{ spires}$$

- Nombre de spires de l'enroulement haute-tension

$$\text{on a } \frac{U_2}{U_1} = \frac{|X|_2}{|X|_1} \Rightarrow |X|_2 = |X|_1 \cdot \frac{U_2}{U_1} \Rightarrow |X|_2 = 30 \cdot \frac{10}{230,95} = 1298,98 \text{ spires}$$

$$|X|_2 = 1299 \text{ spires}$$

- tension par spire recalculée :

$$U_{\text{spr}} = \frac{U_1 f}{|X|_1 \text{ arr}} ; U_{\text{spr}} = \frac{230,95}{30} = 7,69 \text{ V}$$

$$U_{\text{spr}} = 7,69 \text{ V}$$

elle est en accord avec les valeurs données dans le tableau suivant

S_n (KVA)	200	250	315	400	500	630	800	1000
U_{sp} (V)	3,5-6,2	6,5-7	7-7,5	7,5-8	8-9	9-10	10-12	12-14

induction de crete recalculée:

$$B_{cc} = \frac{U_{spr}}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot s_{fercol}} = \frac{7,69}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot 50 \cdot 219,44 \cdot 10^{-4}} = 1,57T \quad B_{cc} = 1,57T$$

2-3 calcul de la section du conducteur:

$$S_W = \frac{I_f}{J_m} \quad \begin{matrix} I_f [A] \\ J_m [A/mm^2] \\ S_W [mm^2] \end{matrix}$$

calcul de la densite moyenne de courant

$$J_m = 7,34 \frac{P_k \cdot U_{sp} \cdot r}{K_{pk} \cdot D_{12} \cdot S_n} \quad \begin{matrix} P_k [kW] & D_{12} [m] \\ S_n [kVA] & J_m [A/mm^2] \\ U_{sp} [V] \end{matrix}$$

K_{pk} : facteur qui tient compte des pertes supplementaires, il est fonction de la puissance.

$S_n (kVA)$	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

on choisit $K_{pk} = 1,03$

$$J_m = \frac{7,34 \cdot 3,30 \cdot 7,69}{1,03 \cdot 23,6 \cdot 10^{-2} \cdot 3,15} = 2,87 A/mm^2 \quad J_m = 2,87 A/mm^2$$

elle est fonction de la puissance et du mode de refroidissement.

2.3.1 choix du conducteur et du type d'enroulements

- a. Enroulement B.T
- b. Enroulement H.T

a. Enroulement basse tension B.T

$$\text{calcul de la section } S_{W1} = \frac{I_{f1}}{J_m} = \frac{454,64}{2,87} = 158,41 \text{ mm}^2 \quad S_{W1} = 158,41 \text{ mm}^2$$

$S_{W1} > 50 \text{ mm}^2$ on utilise on utilise des conducteurs enparalleles
Chacun de section inferieure a 50 mm^2

on utilise 8 conducteurs enparallele. Chacun de section:

$$S_{W1} = \frac{158,41}{8} = 19,8 \text{ mm}^2$$

On choisit dans le tableau (page 12) le conducteur ayant une section proche de $19,8 \text{ mm}^2$ on prend $5W = 20 \text{ mm}^2$

$$5W = 20 \text{ mm}^2 \Rightarrow a = 4,10 \text{ mm} \\ b = 5,10 \text{ mm}$$

- Recalculons la densité moyenne :

$$J_{\text{re}} = \frac{454,64}{8 \times 20} = 2,84 \text{ A/mm}^2$$

$$J_{\text{re}} = 2,84 \text{ A/mm}^2$$

On constate que la valeur de la densité recalculée n'excede pas 5% la valeur moyenne.

- Dimensions géométriques de la bobine . B.T

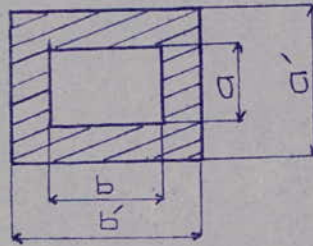
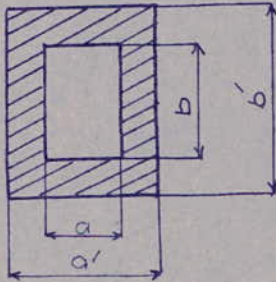
$$\text{hauteur de la bobine : } h_B = (W+1)h_{sp} + (W-1)h_c + 1 \text{ cm}$$

h_{sp} : hauteur de la spire

h_c : hauteur du canal de refroidissement

1 cm : de passement nécessaire pour la stabilisation de la bobine

- On adopte la disposition à plat des conducteurs pour faciliter le problème d'enroulage.



$$a' = a + \delta_{is}$$

$$b' = b + \delta_{is}$$

δ_{is} : épaisseur de l'isolation réalisée avec

- 2 rubans de 0,05 mm enroulés avec recouvrement de $\frac{1}{2}$

- 1 ruban de 0,12 mm enroulé sans recouvrement

$$- 2 \times 2 \times 0,05 = 0,20 \text{ mm}$$

$$\delta_{is} = (0,20 + 0,12) \cdot 2 = 0,64 \text{ mm}$$

$$a' = a + \delta_{is} = 4,10 + 0,64 = 4,74 \text{ mm}$$

$$b' = b + \delta_{is} = 5,10 + 0,64 = 5,74 \text{ mm}$$

$$h_{sp} = 2b' = 2 \times 5,74 = 11,48 \text{ mm}$$

$$h_{sp} = 11,48 \text{ mm}$$

tableau : Section des conducteurs profiles aetben mm Section (mm²)

$\frac{D}{a}$	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	6,41	6,96	7,54	8,15	8,72	—	—	—	—	—	—
3,28	4,91	5,30	5,73	6,19	6,41	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	15,10	16,30	17,50	18,90	20,40	21,70	23,30	25,00
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	25,70	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	22,40	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	40,00	42,80
10	15,40	16,60	17,90	19,30	20,50	22,10	23,00	25,80	27,80	30,00	32,80	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	43,00	46,70	50,10	53,60
12,50	19,80	20,80	22,40	24,20	25,80	27,80	30,00	32,40	34,40	37,60	40,50	43,60	47,00	50,40	54,10	57,90
13,50											43,80					

hauteur de la bobine :

$$h_B = 31. 1,14 + 7. 0,4 + 1 = 35,42 \text{ m}$$

$$h_B = 35,42 \text{ cm.}$$

épaisseur de la bobine :

$$d_1 = 4. d' = 4. 4,74 = 1,89 \text{ cm}$$

$$d_1 = 1,89 \text{ cm}$$

Diamètre du canal de fuite recalculé.

$$D_{12\tau} = 17,88 + 1 + 2. 1,89 + 1,2 = 23,86 \text{ cm}$$

$$D_{12\tau} = 23,86 \text{ cm.}$$

Coefficient de sveltesse recalculé.

$$\beta = \frac{\pi. 23,86}{35,42} = 2,03$$

$$\beta = 2,03$$

erreur sur β . $\frac{\Delta\beta}{\beta} = \frac{2,1 - 2,03}{2,03} \cdot 100 = 3$

$$\frac{\Delta\beta}{\beta} = 3\%$$

la valeur de β recalculé n'exède pas 20% qui représente l'erreur admissible donc c'est une valeur acceptable

b - Enroulement Haute-tension H.T

calcul de la section du conducteur :

$$S_{W_2} = \frac{I f_2}{J_m} = \frac{10,5}{2,87} = 3,65 \text{ mm}^2$$

$$S_{W_2} = 3,65 \text{ mm}^2$$

$S_{W_2} \leq 6 \text{ mm}^2$ on emploie des conducteurs circulaires isolés avec des emaux ou arcs du papier synthétique
les conducteurs sont normalisés on choisit un conducteur de section voisine de $3,65 \text{ mm}^2$ d'après la norme N.F.C. 31-423
on choisit une section $S_{W_2} = 3,922$. $\Rightarrow d = 2,24 \text{ mm}$

on recalcule la densité de courant

$$J_{2\tau} = \frac{10,5}{3,922} = 2,77 \text{ A/mm}^2$$

Comme en basse-tension $J_{2\tau}$ n'exède pas 5% la valeur de J_m donc c'est une valeur acceptable.

$$S_{W_2} = 3,922 \text{ mm}^2 \Rightarrow d = 2,24 \text{ on choisit une isolation de } 0,3 \text{ mm}$$

$$\text{on aura } d' = d + \delta_{is} = 2,24 + 0,3 = 2,54 \text{ mm}$$

- Nombre de spires de l'enroulement pour un réglage de $\pm 4\%$.

$$\begin{aligned} W_2' &= 1,04 W_2 &= 1,04 \cdot 1299 &= 1351 \text{ spires} & W_2' &= 1351 \text{ sp.} \\ W_2'' &= 0,96 W_2 &= 0,96 \cdot 1299 &= 1247 \text{ spires} & W_2'' &= 1247 \text{ spires} \end{aligned}$$

- nombre de spires de réglage :

$$W'r = W_2' - W_2'' = 1351 - 1247 = 104 \quad W'r = 104 \text{ spires}$$

- nombre de spires par couche

$$W_s = \frac{h_{B2} - (0,5 \div 1,5) \text{ cm}}{d'} \Rightarrow W_s = \frac{35,42 - 1,5}{0,25} = 141 \text{ spires}$$

$$W_s = 141 \text{ spires}$$

- nombre de couches :

$$n_s = \frac{W_2'}{W_s} = \frac{1351}{141} = 9,58 \text{ couches : soit } n_s = 10 \text{ couches}$$

$$n_s = 10 \left\{ \begin{array}{l} 9 \text{ couches de } 141 \text{ spires} \\ 1 \text{ couche de } 92 \text{ spires} \end{array} \right.$$

- Dimensions de la bobine haute-tension :

- hauteur :

$$h_B = d' (W_s + 1) + (0,5 \div 1,5) \text{ cm}$$

$$h_B = 0,25 (141 + 1) + 1,5 = 35,34$$

$$h_B = 35,34 \text{ cm}$$

- épaisseur de la bobine

$$a_2 = n_s d' + \delta_s (n_s - 1) + \delta_r$$

δ_s : isolation entre couche, elle est choisie en fonction de la tension

$$U = 2 U_{sp} \cdot W_s \quad U = 2,78 \cdot 141 = 2,199 \text{ KV}$$

U entre 2 couches (KV)	$\leq 1,0$	1-2	2-3	3-3,5	3,5-4	4,5-5	4,5-5	5-5,5
δ_s (mm)	0,24	0,36	0,48	0,6	0,72	0,84	0,96	1,08

on choisit $\delta_s = 0,48 \text{ mm}$

δr = largeur du canal de refroidissement

$$\delta r = 4 \div 6 \text{ mm} \quad \text{on prend } \delta r = 5 \text{ mm}$$

$$a_2 = 10 \cdot 0,25 + 9 \cdot 0,048 + 0,5 = 3,33 \text{ cm}$$

$$a_2 = 3,33 \text{ cm}$$

2-4 verification de la tension de court-circuit

Pour verifier la tension de court-circuit, nous determinons la largeur du canal de fuite rapportee et du coefficient de Rogowski

$$a_r = a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3} = 1,2 + \frac{1,76 + 3,33}{3} = 2,89 \text{ cm}$$

$$a_r = 2,89 \text{ cm}$$

Coefficient de Rogowski

$$K_r = 1 - \frac{1}{2\pi} \frac{2a_{12} + a_1 + a_2}{h_B} = 1 - \frac{1}{2\pi} \frac{2,4 + 1,76 + 3,33}{35,42} = 0,96$$

$$K_r = 0,96$$

- Calculons la composante reactive de la tension de court-circuit qui est donnee par la relation suivante

$$U_{kr} = \frac{2\pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot I_{f1}^2 \cdot a_r \cdot \beta \cdot K_r \cdot I_{f1} \cdot 100}{U_{f1}}$$

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

$$[a_r]: [\text{m}] \quad U_{kr} [\%]$$

$$I_{f1}: [\text{A}] \quad |$$

$$U_{kr} = \frac{2\pi \cdot 50 \cdot 4\pi 10^{-7} \cdot (30)^2 \cdot 2,89 10^{-2} \cdot 0,96 \cdot 2,03 \cdot 454,64 \cdot 100}{230,95} = 3,93\%$$

la tension de court-circuit est

$$U_k = \sqrt{(U_{ka})^2 + (U_{kr})^2}$$

$$U_k = \sqrt{(1,23)^2 + (3,93)^2} = 4,11\%$$

l'erreur est inferieure a 10% de la valeur imposee par le cahier de charge.

2-5 caracteristiques mecaniques et electriques des enroulements

- nous calculerons successivement la resistance et le poids de chaque enroulement

a. Enroulement basse-tension:

- calcul de la resistance $R_1 = \rho \frac{l_{t1}}{S_{1x1}}$

- Diametre moyen de la spire

$$Dm_1 = D + 2a_{10} + a_1' \quad Dm_1 = 17,88 + 1 + 1,89 = 20,77 \text{ cm} \quad Dm_1 = 20,77 \text{ cm}$$

Longueur moyenne de la spire :

$$Lw_1 = \pi Dm_1 = \pi \cdot 20,77 = 65,25 \text{ cm} \quad Lw_1 = 65,25 \text{ cm}$$

- longueur totale du conducteur :

$$lt_1 = N_1 \cdot Lw_1 = 30 \cdot 65,25 = 1957 \text{ cm} \quad lt_1 = 1957 \text{ cm}$$

- Resistance de l'enroulement :

$$R_1 = \rho \frac{lt_1}{S_{W1}} \quad \rho_{100^\circ\text{C}} = 0,021 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$$

$$R_1 = 2,59 \cdot 10^{-3} \Omega$$

$$R_1 = \frac{0,021 \cdot 19,57}{8 \times 20} = 2,59 \cdot 10^{-3}$$

Poids du materiel actif .

$$G_1 = \delta_1 \cdot lt_1 \cdot S_{W1} \cdot 10^{-3} \quad \delta_1: \text{poids specifique} \quad \delta_1 = 8,9 \text{ kg/dm}^3$$

$lt_1: [\text{m}]$
 $S_{W1}: [\text{mm}^2] \quad G: [\text{kg}]$

$$G_1 = 8,9 \cdot 19,57 \cdot 8 \cdot 20 \cdot 10^{-3} = 27,58 \text{ kg} \quad G_1 = 27,58 \text{ kg}$$

b - Enroulement haute - tension

- calcul de la resistance

$$R_2 = \rho \frac{lt_2}{S_{W2}}$$

Diametre moyenne de la spire

$$Dm_2 = D + 2a_{10} + 2a_{12} + 2a_1 + a_2$$

$$Dm_2 = 17,88 + 1 + 2,4 + 3,78 + 3,33 = 28,39 \text{ cm} \quad Dm_2 = 28,39 \text{ cm}$$

longueur moyenne de la spire

$$Lw_2 = \pi Dm_2 = \pi \cdot 28,39 = 89,18 \text{ cm} \quad Lw_2 = 89,18 \text{ cm}$$

longueur totale du conducteur

$$lt_2 = N_2' \cdot Lw_2 = 1351 \cdot 89,18 = 120495,43 \text{ cm} \quad lt_2 = 1204,95 \text{ m}$$

Poids du materiel

$$G_2 = 8,1 \text{ t} \cdot 5 \times 10^{-3} = 8,9 \cdot 1204,95 \cdot 3,02 \cdot 10^{-3} = 39,14 \text{ kg} \quad G_2 = 39,4 \text{ kg}$$

Poids total du materiel actif

$$G = 3 (G_1 + G_2) = 3 (27,58 + 39,14) = 200,16 \text{ kg} \quad G = 200,16 \text{ kg}$$

3.1. calcul definitif du circuit magnetique

- nous determinerons d'une maniere definitive le poids et les dimensions du circuit magnetique.

- longueur de la fenetre:

$$l_F = 2 (a_{10} + a_1 + a_2 + a_2) + a_{22}$$

a_{22} : distance separant deux bobines H.T. Elle est fonction de la tension nominale, on la choisit d'apres le tableau suivant

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

on prend $a_{22} = 1,4$ cm

$$l_F = 2(0,5 + 1,89 + 1,2 + 3,33) = 13,84 \text{ cm}$$

$$l_F = 13,84 \text{ cm}$$

- hauteur de la fenetre

$$h_F = h_B + 2l_{02} \quad h_F = 35,42 + 2 \cdot 4 = 43,42 \text{ cm}$$

$$h_F = 43,42 \text{ cm}$$

- longueur entre axe des colonnes

$$l_{cc} = l_F + D = 13,84 + 17,88 = 31,72 \text{ cm}$$

$$l_{cc} = 31,72 \text{ cm}$$

- section de la culasse:

la section de la culasse est estimee a 1,15 fois la section du fer de la colonne, pour bien canaliser le flux dans le circuit magnetique (donc diminution des lignes de fuites)

$$S_j = 1,15 \text{ sfercol} \quad \text{avec } s_{\text{fercol}} = 219,44 \text{ cm}$$

$$S_j = 1,15 \cdot 219,44 = 252,35 \text{ cm}^2$$

$$S_j = 252,35 \text{ cm}^2$$

- induction magnetique dans la culasse.

le flux magnetique est le meme, d'apres la conservation du flux magnetique on peut ecrire:

$$\hat{B}_c \text{ sfercol} = \hat{B}_j S_j \quad \text{ceci nous donne}$$

$$\hat{B}_j = B_c \cdot \frac{s_{\text{fercol}}}{S_j} \Rightarrow B_j = \frac{1,57}{1,15} = 1,36 \text{ T}$$

$$B_j = 1,36 \text{ T}$$

- geometrie de la section de la colonne

la colonne est formee par l'assemblage de paquets de toles formant ces gradins.

le nombre de gradins est fonction de la puissance

S (KVA)	< 5	5-15	15-45	45-5000
n gradins	2	4	5	6
Δ cm	< 8	8-12	12-16	16-51
kg	0,786	0,886	0,91	0,98

largeur des gradins l_{g_i} :

les resultats experimentaux ainsi que les normes ont donne les resultats suivants:

$$l_{g_1} = 0,960 D$$

$$l_{g_2} = 0,885 D$$

$$l_{g_3} = 0,775 D$$

$$l_{g_4} = 0,631 D$$

$$l_{g_5} = 0,466 D$$

$$l_{g_6} = 0,28 D$$

$$D = 17,88 \text{ cm} = 178,8 \text{ mm}$$

$$l_{g_1} = 171,64 \text{ mm}$$

$$l_{g_2} = 158,23 \text{ mm}$$

$$l_{g_3} = 138,57 \text{ mm}$$

$$l_{g_4} = 112,82 \text{ mm}$$

$$l_{g_5} = 83,32 \text{ mm}$$

$$l_{g_6} = 50,06 \text{ mm}$$

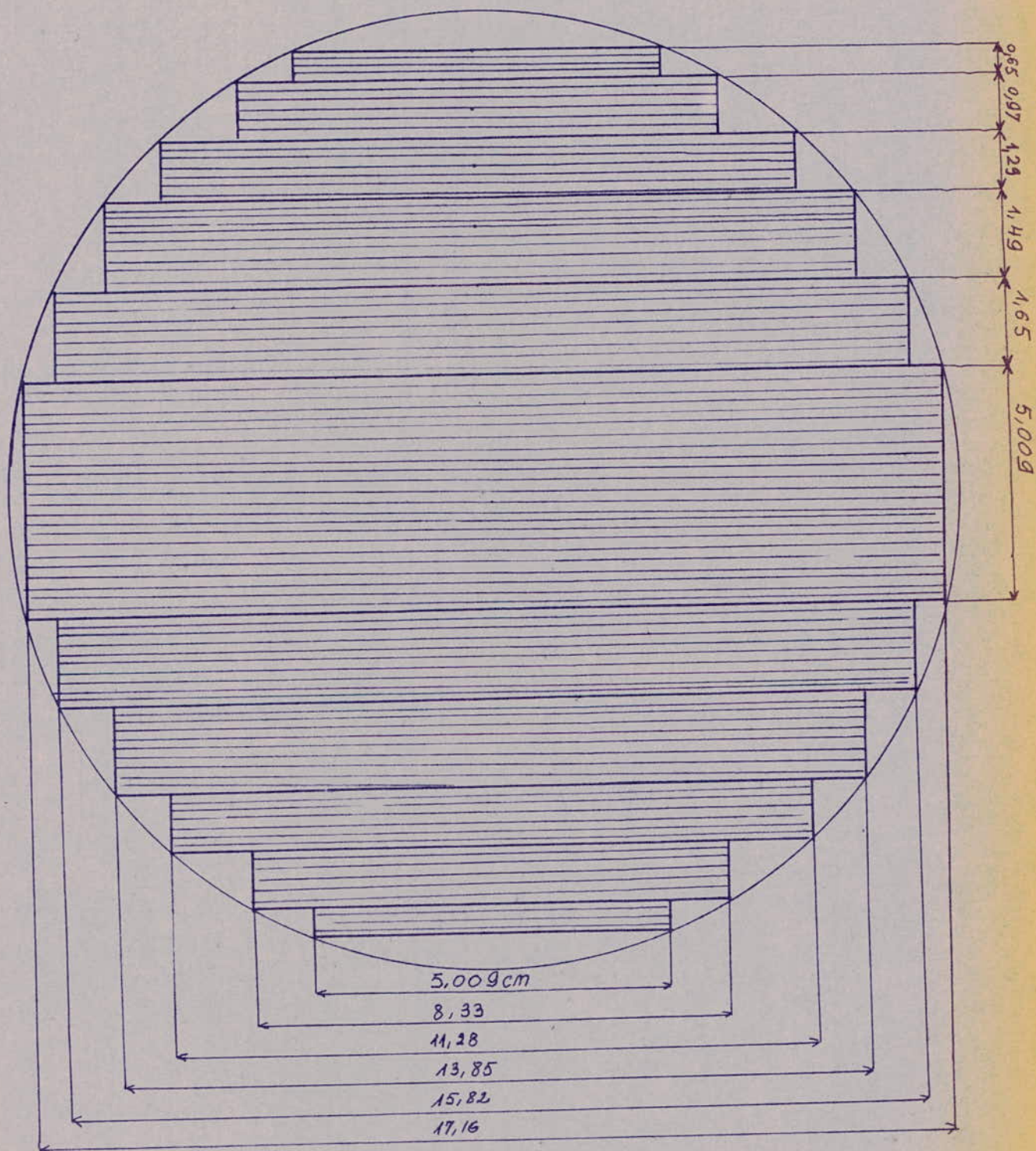
- hauteur des gradins:

les plaquettes etant rectangulaires, on applique le theoreme de Pythagore

$$h_{g_i} = \sqrt{D^2 - l_{g_i}^2}$$

section de la colonne

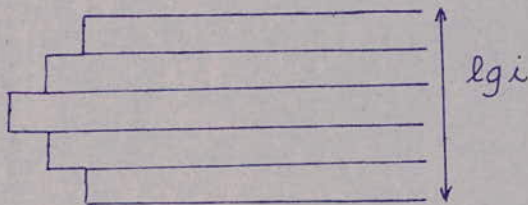
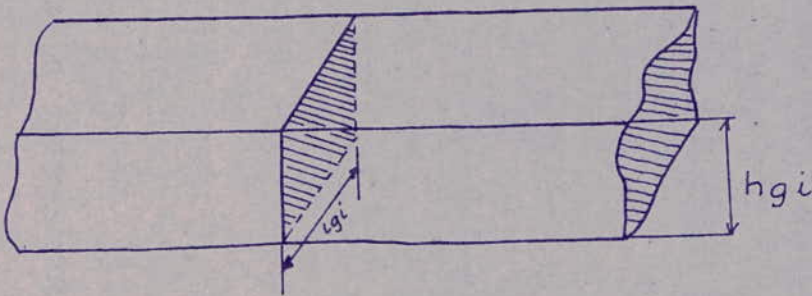
toutes les cotes sont en cm.



$$\begin{aligned}
 hg_1 &= [(17,88)^2 - (17,16)^2]^{1/2} = 5,009 \text{ cm} & hg_1 &= 5,009 \text{ cm} \\
 hg_2 &= [(17,88)^2 - (15,82)^2]^{1/2} = 8,32 \text{ cm} & hg_2 &= 8,32 \text{ cm} \\
 hg_3 &= [(17,88)^2 - (13,85)^2]^{1/2} = 11,29 \text{ cm} & hg_3 &= 11,29 \text{ cm} \\
 hg_4 &= [(17,88)^2 - (11,28)^2]^{1/2} = 13,87 \text{ cm} & hg_4 &= 13,87 \text{ cm} \\
 hg_5 &= [(17,88)^2 - (8,33)^2]^{1/2} = 15,81 \text{ cm} & hg_5 &= 15,81 \text{ cm} \\
 hg_6 &= [(17,88)^2 - (5,009)^2]^{1/2} = 17,11 \text{ cm} & hg_6 &= 17,11 \text{ cm}
 \end{aligned}$$

- geometrie de la section de la culasse:

On choisit une section rectangulaire :



la largeur de la culasse doit être égale à la largeur de la tôle la plus large du noyau.

- largeur de la culasse l_j

$$l_{g1} = l_j = 17,16 \text{ cm}$$

$$l_j = 17,16 \text{ cm}$$

- hauteur de la culasse h_j

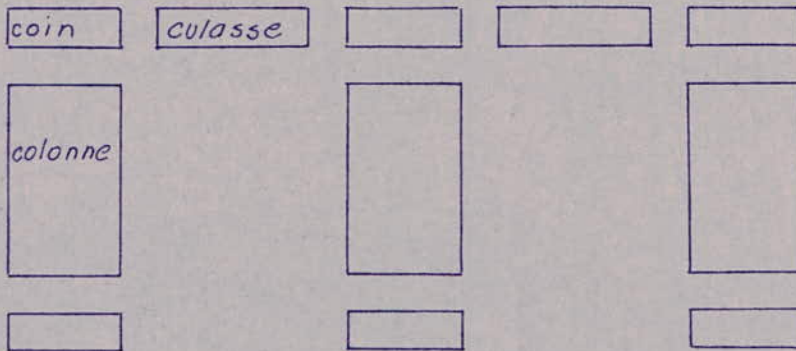
$$\text{on a } s_j = h_j \cdot l_j \Rightarrow h_j = \frac{s_j}{l_j} = \frac{252,35}{17,16} = 147,02 \text{ mm} \quad h_j = 14,70 \text{ cm}$$

hauteur du circuit magnetique

$$H_{em} = h_c + 2h_j = 43,42 + 2 \cdot 14,70 = 72,82 \text{ cm}$$

- Poids du circuit magnetique

- nous calculerons successivement :
 - le poids des colonnes
 - le poids des culasses
 - le poids des coins



le poids de chacune des parties est egal au volume de la partie considerée par la densité volumique des tôles d'acier utilisées

- Poids des colonnes :

$$\delta_2 = 7,65 \text{ kg/dm}^3$$

$$G_{col} = 3 \delta_2 V_{col}$$

Volume de la colonne

$$V_{col} = s_{col} \cdot h_{col} = 251,08 \cdot 43,42 = 10902,21 \text{ cm}^3$$

$$V_{col} = 10,90 \text{ dm}^3$$

$$G_{col} = 3 \cdot 7,65 \cdot 10,9 = 250,20 \text{ kg}$$

$$G_{col} = 250,20 \text{ kg}$$

Poids des culasses

$$G_j = 4 \delta_2 \cdot V_j$$

Volume de la culasse

$$V_j = s_j \cdot h_j = 252,95 \cdot 13,84 = 3492,52 \text{ cm}^3$$

$$V_j = 3,429 \text{ dm}^3$$

$$G_j = 4 \cdot 7,65 \cdot 3,429 = 106,87 \text{ kg}$$

$$G_j = 106,87 \text{ kg}$$

Poids des coins :

$$G_C = 6 \rho_2 \cdot V_C$$

Volume des coins : V_C

$$V_C = S_j \cdot D = 252,35 \cdot 17,88 = 4512,018 \text{ cm}^3 \quad V_C = 4,512 \text{ dm}^3$$

$$G_C = 6 \cdot 7,65 \cdot 4,512 = 207,10 \text{ kg} \quad G_C = 207,10 \text{ kg}$$

Poids total du circuit magnetique :

$$G' = G_{eol} + G_j + G_C$$

$$G' = 250,20 + 106,87 + 207,10 = 564,17 \text{ kg} \quad G' = 564,17 \text{ kg}$$

I.4 calcul des pertes et du courant de marche à vide

- Une partie de la puissance recue est dissipée sous forme de chaleur. le transformateur étant une machine statique (Pas de pertes mécaniques, aucune partie tournante), on distingue deux sortes de pertes :

- Pertes joules
- Pertes dans le fer.

A. calcul des pertes joules :

a. Enroulement basse-tension :

$$P_{j1} = m \cdot R_1 \cdot I_{f1}^2 \quad m: \text{nombre de phases}$$

$$P_{j1} = 3 \cdot 2,5910^3 \Omega (454,64)^2 = 1606,039 \text{ W} \quad P_{j1} = 1606,039 \text{ W}$$

- Pertes dues à la connexion :

- Ce sont les pertes dues à la résistance des fils qui relient les différentes phases du transformateur.

- On détermine alors l_{conex} et la section des fils de connexion

Pour une connexion en étoile on a :

$$l_{conex} = 1,5 h_B = 1,5 \cdot 35,42 = 265,05 \text{ cm} \quad l_{conex} = 2,65 \text{ m}$$

$$S_{conex} = 3 \text{ W/1}$$

On déduit $R_{con.} = \rho \cdot \frac{R_{conex.}}{S_{conex.}} = 0,021 \cdot \frac{2,65}{158,41} = 3,52 \cdot 10^{-4}$

$R_{con.} = 3,52 \cdot 10^{-4} \Omega$

$P'_{j1} = 3,52 \cdot 10^{-4} (454,64)^2 = 72,75 \text{ W}$

$P'_{j1} = 72,75 \text{ W}$

- Pertes supplémentaires

- elles sont dues à l'effet pelliculaire et données par la relation

$P_{sup1} = (k m \epsilon_1 - 1) \cdot m \cdot R_1 \cdot I_{f1}^2$

$k m \epsilon_1$: coefficient de majoration de la résistance en courant alternatif

Pour un conducteur méplat, sa valeur est donnée par

$k m \epsilon_1 = 1 + \frac{(m^2 - 0,2) (\alpha a)^4}{9}$

m : nb de couches $m = 4$

a : largeur du conducteur nu

$\alpha = \sqrt{\frac{n \cdot b \cdot \omega \cdot \mu_0}{h_f \cdot 2 \cdot \rho}}$

b [mm] $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$
 h_f [mm] α [m⁻¹]
 ρ [$\Omega \text{ mm}^2$]

b : longueur du conducteur nu

n : désigne le nb de conducteurs par couches

$\alpha = \left(\frac{60 \cdot 5,10 \cdot 100\pi \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}}{434,2 \cdot 2 \cdot 2,1 \cdot 10^{-8}} \right)^{1/2} = 81,38 \text{ m}^{-1}$

$\alpha = 81,38 \text{ m}^{-1}$

$(\alpha a)^4 = (81,38 \times 4,10 \cdot 10^{-3})^4 = 2,1 \cdot 10^{-2}$

$(\alpha a)^4 = 2,1 \cdot 10^{-2}$

$k m \epsilon_1 = 1 + \frac{4^2 - 0,2}{9} \cdot 0,021 = 1,04$

$k m \epsilon_1 = 1,04$

$P_{sup1} = (1,04 - 1) \cdot 3 \cdot 2,59 \cdot 10^{-3} \cdot (454,64)^2 = 64,24 \text{ W}$

$P_{sup1} = 64,24 \text{ W}$

b. Enroulement - Haute-tension :

Pertes dans l'enroulement

$P_{j2} = m \cdot R_2 \cdot I_{f2}^2 = 3 \cdot 6,93 \cdot (10,5)^2 = 2292,9 \text{ W}$

$P_{j2} = 2292,9 \text{ W}$

Pertes dans les connexions

Pour une connexion en triangle

$$l_{\text{conex}} = 14 h_B = 14 \cdot 35,42 = 495,88 \text{ cm} = 4,95 \text{ m} \quad l_{\text{con}} = 4,95 \text{ m}$$

$$s_{\text{conex}} = \sqrt{3} s_{wL} = \sqrt{3} \cdot 4,64 = 8,01 \text{ mm}^2$$

$$R_{\text{conex}} = 0,021 \cdot \frac{4,95}{8,01} = 1,29 \cdot 10^{-2} \Omega \quad R_{\text{con}} = 1,29 \cdot 10^{-2} \Omega$$

$$P'_{J2} = 3 \cdot 1,29 \cdot 10^{-2} \cdot (10,5)^2 = 3,87 \text{ W} \quad P'_{J2} = 3,87 \text{ W}$$

Pertes supplémentaires : Elles sont dues à l'effet pelliculaire et sont données par la relation :

$$P_{\text{sup}2} = (k m \epsilon_2 - 1) m \cdot R_2 I_f^2$$

$$k m \epsilon_2 = 1 + \frac{m^2 - 0,2}{15,25} (\alpha d)^2$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{n \cdot d \cdot w \cdot \mu_0}{2 h F \cdot p}} \quad \begin{array}{l} m: \text{nombre de couches} \\ d: \text{diamètre du fil} \end{array}$$

$$\alpha = \left(\frac{141 \cdot 2,24 \cdot 100\pi \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}}{2 \cdot 434,2 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 10^{-8}} \right)^{1/2} = 80,44 \text{ m}^{-1} \quad \alpha = 80,44 \text{ m}^{-1}$$

$$(\alpha d)^4 = (80,44 \times 2,42 \cdot 10^{-3})^4 = 8,45 \cdot 10^{-4}$$

$$k m \epsilon_2 = 1 + \frac{10^2 - 0,2}{15,25} \cdot 8,45 \cdot 10^{-4} = 1,005 \quad k m \epsilon_2 = 1,005$$

$$P_{\text{sup}2} = (1,005 - 1) \cdot 3 \cdot 6,93 \times (10,5)^2 = 11,46 \text{ W} \quad P_{\text{sup}2} = 11,42 \text{ W}$$

les autres pertes qui existent dans les parties mécaniques dans les 2 enroulements HT et BT dont le calcul est compliqué sont approximés par un coefficient k_{PK} fonction de la puissance nominale

Pertes joules totales dues à la charge

$$P_K = k_{PK} (P_{Cu1} + P_{Cu2})$$

$$P_{CU1} = P_{J1} + P'_{J1} + P_{sup1}$$

$$= 1606,63 + 72,75 + 64,24 = 1743,62 \text{ W}$$

$$P_{CU1} = 1743,62 \text{ W}$$

$$P_{CU2} = P_{J2} + P'_{J2} + P_{sup2}$$

$$= 2.292,9 + 3,87 + 11,46 = 2308,23 \text{ W}$$

$$P_{CU2} = 2308,23 \text{ W}$$

$$P_k = 1,03 (1743,6 + 2.308,23) = 4.173,40 \text{ W}$$

$$\frac{\Delta P_k}{P_k} = \frac{4,17 - 3,90}{4,17} = 6,47\%$$

P_k est une valeur acceptable, elle ne dépasse pas de 10% la valeur imposée par le cahier de charge.

B. Pertes dans le fer : P_0

on calcule les pertes actives et vide dans le circuit

$$P_0 = P_{fo} + P_{so} \quad \text{avec} \quad P_{fo} = P_h + P_f$$

P_h : pertes par hysteresis

P_f : pertes par courant de Foucault

P_{so} : Pertes supplémentaires dans les différentes pièces de serrage elles sont évaluées à (15-20%) de P_{fo}

le calcul des pertes par hysteresis et courant de Foucault ne présentent pas d'intérêt, on dispose de courbes qui nous donnent globalement les pertes par unité de masse avec une bonne précision, en fonction de l'induction et de la nature des tôles utilisées, ainsi que leurs épaisseurs et du sens du laminage. Ce dernier influe beaucoup sur les pertes spécifiques.

- calcul des pertes fer dans les différentes parties du circuit magnétique

$$P_{fer} = P_{sp} \cdot G \quad \text{avec} \quad P_{sp}: \text{pertes spécifiques (W/kg)}$$

ACIER utilisé M6. ARMACO épaisseur des tôles 0,35mm
sens du laminage $\alpha = 0^\circ$

- Pertes fer dans les colonnes:

l'induction magnétique de 1,57T lui correspond une valeur des pertes spécifiques

$$P_{s1} = 1,3 \text{ W/kg}$$

$$P_{\text{fer col}} = 1,3 \cdot 250,20 = 325,26 \text{ W}$$

$$P_{\text{fer col}} = 325,26 \text{ W}$$

Pertes fer dans les culasses

$$B_j = 1,36 \text{ T} \text{ lui correspond } P_{s2} = 0,85 \text{ W/kg}$$

$$P_{\text{fer j}} = P_{s2} \cdot G_j$$

$$P_{\text{fer j}} = 0,85 \cdot 106,87 = 90,83 \text{ W}$$

$$P_{\text{fer j}} = 90,83 \text{ W}$$

P_{fo} : Pertes fer dans les colonnes et culasses

$$P_{fo}: P_{\text{fer col}} + P_{\text{fer j}} = 325,26 + 90,83 = 416,09 \text{ W}$$

$$P_{fo} = 416,09 \text{ W}$$

les pertes supplémentaires sont évaluées de 15 à 20% des pertes principales : on choisit 16%

$$P_{so} = 0,16 \cdot 416,09 = 66,57 \text{ W}$$

$$P_{so} = 66,57 \text{ W}$$

Pertes dans les coins :

dans cette partie l'induction n'est pas uniforme on estime qu'elle est égale à la moyenne des inductions de la colonne et de la culasse

$$\hat{B}_m = \frac{B_j + \hat{B}_c}{2} = \frac{1,36 + 1,57}{2} = 1,46 \text{ T}$$

$$\hat{B}_m = 1,46 \text{ T}$$

à cette induction correspond $P_{sp} = 1 \text{ W/kg}$

$$P_{\text{fer c}} = P_{sp} \cdot G_c = 1 \cdot 207,10 = 207,10 \text{ W}$$

$$P_{\text{fer coins}} = 207,10 \text{ W}$$

dans cette partie, en plus des pertes supplémentaires, s'ajoutent les pertes dues à la distorsion du flux. Elles sont estimées à 50% des pertes principales dans les coins.

$$P_{soc} = P_{\text{fer c}} \cdot 0,50 = 207,10 \times 0,50 = 103,55 \text{ W}$$

$$P_{soc} = 103,55 \text{ W}$$

pertes totales dans le fer:

$$P_o = 416,09 + 66,57 + 207,10 + 103,55 = 793,31 \text{ W}$$

$$P_o = 793,31 \text{ W}$$

- calcul des pertes reactives :

les pertes reactives dans le fer et les entrefers necessaires à entretenir le courant magnetisant, se calculent comme les pertes actives.

Pertes reactives dans les colonnes: $B_c = 1,57 T$

il lui correspond $q_{ocol} = 2,4 VAR/kg$: q_0 pertes specifiques reactives par unite de masse.

$$Q_{col} = q_{ocol} \cdot G_{col} = 2,4 \cdot 250,20 = 600,48 VAR$$

$$Q_{col} = 600,48 VAR$$

- dans les culasses : $B_j = 1,36 T$

à $B_j = 1,36 T$ lui correspond $q_{oj} = 1,2 VAR/kg$

$$Q_j = q_{oj} \cdot G_j = 1,2 \cdot 106,87 = 128,24 VAR$$

$$Q_j = 128,24 VAR$$

- dans les coins : $B_c = 1,46 T$

à $B_c = 1,46 T$ lui correspond $1,6 VAR/kg$

$$Q_{coins} = 1,6 \times 207,10 = 331,36 VAR$$

$$Q_{coins} = 331,36 VAR$$

- dans les entrefers :

on considere que l'induction dans la colonne est la même dans l'entrefer: on a 6 entrefers

$B_s = 1,57 T$ il lui correspond $q_{os} = 0,95 \cdot q_{ocol} = 0,95 \cdot 2,4 = 2,28 VAR/cm^2$

$$Q_s = q_{os} \cdot m_s \cdot s_s = 2,28 \times 6 \times 219,4 = 3001,3 VAR$$

$$Q_s = 3001,3 VAR$$

1
Puissance totale magnetisante

$$Q = Q_{col} + Q_j + Q_{coins} + Q_s$$

$$Q = 128,24 + 600,48 + 331,36 + 3001,3 = 4061,38 VAR.$$

$$Q = 4061,38 VAR$$

1.5: Calcul du courant de marche à vide I_0

I_0 a deux composantes : Une composante active et une composante reactive.

- Calculons la composante active I_{0a} :

$$I_{0a} = \frac{P_0}{\sqrt{3} U_1} = \frac{793,31}{\sqrt{3} \cdot 10^4} = 4,5 \cdot 10^{-2} \quad I_{0a} = 0,0045 \text{ A}$$

- calcul de la composante reactive I_{0r} .

$$I_{0r} = \frac{Q_0}{\sqrt{3} U_1} = \frac{4061,38}{\sqrt{3} \cdot 10^4} = 0,23 \text{ A} \quad I_{0r} = 0,23 \text{ A}$$

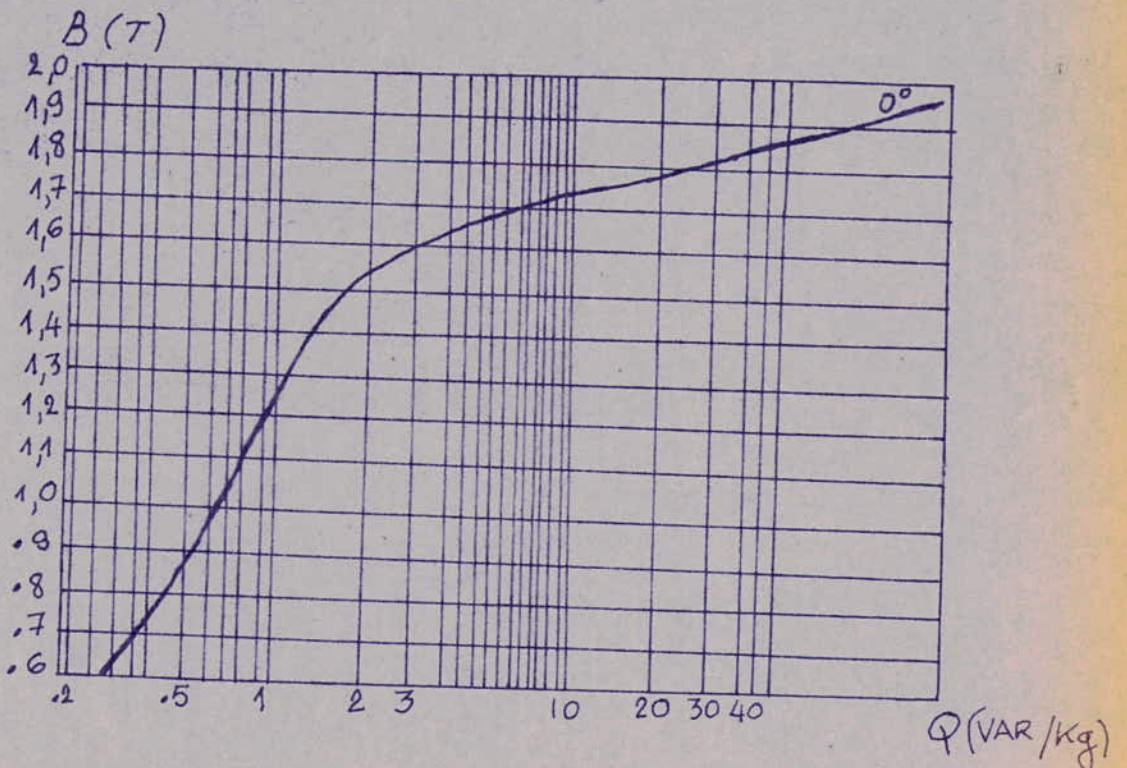
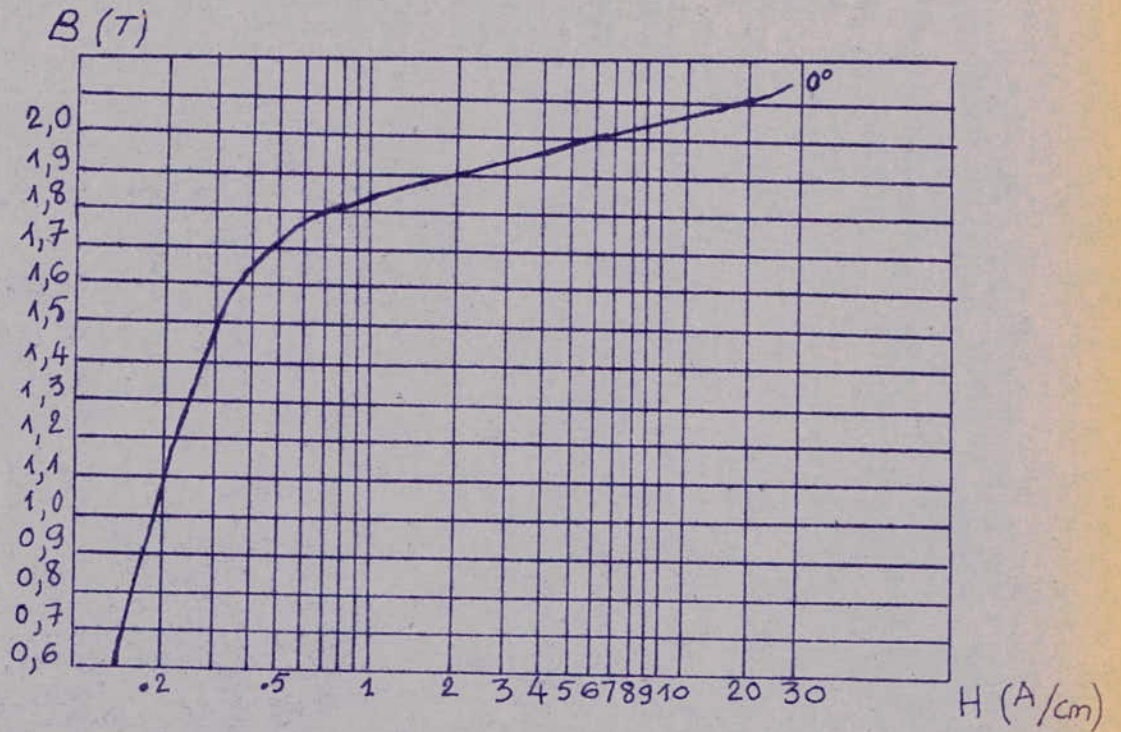
- Calculons le courant de marche à vide I_0

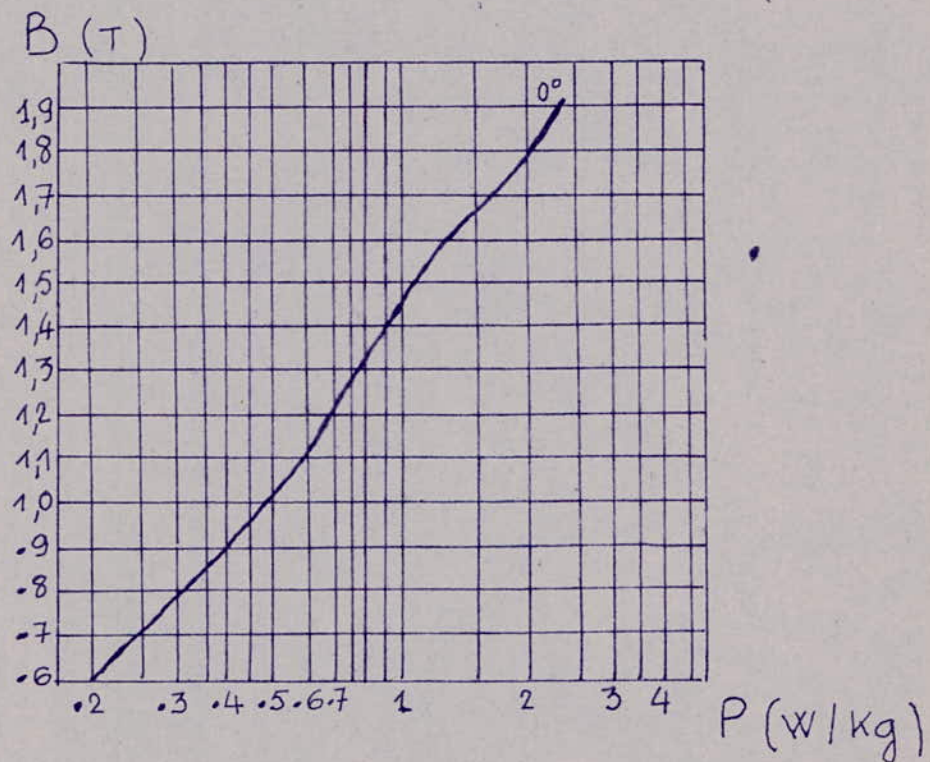
$$I_0 = \sqrt{(0,0045)^2 + (0,23)^2} = 0,23 \text{ A} \quad I_0 = 0,23 \text{ A}$$

- En pourcentage par rapport à I_n

$$I_0 \% = \frac{I_0}{I_n} \cdot 100 = \frac{0,23}{10,5} \cdot 100 = 2,10 \% \quad I_0 = 2,10 \%$$

courbe d'aimantation de l'acier
ARMACO M6





2^e partie

CALCUL THERMIQUE

- les chauffements dans les différentes parties du transformateur, dus essentiellement aux pertes ont des conséquences nuisibles sur le fonctionnement de celui-ci.

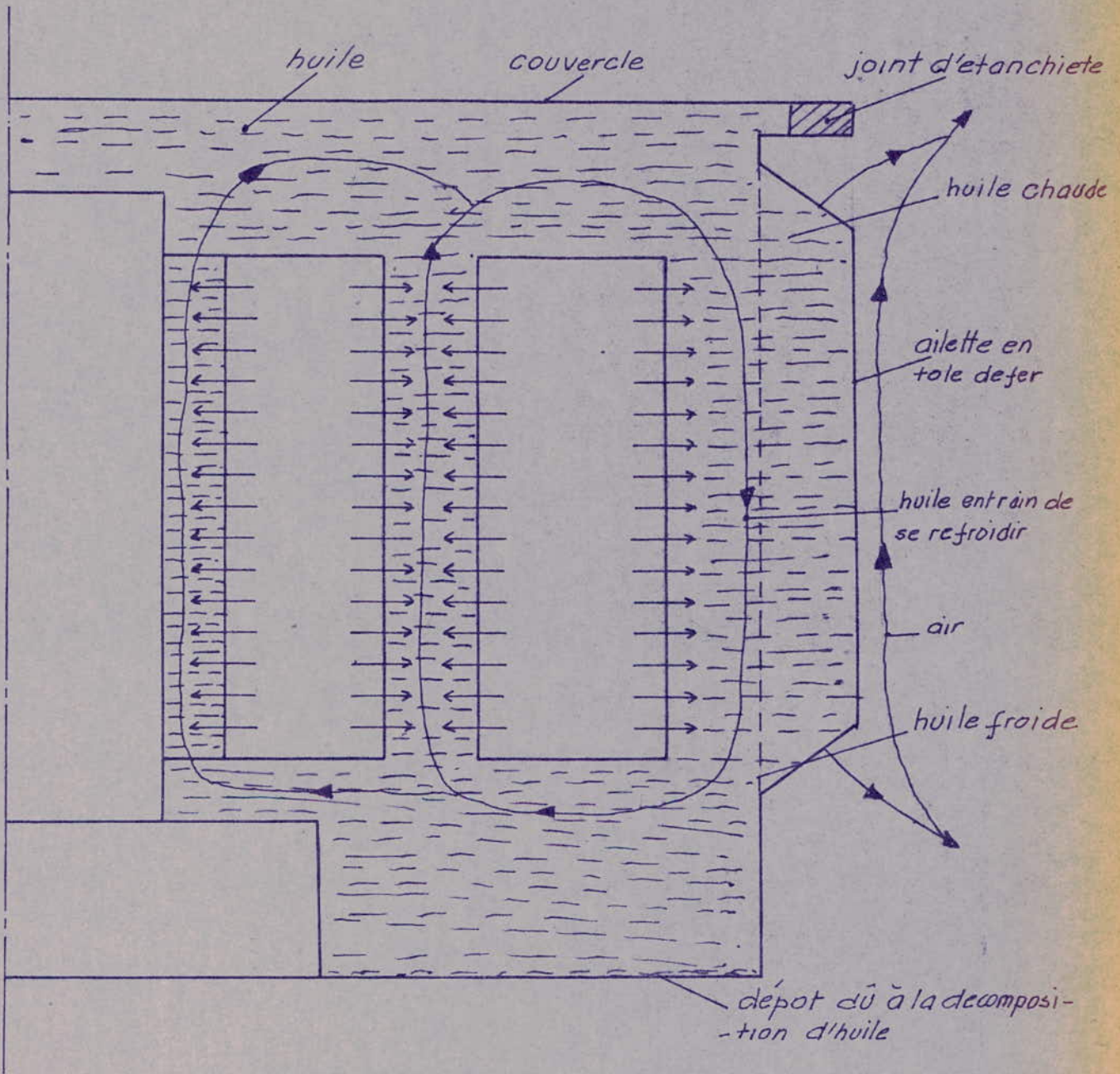
Parmi ces conséquences nous pouvons citer :

- Augmentation de la résistivité
- Vieillessement des matériaux magnétiques
- diminution de la ténacité, dilatation.
- Augmentation de la rapidité d'oxydation

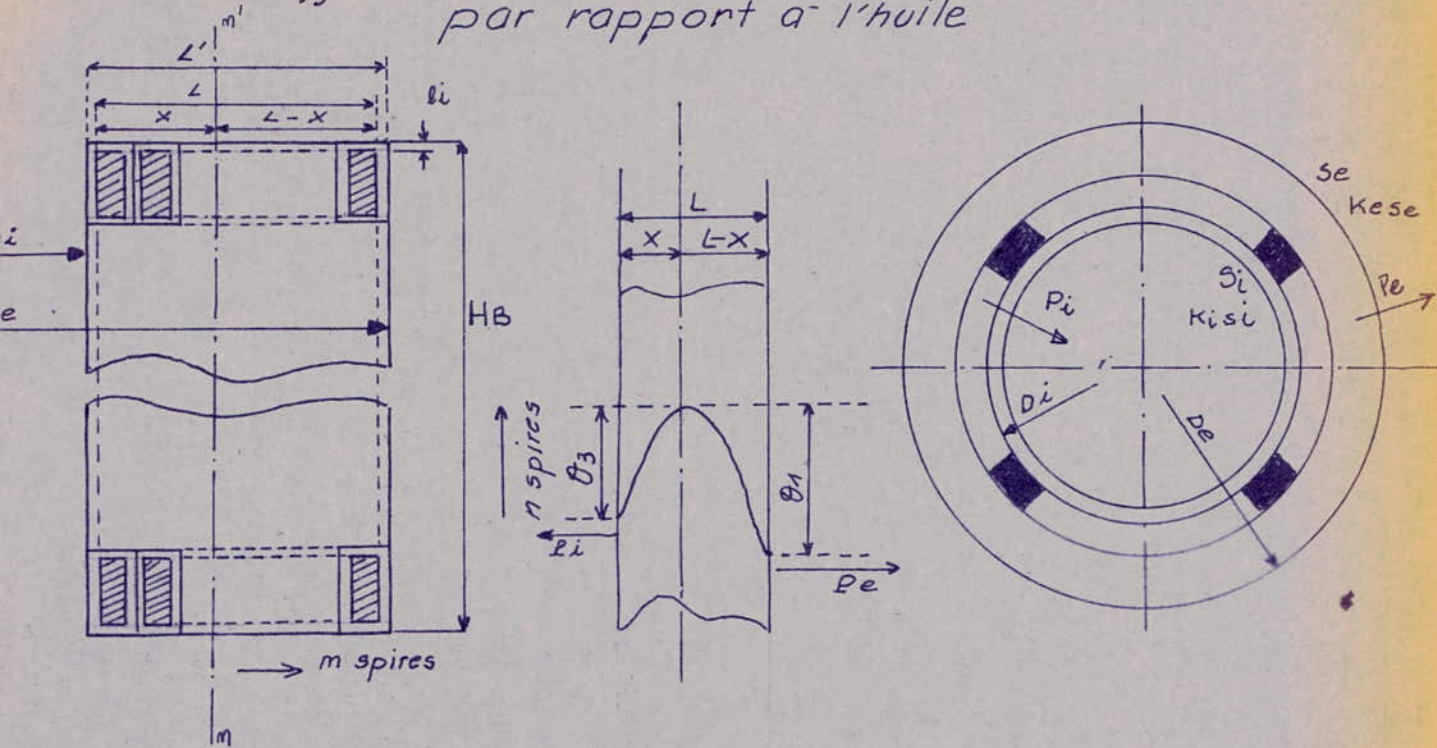
La chaleur se transmet soit par : a) rayonnement
b) conduction
c) convection

la transmission se fait essentiellement par convection, pour cela l'étude du phénomène et le mode de refroidissement sont importants. Ces chauffements ne doivent pas dépasser les valeurs imposées par les normes françaises N.F.C 52.100
52.112.
dans notre cas la solution imposée par le cahier de charges consiste en l'immersion dans une cuve d'huile minérale, et refroidissement naturel à l'extérieur. Le calcul thermique a pour but de vérifier les chauffements.

schema de principe des phenomenes thermiques



II.1 echauffement de l'enroulement basse-tension par rapport a l'huile



- Pour calculer l'echauffement on commence par calculer les surfaces en contact avec l'huile

- calcul de la surface laterale en contact avec l'huile

$$S_e = \pi \cdot D_i \cdot H_B$$

- Diametre interieur D_i

$$D_e = D + 2a_{10} = 17,88 + 1 = 18,88 \text{ cm}$$

$$D_e = 18,88 \text{ cm}$$

$$S_e = \pi \cdot 18,88 \cdot 35,42 = 2100,87 \text{ cm}^2$$

$$S_e = 0,21 \text{ m}^2$$

- calcul de la surface en contact direct avec l'huile K_{iS_i}

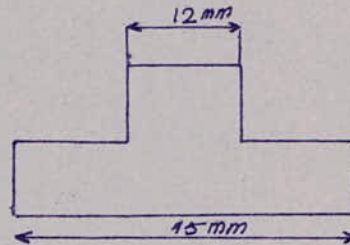
$$K_{iS_i} = \frac{\pi D_i \cdot m \cdot \text{cal. local}}{\pi D_i}$$

le nombre de cales est fonction du diametre exterior .

D'après le tableau page suivante on prend $n_{cal} = 6$

tableau donnant le nombre de cales en fonction du diametre extérieur

D _{ex} (mm)	150-250	250-380	380-500	500-600	900-1200
nb de cales	6	8	10	12	14-16



$$k_i = \frac{\pi D_i - n_{cal} l_{cal}}{\pi D_i}$$

$$k_i = \frac{3,14 \cdot 18,88 - 6 \times 15}{\pi \cdot 18,88} = 0,85$$

$$k_i = 0,85$$

surface directement en contact avec l'huile

$$k_i s_i = 0,85 \times 0,21 = 0,18 \text{ m}^2$$

$$k_i s_i = 0,18 \text{ m}^2$$

surface laterale extérieure en contact avec l'huile

$$s_e = \pi D_e \cdot H$$

D_e : diametre extérieur

$$D_e = D_i + 2a_1 = 18,88 + 2 \cdot 1,89 = 22,66 \text{ cm}$$

$$D_e = 22,66 \text{ cm}$$

$$s_e = \pi \cdot 22,66 \times 35,42 = 2476,98 \text{ cm}^2 = 0,24 \text{ m}^2$$

$$s_e = 0,24 \text{ m}^2$$

surface laterale directement en contact avec l'huile

$$k_e = \frac{\pi D_e - l_{cal} \cdot n_{cal}}{\pi D_e} = \frac{3,14 \cdot 22,66 - 12 \times 6}{\pi \cdot 22,66} = 0,90$$

$$k_e = 0,90$$

surface extérieure directement en contact avec l'huile

$$k_e s_e = 0,90 \times 0,24 = 0,21 \text{ m}^2$$

$$k_e s_e = 0,24 \text{ m}^2$$

Conductivite resultante de l'enroulement.

$$\lambda_{res} = \frac{\lambda_i L}{2 l_i (m-2)}$$

λ_i : conductivite thermique du papier

$$\lambda_i = 0,2 \text{ W m}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$L = a_1 - 2 l_i$$

: l_i = epaisseur de l'isolation
 $l_i = 0,32 \text{ mm}$

$$l_i = 0,32 \text{ mm}$$

Largeur de la bobine $L' = a_1 = 1,89 \text{ cm}$

$$L' = 1,89 \text{ cm}$$

$$L = 1,89 - 0,64 = 1,25 \text{ cm}$$

$$L = 1,25 \text{ cm}$$

$$\lambda_{res} = \frac{\lambda_i L}{2 l_i (m-2)} = \frac{0,2 \cdot 1,25 \cdot 10^{-2}}{0,64 \cdot 2 \cdot 10^{-3}} = 1,95 \text{ W m}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}$$

calcul des resistances thermiques de l'isolant peripherique

$$R_e = \frac{l_i}{\lambda_i k_{ese}} + \frac{1}{\alpha h \cdot k_{ese}}$$

αh = facteur de convection d'huile

$$\alpha h = 110 \text{ W m}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$R_e = \frac{0,32 \cdot 10^{-3}}{0,2 \cdot 0,24} + \frac{1}{110 \cdot 0,24} = 5,09 \cdot 10^{-2} \text{ W}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$R_e = 5,09 \cdot 10^{-2} \text{ W}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$R_i = \frac{l_i}{\lambda_i k_{isi}} + \frac{1}{\alpha h \cdot k_{isi}} = \frac{0,32 \cdot 10^{-3}}{0,2 \cdot 0,18} + \frac{1}{110 \cdot 0,18} = 5,9 \cdot 10^{-2} \text{ W}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}$$

Calculons la distance x de la surface laterale à l'axe de la bobine
Elle est donnee par la relation

$$x = L \frac{R_e \cdot s_e + \frac{L}{\lambda_{res}}}{R_e \cdot s_e + R_i \cdot s_i + \frac{L}{\lambda_{res}}}$$

$$x = 1,25 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{5,09 \cdot 10^{-2} \cdot 0,24 + 2 \cdot \frac{1,25 \cdot 10^{-2}}{1,95}}{5,09 \cdot 10^{-2} \cdot 0,24 + 5,9 \cdot 10^{-2} \cdot 0,18 + \frac{1,25 \cdot 10^{-2}}{1,95}} = 6,59 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$x = 6,59 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Distance axe - surface laterale exterieure:

$$L - x = 1,25 - 0,659 = 0,59$$

- calculons les flux thermiques σ travers les surfaces k_{ese} et k_{isi}

$$i = \frac{P_e}{P_i} \quad i = \frac{(L-x) s_e}{x s_i} = \frac{0,59 \times 0,24 \cdot 10^{-2}}{6,59 \cdot 10^{-3} \times 0,18} = 1,19$$

$$i = 1,19$$

$$P_e = \frac{P_{cu}}{1 + \frac{1}{\lambda}} = \frac{556,96}{1 + \frac{1}{1,19}} = 302,64 \text{ W}$$

$$P_e = 302,64 \text{ W}$$

$$P_i = \frac{P_{cu}}{1 + \lambda} = \frac{556,96}{1 + 1,19} = 254,31 \text{ W}$$

$$P_i = 254,31 \text{ W}$$

calcul des resistances internes

$$R_{ie} = \frac{1}{2} \frac{L - x}{\lambda \text{ res. se}} = \frac{1}{2} \frac{0,59 \cdot 10^{-2}}{1,95 \cdot 0,24} = 0,63 \cdot 10^{-2} \text{ W}^\circ\text{C}$$

$$R_{ie} = 0,63 \cdot 10^{-2} \text{ W}^\circ\text{C}$$

$$R_{ii} = \frac{1}{2} \frac{x}{\lambda \text{ res. si}} = \frac{1}{2} \frac{6,59 \cdot 10^{-3}}{1,95 \cdot 0,21} = 0,80 \cdot 10^{-2} \text{ W}^\circ\text{C}$$

$$R_{ii} = 0,80 \cdot 10^{-2} \text{ W}^\circ\text{C}$$

temperature maximale de l'enroulement

$$\theta_M = P_e (R_e + R_{ie}) = 302,64 (5,09 + 0,63) \cdot 10^{-2} = 17,31^\circ\text{C}$$

$$\theta_M = P_i (R_i + R_{ii}) = 254,31 (5,9 + 0,80) \cdot 10^{-2} = 17,03^\circ\text{C}$$

Calcul des temperatures

$$\theta_e = R_{ie} \cdot P_e = 0,63 \cdot 10^{-2} \times 302,64 = 1,90^\circ\text{C}$$

$$\theta_i = R_{ii} \cdot P_i = 0,80 \cdot 10^{-2} \times 254,31 = 2,03^\circ\text{C}$$

$$\theta_{\text{moy-h}_1} = \theta_M - \frac{i \theta_e + \theta_i}{3(i+1)} = 17,31 - \frac{1,19 \cdot 1,90 + 2,03}{3(1,19+1)} = 16,65^\circ\text{C}$$

Echauffement moyen de l'enroulement haute-tension par rapport à l'huile

L'enroulement haute-tension comporte un canal de refroidissement de 5 mm de largeur on calcule les differents echauffements pour les 2 parties de l'enroulement par la même methode que l'enroulement basse-tension.

1^{ere} partie: calculons le diometre interieur et exterieur:

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

$$D_i = 17,88 + 1 + 2 \cdot 1,76 + 2 \cdot 1,2 = 24,8$$

$$D_i = 24,8 \text{ cm}$$

$$D_e = D_i + a_2 = 24,8 + 3,33 = 28,13 \text{ cm}$$

$$D_e = 28,13 \text{ cm}$$

$$\text{épaisseur de l'isolation } l_i = \frac{d' - 0,886 d}{2} =$$

$$l_i = \frac{2,54 - 0,886 \cdot 2,24}{2} = 0,27 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$\text{hauteur de la bobine } H_B = 35,42 \text{ cm} \quad L = 1,66 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

calcul de la surface en contact avec l'huile

$$S_i = \pi D_i \cdot H$$

$$S_i = (\pi \cdot 24,8 \cdot 35,42) \cdot 10^{-4} = 0,27 \text{ m}^2$$

$$S_i = 0,27 \text{ m}^2$$

$$k_i = \frac{\pi D_i \cdot m_{\text{cal}} \cdot l_{\text{cal}}}{\pi D_i} = \frac{\pi \cdot 248 - 6 \times 12}{\pi \cdot 248} = 0,93$$

$$k_i = 0,93$$

surface directement en contact avec l'huile

$$k_i S_i = 0,93 \cdot 0,27 = 0,243 \text{ m}^2$$

$$k_i S_i = 0,24 \text{ m}^2$$

surface latérale extérieure : $S_e = \pi \cdot D_e \cdot H$

$$S_e = (\pi \cdot 28,13 \cdot 35,42) \cdot 10^{-4} = 0,31 \text{ m}^2$$

$$S_e = 0,31 \text{ m}^2$$

$$k_e = \frac{\pi D_e \cdot m_{\text{cal}} \cdot l_{\text{cal}}}{\pi D_e} = \frac{\pi \cdot 281,3 - 6 \times 15}{\pi \cdot 281,3} = 0,89$$

surface directement en contact avec l'huile

$$k_e S_e = 0,89 \cdot 0,31 = 0,27 \text{ m}^2$$

$$k_e S_e = 0,27 \text{ m}^2$$

conductivité résultante de l'enroulement

$$\lambda_{\text{res}} = \lambda_i \frac{L}{2 l_i (m-1) + (m-1) t}$$

$$t : \text{isolation entre couche } t = 0,48 \text{ mm}$$

$$\lambda_{\text{res}} = 0,2 \cdot \frac{1,66 \cdot 10^{-2}}{(2 \cdot 0,27 \cdot 4 + 4 \cdot 0,48) \cdot 10^{-3}} = 0,81 \text{ W m}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

Résistance thermique de l'isolant

$$R_e = \frac{1}{k_e S_e} \left(\frac{l_i + t}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_h} \right) = \frac{1}{0,27} \left(\frac{0,27 \cdot 10^{-3} + 0,48 \cdot 10^{-3}}{0,2} + \frac{1}{110} \right) = 4,75 \cdot 10^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ W}^{-1}$$

$$R_e = 4,75 \cdot 10^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ W}^{-1}$$

$$R_i = \frac{1}{k_i S_i} \left(\frac{l_i + t}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_h} \right) = \frac{1}{0,24} \left(\frac{0,27 \cdot 10^{-3} + 0,48 \cdot 10^{-3}}{0,2} + \frac{1}{110} \right) = 5,85 \cdot 10^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ W}^{-1}$$

$$R_i = 5,35 \cdot 10^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ W}^{-1}$$

$$x = L \frac{R_{e se} + \frac{L}{2 \lambda_{res}}}{R_{e se} + R_{i si} + \frac{L}{\lambda_{res}}} = 1,66 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{4,75 \cdot 10^{-2} \cdot 0,31 + \frac{1,66 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 0,81}}{4,75 \cdot 10^{-2} \cdot 0,31 + 5,35 \cdot 10^{-2} \cdot 0,27 + \frac{1,66 \cdot 10^{-2}}{0,81}} = 0,84 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

$$L - x = (1,66 - 0,84) \cdot 10^{-2} = 0,82 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

$$x = 0,84 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

Rapport des flux thermiques

$$i = \frac{(L-x) s_e}{x s_i} = \frac{0,82 \cdot 10^{-2} \cdot 0,31}{0,84 \cdot 10^{-2} \cdot 0,27} = 1,12$$

$$i = 1,12$$

calcul des resistances internes de l'isolant

$$R_{ie} = \frac{1}{2} (L-x) \frac{1}{\lambda_{res} \cdot s_e} = \frac{1}{2} \cdot 0,82 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{1}{0,81 \cdot 0,31} = 1,63 \cdot 10^{-2} \text{ W}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$R_{ii} = \frac{1}{2} x \frac{1}{\lambda_{res} \cdot s_i} = \frac{1}{2} \cdot \frac{0,84 \cdot 10^{-2}}{0,81 \cdot 0,27} = 1,9 \cdot 10^{-2} \text{ W}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C} \quad R_{ii} = 1,9 \cdot 10^{-2} \text{ W}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}$$

calcul des flux thermiques

$$P_e = \frac{P_{CU}}{1 + \frac{1}{i}} = \frac{384,01}{1 + \frac{1}{1,12}} = 202,87 \text{ W}$$

$$P_e = 202,87 \text{ W}$$

$$P_i = \frac{P_{CU}}{1 + 1,12} = \frac{384,01}{2,12} = 181,13 \text{ W}$$

$$P_i = 181,13 \text{ W}$$

temperature maximale des enroulements

$$\theta_M = P_e (R_e + R_{ie}) = 202,87 (4,75 \cdot 10^{-2} + 1,63 \cdot 10^{-2}) = 12,9^\circ\text{C}$$

$$\theta_M = P_i (R_i + R_{ii}) = 181,13 (5,35 \cdot 10^{-2} + 1,9 \cdot 10^{-2}) = 13,13^\circ\text{C}$$

$$\theta_e = P_e R_{ie} = 202,87 \cdot 1,63 \cdot 10^{-2} = 3,30^\circ\text{C}$$

$$\theta_i = P_i R_{ii} = 181,13 \cdot 1,9 \cdot 10^{-2} = 3,44^\circ\text{C}$$

$$\theta_{\text{moy-h2}} = \theta_M - \frac{i \theta_e + \theta_i}{3(i+1)} = 13,13 - \frac{1,12 \cdot 3,30 + 3,44}{3(1,12+1)} = 12,01^\circ\text{C}$$

$$\theta_{\text{moy-h2}} = 12,01^\circ\text{C}$$

2^e partie de l'enroulement (H.T)

Calcul des diamètres intérieurs et extérieurs

$$D_i = D + 2a_{10} + 2a_1 + 2a_2 + a_2$$

$$D_i = 17,88 + 1 + 2 \cdot 1,76 + 2 \cdot 1,2 + 3,33 = 28,13 \text{ cm}$$

$$D_i = 28,13 \text{ cm}$$

$$D_e = D_i + a_2 + 0,5 = 28,13 + 3,33 + 0,5 = 31,96 \text{ cm}$$

$$D_e = 31,96 \text{ cm}$$

$$\text{épaisseur } l_i = \frac{d' - 0,886d}{2} = \frac{2,54 - 0,886 \cdot 2,24}{2} = 0,2710^{-3} \text{ m} \quad l_i = 0,2710^{-3} \text{ m}$$

$$\text{hauteur de l'enroulement } h_B = 35,42 \text{ cm.}$$

surface en contact avec l'huile :

$$s_i = \pi \cdot D_i \cdot h_B = \pi \cdot 28,1310^{-2} \cdot 35,4210^{-2} = 0,31 \text{ m}^2$$

$$s_i = 0,31 \text{ m}^2$$

$$k_i = \frac{\pi D_i - m \cdot c \cdot l_{cal}}{\pi \cdot D_i} = \frac{\pi \cdot 281,3 - 6 \cdot 18}{\pi \cdot 281,3} = 0,87$$

$$k_i = 0,87$$

surface directement en contact avec l'huile

$$k_i s_i = 0,87 \cdot 0,31 = 0,26$$

$$k_i s_i = 0,26 \text{ m}^2$$

surface latérale extérieure

$$s_e = \pi \cdot D_e \cdot h_B = \pi \cdot 31,9610^{-2} \cdot 35,4210^{-2} = 0,35 \text{ m}^2$$

$$s_e = 0,35 \text{ m}^2$$

$$k_e = \frac{\pi \cdot D_e - 6 \cdot 18}{\pi \cdot D_e} = \frac{\pi \cdot 319,6 - 6 \cdot 18}{\pi \cdot 319,6} = 0,89$$

$$k_e = 0,89$$

surface en contact avec l'huile

$$k_e s_e = 0,89 \cdot 0,35 = 0,31$$

$$k_e s_e = 0,31 \text{ m}^2$$

$$\lambda_{res} = \frac{\lambda_i L}{2l_i(m-1) + (m-1)t} = 0,2 \cdot \frac{1,6610^{-2}}{2 \cdot 0,2710^{-3} \times 4 + 4 \cdot 0,4810^{-3}} = 0,81 \text{ W m}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\lambda_{res} = 0,81 \text{ W m}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}$$

- calcul des résistances de l'isolation :

$$R_e = \frac{1}{k_e s_e} \left(\frac{l_i + t}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha h} \right) = \frac{1}{0,31} \left(\frac{0,2710^{-3} + 0,4810^{-3}}{0,2} + \frac{1}{110} \right) = 4,1410^{-2} \text{ W}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$R_i = \frac{1}{k_i s_i} \left(\frac{l_i + t}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha h} \right) = \frac{1}{0,26} \left(\frac{0,2710^{-3} + 0,4810^{-3}}{0,2} + \frac{1}{110} \right) = 4,910^{-2} \text{ W}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$R_i = 4,910^{-2} \text{ W}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$X = \frac{L \cdot Re_{se} + \frac{L}{2\lambda_{res}}}{Re_{se} + Ri_{si} + \frac{L}{\lambda_{res}}} = 1,66 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{4,14 \cdot 10^{-2} \cdot 0,35 + \frac{1,66 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 0,81}}{4,14 \cdot 10^{-2} \cdot 0,35 + 4,9 \cdot 10^{-2} \cdot 0,31 + \frac{1,66 \cdot 10^{-2}}{0,81}} = 8,110^{-3} \text{ m}$$

$$X = 8,10 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$L - x = (1,66 - 0,81) \cdot 10^{-2} = 0,85 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

Rapport des flux thermiques

$$i = \frac{(L-x) \cdot se}{x \cdot si} = \frac{0,85 \cdot 10^{-2} \cdot 0,35}{0,81 \cdot 10^{-2} \cdot 0,31} = 1,18$$

calcul des resistances et des flux thermiques

$$R_{ie} = \frac{1}{2} (L-x) \frac{1}{\lambda_{res} \cdot se} = \frac{1}{2} \cdot 0,85 \cdot 10^{-2} \frac{1}{0,81 \cdot 0,35} = 1,49 \cdot 10^{-2} \text{ W}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$R_{ii} = \frac{1}{2} x \frac{1}{\lambda_{res} \cdot si} = \frac{1}{2} \cdot 0,81 \cdot 10^{-2} \frac{1}{0,81 \cdot 0,31}$$

$$R_{ii} = 1,6 \cdot 10^{-2} \text{ W}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}$$

- calcul des flux thermiques :

$$P_e = \frac{P_{cu}}{1 + \frac{1}{i}} = \frac{384,01}{1 + \frac{1}{1,18}} = 207,85 \text{ W}$$

$$P_i = \frac{P_{cu}}{1 + i} = \frac{384,01}{1 + 1,18} = 176,15 \text{ W}$$

temperature maximale :

$$\theta_M = P_e (R_e + R_{ie}) = 207,85 (4,14 \cdot 10^{-2} + 1,49 \cdot 10^{-2})$$

$$\theta_M = 11,70 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\theta_M = P_i (R_i + R_{ii}) = 176,15 (4,9 \cdot 10^{-2} + 1,6 \cdot 10^{-2})$$

$$\theta_M = 11,44 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\theta_e = P_e \cdot R_{ie} = 207,85 \cdot 1,49 \cdot 10^{-2} = 3,09 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\theta_e = 3,09 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\theta_i = P_i \cdot R_{ii} = 176,15 \cdot 1,6 \cdot 10^{-2} = 2,81 \text{ } ^\circ\text{C}$$

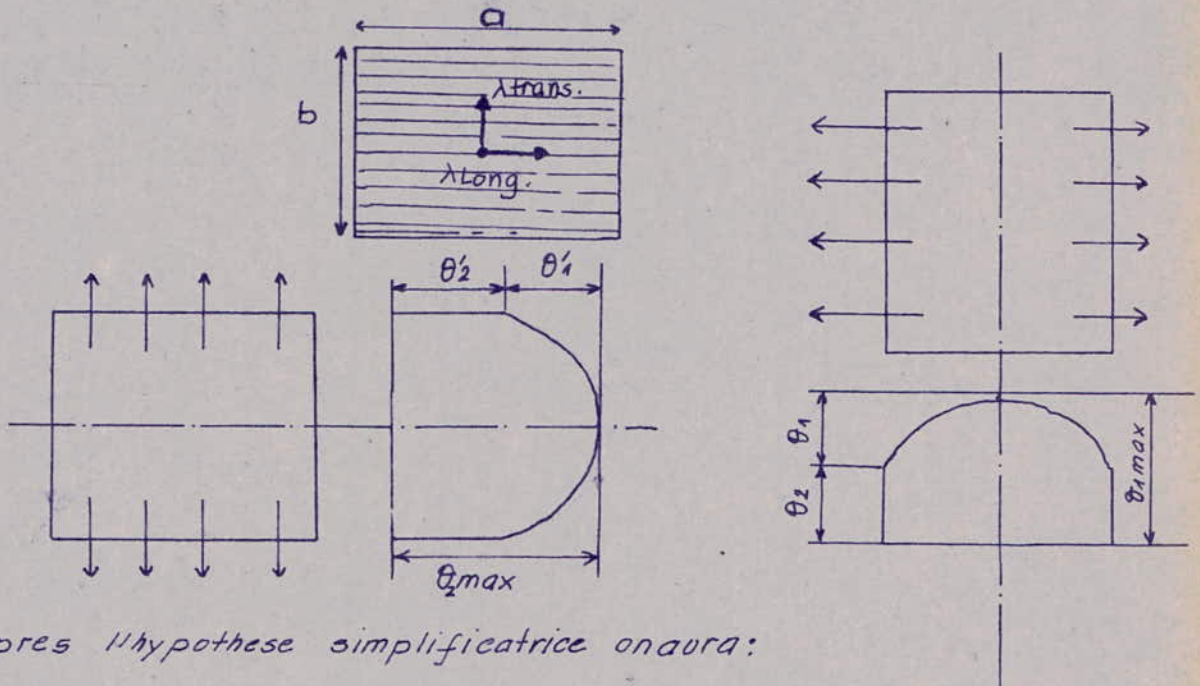
$$\theta_i = 2,81 \text{ } ^\circ\text{C}$$

temperature moyenne de l'enroulement

$$\theta_{mj} - t_2 = \theta_M - \frac{i\theta_e + \theta_i}{3(i+1)} = 11,70 - \frac{1,18 \cdot 3,09 + 2,81}{3(1,18+1)} = 10,71 \text{ } ^\circ\text{C}$$

II. 4 Échauffement du circuit magnétique

du fait que le circuit magnétique n'est pas homogène, et que le refroidissement de la colonne et de la culasse est différent le calcul de l'échauffement devient compliqué. Pour cela on formule l'hypothèse suivante, on considère que la section de la colonne est un rectangle inscrit dans un cercle.



après l'hypothèse simplificatrice on aura:

dimensions du rectangle : $a = 0,9 D = 0,9 \cdot 17,88 = 16,09 \text{ cm}$ $a = 16,09 \text{ cm}$
 $b = \frac{scol}{a} = \frac{219,40}{16,09} = 13,66 \text{ cm}$ $b = 13,66 \text{ cm}$

relations permettant le calcul des différents échauffements

$$\theta_1 = \frac{P \cdot a^2}{8 \lambda l}$$

P : pertes spécifique par unité de volume (W/cm^3)

$$\theta_2 = \frac{P \cdot a}{2 \alpha_{con}}$$

λl : coefficient de translation longitudinal

$$\theta'_1 = \frac{P \cdot b^2}{8 \lambda t}$$

λt : coefficient de translation transversal

α_{con} : facteur de convection d'huile

$$\theta'_2 = \frac{P \cdot b}{2 \alpha_{con}}$$

$\lambda l = 20 \text{ W}/\text{m}^\circ\text{C}$ $\lambda t = 3 \text{ W}/\text{m}^\circ\text{C}$ $\alpha_{con} = 110 \text{ W}/\text{m}^2^\circ\text{C}$

calcul des pertes par unité de volume

$$P = P_{sp} \cdot \delta$$

P_{sp} : pertes spécifiques par unité de volume. W/dm^3
 δ : kg/dm^3

$$P = 1,3 \times 7,65 \cdot 10^3 = 9,95 \cdot 10^3 \text{ W/m}^3$$

$$P = 9,95 \cdot 10^3 \text{ W/m}^3$$

valeur des différents échauffements :

$$\theta_1 = \frac{9,95 \cdot 10^3 \cdot 0,16^2}{8 \cdot 20} = 1,60^\circ\text{C}$$

$$\theta_1 = 1,60^\circ\text{C}$$

$$\theta_2 = \frac{9,95 \cdot 10^3 \cdot 0,16}{2 \cdot 110} = 7,27^\circ\text{C}$$

$$\theta_2 = 7,27^\circ\text{C}$$

$$\theta'_1 = \frac{9,95 \cdot 10^3 \cdot 0,136^2}{8 \cdot 3} = 7,73^\circ\text{C}$$

$$\theta'_1 = 7,73^\circ\text{C}$$

$$\theta'_2 = \frac{9,95 \cdot 10^3 \cdot 0,136}{2 \cdot 110} = 6,17^\circ\text{C}$$

$$\theta'_2 = 6,17^\circ\text{C}$$

$$\theta_{1 \max} = \theta_1 + \theta_2 = 1,60 + 7,27^\circ\text{C} = 8,87^\circ\text{C}$$

$$\theta_{1 \max} = 8,87^\circ\text{C}$$

$$\theta_{2 \max} = \theta'_1 + \theta'_2 = 7,73 + 6,17 = 13,90^\circ\text{C}$$

$$\theta_{2 \max} = 13,90^\circ\text{C}$$

échauffement du circuit magnétique est :

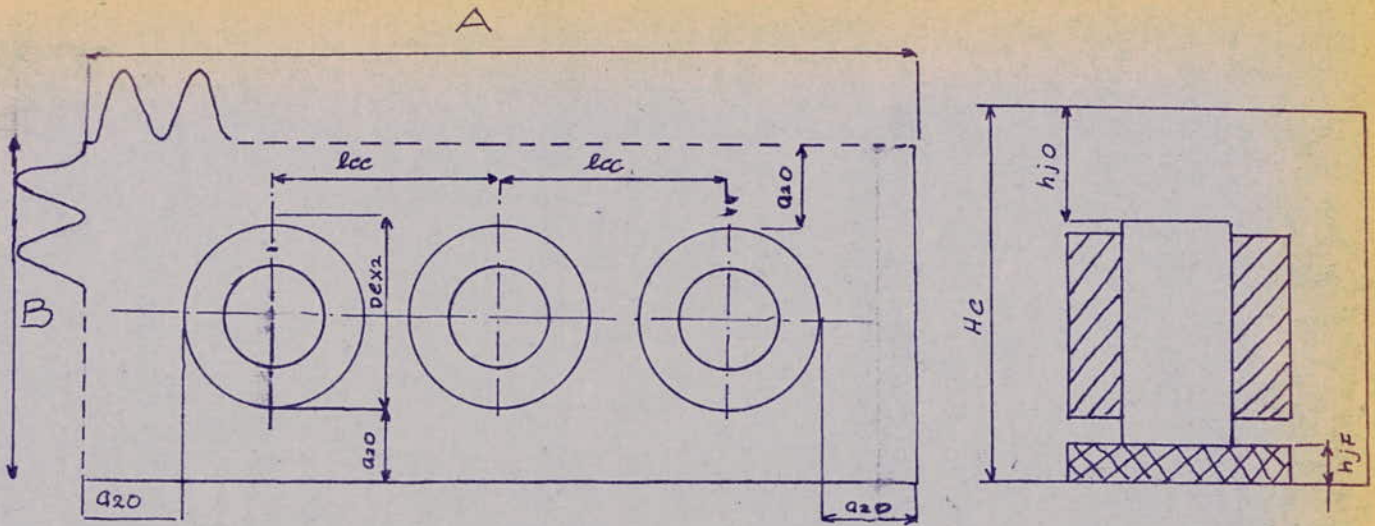
$$\theta_{\max. \text{ C.M. } h} = \theta_{2 \max} \frac{\theta'_2 + 1,5 \theta'_1}{\theta_{2 \max} + \theta'_2 + 1,5 \theta'_1} =$$

$$\theta_{\max. \text{ C.M. } h} = 13,90 \frac{6,17 + 1,5 \cdot 7,73}{13,90 + 6,17 + 1,5 \cdot 7,73} = 7,79^\circ\text{C} \quad \theta_{\max \text{ C.M. } h} = 7,79^\circ\text{C}$$

la valeur indicative trouvée montre que le circuit magnétique n'est pas excessivement échauffé.

- Dimension de la cuve.

La cuve a une section rectangulaire avec les parois ondulées afin d'augmenter la surface d'échange avec l'extérieur et avoir un bon refroidissement d'huile.



les dimensions de la cuve sont fonction de la tension nominale comme le montre le tableau ci-dessous

U (KV)	Sn (KVA)	a ₂₀ (mm)	h _{jo} (mm)	h _{jf} (mm)
< 20	20-160	55	150-250	30 a 40
	200-1600	65	150-300	
	2000-10000	90	150-350	
> 20	20-160	65	150-300	
	200-1600	75	150 a	
< 30	2000-104	120	300	

les dimensions de la cuve sont: $a_{20} = 6,5 \text{ cm}$

$h_{jo} = 16 \text{ cm}$

Pour $U_n = 10 \text{ KV}$

$h_{jf} = 3,5 \text{ cm}$

$$D_{i2} = D + 2a_{10} + 2a_{11} + 2a_{12}$$

$$D_{ex2} = D_{i2} + 2a_2$$

$$h_m = h_f + 2h_j$$

$$A = 2l_{cc} + D_{ex2} + 2a_{20}$$

$$B = D_{ex2} + 2a_{20}$$

$$H_c = h_m + h_{jo} + h_{jf}$$

Application numerique :

$$D_{i2} = 17,88 + 1 + 3,52 + 2,4 = 24,8 \text{ cm}$$

$$D_{ex} = 24,8 + 6,66 = 31,46 \text{ cm}$$

$$h_m = (43,42 + 2 \cdot 14,70) = 72,82 \text{ cm}$$

$$A = 2 \cdot 31,72 + 31,46 + 2 \cdot 3,33 = 101,56 \text{ cm}$$

$$B = 31,46 + 2 \cdot 3,33 = 38,12 \text{ cm}$$

$H_c = 72,82 + 16 + 3,5 = 92,32 \text{ cm}$ $H_c = 92,32 \text{ cm}$
 les épaisseurs des tôles d'acier de la cuve sont fonctions de la puissance et sont données par le tableau suivant

S_n (KVA)	< 100	125 - 250	315 - 630	630 - 1600
épaisseur du fond Δf	3 - 4	4 - 5	5 - 6	6 - 8
épaisseur du couvercle Δc (mm)	4 - 5	5 - 6	6 - 8	10
épaisseur des parois latérales Δp (mm)	0,75 - 1	1 - 1,5	1,5	2,5

Pour une puissance $S_n = 315 \text{ KVA}$.

$\Delta f = 5 \text{ mm}$

$\Delta c = 6 \text{ mm}$

$\Delta p = 1,5 \text{ mm}$

Definition de la geometrie des ailettes

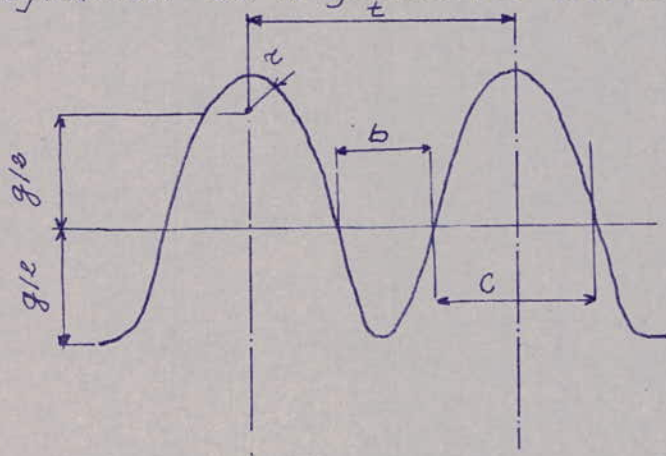
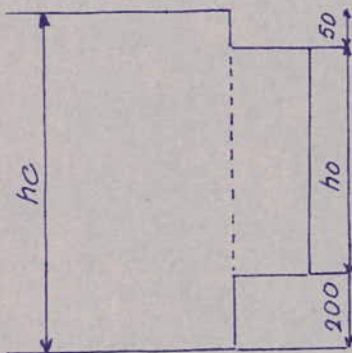


tableau des valeurs indicatives

t min	g max	b min	c min
40	300	30	10

on prend $t = 43 \text{ mm}$
 $g = 200 \text{ mm}$
 $b = 35 \text{ mm}$
 $c = 10 \text{ mm}$
 $r = 5 \text{ mm}$



calculons le perimetre d'une ondole:

$P_{ond} = b + 2g + \pi \cdot r = 35 + 2 \cdot 200 + \pi \cdot 5 = 450,70 \text{ mm}$

$h_o = h_c - (200 + 50) = 923,2 - 250 = 673,2 \text{ mm}$

Nombre d'ondules à placer sur les parois sur la longueur

$n_1 + 1 = \frac{A}{t} = \frac{1015}{43} = 24$

$n_1 = 23$

Sur la largeur $n_2 + 1 = \frac{B}{t} = \frac{381,2}{43} = 9$ $\eta_e = 8$

Dimension de la cuve avec les ondules.

$$A' = A + 2g + e \quad A' = 101,5 + 40 + 0,5 = 142 \text{ cm} \quad A' = 142 \text{ cm}$$

$$B' = B + 2g + e \quad B' = 38,12 + 40 + 0,5 = 68,62 \text{ cm} \quad B' = 68,62 \text{ cm}$$

Calcul des échauffements de l'huile par rapport à la cuve et de la cuve par rapport à l'air

1. Échauffement de l'huile par rapport à la cuve :

l'échauffement de l'huile par rapport à la cuve lors d'une transmission par convection naturelle est donnée par la relation :

$$\theta_{h-c} = 0,165 \left(\frac{1,65 (P_o + P_k)}{AC} \right)^{0,6}$$

avec : sc = surface en contact avec l'huile

$$sc = sc_o + sc_c = \quad \begin{array}{l} sc_o : \text{surface des ondules} \\ sc_c : \text{surface du couvercle} \end{array}$$

$$sc_o : n_o \cdot \text{Pond} \cdot h_o \quad sc_o : 2(23 + 8) \cdot 0,45 \cdot 0,67 = 18,69 \text{ m}^2 \quad sc_o = 18,69 \text{ m}^2$$

$$sc_c : A \cdot B = 1,015 \times 0,38 = 0,385 \text{ m}^2 \quad sc_c = 0,38 \text{ m}^2$$

$$sc = 18,69 + 0,38 = 19,07 \text{ m}^2 \quad sc = 19,07 \text{ m}^2$$

$$\theta_{h-c} = 0,165 \left(\frac{1,05 (793,3 + 4173)}{19,07} \right)^{0,6} = 4,78^\circ\text{C} \quad \theta_{h-c} = 4,78^\circ\text{C}$$

échauffement de la cuve par rapport à l'air :

la chaleur est transmise par la cuve à l'air par radiation et convection
l'échauffement cuve-air est donné par

$$\theta_{c-a} = \left[\frac{1,05 (P_o + P_k)}{2,8 sr + 2,5 sc} \right]^{0,8}$$

sr : surface radiante de la cuve elle représente toute la surface enveloppante de la cuve et celle du couvercle.

$$sr = 2(A' + B') \cdot h_o + sc_c$$

$$= 2(1,42 + 0,78) \cdot 0,673 + 0,385 = 3,34 \text{ m}^2$$

$$d'o\grave{u} \theta_{c-a} = \left[\frac{1,05 (793,3 + 4173)}{2,8 \cdot 3,34 + 2,5 \cdot 19,07} \right]^{0,8} = 37,1^{\circ}\text{C} \quad \theta_{c-a} = 37,1^{\circ}\text{C}$$

temperature des bobinages

$$t_a = 35^{\circ}\text{C}$$

Basse-tension : $t_{e1} = \theta_{moy-h1} + \theta_{h-c} + \theta_{c-a} + t_a$

$$t_{e1} = 16,65 + 4,78 + 37,1 + 35 = 93,53^{\circ}\text{C} \quad t_{e1} = 93,53^{\circ}\text{C}$$

haute-tension : $t_{e2} = \theta_{moy-h2} + \theta_{h-c} + \theta_{c-a} + t_a$

on prend la plus haute temperature pour l'enroulement. Haute-tension

$$t_{e2} = 12,01 + 4,78 + 37,1 + 35 = 88,90^{\circ}\text{C} \quad t_{e2} = 88,90^{\circ}\text{C}$$

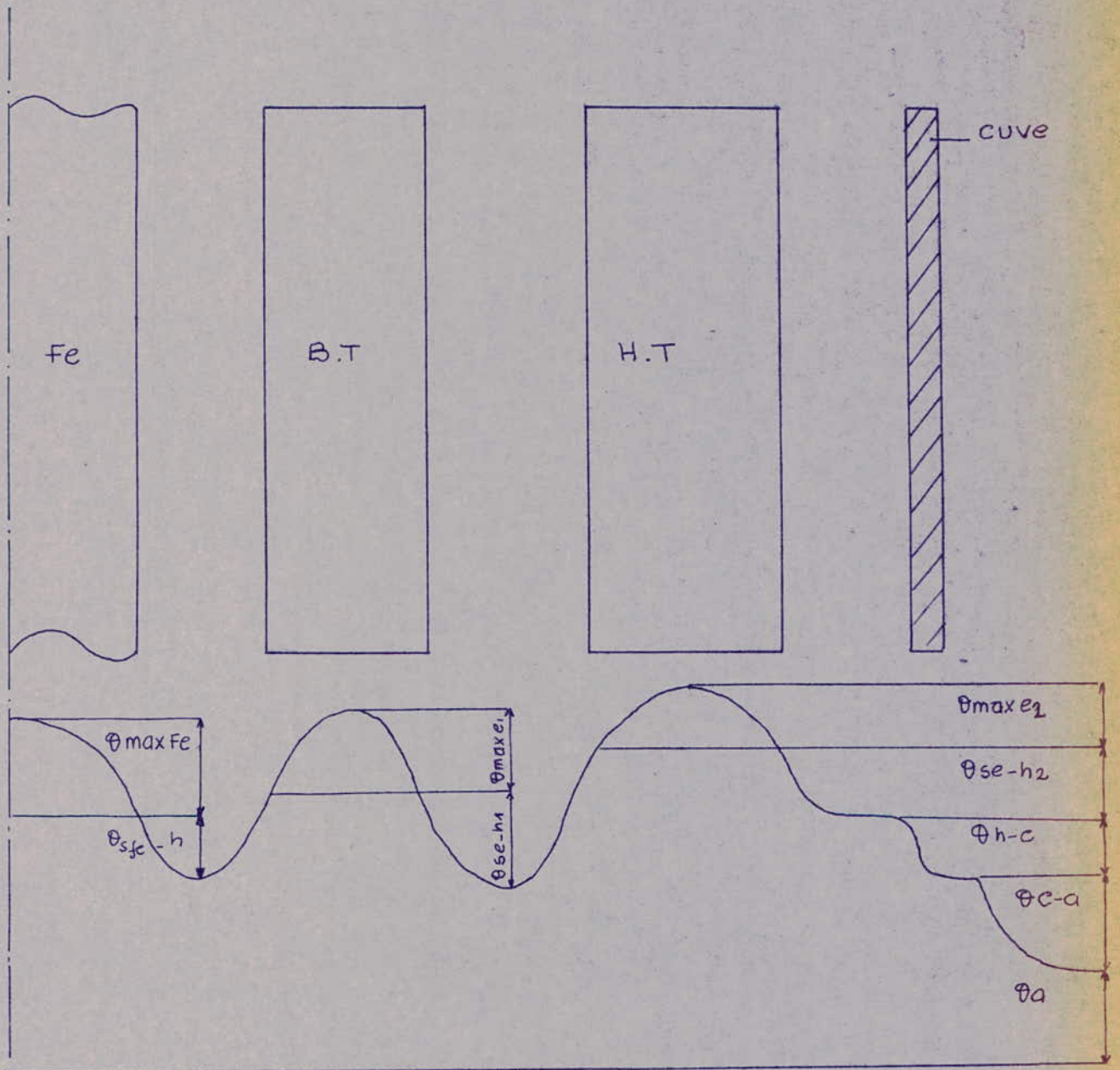
temperature du circuit magnetique

$$t_{c-m} = \theta_{c-m-h} + \theta_{h-c} + \theta_{c-a} + t_a$$

$$t_{c-m} = 7,79 + 4,78 + 37,1 + 35 = 84,67^{\circ}\text{C}$$

On remarque que ces temperatures sont inferieures a 105°C temperature imposees par les normes.

Graphique des chauffements



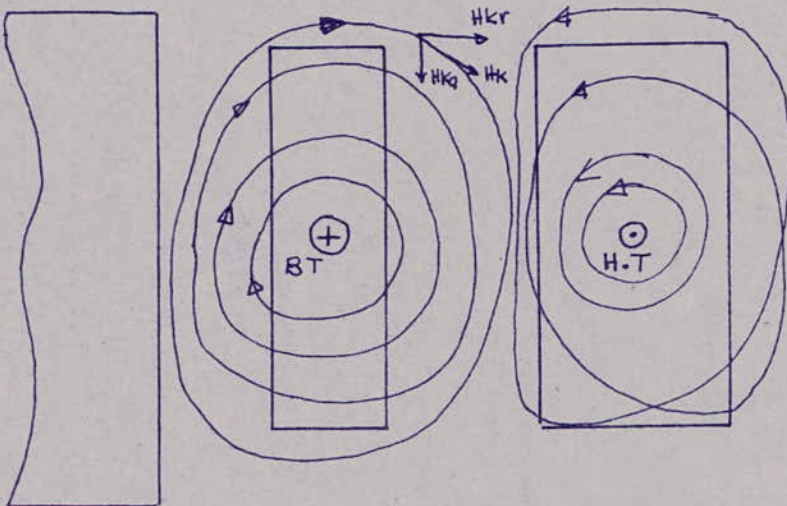
- θ_a : température de l'air ambiant
- θ_{c-a} : chauffage cuve - air
- θ_{h-c} : chauffage huile - cuve
- θ_{se-h_2} : chauffage ^{surface} enroulement H.T - huile
- $\theta_{\max e_2}$: chauffage enroulement H.T - surface
- θ_{sfc-h} : chauffage surface fer - huile
- $\theta_{\max fe}$: chauffage fer - surface
- θ_{se-h_1} : chauffage surface B.T - huile
- $\theta_{\max e_1}$: chauffage B.T - surface.

3^e PARTIE

CALCUL MECANIQUE

Dans cette partie on vérifiera la stabilité mécanique des bobines aux efforts électrodynamiques, dans le cas d'un court-circuit brusque. On dimensionnera, les éléments constructifs du transformateur (boulons de serrage, tirants.....) puis on fera le calcul mécanique de la cuve.

la figure ci-dessous montre les lignes de forces et le champ de fuite.



- le champ de fuite se décompose en une composante axiale et une composante radiale
- H_{kr} : composante radiale
- H_{ka} : composante axiale

Lors d'un court-circuit brusque, il peut résulter des forces électrodynamiques considérables, qui nuisent à la stabilité des bobines et peuvent entraîner même leur détérioration. Pour vérifier que les efforts électrodynamiques sont inférieurs aux efforts admissibles on se placera dans le cas d'un court-circuit le plus défavorable c'est-à-dire le court-circuit triphase symétrique. Nous supposons que le réseau d'alimentation est de puissance infinie.

- calcul de la valeur maximale du courant de court-circuit

ELLE est donnée par la relation $I_{kmax} = \sqrt{2} \cdot K_m \cdot I_{kdin}$.

k_m : coefficient de crête

$$k_m = 1 + e^{-\pi \frac{U_{ka}}{U_{kr}}} \Rightarrow k_m = 1 + e^{-\pi \frac{1,23}{3,93}} = 1 + 0,37 = 1,37$$

- courant stationnaire de court-circuit

$$I_{k \text{ din}} = I_n \cdot \frac{100}{U_k}$$

Pour l'enroulement Basse-tension

$$I_{k \text{ din}_1} = I_{n1} \cdot \frac{100}{U_k} = 454,64 \cdot \frac{100}{4,11} = 11061,8 \text{ A}$$

Pour l'enroulement haute-tension :

$$I_{k \text{ din}_2} = I_{n2} \cdot \frac{100}{U_k} = 10,5 \cdot \frac{100}{4,11} = 225,47 \text{ A}$$

- valeur maximale de courant de court-circuit

- enroulement Basse-tension :

$$I_{k \text{ max}_1} = \sqrt{2} \cdot 1,37 \cdot 11061,8 = 21431,93 \text{ A}$$

enroulement haute-tension :

$$I_{k \text{ max}_2} = \sqrt{2} \cdot 1,37 \cdot 225,47 = 436,84 \text{ A}$$

- calcul des forces radiales :

elles sont données par la relation

$$F_r = \frac{6,4 (W \cdot I_{k \text{ max}})^2 \cdot l_{\text{moy}} \cdot K_r \cdot 10^{-8}}{h_B}$$

K_r : coefficient de Rogowski
 l_{moy} : longueur moyenne de la spire [cm]
 m : nb despires
 h_B : hauteur de la bobine [cm]
 F_r : force radiale [kgf]

Enroulement Basse-tension [B.T.]

$$F_{r1} = \frac{6,4 (30 \cdot 21431,93)^2 \cdot 0,65 \cdot 0,96 \cdot 10^{-8}}{0,3542} = 46636,5 \text{ kgf} = 4,66 \cdot 10^4 \text{ kgf}$$

Enroulement haute-tension

$$F_{r2} = \frac{6,4 (1299 \cdot 436,84)^2 \cdot 0,89 \cdot 0,96 \cdot 10^{-8}}{0,3542} = 4,97 \cdot 10^4 \text{ kgf}$$

calcul des forces axiales :

elles sont donnees par la relation

$$F_a = F_r \cdot \frac{a_r}{2hb} \quad a_r: \text{largeur du canal de fuite}$$

Enroulement basse-tension :

$$F_{a1} = 4,66 \cdot 10^4 \cdot \frac{2,89}{2 \cdot 35,42} = 1901,10 \text{ kgf} = 1,9 \cdot 10^3 \text{ kgf}$$

Enroulement haute-tension

$$F_{a2} = 4,97 \cdot 10^4 \cdot \frac{2,89}{2 \cdot 35,42} = 2,027 \cdot 10^3 \text{ kgf}$$

calcul des efforts unitaires dans les enroulements.

Enroulement basse-tension . B.T

$$\sigma_{a1} = \frac{F_r \cdot 10^2}{2\pi \cdot n \cdot W_2 \cdot A W'el} = \frac{4,97 \cdot 10^4 \cdot 10^2}{2\pi \cdot 1 \cdot 1299 \cdot 3,65} = 166,51 \text{ kgf/cm}^2$$

les efforts calcules sont admissibles pour le cuivre car celui-ci a un effort admissible $\sigma_{ad} = 700 \text{ kgf/cm}^2$.

les efforts unitaires, dus aux forces axiales dans les enroulements B.T et H.T auront respectivement pour valeur .

Enroulement basse-tension :

$$\sigma_{a1} = \frac{F_{a1}}{S_1} \quad \text{avec } S_1 = \pi D M_1 \cdot a_1 \quad S_1 = \pi \cdot 20,77 \cdot 1,76 = 114,84 \text{ cm}^2$$

$$\sigma_{a1} = \frac{1,9 \cdot 10^3}{114,84} = 16,54 \text{ kgf/cm}^2$$

Enroulement Haute-tension :

$$\sigma_{a2} = \frac{F_{a2}}{S_2} \quad \text{avec } S_2 = \pi \cdot 28,39 \cdot 3,33 = 297 \text{ cm}^2$$

$$\sigma_{a2} = \frac{2,027 \cdot 10^3}{297} = 6,82 \text{ kgf/cm}^2$$

σ_{a1} et σ_{a2} sont inferieures aux efforts admissibles, d'où les enroulements

ont une bonne tenue aux efforts électrodynamiques

Calcul mécanique de la cuve.

Pour faire ce calcul on détermine d'abord les volumes et les poids suivants.

Volume occupé par l'enroulement basse-tension

$$V_1 = \rho t_1 \cdot \Delta w_1 \cdot 10^3 \cdot 3$$

$\Delta w_1 : [mm^2]$
 $t_1 : [m]$
 $V_1 : [dm^3]$

$$V_1 = 19,57 \cdot 158,4 \cdot 10^3 \cdot 3 = 9,30 dm^3 \qquad V_1 = 9,30 dm^3$$

Volume occupé par l'enroulement haute-tension

$$V_2 = \rho t_2 \cdot \Delta w_2 \cdot 10^3 \cdot 3$$

$\Delta w_2 : [mm^2]$
 $t_2 : [m]$
 $V_2 : [dm^3]$

$$V_2 = 1204,95 \cdot 3,65 \cdot 10^3 \cdot 3 = 13,19 dm^3 \qquad V_2 = 13,19 dm^3$$

Volume occupé par les colonnes

$$V_{col} = 3 h_{col} \cdot s_{col} \qquad V_{col} = 3 \cdot 43,42 \cdot 251,08 = 32,70 dm^3$$

$$V_{col} = 32,70 dm^3$$

Volume occupé par les culasses:

$$V_j = 2 \cdot S_j (3D + 2LF)$$

$$V_j = 2 \cdot 252,35 (3 \cdot 17,88 + 2 \cdot 13,84) = 41,042 dm^3$$

Volume occupé par le cuirre

$$V_{cu} = V_1 + V_2 = 9,3 + 13,19 = 22,49 dm^3$$

$$V_{cu} = 22,49 dm^3$$

Volume occupé par le circuit-magnétique

$$V_{EM} = V_{col} + V_j = 32,70 + 41,04 = 73,74 dm^3$$

$$V_{EM} = 73,74 dm^3$$

Volume de la masse découvrable :

on estime le volume du matériel de serrage à 20% du volume du cuirre et du circuit magnétique

$$V_{decu} = 1,20 (V_{CM} + V_{Cu})$$

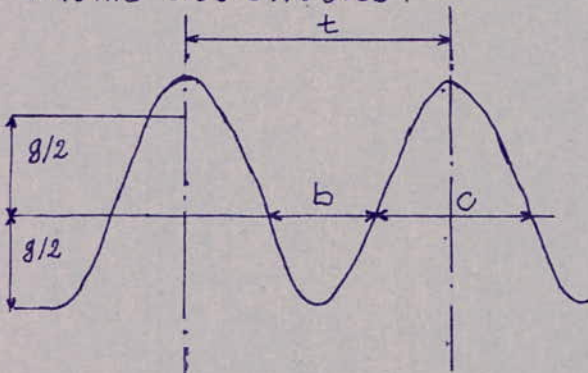
$$= 1,20 (78,74 + 22,49) = 115,47 \text{ dm}^3$$

$$V_{decu} = 115,47 \text{ dm}^3$$

Volume de la cuve.

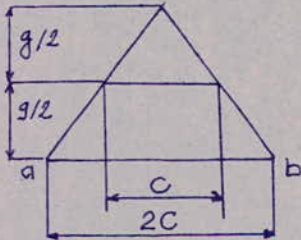
$$V_{eu} = A \cdot B \cdot H_c \Rightarrow V_{eu} = 101,56 \cdot 38,12 \cdot 93,32 = 357,41 \text{ dm}^3$$

Volume des ondules.



On assimile la surface de base de l'ondule à un triangle

Par homothétie, nous avons $ab = 2c$



$$\text{surface d'une ondule : } s_{ond} = \frac{g \times 2c}{2}$$

$$s_{ond} = 200 \times 10 = 2000 = 20 \text{ cm}^2$$

$$s_{ond} = 20 \text{ cm}^2$$

Volume d'une ondule

$$V_{ond} = 20 \cdot 67,32 = 1346 \text{ cm}^3 = 1,34 \text{ dm}^3$$

Volume total des ondules :

$$2(23 + 8) \cdot 1,34 = 83,08 \text{ dm}^3$$

Volume total de la cuve :

$$V_{eu.t} = V_{e.u} + V_{ond} \quad 357,41 + 83,08 = 440,49 \text{ dm}^3$$

$$\text{Volume d'huile} \quad V_h = V_{eu.t} - V_{decu} = 440,49 - 115,47 = 325,02 \text{ dm}^3$$

$$\text{Poids d'huile} \quad P_h = \gamma_h \cdot V_h \quad \gamma_h: 0,9 \text{ kgf/dm}^3$$

$$\text{Poids d'huile} \quad P_h = 0,9 \cdot 325,02 = 292,51 \text{ kgf}$$

Poids du circuit magnétique

$$G.C.M. = \delta_{fer} \cdot V.C.M$$

$$\delta_{fer} = 7,65 \text{ kgf/dm}^3$$

$$G.C.M. = 7,65 \cdot 73,74 = 564,11 \text{ kgf}$$

$$G.C.M = 564,11 \text{ kgf}$$

$$\text{Poids du cuivre : } G_{cu} = \delta_{cu} \cdot V_{cu}$$

$$\delta_{cu} = 8,9 \text{ kgf/dm}^3$$

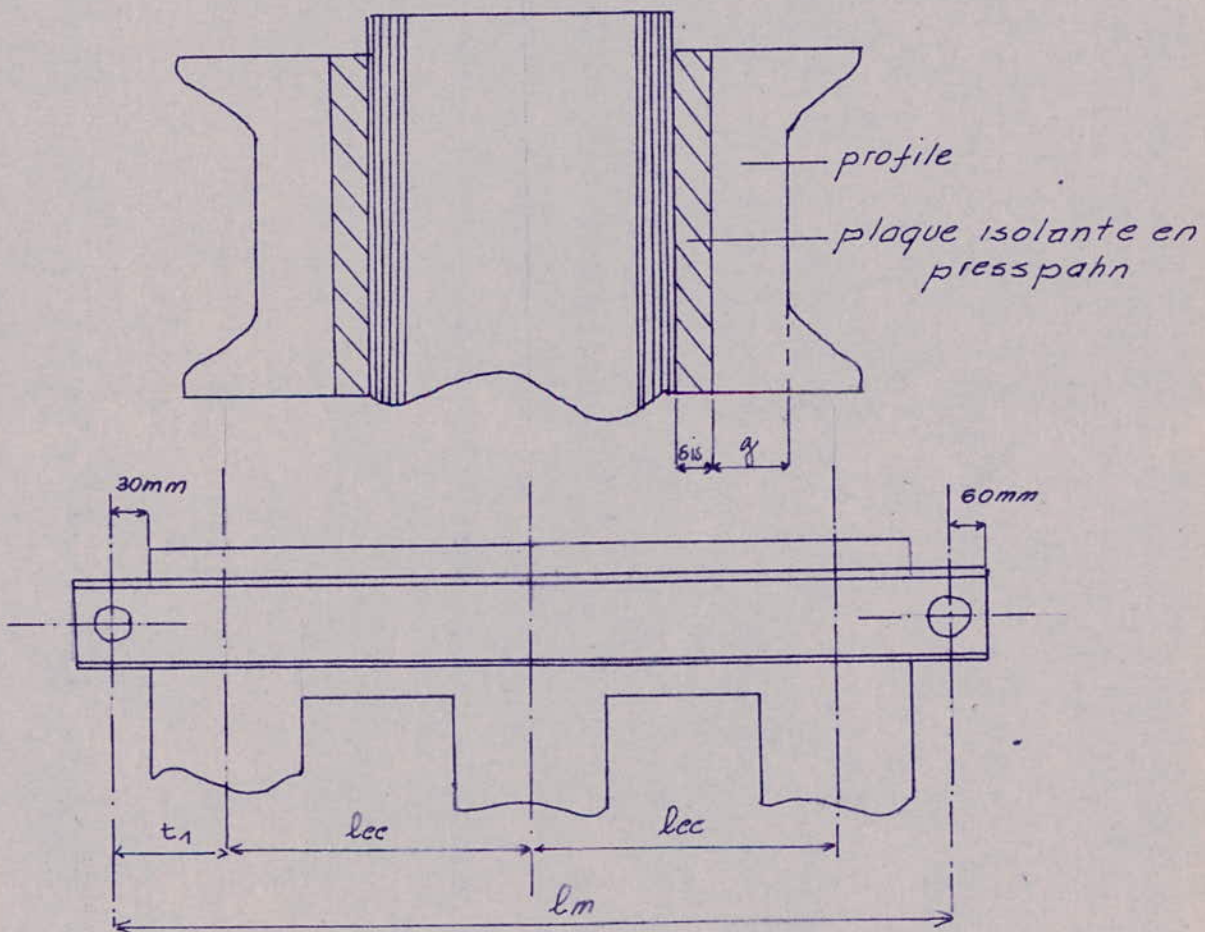
$$G_{cu} = 8,9 \cdot 22,49 = 200,16 \text{ kgf}$$

III-3 calcul mecanique des accessoires

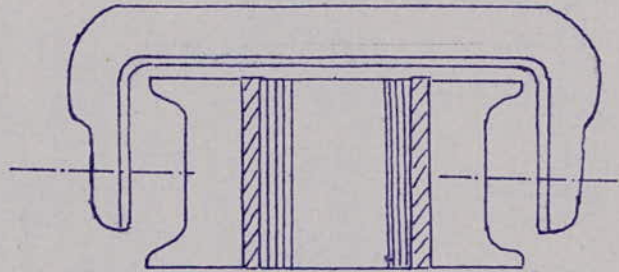
- Accessoires de serrage :

1. Poutres et boulons de serrage :

le serrage des culasses se fait par deux poutres realisees en profilé U.



afin d'éviter de percer le circuit magnétique, on fera le serrage par deux boulons extérieurs, et un étrier au centre



la force de serrage exercée par les boulons et l'étrier se transmet aux profilés en U qui assurent la répartition

- calcul de la force de serrage:

elle est donnée par la relation

$P = p \cdot h_j \cdot l_m$ où p : pression entre la poutre et la culasse que l'on considère comme uniformément répartie son domaine de variation est $2-6 \text{ kgf/cm}^2$.

h_j : hauteur de la culasse

l_m : longueur de la culasse ($l_m = 2 \cdot l_{ec} + D$)

$$l_m = 2 \cdot 31,72 + 17,88 = 81,32 \text{ cm}$$

$$P = 2 \cdot 14,7 \cdot 81,32 = 2.390,8 \text{ kgf.}$$

le moment maximal supporté par la poutre est donné par la relation

$$M_{max} = \frac{p \cdot h_j (l_{ec} + t_1)}{8}$$

h_j : [cm] l_{ec} : [cm]

t_1 : [cm] p : kgf/cm^2

M_{max} : [kgf.cm]

$$t_1 = \frac{D}{2} + 3 \text{ cm} \quad t_1 = \frac{17,88}{2} + 3 = 11,94 \text{ cm}$$

$$t_1 = 11,94 \text{ cm}$$

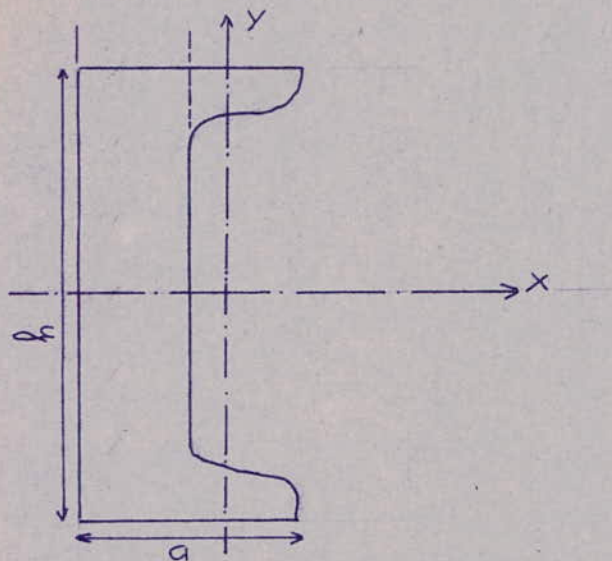
$$M_{max} = \frac{2 \cdot 14,7 (31,72 + 11,94)^2}{8} = 7 \cdot 10^3 \text{ kgf.cm} \quad M_{max} = 7 \cdot 10^3 \text{ kgf.cm}$$

- Module de résistance du profilé en U selon l'axe y est $W_y = \frac{M_{max}}{\sigma_a}$

σ_a : effort unitaire admissible de l'acier utilisé, pour un acier A33 avec charge minimale de rupture 3300 kgf/cm^2 $\sigma_a = 1200 \text{ kgf/cm}^2$

valeur du module de résistance $W_y = \frac{7 \cdot 10^3}{1,2 \cdot 10^3} = 5,83 \text{ cm}^3$

On choisit un profile dont le moment est au moins égal à celui calculé. On choisit un U.P.N 120 (N.I. A. 45. 202. et 45. 210)

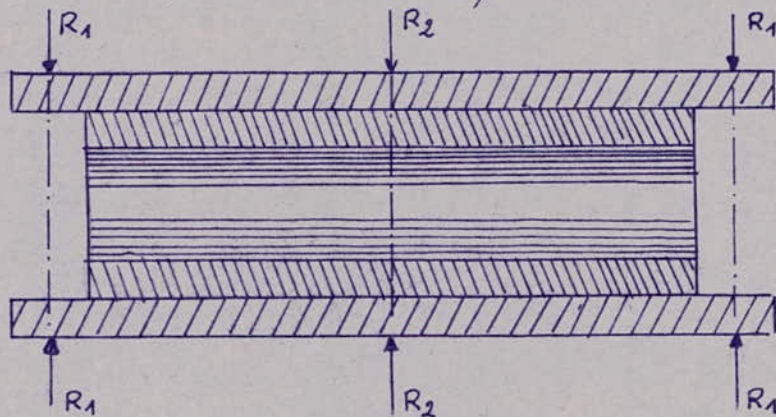


longueur de la poutre

$$l_p = 2 \cdot (l_{cc} + t_1 + 6) = 2 \cdot (31,72 + 11,94 + 6) = 99,32 \text{ cm}$$

- boulons de serrage et etrier :

la partie decouvrable du transformateur est presque suspendu au couvercle par des tirants. Les boulons seront soumis au poids de la partie decouvrable donc ils sont soumis à une flexion et en meme temps à un cisaillement. Ils sont aussi soumis à une force de traction exercée par les tôles serrées, donc les boulons doivent resister à ces efforts. On calcule cette resistance d'après le modèle suivant.



les forces R_1 et R_2 ont pour valeur :

$$R_1 = \frac{3}{16} P$$

$$R_1 = \frac{3}{16} (2 \cdot 390,8) = 448,275 \text{ kgf}$$

$$R_2 = \frac{5}{8} P$$

$$R_2 = \frac{5}{8} (2 \cdot 390,8) = 1494,25 \text{ kgf}$$

R_2 étant supérieur à R_1 , on voit que l'étrier placé au milieu est le plus sollicité

- Diamètre des boulons:

si les boulons sont réalisés en Acier A.48 avec une résistance de rupture de 4800 kgf/cm^2 et une contrainte admissible $\sigma_{at} = 1000 \text{ kgf/cm}^2$

$$d_1 = \sqrt{\frac{4R_1}{\pi \cdot \sigma_{at}}}$$

$$d_1 = \sqrt{\frac{4 \cdot 448,275}{\pi \cdot 1000}} = 0,75 \text{ cm}$$

les diamètres étant normalisés on choisit un diamètre $d_{arr} = 80 \text{ mm}$.

Diamètre des tirants :

afin d'assurer un réglage et un bon serrage mécanique on utilise 4 tirants (4 courts, 4 longs) reliés entre eux par des pièces de liaisons. Ils servent à relier la partie décuvable au couvercle et assurent la compression des bobinages en reliant les parties inférieures et supérieures des bobines, ils permettent aussi le soulèvement de la partie active. Le réglage se fera à l'aide des pièces de liaison obtenues par pliage.

- les tirants sont soumis à la traction et aux efforts provenant du poids suspendu (partie décuvable)

- calcul des diamètres des tirants :

On prend un tirant court à la limite il soulève la partie décuvable

- La relation est donnée par:

$$d_{tir} = \left[\frac{4 \cdot G_{decu}}{4\pi \cdot \sigma_{at}} \right]^{1/2}$$

$$G_{decu} = G_{eu} + G_{cm} + G_{poutres}$$

$$G_{eu} = 200,16 \text{ kgf}$$

$$G_{cm} = 564,11 \text{ kgf}$$

$$G_{pu} = 13,4 \text{ kgf/m}$$

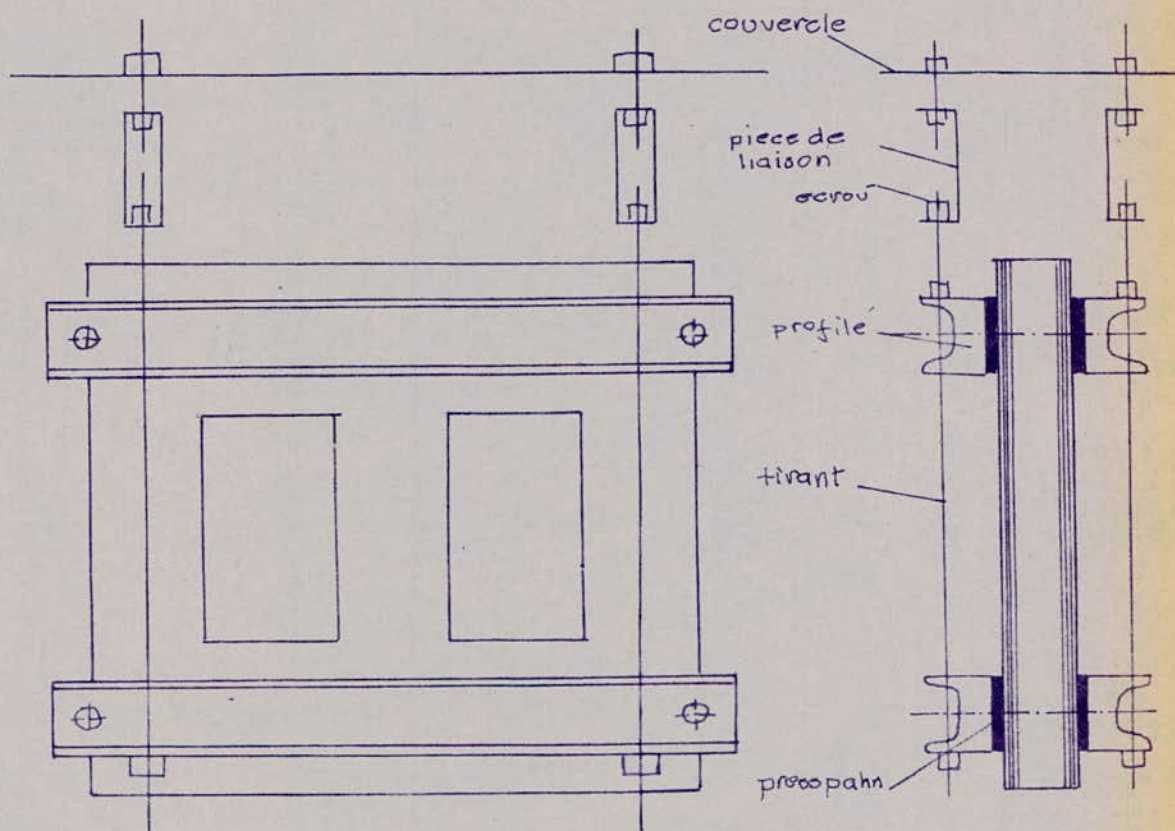
$$G_{poutres} = 4 \cdot L_p \cdot G_{pu}$$

$$G_{poutre} = 4 \cdot 0,99 \cdot 13,4 = 53,064 \text{ kgf}$$

$$G_{decu} = 200,16 + 564,11 + 53,064 = 817,33 \text{ kgf}$$

$$d \text{ tirants} = \left[\frac{4 \cdot 817,33}{4\pi \cdot 1000} \right]^{1/2} = 0,5 \text{ cm}$$

$$d \text{ tirant} = 5 \text{ mm}$$



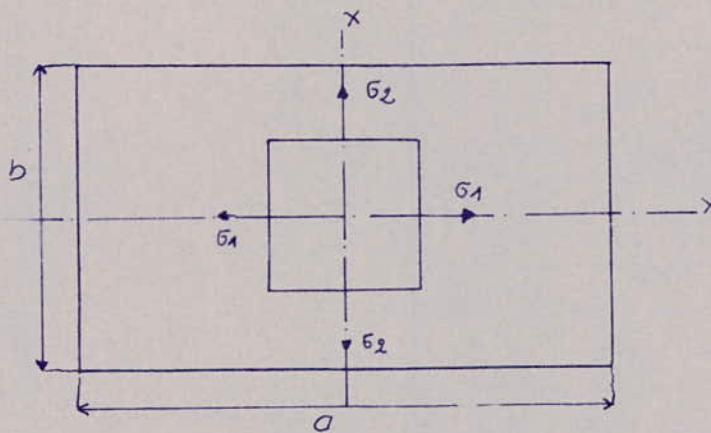
III-3 calcul mécanique de la cuve:

la cuve est réalisée avec des parois ondulées qui doivent résister à la pression exercée par l'huile.

Pour cela on prévoit des bandages, et une épaisseur suffisante pour les ondules.

la partie la plus sollicitée de la cuve est le fond, en effet il supporte le poids de l'huile et celui de la partie decuvable

Pour faire le calcul on considère le modèle suivant



la pression exercée sur la plaque est considérée comme uniforme. Cette pression est due au poids d'huile, de la partie decuvable, et du poids propre de la cuve.

- calcul de la fleche :

- surface du fond de la cuve.

$$s = A \cdot B = 101,56 \times 38,12 = 3.871,46 \text{ cm}^2$$

Poids propre du fond de la cuve:

$$\Delta f = 5 \text{ mm}$$

$$G_{\text{fer}} = \gamma_{\text{fer}} \cdot s \cdot \Delta f$$

$$G_{\text{fer}} = 7,65 \cdot 3.871,46 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} = 14,80 \text{ kgf}$$

force exercée sur le fond de la cuve

$$G_t = G_{\text{decu}} + G_h + G_f = 817,33 + 292,51 + 14,80 = 1.124,64 \text{ kgf}$$

Pression exercée sur le fond de la cuve

$$P_f = \frac{G_t}{S} \quad P_f = \frac{1\,124,64}{3\,871,46} = 0,29 \text{ kgf/cm}^2$$

la flèche au milieu de la plaque est donnée par

$$f_1 = \frac{\alpha \cdot P_f \cdot B^4}{E \cdot (\Delta f)^3} \quad \begin{array}{l} B: [\text{cm}] \quad P_f: [\text{kgf/cm}^2] \\ \Delta f: [\text{cm}] \quad f_1: [\text{cm}] \end{array}$$

E : module de young $E = 2,1 \cdot 10^6 \text{ kgf/cm}^2$

α est fonction du rapport A/B donnée par le tableau suivant

A/B	α	β_1	β_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

$$\frac{A}{B} = \frac{101,56}{38,12} = 2,66$$

$$\alpha = 0,0277$$

valeur de la flèche

$$f_1 = 0,0277 \frac{0,29 \cdot (38,12)^4}{2,10 \cdot 10^6 \cdot (0,5)^3} = 0,06 \text{ cm}$$

$$f_1 = 0,6 \text{ mm}$$

Poids du transformateur :

Poids du couvercle : $G_c = \delta_{\text{fer}} \cdot S_c \cdot \Delta c$; $G_c = 7,65 \cdot 3\,871,46 \cdot 0,6 \cdot 10^{-3} = 17,77 \text{ kgf}$

Poids des parois

$$G_p = \delta_{\text{fer}} \cdot S_{\text{parois}} \cdot \Delta_{\text{parois}}$$

$$S_{\text{parois}} = S_{c0} + (h_c - h_0) \times 2 (A+B)$$

$$S_{\text{parois}} = 14.4200 + (92,32 - 67,32) \times 2 (101,56 + 38,12) = 151.184 \text{ cm}^2$$

$$G_{\text{parois}} = 7,65 \times 151.184 \times 0,15 \cdot 10^{-3} = 173,483 \text{ kg}$$

Poids du transformateur :

$$G = G_t + G_c + G_p = 1124,64 + 17,77 + 173,483 = 1315,893 \text{ kgf}$$

On estime le poids du réservoir d'huile et autres accessoires électriques (relais, isolateur ---) et du dispositif de manutention..... à 200 kg

$$\text{Poids total du transformateur } G_t = 1315,89 + 200 = 1515,89 \text{ kg}$$

- Caractéristiques électriques du transformateur

- Rendement du transformateur:

Le rendement du transformateur, comme pour toutes les machines électriques est le quotient de la puissance fournie à la puissance absorbée

$$\eta(\%) = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100$$

P_2 : puissance fournie
 P_1 : puissance absorbée

$$P_1 = P_0 + P_2 + P_{Cu}$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_0 + P_{Cu}} \Rightarrow \eta(\%) = \left(1 - \frac{P_0 + P_{Cu}}{P_2 + P_0 + P_{Cu}} \right) \cdot 100$$

avec $P_{Cu} = RI^2 = R I_{cc}^2 \left(\frac{I}{I_{cc}} \right)^2$ on pose $\alpha = \frac{I}{I_{cc}}$

α : coefficient de charge:

$$R I_{cc}^2 = P_K \quad \text{d'où} \quad P_{Cu} = \alpha^2 P_K. \quad P_2 = (S_n \cos \varphi) \cdot \alpha$$

on aura donc le rendement qui s'exprime par

$$\eta(\%) = \left(1 - \frac{P_0 + \alpha^2 P_K}{(S_n \cos \varphi) \alpha + P_0 + \alpha^2 P_K} \right) \cdot 100$$

Le rendement est maximal c'est à dire égal à 1 lorsque

$$\text{la quantité } \frac{P_0 + \alpha^2 P_K}{(S_n \cos \varphi) \alpha + P_0 + \alpha^2 P_K} = 0 \Rightarrow P_0 = \alpha^2 P_K$$

c'est à dire les pertes joules sont égales aux pertes à vide.

- de cette relation on tire le coefficient de charge α

$$\alpha = \left[\frac{P_0}{P_K} \right]^{1/2} = \left[\frac{0,793 \text{ kW}}{4,173 \text{ kW}} \right]^{1/2} = 0,43 \quad \alpha = 0,43$$

On déterminera les caractéristiques du rendement en fonction de la charge

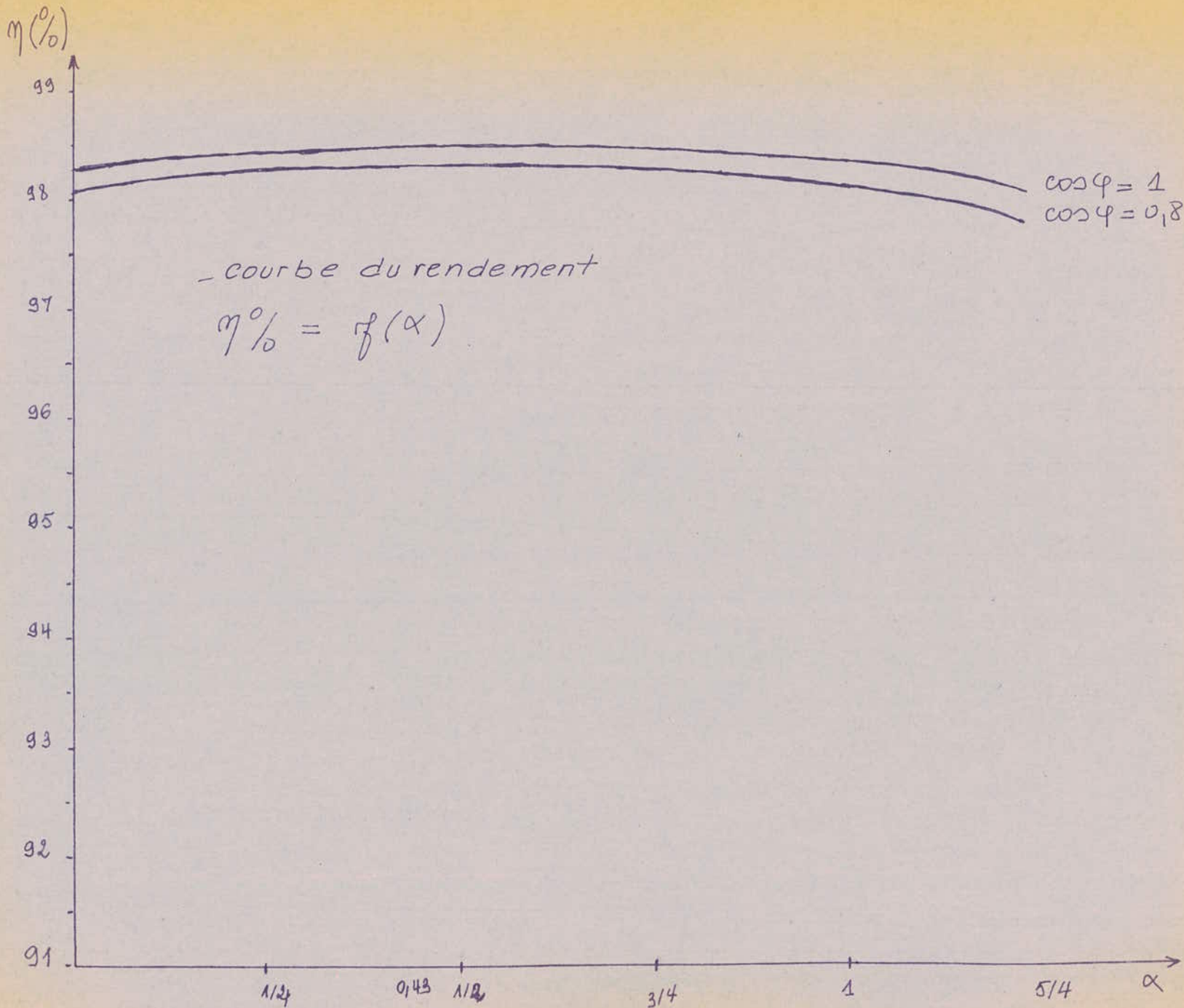
- charge resistive $\cos \varphi = 1$

$$\alpha = 0,43$$

α	$\alpha^2 P_k$	$P_0 + \alpha^2 P_k$	$\alpha S_n \cos \varphi$	$\alpha S_n \cos \varphi + P_0 + \alpha^2 P_k$	$\eta(\%)$
1/4	0,26	1,05	78,75	79,8	98,68
0,43	0,77	1,56	135,45	137,01	98,86
1/2	1,04	1,83	157,5	159,33	98,85
3/4	2,34	3,13	236,25	239,38	98,69
1	4,173	4,96	315	319,96	98,44
5/4	6,52	7,31	393,75	401,06	98,17

- $\cos \varphi = 0,8$

α	$\alpha^2 P_k$	$P_0 + \alpha^2 P_k$	$\alpha S_n \cos \varphi$	$\alpha S_n \cos \varphi + P_0 + \alpha^2 P_k$	$\eta(\%)$
1/4	0,26	1,05	63	64,05	98,36
0,43	0,77	1,56	108,36	109,92	98,56
1/2	1,04	1,83	126	127,83	98,56
3/4	2,34	3,13	189	192,13	98,37
1	4,173	4,96	252	256,96	98,06
5/4	6,52	7,31	315	322,31	97,73



Variation de la tension secondaire en fonction de la charge :

Puissance de la charge $P_{ch} = \sqrt{3} U_2 I_2 \cos \varphi_2$; $S_n = \sqrt{3} U_{2n} I_{2n}$

On définit la charge par le rapport suivant $\alpha = \frac{P_{ch}}{S_n}$

$$\alpha = \frac{U_2 \cdot I_2 \cdot \sqrt{3} \cos \varphi_2}{U_{2n} I_{2n} \sqrt{3}} = \frac{U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2}{U_{2n} I_{2n}}$$

la chute de tension étant définie par : $\Delta U = \frac{U_{2n} - U}{U_{2n}} \cdot 100$

$$\text{ou } \Delta U\% = \frac{U'_{2n} - U'_2}{U'_{2n}} \cdot 100$$

U_2 : tension secondaire pour une charge donnée et un facteur de puissance donné.

U_{2n} : tension secondaire nominale

U'_2 et U'_{2n} : sont des tensions secondaires ramenées au primaire

$$U'_{2n} = U_{1n} \quad \text{et} \quad \Delta U' = U_1 - U'_2$$

avec les valeurs ramenées $\Delta U\% = \frac{U_{1n} - U'_2}{U_{1n}} \cdot 100$

- On peut approximer cette chute de tension par

$$\Delta U\% = \alpha (U_{ka}\% \cos \varphi_2 + U_{kr}\% \sin \varphi_2)$$

U_{ka} : chute de tension active

$$U_{ka} = 1,23$$

U_{kr} : chute de tension réactive

$$U_{kr} = 3,93$$

- Nous déterminerons cette chute pour différentes charges

- Pour une charge résistive $\cos \varphi_2 = 1$ $\sin \varphi_2 = 0$

$$\Delta U = \alpha (U_{ka}) = 1,23 \alpha$$

- Pour une charge capacitive $\cos \varphi_2 = 0,8$ $\sin \varphi_2 = -0,6$

$$\Delta U = \alpha (U_{ka} \cos \varphi_2 + U_{kr} \sin \varphi_2) \Rightarrow \Delta U = \alpha (1,23 \cdot 0,8 - 3,93 \cdot 0,6) = -1,37 \alpha$$

- Pour une charge inductive $\cos \varphi_2 = 0,8$ $\sin \varphi_2 = 0,6$

$$\Delta U = \alpha (1,23 \cdot 0,8 + 3,93 \cdot 0,6) = 3,34 \alpha \quad \Delta U = 3,34 \alpha$$

Pour une charge resistive $\Delta U = 1,23 \alpha$

α	$\Delta U\%$	$\Delta U'(V)$	$U_2'(V)$	$U_2(V)$	U_2/U_{2n}	I_2/I_{2n}	$I_2(A)$
1/4	0,307	30,7	9969,3	398,8	0,997	0,25	113,66
0,43	0,528	52,8	9947,2	397,92	0,994	0,43	195,49
1/2	0,615	61,5	9938,5	397,52	0,993	0,503	228,68
3/4	0,922	92,2	9907,8	396,31	0,990	0,75	340,98
1	1,23	123	9877	395,08	0,9877	1,01	459,18
5/4	1,53	153	9847	393,88	0,984	1,27	577,39

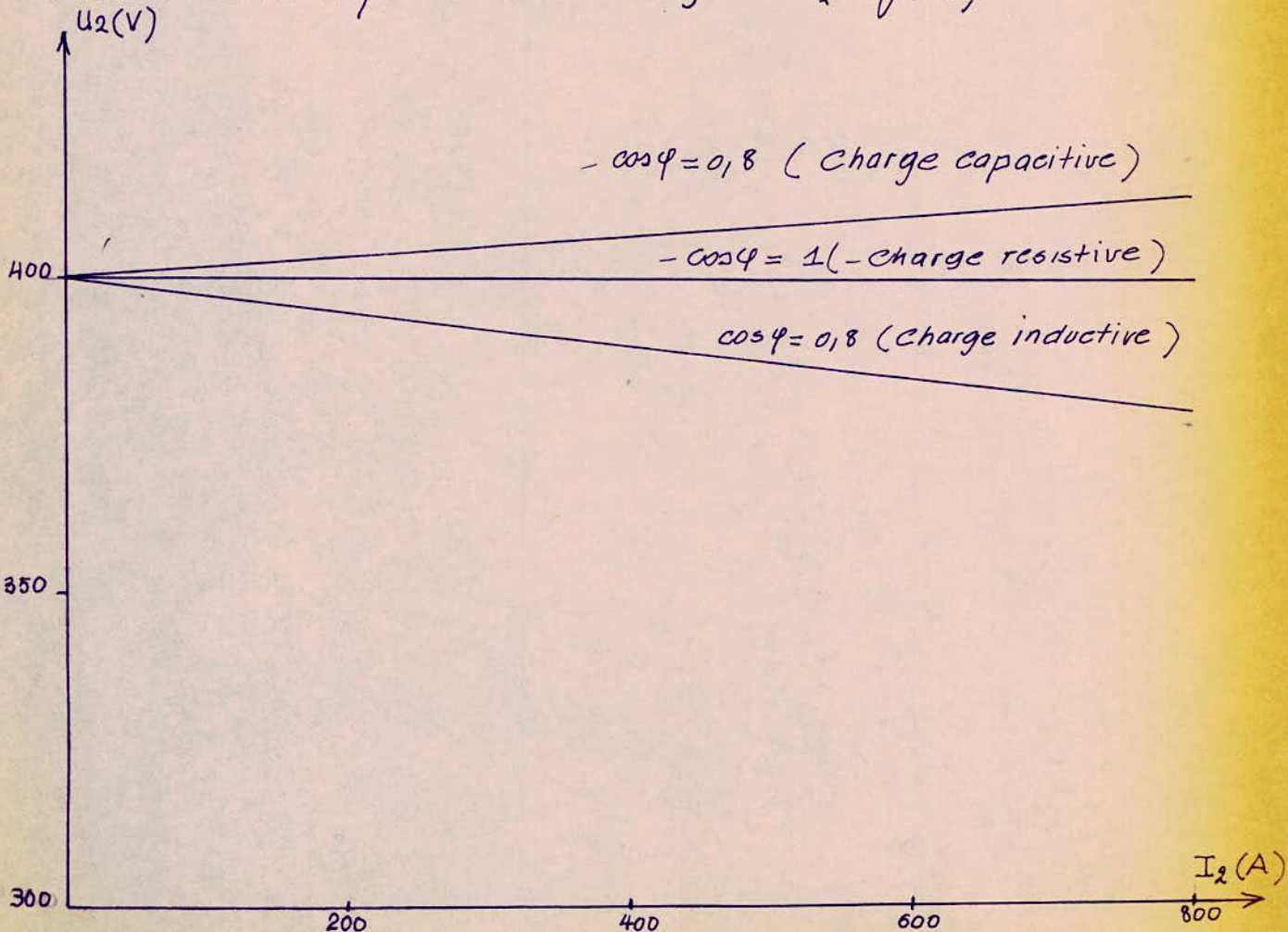
- Charge capacitive $\cos \varphi = 0,8$; $\sin \varphi = -0,6$ $\Delta U = -1,37 \alpha$

α	$\Delta U(\%)$	$\Delta U'(V)$	$U_2'(V)$	$U_2(V)$	U_2/U_{2n}	I_2/I_{2n}	$I_2(A)$
1/4	-0,34	-34	10.034	401,36	1,003	0,311	141,39
0,43	-0,58	-58	10.058	402,32	1,005	0,534	242,77
1/2	-0,68	-68	10.068	402,72	1,006	0,621	282,33
3/4	-1,02	-102	10.102	404,08	1,010	0,928	421,90
1	-1,37	-137	10.137	405,48	1,013	1,233	560,57
5/4	-1,71	-171	10.171	406,84	1,017	1,536	698,32

charge inductive $\cos\varphi = 0,8$ $\sin\varphi = 0,6$ $\Delta U = 3,34\alpha$

α	$\Delta U\%$	$\Delta U' (V)$	$U_2' (V)$	$U_2 (V)$	U_2/U_{2n}	I_2/I_{2n}	$I_2 (A)$
1/4	0,84	84	9916	396,64	0,991	0,315	143,21
0,43	1,44	144	9856	394,24	0,985	0,545	247,77
0,5	1,67	167	9833	393,32	0,983	0,635	288,69
0,75	2,50	250	9750	390	0,975	0,961	436,90
1	3,34	334	9666	386,64	0,966	1,29	586,48
5/4	4,18	418	9582	383,28	0,958	1,63	741,06

- Caracteristiques en charge $U_2 = f(I_2)$



IV.2. ETUDE TECHNOLOGIQUE

Dans cette partie on essayera de donner un aperçu sur le montage et la réalisation

- circuit magnétique : - sa fonction principale est de canaliser le flux magnétique par l'enroulement primaire afin qu'il ait un trajet minimal et un facteur de couplage maximal avec l'enroulement secondaire.

Les circuits magnétiques doivent remplir un certain nombre de conditions afin de réaliser leur fonction principale. On peut citer

- Encombrement réduit, donc choix des matériaux avec de très bonnes caractéristiques magnétiques

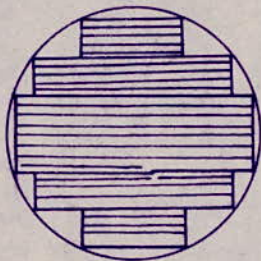
- Pertes réduites ; afin de réduire l'échauffement du circuit magnétique.

- le circuit magnétique doit produire un bruit réduit. Le bruit étant dû aux forces magnétiques alternatives qui apparaissent lors du passage du flux, donc la réduction du bruit entraîne une réduction de l'induction.

On voit que quelques unes des conditions à remplir sont - contradictoires.

- constitution :

Il comporte trois colonnes réunies par deux culasses. Les colonnes portent les enroulements et sont disposées verticalement à cause du fait que les enroulements ont une forme cylindrique droite. Dans notre cas les colonnes ont une section à gradins.

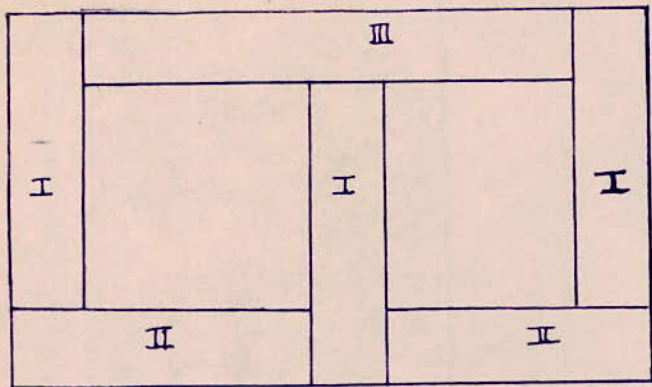


Les tôles sont livrées sous forme de rouleaux isolées de 0,35 mm d'épaisseur. On doit les découper en tôles rectangulaire.

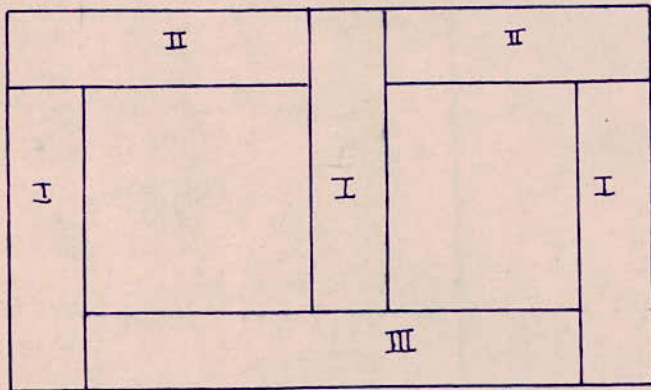
Pour une économie de main-d'œuvre et afin d'éviter que les tôles soient trop manipulées (risque de froissement etc....) on réalise l'assemblage par paquets.

Culasses : Elles ont pour rôle d'assurer la liaison magnétique entre les colonnes, On peut réaliser cette liaison par enchevêtrement

les opérations de réalisation des culasses et noyaux sont faites simultanément, La culasse supérieure doit être enlevée pour permettre la mise en place des enroulements.



Couches 1-3-5

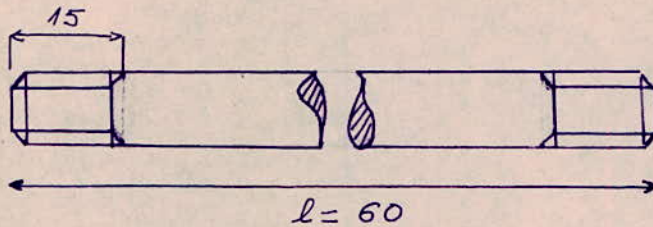
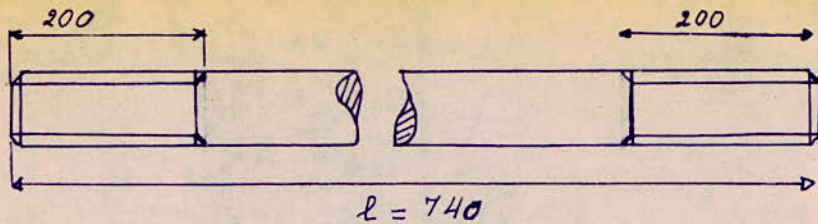


Couches 2-4-6

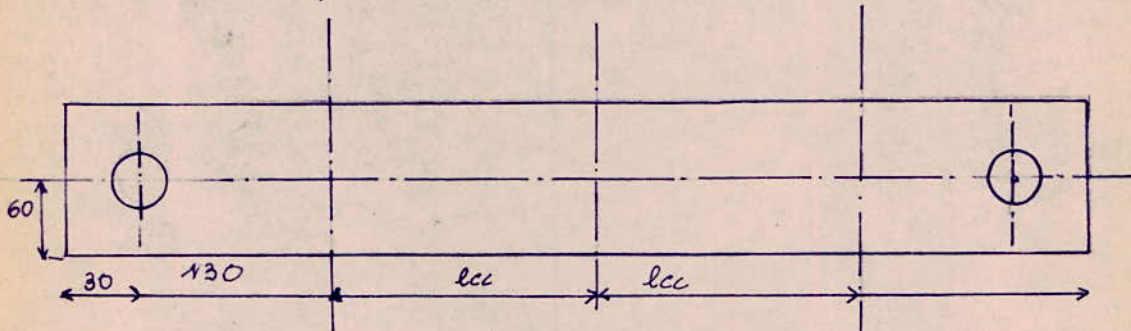
La méthode d'enchevêtrement complique le montage, elle exige après montage, le démontage de la culasse supérieure, mais elle est meilleure du point de vue magnétique et stabilité.

- serrage du circuit magnétique : afin de réduire les entrefers et diminuer le bruit le circuit magnétique doit former un ensemble très rigide. Par un bon serrage, on arrive à faire occuper au circuit magnétique un volume minimal. Dans notre cas le serrage est composée de l'ensemble suivant 8 tirants (4 longs, 4 courts, 4 boulons, 2 étriers), 4 profilés en U et 4 pièces de liaison.

les tirants : ils sont sous forme de barres cylindriques filetées aux extrémités, ils sont en Acier A.48

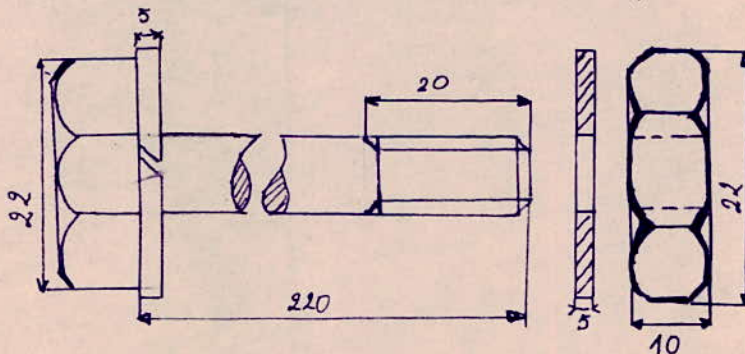


Profiles en U: - ils sont en Acier A.33 et normalises selon les contraintes
- auxquelles ils sont soumis.



On percera 2 trous de $\phi 8$ mm au centre on place un etrier

boulons;

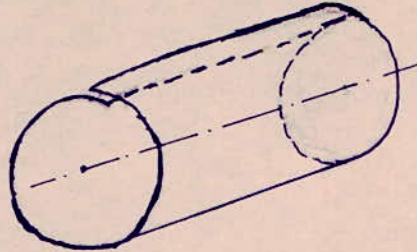


Montage du circuit magnetique:

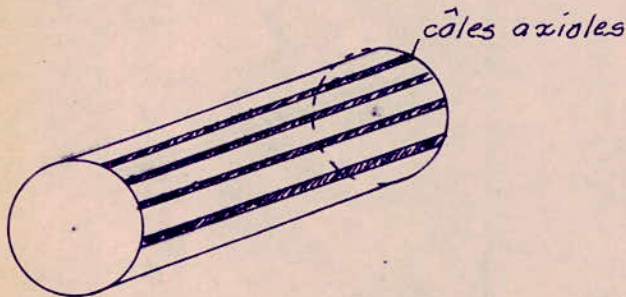
1. assemblage des tôles
2. Montage de l'ensemble (Profile, plaque isolante, boulons de serrage....)
3. serrer les boulons et les tirants
4. faire un dessechage a 80°C pendant 48h.
5. stocker a l'abri de toute humidite.

les enroulements

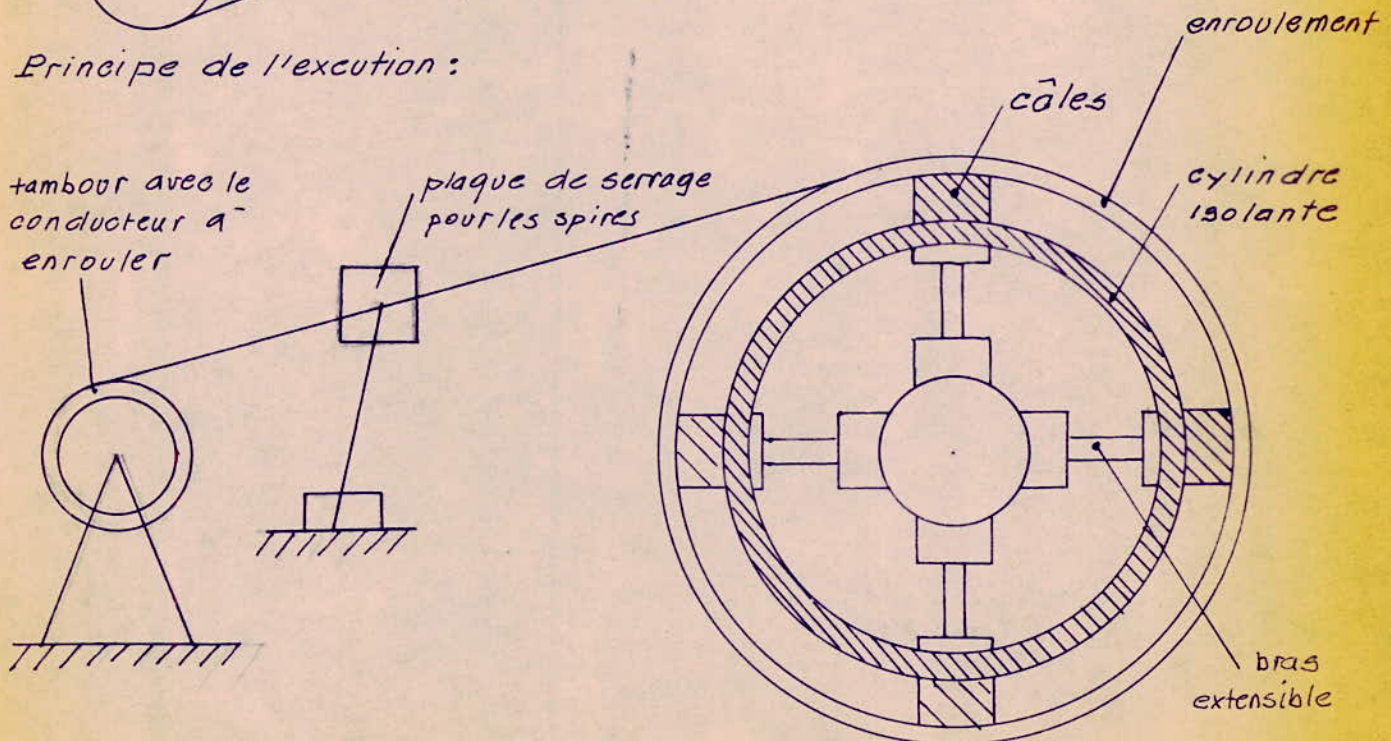
- Execution des bobines : les bobines sont réalisées sur des cylindres isolants. Donc il faut concevoir le cylindre, Pour cela les feuilles livrées en rouleaux, on les découpe puis on les passe entre plusieurs rouleaux afin de les incurver ensuite on les colle.



une fois le cylindre est fait on colle les câbles axiaux

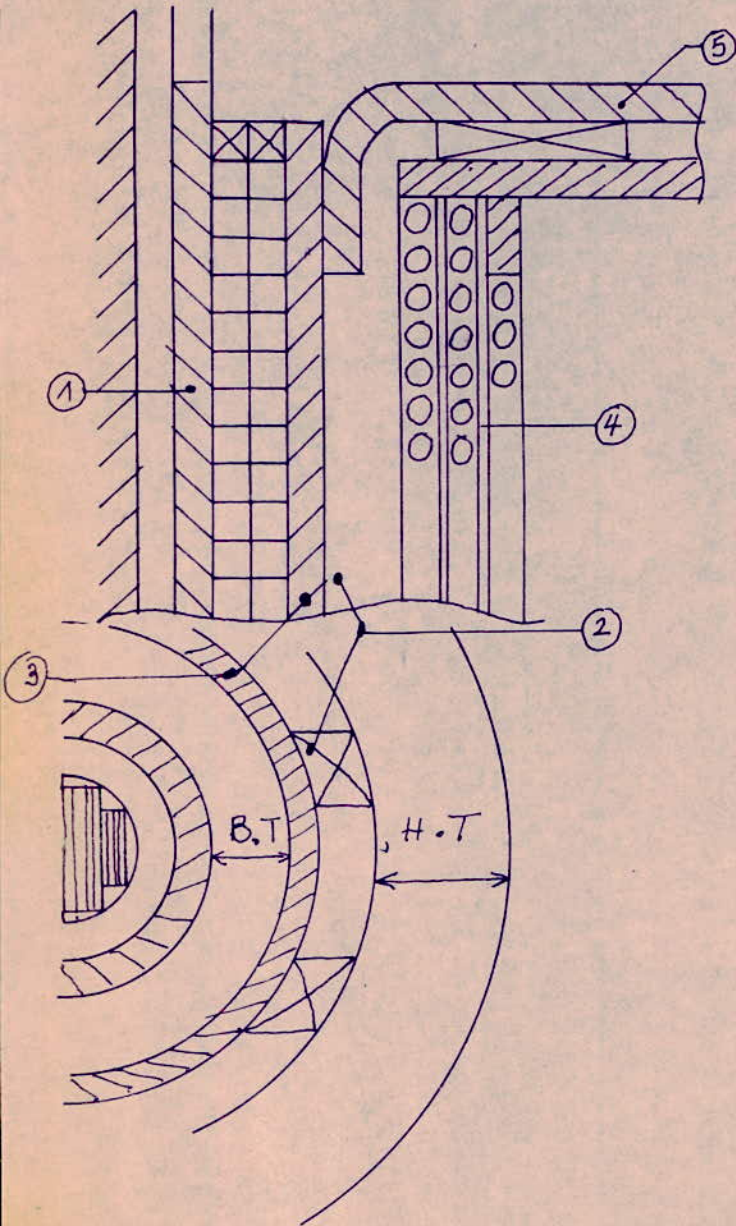


Principe de l'exécution :



On monte le mandrin à bras extensible sur un tour dont la vitesse est lente. Après l'enroulement du conducteur la bobine est retirée du mandrin, on la passe dans une presse spéciale, ensuite on la sèche, et on la monte sur la colonne.

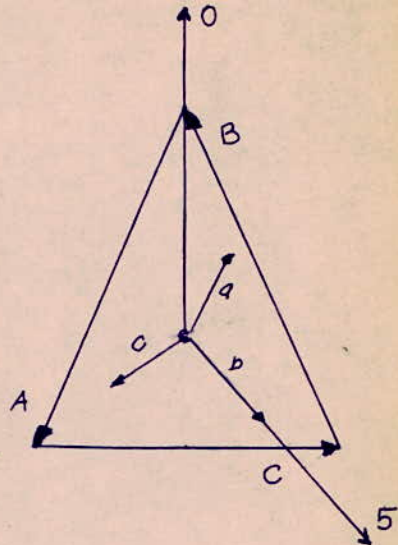
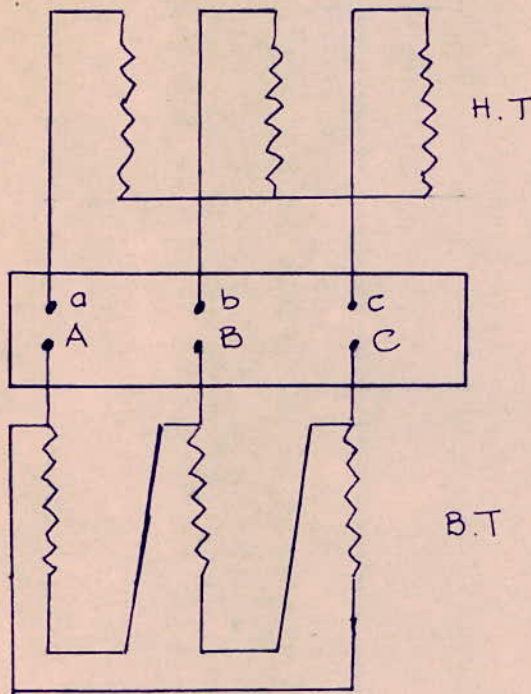
Représentation de la bobine :



- ① tube isolant en presspahn
- ② câbles
- ③ tube écran en papier bakelise
- ④ feuilles de papier
- ⑤ cornieres en presspahn

couplage :

on appelle couplage la connexion des deux enroulements dans l'ordre H.T - B.T. Dans notre cas le couplage est $\Delta Y_0 5$



Appareils auxilliaires

Ce sont des appareils qui assurent la manutention, la protection, ainsi que le réglage du transformateur

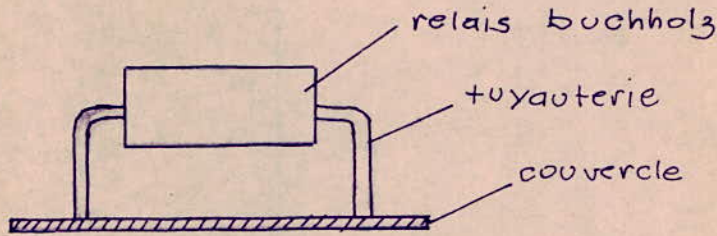
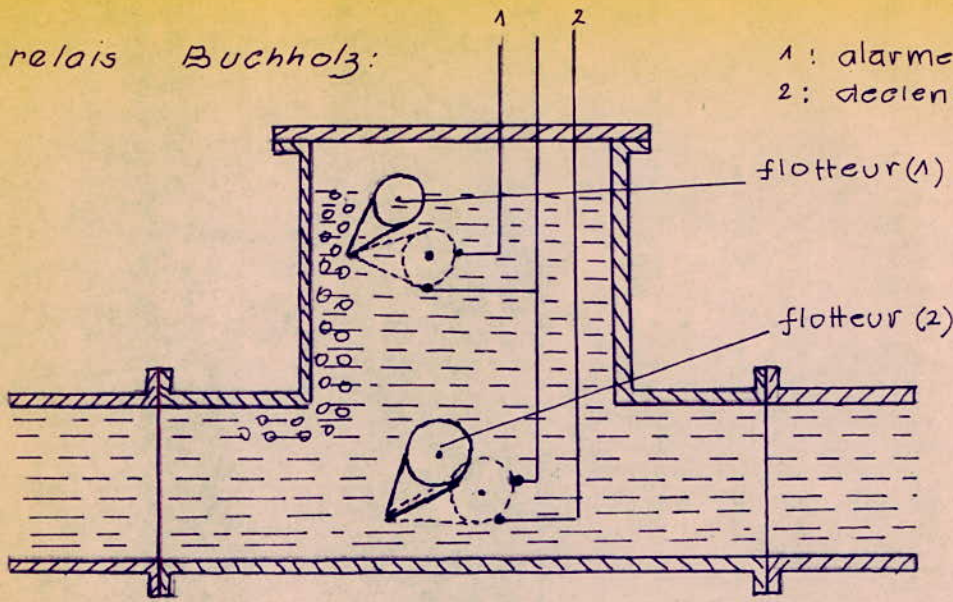
Protection : Relais BUCHHOLZ :

son principe est basé sur la détection des gaz. En cas de défaut (court-circuit entre spire, mise à la masse etc...) le courant augmente la quantité de chaleur produite par les enroulements augmente, il y aura un dégagement de bulles. Ces bulles vont s'accumuler au niveau du flotteur (1) qui met le contact du circuit d'alarme en marche.

En cas d'incident grave, le dégagement sera important il y aura expulsion de l'huile (sous l'action de la pression) ou bien en cas de coup de foudre, la vitesse d'huile augmente brusquement le flotteur (2) entre en action et ferme le contact relie au disjoncteur.

relais Buchholz:

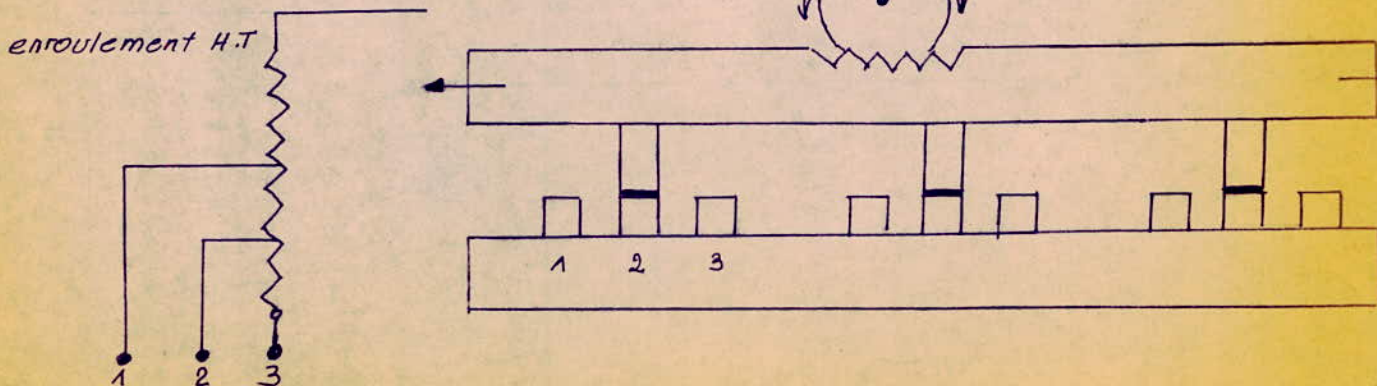
1 : alarme
2 : declenchement.



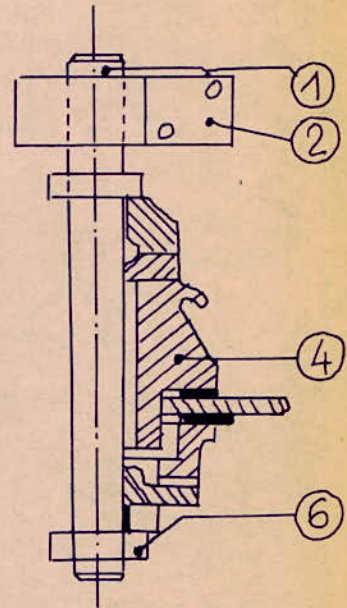
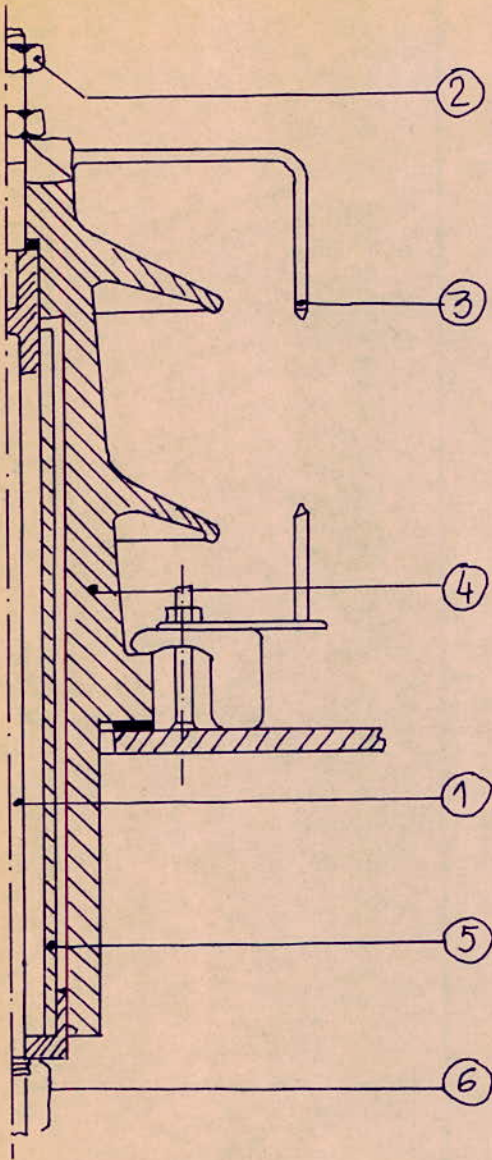
reglage de la tension :

L'enroulement haute tension porte d'habitude les prises de reglage, dont le but est de compenser les variations de tension du reseau.

Le reglage se fait par addition ou soustraction de spires. Pour la basse-tension le nb de spires etant faible on ne pourrait pas faire varier le rapport dans la proportion necessaire.



TRAVERSEES ISOLANTES



① conducteur en cuivre

③ eclateurs

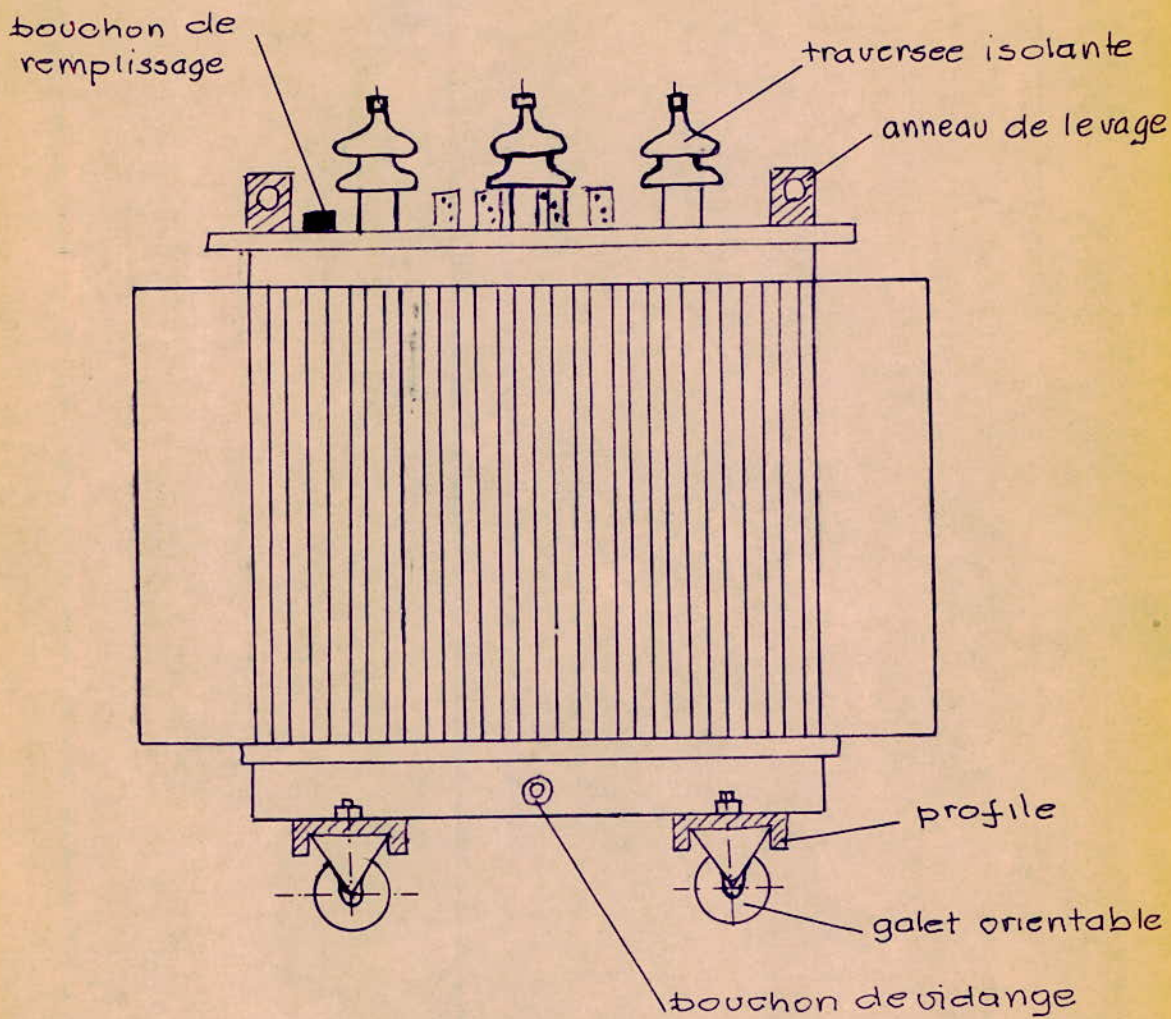
⑤ condensateur

② Pieces de connexion

④ corps isolant (porcelaine)

⑥ Pieces de connexion

Dispositifs de manutention



CONCLUSION

Comme dans toute entreprise industrielle, la construction d'une machine doit répondre aux besoins et aux exigences de la clientèle.

Pour le constructeur, son but est de réaliser la machine avec de bonnes performances à un prix de revient le plus bas possible. Donc l'ingénieur constructeur sera soumis à une contrainte économique, lorsque celle-ci n'est pas d'ordre technique. Les conditions réelles de travail de la machine doivent être connues, pour permettre un choix optimal des paramètres et une exploitation maximale. Dans notre cas si on compare les résultats trouvés à ceux du cahier de charges, ceux-ci restent dans les limites imposées par les normes.

Pour terminer je dirai que ce projet m'a permis de m'initier aux problèmes que rencontre l'ingénieur constructeur et de comprendre que le travail de celui-ci n'est jamais terminé.

BIBLIOGRAPHIE

- 1. Notes de cours de construction des machines électriques dispensé par M^r PARLOG
- 2. LIXISCHITZ : calcul des machines électriques tome I et II
- 3. Revue générale de l'électricité (74)
- 4. M. KOSTENKO machine électrique tome 1.
- 5. Normes françaises:
 - N.F.C 52. 100 transformateurs électriques de puissance
 - N.F.C 52. 112 transformateurs électriques
 - N.F.C 27. 10A. Huiles minérales isolantes
 - N.F.C 28. 920. tôles magnétiques laminées à froid