

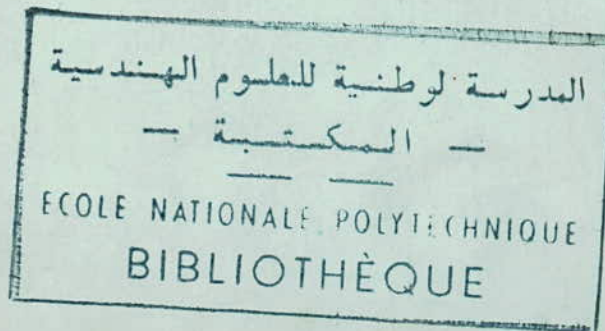
PROJET DE FIN D'ETUDES



CONSTRUCTION D'UN TRANSFORMATEUR

5000 kva 35/5 kv

2 PLANCHES



Proposé Par :

V. STIRBU

Etudié Par :

Z. CHENAH

Promotion : 1978

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

“ وَقُلْ رَبِّي نَزَدَنِي عِلْمًا ”

صدق الله العظيم

Remerciements

Je tiens à remercier monsieur V. STIRBU, professeur à l'E.N.P d'une part d'avoir accepté de diriger ce travail et d'autre part de l'avoir dirigé d'une manière consciencieuse

Qu'il me soit aussi permis d'exprimer mes remerciements à tous ceux qui ont contribué à ma formation.

— o o —

(2)

Cahier des charges

Puissance apparente nominale	$S_n = 5000 \text{ KVA}$
Fréquence	$f = 50 \text{ Hz}$
nombre de phase	$m = 3$
Mode de couplage	Dy
Tension nominale primaire	$U_{1n} = 35 \text{ KV}$
Tension nominale secondaire	$U_{2n} = 5 \text{ KV}$
Pertes à vide	$P_0 = 0,32\%$
Pertes dues à la charge	$P_K = 0,83\%$
Courant à vide	$I_0 = 2\%$
Tension de court-circuit	$u_K = 7\%$
Prise de réglage $\pm 5\%$ sur côté H.T	

Plan d'étude

- Chapitre I : Généralités et grandeurs nominales
- Chapitre II : Calcul des dimensions de la colonne du circuit magnétique
- Chapitre III : Calcul des enroulements
- Chapitre IV : Suite du dimensionnement du circuit magnétique
- Chapitre V : Etude du rendement et des chutes de tension
- Chapitre VI : Vérification des données du cahier des charges
- Chapitre VII : Calcul mécanique
- Chapitre VIII : Calcul thermique
- Chapitre IX : Complément.

(4)

Introduction.

L'énergie électrique présente plusieurs avantages entre autre la non pollution, raison pour laquelle cette forme d'énergie ne cesse de se développer et à s'étendre à de nombreux domaines.

Elle est généralement produite en basse tension en des points éloignés des lieux d'utilisation, transportée sous tension élevée pour être utilisée sous une autre tension. D'où l'intérêt considérable d'un transformateur qui permet de relier entre eux des circuits à des tensions différentes. C'est grâce à cet appareil qu'il a été possible de constituer des réseaux de grande interconnexion.

I - Généralités et grandeurs nominales

A. Généralités

Description du transformateur

Le transformateur se compose de 3 parties principales

- le circuit magnétique
- les enroulements
- les éléments de refroidissement

Rôle et construction de ces parties

a - le circuit magnétique

Le circuit magnétique est formé par les colonnes et les culasses. Sa fonction principale est de canaliser le flux magnétique produit par l'enroulement primaire. Certaines conditions sont imposées dans la construction

- Réduction de l'encombrement et des pertes

Le choix de la qualité d'acier avec une bonne caractéristique magnétique permet d'avoir une induction élevée pour réduire la section de fer de la colonne (et parallèlement le périmètre des spires qui l'entourent). Donc de réaliser un appareil moins volumineux et plus économique.

Mais les pertes dans le fer augmentent avec l'induction. L'augmentation des pertes diminue le rendement. C'est un inconvénient pour l'exploitation.

de la machine

C'est grâce aux toles laminées à froid (dites aussi à grains orientés) que des inductions élevées sont atteintes avec des pertes dans le fer non excessives et un courant à vide modéré.

Dans le circuit magnétique apparaissent des courants parasites dits courants de Foucault qui sont des courants induits dus au flux variable.

Leur forme est en général très compliquée et ils sont nuisibles car non seulement les pertes d'énergie qu'ils causent entraînent une diminution du rendement mais aussi provoquent parfois un échauffement dangereux des pièces dans lesquelles ils se produisent. Pour réduire l'effet de ce phénomène les précautions suivantes sont prises :

- Feuilletage du circuit magnétique

Le circuit magnétique n'est pas massif c'est à dire formé d'une seule pièce métallique, il est formé d'empilages de toles d'épaisseur très réduite et isolées entre elles. Les toles feuilletées sont disposées dans des plans parallèles aux lignes d'induction.

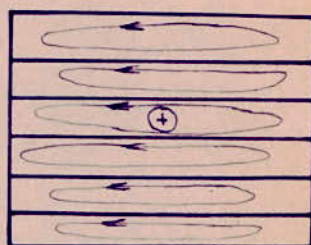
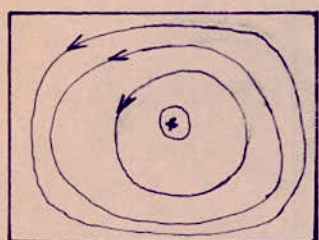
- Addition de silicium à l'acier

L'addition de silicium augmente la résistance

(7)

électrique de l'acier donc diminue les courants de Foucault. De la même façon le silicium réduit le vieillissement de l'acier qui se manifeste par l'accroissement des pertes dans l'acier.

C'est ainsi que sont réduits l'importance et le parcours des courants de Foucault engendrés dans des plans perpendiculaires au flux.



courants de Foucault

- Préparation des tôles

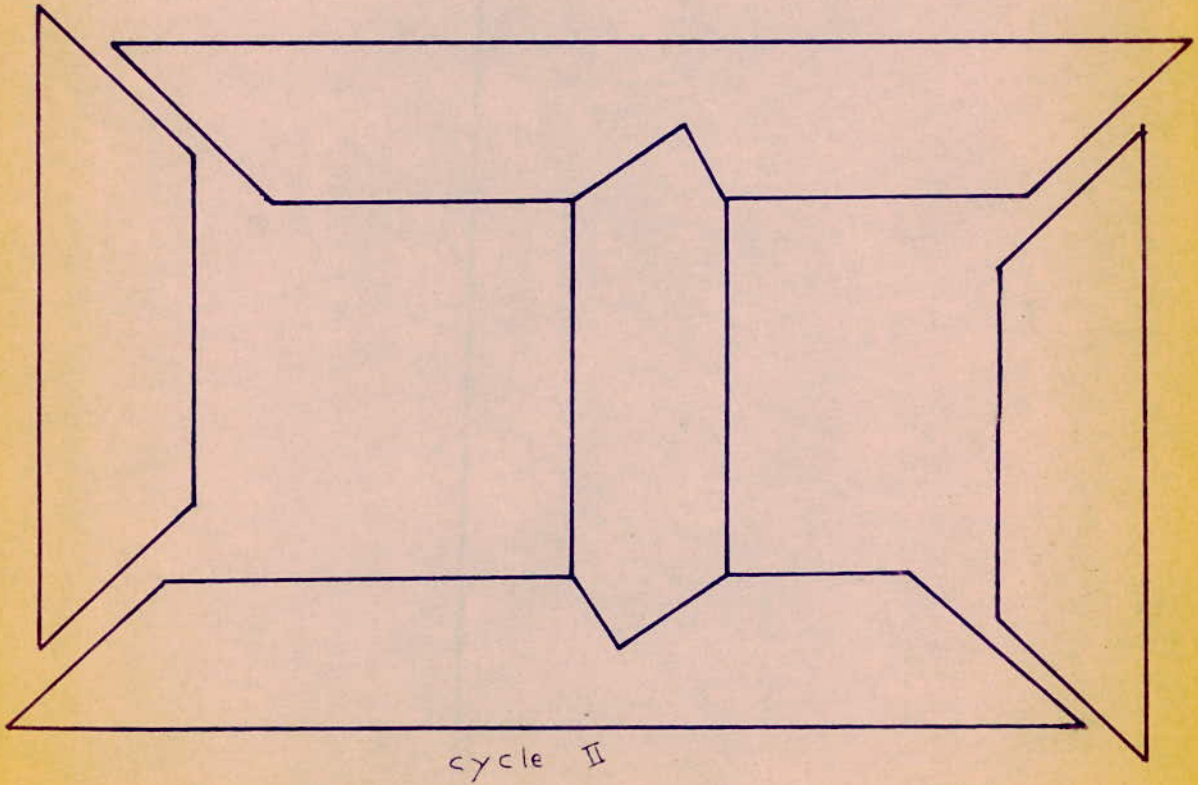
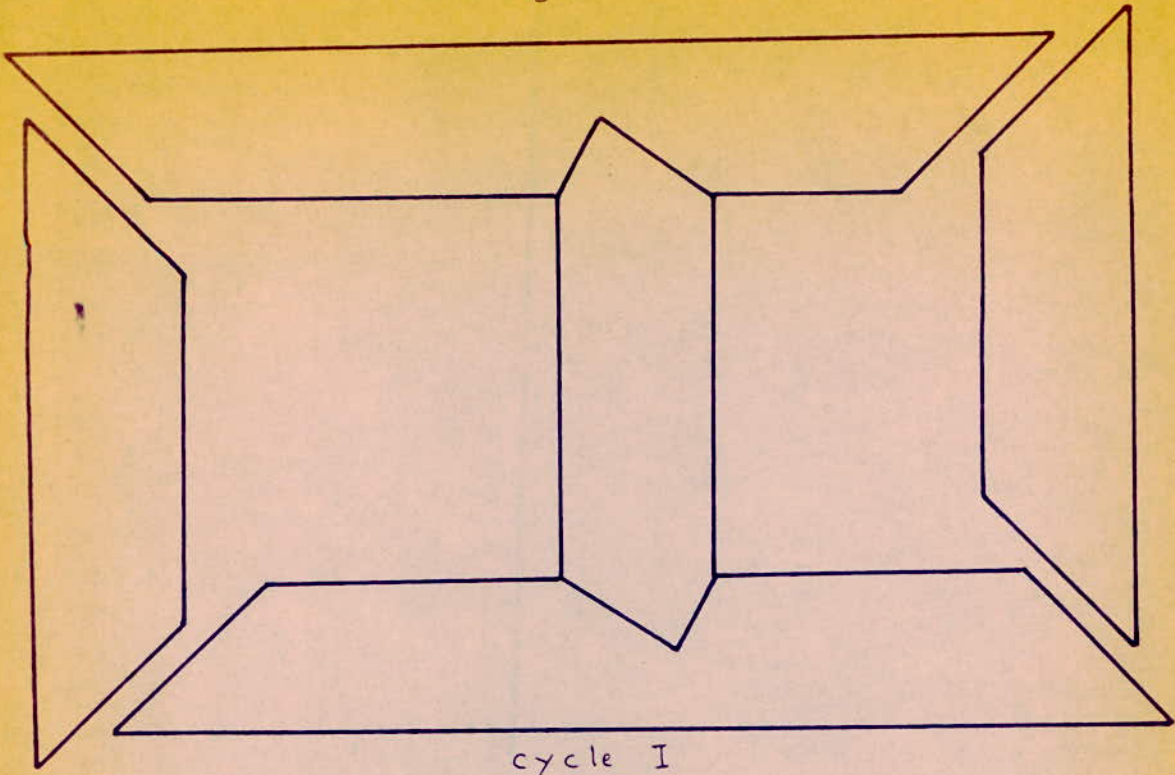
L'écrouissage à froid lors du laminage augmente les pertes magnétiques. L'influence de l'écrouissage peut se manifester également lors du découpage des tôles.

Après le laminage, afin de détruire l'influence de l'écrouissage l'acier magnétique est recuit à la température de 800°C dans une ambiance d'hydrogène pour éviter l'oxydation.

Les tôles préparées sont assemblées par enchevêtrement à 45° selon 2 cycles différents afin de réduire la saturation locale (dans les zones d'enchevêtrement) des tôles.

⑧

Assemblage des tôles



b. Les enroulements

Par l'intermédiaire du phénomène d'induction électromagnétique ils assurent le transfert de puissance entre l'enroulement primaire et l'enroulement secondaire.

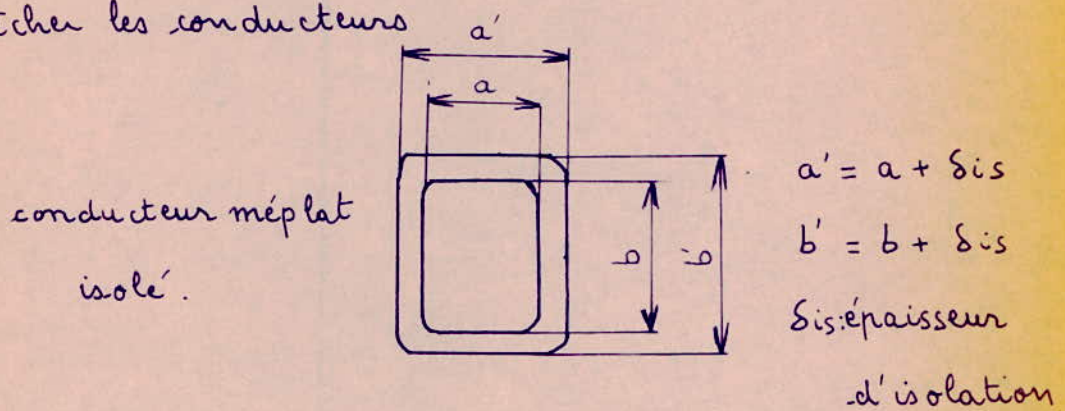
Ils sont disposés sur chaque colonne. Dans la disposition concentrique comme c'est le cas l'enroulement H.T entoure l'enroulement B.T qui entoure la colonne. Ceci est fait pour réduire l'isolation par rapport au circuit magnétique.

Les enroulements sont réalisés avec un bon conducteur d'électricité par exemple le cuivre.

Quand la section du conducteur est importante (supérieure à 6 mm^2) l'utilisation d'un ou de plusieurs conducteurs élémentaires méplats en parallèle (chacun de section inférieure à 60 ou 50 mm^2) est nécessaire afin de réduire la majoration des pertes supplémentaires dues à l'effet de peau. Cet effet est caractérisé par la non uniformité de répartition de courant dans le conducteur ce qui se manifeste extérieurement par une augmentation de la résistance du conducteur donc une augmentation des pertes dans le cuivre.

Tous les conducteurs sont isolés avec du papier pour

éviter tout contact entre conducteur élémentaire en parallèle et le court-circuit entre les spires voisines. Pour ne pas détériorer les qualités diélectriques des isolants l'échauffement de l'enroulement ne doit pas être excessif. Pour cela et selon le type de l'enroulement on laisse des canaux de refroidissement radiaux ou axiaux ou les 2 en même temps pour permettre à l'agent de refroidissement de lécher les conducteurs



c. Les éléments de refroidissement

Ils sont constitués par l'huile agent de refroidissement et la cuve qui le contient. Les éléments évacuent la chaleur produite dans le transformateur vers l'extérieur (air ambiant). La plus grande partie de cette chaleur est due aux pertes d'énergie dans les matériaux actifs c'est à dire dans le cuivre des enroulements et dans le fer du circuit magnétique. Une autre partie plus petite est produite dans les

parties constructives telles les diverses pièces mécaniques pour les supports et les serrages.

Par conséquent on doit garantir non seulement une bonne conductivité thermique des matériaux employés mais encore une transmission efficace de la chaleur pour éviter un échauffement excessif.

Le liquide de refroidissement couramment employé est une huile minérale dite huile pour transformateur. Elle est obtenue par distillation du pétrole brute et elle possède les caractéristiques suivantes :

- . Poids spécifique : $0,9 \text{ kgf/dm}^3$
- . Rigidité diélectrique : 100 KV/cm
- . température de congélation : -35°C
- . température d'inflammation : vers 140°C .

(au minimum 137°C) c'est l'inconvénient majeur de l'huile.

L'huile échauffée se dilate et sous l'effet de la température, au contact de l'air, elle s'oxyde et se décompose en formant des dépôts au fond de la cuve. L'huile absorbe facilement l'humidité de l'air ce qui réduit fortement ses propriétés diélectriques.

Pour réduire l'action nuisible de l'air, et permettre l'expansion de l'huile, quand elle se dilate, la cuve est reliée à un réservoir (appelé conservateur d'huile) placé plus haut qu'elle.

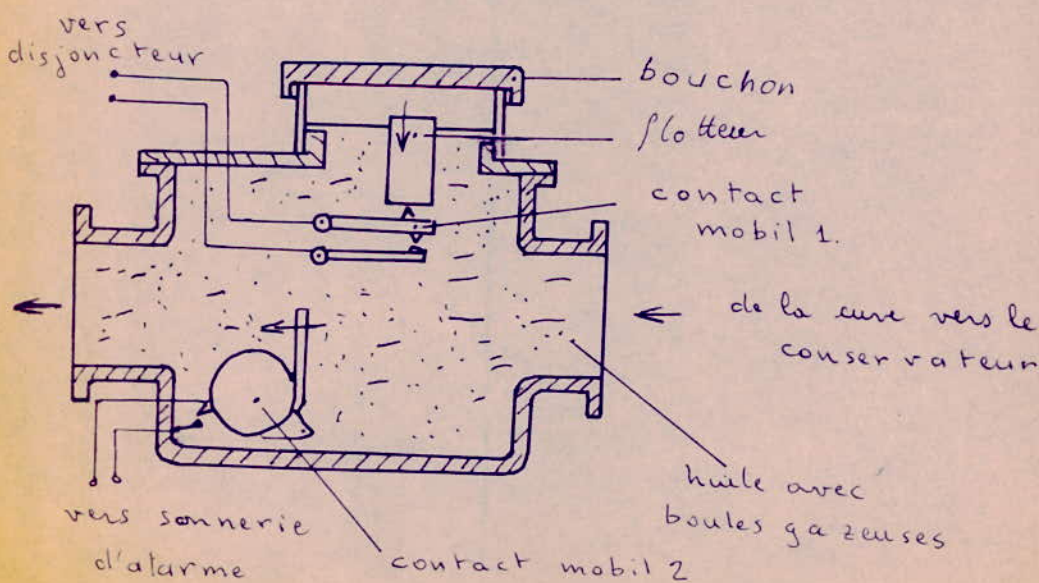
Le conservateur d'huile s'appuie par des supports sur le couvercle de la cuve.

Sur le couvercle sont aussi placés les isolateurs B.T et H.T. Entre le conservateur et la cuve est installé un relai de Bucholz destiné à signaler tout accident dans le transformateur et séparer le transformateur du réseau en cas d'avarie.

En cas de court-circuit, et par la suite de la formation de gaz dans l'huile et de l'accroissement brusque de la tension, la cuve est protégée par un tube d'échappement.

Le tube est en acier. Il a une ouverture communiquant avec la cuve et l'autre est fermée par un disque en verre. Pour une certaine pression le disque est expulsé et les gaz avec l'huile sont projetés vers l'extérieur.

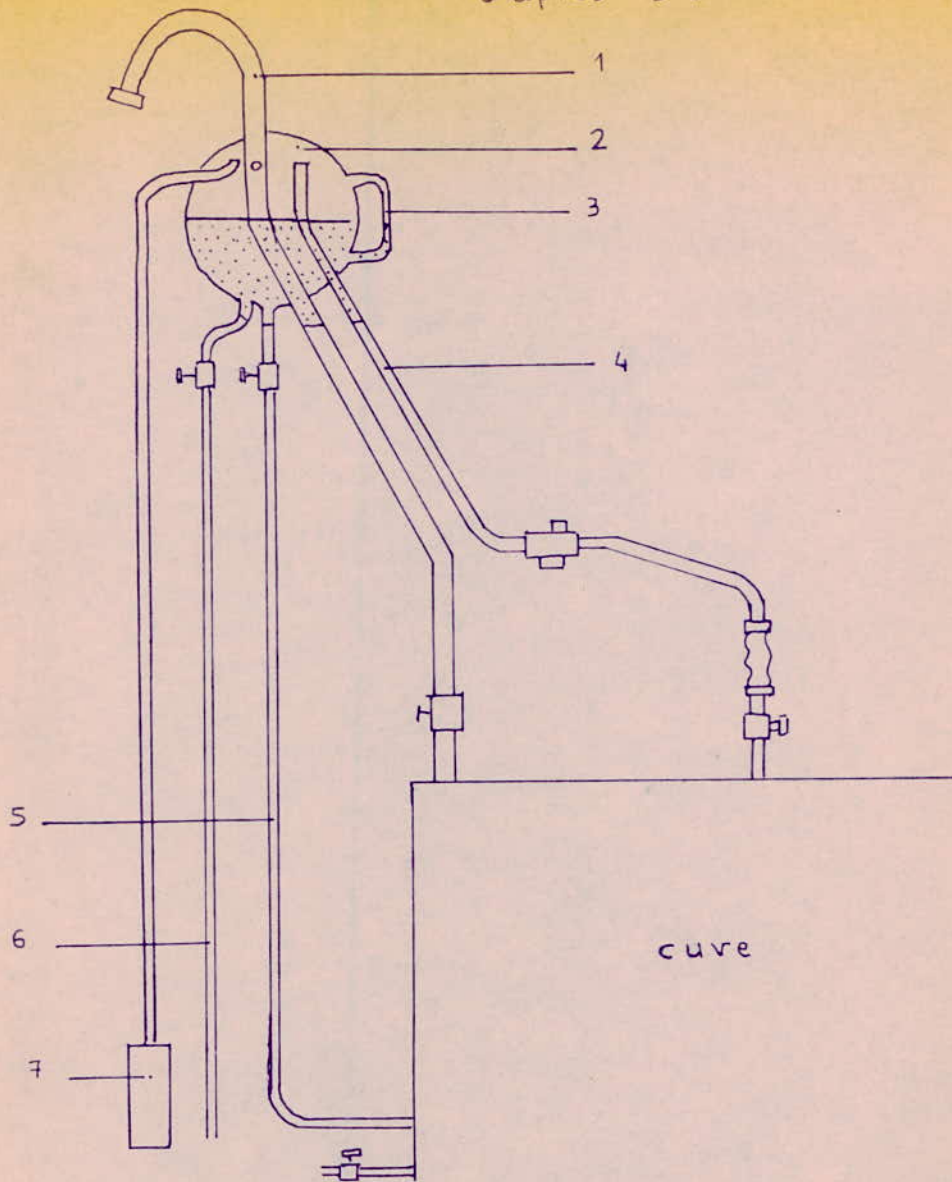
- Relais de Bucholz.



- faible dégagement de gaz = le contact 2 est fermé
- important dégagement de gaz = le contact 1 est fermé.

13

Conservateur d'huile
d'après Savoisienne



- 1 - tubulaire d'échappement des gaz en cas d'explosion
- 2 - réservoir d'expansion
- 3 - indicateur de niveau
- 4 - tubulaire de passage de l'huile dans le réservoir d'expansion
- 5 - tubulaire de retour de l'huile dans la cuve
- 6 - vidange du réservoir
- 7 - dessiccateur

B. Grandeurs nominales

C'est les grandeurs (puissance, tensions, courants, etc...) qui caractérisent le fonctionnement d'un transformateur dans les conditions de garantie pour les essais et l'exploitation.

Principales définitions.

- Enroulement :

a. l'enroulement d'un transformateur polyphasé est l'ensemble de tous les enroulements de phase de même tension reliés entre eux d'une certaine façon.

b. l'enroulement du transformateur auquel est amenée l'énergie du courant alternatif est appelé enroulement primaire et l'autre enroulement duquel l'énergie est prélevée est appelé enroulement secondaire

c. l'enroulement connecté au réseau à tension plus élevée est appelé enroulement de haute tension (H.T); l'enroulement connecté au réseau de tension inférieure est appelé enroulement de basse tension (B.T).

d. Si la tension secondaire est inférieure à celle primaire le transformateur est appelé transformateur abaisseur, et lorsque cette tension est supérieure à la tension primaire le transformateur est dit transformateur élévateur

- Puissance nominale :

la puissance nominale d'un transformateur est celle aux bornes de l'enroulement secondaire. Mais vu que le rendement d'un transformateur est très élevé, on admet que les puissances nominales des 2 enroulements primaire et secondaire sont égales.

Puissance apparente par colonne :

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

S_n = puissance nominale

m_c = nombre de colonnes = 3

$$S_c = \frac{5000}{3} = 1666,66 \text{ KVA.}$$

S_c = puissance par colonne

- Tension nominale d'un enroulement :

C'est la tension spécifiée pour être appliquée ou développée en fonctionnement à vide entre les bornes de ligne d'un enroulement du transformateur.

La tension secondaire nominale est la tension aux bornes de l'enroulement secondaire lorsque le transformateur fonctionne à vide (la tension aux bornes de l'enroulement primaire étant nominale).

- Tension nominale par phase :

Elle dépend du mode de couplage de l'enroulement :

Mode de couplage :

- Enroulement B.T en étoile

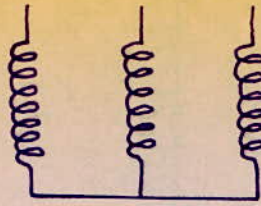
$$U_{f1} = \frac{U_{n1}}{\sqrt{3}} = \frac{5000}{\sqrt{3}} = 2886,84 \text{ V}$$

U_{n1} = tension nominale

U_{f1} = tension par phase

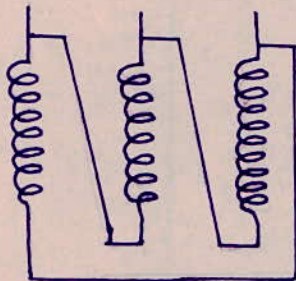
(16)

Enroulement B.T en étoile



- Enroulement H.T en triangle :

$$U_{p2} = U_{n2} = 35 \text{ KV}$$



- Courant nominal

$$I_n = \frac{S_n}{k_f U_n} \text{ [A]}$$

 S_n : puissance nominale [KVA] U_n : tension nominale [KV] k_f : facteur de phase = $\sqrt{3}$

- Courant nominal par phase :

le courant nominal par phase dépend aussi du mode de couplage :

- Dans la B.T

$$I_{p1} = I_{n1} = \frac{S_n}{\sqrt{3} U_{n1}} = \frac{5000}{\sqrt{3} \cdot 5} = 577,37 \text{ A}$$

- Dans la H.T

$$I_{p2} = \frac{I_{n2}}{\sqrt{3}} = \frac{S_n}{3 \cdot U_{n2}} = \frac{5000}{3 \cdot 35} = 47,62 \text{ A}$$

II. Calcul des dimensions de la colonne du circuit magnétique

Le circuit magnétique est réalisé avec des tôles d'acier de type $\exists 320$ et d'épaisseur $0,35 \text{ mm}$.

$\exists 320$ désigne un acier à teneur en silicium augmentée, laminé à froid texturé, à faibles pertes spécifiques pour la fréquence de 50 Hz et pour une induction de 1 T .

Poids spécifique moyen et teneur en silicium des aciers:

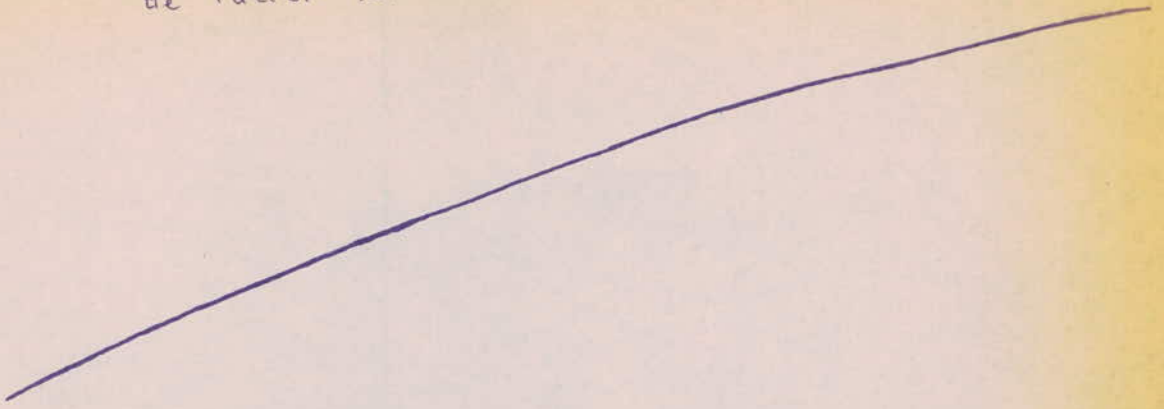
Nuance de l'acier	teneur en Si %	Poids spécifique moyen Kg/dm^3
Faiblement allié	0,8 à 1,8	7,80
Moyennement allié	1,8 à 2,8	7,75
À teneur en Si augmentée:		
a) - laminé à froid	2,8 à 4	7,65
b) - laminé à chaud	2,5 à 3,5	7,65
Hautement allié	4 à 4,8	7,65

Les tôles sont isolées par des oxydes céramiques (connus sous le nom de carlite) obtenus à la suite d'un traitement thermo-chimique de la surface de la tôle. L'épaisseur de la couche de la carlite est très faible, elle est de l'ordre de $0,001 \text{ mm}$. Ainsi on arrive à utiliser au maximum la section géométrique du circuit magnétique.

(18)

B [T]

caractéristique magnétique
de l'acier laminé à froid du type Э320



H [A/cm]

1,5

2

10

100

a. Diamètre de la colonne

Le diamètre de la colonne est la dimension de base du circuit magnétique. Ce diamètre est donné par la relation ci-dessous.

$$D = 1,9 \sqrt[4]{\frac{a_r \cdot \beta \cdot K_R \cdot S_c \cdot 100}{K_u^2 \cdot \hat{B}_c^2 \cdot u_{kr}}} \quad [\text{cm}]$$

a_r [cm]

S_c [KVA]

\hat{B}_c [T]

u_{kr} [%]

S_c : puissance par colonne

$$S_c = \frac{S_n}{3} = \frac{5000}{3} = 1666,66 \text{ KVA}$$

β : facteur de sveltesse

Le facteur influence directement les dimensions du transformateur. Donc les quantités de matériaux nécessaires pour la réalisation. Sa valeur est comprise entre 1,15 et 3,4.

Si β est proche de la limite supérieure, la quantité de matériau diminue mais les pertes dues à la charge augmentent. Ceci pose un problème pour l'exploitation, car le rendement diminue et l'échauffement risque de devenir important, le refroidissement a lieu dans des conditions difficiles (vu la quantité de chaleur à évacuer).

β dépend de la puissance par colonne et de la valeur de la H.T.

β est choisi d'après le tableau suivant :

(20)

S_c KVA	3 ÷ 2000	3 ÷ 2000	2000 ÷ 20000	2000 ÷ 20000
U_{HT} KV	6 ÷ 10	35		110
β_{AP}	1,8 ÷ 1,15		1,77 ÷ 1,49	
β_{Cu}	3,4 ÷ 1,75	3 ÷ 1,8	1,8 ÷ 1,3	2 ÷ 1,5

$$\beta = 1,8$$

a_r : épaisseur équivalente du canal de fuite

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

a_{12} : largeur du canal de fuite ou distance séparant les 2 enroulements B.T et H.T d'une même colonne. Cette distance est fonction de la H.T. Pour les transformateurs immergés dans l'huile la valeur de a_{12} est donnée par le tableau ci-après :

U_n KV	3	6	10	15	20	35	60	110	220
U_{CE2} KV	3,6	7,2	12	17,5	24	36	72,5	123	245
U_{essai} KV	16	22	28	38	50	70	140	230	460
a_{12} cm	0,6 ÷ 1	0,6 ÷ 1	0,8 ÷ 1,2	1 ÷ 1,5	1,2 ÷ 1,8	2,1 ÷ 2,7	-	8	22

$$a_{12} = 2,7 \text{ cm}$$

Dans cette étape de calcul $\frac{a_1 + a_2}{3} = K \sqrt[4]{S_c}$

où K est un facteur dépendant de la puissance par colonne et de la valeur de la H.T.

La valeur de K est choisie dans le tableau suivant :

(21)

S_c KVA	< 100	100 ÷ 560	750 ÷ 5600	7500 ÷ 31500
U_n KV	≤ 10	10 ÷ 35	10 ÷ 35	10 ÷ 35
K	0,6 ÷ 0,8	0,48 ÷ 0,6	0,4 ÷ 0,5	0,44 ÷ 0,46

$$\frac{a_1 + a_2}{3} = K \sqrt[4]{S_c} = 0,5 \sqrt[4]{1666,66} = 3,19 \quad K = 0,5$$

a_R = facteur de Rogowski

Ce facteur tient compte du fait que les lignes de champ dans le canal de fuite sont incurvées et non parallèles. A ce niveau de calcul K_R est égal à 0,95

$$K_R = 0,95$$

La valeur exacte sera calculée après avoir déterminé les dimensions principales

K_u = facteur d'utilisation de la section fer.

$$K_u = K_g \cdot K_r$$

K_g : facteur géométrique

La colonne n'est pas à section circulaire mais elle est formée de gradins; l'ensemble est inscrit dans un cercle.

K_g est fonction de la puissance et du nombre de gradins

S_c KVA	< 5	5 ÷ 15	15 ÷ 45	45 ÷ 5000
nb gradins	2	4	5	6
K_g	0,786	0,886	0,91	0,93

(22)

La colonne sera réalisée avec 6 gradins

$$K_g = 0,93$$

K_r : facteur de remplissage

Le facteur tient compte de l'isolation existante entre les tôles. Cette isolation diminue la section de canalisation du flux.

δ : épaisseur de la tôle

δ mm	isolation en papier	isolation en carlite
0,5	0,98	0,97 - 0,98
0,35	0,85	0,94 - 0,95
0,28	-	0,93 - 0,94

$$K_r = 0,94$$

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

\hat{B}_c : induction magnétique de crête

Elle dépend du type de tôle utilisé et influe considérablement sur les pertes dans le fer.

Pour une valeur élevée de \hat{B}_c les pertes dans le fer ou pertes à vide augmentent et la saturation des tôles peut être atteinte. \hat{B}_c est choisie en fonction de la puissance du transformateur et du type de tôle

S_c kVA	10 ÷ 50	75 ÷ 250	315 ÷ 600	630 ÷ 1000	> 1000
\hat{B}_c [T] <small>laminée à froid</small>	1,25 ÷ 1,55	1,55 ÷ 1,65	1,62 ÷ 1,68	1,63 ÷ 1,69	1,64 ÷ 1,67

$$\hat{B}_c = 1,64 \text{ T}$$

(23)

u_{kr} = composante réactive de la tension de court-circuit
Elle est due à l'inductivité de l'enroulement.

$$u_{kr} = \sqrt{u_k^2 - u_{ka}^2}$$

u_k = tension de court-circuit. Elle est donnée égale à 7%

u_{ka} = composante active de la tension de court-circuit. Elle est due à la résistance de l'enroulement. La composante active est donnée par le cahier de charges.

$$u_{ka} = \frac{P_k}{S_n} 100 [\%] \quad P_k: \text{pertes dues à la charge [KW]} \\ S_n = [KVA]$$

$$u_{ka} = \frac{41,5}{5000} 100 = 0,83 \%$$

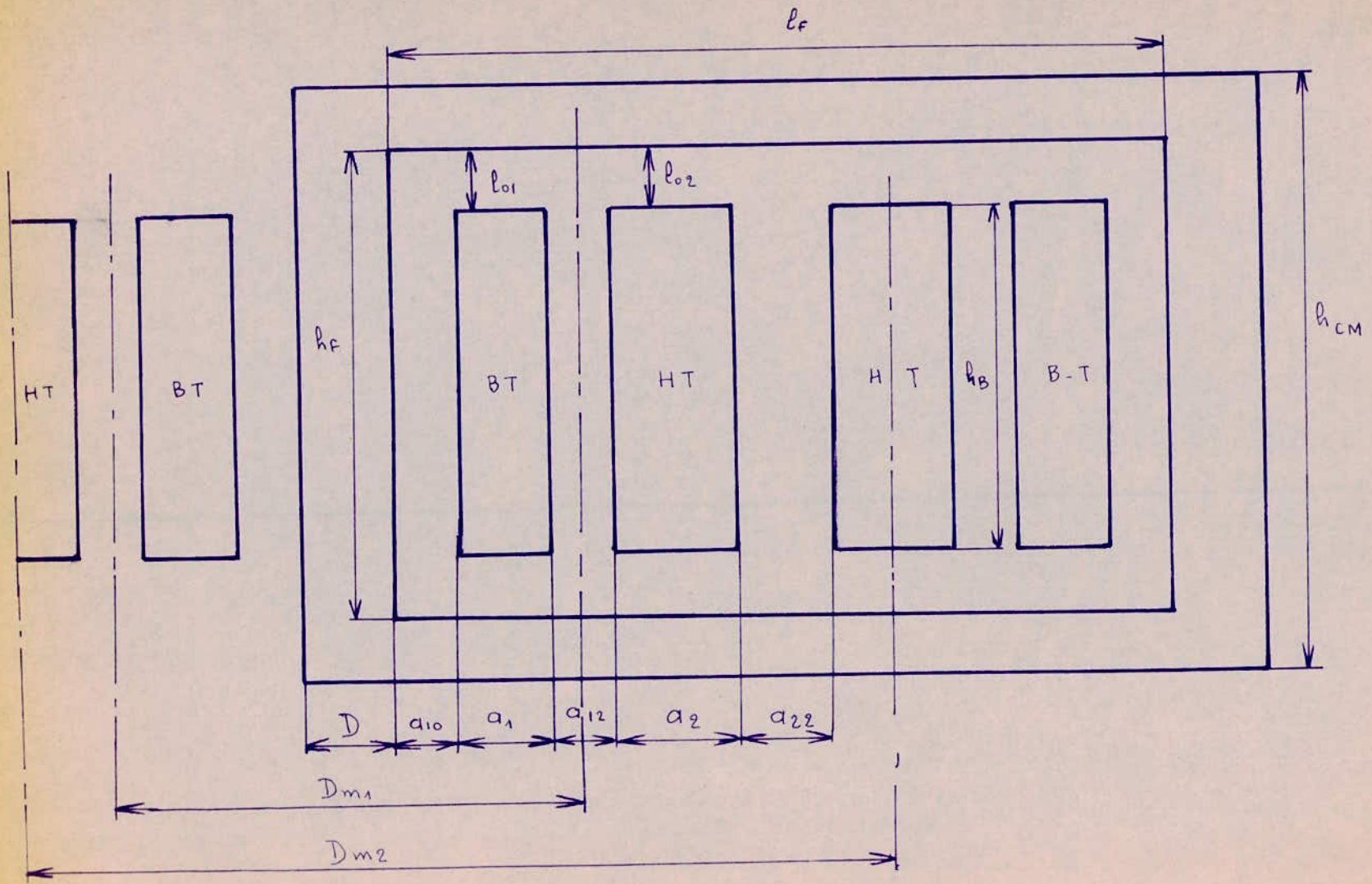
$$\text{d'où } u_{kr} = \sqrt{7^2 - 0,83^2} = 6,95 \%$$

Le diamètre du cercle dans lequel est inscrite la colonne est calculé en fonction des valeurs de tous les paramètres précédents.

$$D = 1,9 \sqrt[4]{\frac{a_r \cdot \beta \cdot K_R \cdot S_c}{K_u^2 \cdot \beta_c^2 \cdot u_{kr}} 100}$$

$$D = 1,9 \sqrt[4]{\frac{5,89 \cdot 1,8 \cdot 0,95 \cdot 1666,66}{0,874^2 \cdot 1,64^2 \cdot 6,95} 100} = 35,2 \text{ cm}$$

(94)



(25)

b. Dimensions des gradins

Chaque gradin est formé d'un paquet de tôle de même largeur.

Pour un noyau à 6 gradins les normes donnent la largeur l_{g_i} et l'épaisseur h_{g_i} de chaque gradin.

1^e gradin

c'est le tronçon principal

$$l_{g_1} = 0,96 D = 33,79 \text{ cm}$$

$$h'_{g_1} = \sqrt{D^2 - l_{g_1}^2} = 9,86 \text{ cm}$$

$$h_{g_1} = h'_{g_1} \text{ pour le 1^e gradin.}$$

2^e gradin

$$l_{g_2} = 0,885 D = 31,15 \text{ cm}$$

$$h'_{g_2} = \sqrt{D^2 - l_{g_2}^2} = 16,39 \text{ cm}$$

$$h_{g_2} = \frac{h'_{g_2} - h_{g_1}}{2} = \frac{16,39 - 9,86}{2} = 3,27 \text{ cm}$$

3^e gradin

$$l_{g_3} = 0,775 D = 27,28 \text{ cm}$$

$$h'_{g_3} = \sqrt{D^2 - l_{g_3}^2} = 22,25 \text{ cm}$$

$$h_{g_3} = \frac{h'_{g_3} - h'_{g_2}}{2} = \frac{22,25 - 16,39}{2} = 2,93 \text{ cm}$$

(26)

4^e gradin

$$l_{g_4} = 0,631 D = 22,21 \text{ cm}$$

$$h'_{g_4} = \sqrt{D^2 - l_{g_4}^2} = 27,31 \text{ cm}$$

$$h_{g_4} = \frac{h'_{g_4} - h'_{g_3}}{2} = \frac{27,31 - 22,25}{2} = 2,53 \text{ cm}$$

5^e gradin

$$l_{g_5} = 0,465 D = 16,37 \text{ cm}$$

$$h'_{g_5} = \sqrt{D^2 - l_{g_5}^2} = 31,16 \text{ cm}$$

$$h_{g_5} = \frac{h'_{g_5} - h'_{g_4}}{2} = \frac{31,16 - 27,31}{2} = 1,93 \text{ cm}$$

6^e gradin

$$l_{g_6} = 0,28 D = 9,86 \text{ cm}$$

$$h'_{g_6} = \sqrt{D^2 - l_{g_6}^2} = 33,79 \text{ cm}$$

$$h_{g_6} = \frac{h'_{g_6} - h'_{g_5}}{2} = \frac{33,79 - 31,16}{2} = 1,32 \text{ cm}$$

Remarque:

Pour des diamètres de la colonne $D \geq 35 \text{ cm}$, pour améliorer le refroidissement du noyau on le divise en paquets séparés l'un de l'autre par des canaux à huile longitudinaux larges de 0,6 à 1,5 cm.

Les canaux sont prévus tous les 15 à 20 cm et réduisent la section géométrique de la colonne, donc le facteur K_g .

(27)

- Le diamètre de la colonne est égal à 35,2 cm, un canal longitudinal de refroidissement large de 7 mm est laissé dans le gradin principal.

- Section occupée par le canal de refroidissement

$$S_{cr} = l_{g_1} \cdot l_{cr} = 33,79 \cdot 0,7 = 23,65 \text{ cm}^2$$

l_{g_1} = largeur du gradin principal

l_{cr} = largeur du canal de refroidissement.

- Section brute de la colonne sans canal de refroidissement

$$S_c = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 35,2^2}{4} = 972,65 \text{ cm}^2$$

- Section brute de la colonne avec canal de refroidissement

$$S_c - S_{cr} = 972,65 - 23,65 = 949 \text{ cm}^2$$

- Calcul du coefficient géométrique en tenant compte du canal de refroidissement.

$$K_g = 0,93^* \frac{S_c - S_{cr}}{S_c} = 0,93 \frac{949}{972,65} = 0,906$$

$0,93^*$: facteur géométrique sans canal de refroidissement.

- Le facteur d'utilisation a aussi diminué.

$$K_u = K_g \cdot K_r = 0,906 \cdot 0,94 = 0,852$$

- Largeur d'un paquet de tôle du noyau.

La somme des épaisseurs des gradins est =

$$l_{g_1} + 2 \cdot (l_{g_2} + l_{g_3} + l_{g_4} + l_{g_5} + l_{g_6})$$

$$9,86 + 2 \cdot (3,27 + 2,93 + 2,53 + 1,93 + 1,32) = 33,8 \text{ cm}$$

Le canal de refroidissement divise le noyau en 2 paquets.

(28)

Longueur d'un paquet de tôle du noyau :

$$\frac{33,8 - l_{cr}}{2} = \frac{33,8 - 0,7}{2} = 16,5 \text{ cm.}$$

d. Hauteur prédéterminée de l'enroulement.

Diamètre du canal de fuite

$$D_{12} = D + 2a_{01} + 2a_1 + a_{12}$$

a_{01} = distance séparant la colonne de l'enroulement monté le plus près. L'enroulement monté le plus près de la colonne est la B.T.

a_{01} est fonction de la valeur de la B.T.

$U_{nBT} \text{ KV}$	≤ 1	3	6	10	15	20	35
$a_{01} \text{ cm}$	0,5	1,2	1,2 ÷ 1,5	1,8	1,8 ÷ 2	2,1 ÷ 2,3	3

a_1 = épaisseur de l'enroulement BT. $a_{01} = 1,5 \text{ cm}$

cette épaisseur est estimée par :

$$a_1 = K_{a1} \sqrt[4]{S_c} \quad \begin{matrix} a_1 \text{ [cm]} \\ S_c \text{ [KVA]} \end{matrix}$$

$$K_{a1} = \begin{cases} 0,55 & \text{pour } U_{nHT} \leq 35 \text{ KV} \\ 0,45 & \text{pour } U_{nHT} \leq 110 \text{ KV} \end{cases}$$

$$K_{a1} = 0,55$$

lorsque le type de l'enroulement est connue, a_1 est calculé définitivement

$$a_1 = K_{a1} \sqrt[4]{S_c} = 0,55 \sqrt[4]{\frac{5000}{3}} = 3,51 \text{ cm}$$

$$a_1 = 3,51 \text{ cm.}$$

(29)

Diamètre du canal de fuite

$$D_{12} = D + 2a_{0,1} + 2a_1 + a_{1,2}$$

$$= 35,2 + 2 \cdot 1,5 + 2 \cdot 3,51 + 2,7 = 47,92 \text{ cm.}$$

Hauteur de l'encoulement.

Cette hauteur n'est qu'approximative, la valeur précise est déterminée après le calcul de l'encoulement.

$$h_B = \frac{\pi D_{12}}{\beta} = \frac{3,14 \cdot 47,92}{1,8} = 83,6 \text{ cm.}$$

C'est à ce niveau qu'apparaît bien l'influence du facteur de sveltesse β sur la géométrie du transformateur.

III. Calcul des enroulements.

L'enroulement est connu par son type et ses caractéristiques = le nombre de spires, la section et les dimensions du conducteur ainsi que l'épaisseur de l'isolation.

- Type de l'enroulement.

En général, le choix du type de l'enroulement est basé sur les valeurs des tensions et des courants nominaux.

L'enroulement doit satisfaire à plusieurs exigences =

- le régime thermique de l'enroulement doit correspondre aux exigences de la norme, car une température trop élevée réduit nettement la durée de service du transformateur.

- l'enroulement doit présenter la rigidité diélectrique nécessaire pour supporter les surtensions

- l'enroulement doit résister aux contraintes naissant lors d'un court-circuit brusque.

- l'enroulement doit être économique tout en permettant d'avoir un meilleur rendement.

Les exigences sont souvent contradictoires

Ainsi lorsque la densité de courant dans l'enroulement est élevée la quantité de cuivre utilisée est faible, mais les pertes augmentent et le rendement diminue.

Lorsqu'un grand surchauffement de l'enroulement est admis, les dimensions du transformateur sont petites

(31)

Donc les quantités de matériaux nécessaires pour le réaliser sont faibles mais sa durée de service devient courte.

L'isolation protège les conducteurs de l'enroulement mais les empêche de contacter directement l'agent de refroidissement.

a. Enroulement B.T.

Calcul du nombre de spires

Le nombre dépend de la tension par spire qui est fonction de l'induction et de la section nette de fer de la colonne :

- Section nette de fer de la colonne

$$S_{Fec} = K_u \frac{\pi D^2}{4}$$
$$= 0,852 \frac{3,14 \cdot (35,2)^2}{4} = 828,69 \text{ cm}^2$$

- Tension par spire

$$U_{sp,1} = \sqrt{2} \pi f S_{Fec} \hat{B}_c \quad [V]$$
$$= \sqrt{2} \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 828,69 \cdot 10^{-4} \cdot 1,64 = 30,2 \text{ V}$$

- nombre de spire

$$W_1 = \frac{U_g}{U_{sp,1}}$$
$$= \frac{2886,84}{30,2} = 95,59$$

le nombre de spire arrondi est $W_{1ar} = 95$ $W_1 = 95$ spires

(32)

Le nombre de spire étant arrondi, une légère variation de la tension par spire apparaît.

- Recalcul de la tension par spire

$$U_{sp,1} = \frac{U_{s1}}{W_1}$$
$$= \frac{2886,84}{95} = 30,39 \text{ V}$$

Le tableau ci-après donne l'ordre de grandeur de la tension par spire en fonction de la puissance nominale.

S_n kVA	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000
U_{sp} V	18 ÷ 23	21 ÷ 26	26 ÷ 30	30 ÷ 34	34 ÷ 38	40 ÷ 44	46 ÷ 54

La valeur recalculée de la tension par spire est comprise entre les limites données.

La variation de la tension par spire entraîne une modification de l'induction magnétique \hat{B}_c .

- Calcul de l'induction.

$$\hat{B}_c = \frac{U_{sp,1}}{\sqrt{2} \pi f S_{Fec}}$$
$$= \frac{30,39}{\sqrt{2} \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 828,69 \cdot 10^{-4}} = 1,65 \text{ T}$$

$\hat{B}_c = 1,65 \text{ T.}$

Vu la caractéristique magnétique de l'acier utilisé, cette valeur de l'induction est acceptable.

- Densité de courant moyenne

La densité moyenne de courant pour un enroulement en cuivre est donnée par :

$$J_{m_1} = 7,34 \frac{P_K U_{sp}}{K_{PK} D_{12} S_n} \quad [A/mm^2]$$

$U_{sp} [V]$
 $P_K [KW]$
 $S_n [KVA]$
 $D_{12} [m]$

K_{PK} : facteur des pertes supplémentaires

K_{PK} dépend de la tension nominale

S_n KVA	1000	1600	2000	2500	4000	5000	6000	10000
K_{PK}	1,06	1,07	1,075	1,08	1,09	1,10	1,11	1,125

$K_{PK} = 1,10$

$$J_{m_1} = 7,34 \frac{41,5 \cdot 30,39}{1,1 \cdot 47,92 \cdot 10^{-2} \cdot 5000} = 3,51 \text{ A/mm}^2$$

la valeur de la densité moyenne ne dépasse pas les limites imposées et indiquées par le tableau suivant:

Transformateur "sec"	1,2 ÷ 2,8	0,8 ÷ 1,7
Transformateur immergé	1,5 ÷ 4,5	1 ÷ 2,4
	matériel de l'enroulement : Cuivre	matériel de l'enroulement Aluminium

- Section du conducteur nu

$$S_{W_1} = \frac{I_{g_1}}{J_{m_1}} \quad [mm^2]$$

$I_{g_1} [A]$
 $J_{m_1} [A/mm^2]$

$$S_{W_1} = \frac{577,37}{3,51} = 164,49 \text{ mm}^2$$

la section S_{W_1} est supérieure à 50 mm²

- Plusieurs conducteurs élémentaires méplats seront utilisés
- le nombre et les dimensions de ces conducteurs seront déterminés après avoir choisi un enroulement convenable

- L'expérience de construction montre qu'un enroulement hélicoïdal est largement utilisé pour réaliser les enroulements B-T, de tension nominale de l'ordre 5 KV, des transformateurs de moyenne et surtout de grande puissance.
- le nombre de conducteur élémentaire sera choisi de telle sorte que la variation du facteur de sveltesse β n'excède pas la valeur précédemment choisie de $\pm 20\%$ afin d'avoir une hauteur convenable pour l'enroulement.

Pour répondre à ces exigences le nombre de conducteur élémentaire est égal à 10.

- Section d'un conducteur élémentaire

$$S_{w_{ne}} = \frac{S_{w_1}}{n_{el}} \quad n_{el} = \text{nombre de conducteur élémentaire}$$

$$= \frac{164,49}{10} = 16,45 \text{ mm}^2$$

- La section normalisée choisie est $16,2 \text{ mm}^2$

Pour cette section, les dimensions du conducteur nu

sont : $b = 4,4 \text{ mm}$

$a = 3,8 \text{ mm}$.

- Dimensions du conducteur isolé

l'isolation est en papier - l'épaisseur totale de l'isolation est fonction de la section du conducteur et de la tension nominale de l'enroulement.

Section des conducteurs profiles

a et b en mm

$\begin{array}{l} a \\ \backslash \\ b \end{array}$	1,56	1,68	1,81	1,95	2,1	2,26	2,44	2,63	2,83	3,05	3,28	3,53	3,8	4,1	4,4	4,7
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	5,3	5,73	6,19	6,41	6,93	7,52	8,15	8,8	9,51	10,3	—	—	—	—	—
3,53	5,3	5,72	6,18	6,67	6,93	7,5	8,13	8,8	9,51	10,3	11,1	12	—	—	—	—
3,8	5,72	6,17	6,67	7,2	7,5	8,11	8,79	9,51	10,3	11,1	12	12,9	13,9	—	—	—
4,1	6,19	6,68	7,21	7,79	8,13	8,79	9,52	10,3	11,1	12	13	14	15,1	15,9	—	—
4,4	6,65	7,18	7,75	8,37	8,76	9,46	10,2	11,9	12	12,9	13,9	15	16,2	17,1	18,5	—
4,7	7,12	7,79	8,3	8,96	9,39	10,1	11	11,9	12,8	13,8	14,9	16,1	17,4	18,4	—	21,2
5,1	7,75	8,36	9,02	9,74	10,2	11	11,9	12,9	13,9	15,1	16,2	17,5	18,9	20	21,5	—
5,5	8,37	9,03	9,75	10,5	11,1	11,9	12,9	14	15,1	16,3	17,5	18,9	20,4	21,7	23,3	25
5,9	8,89	9,7	10,5	11,3	11,9	12,8	13,9	15	16,2	17,5	18,9	20,3	21,9	23,3	25,9	26,8
6,4	9,77	10,6	11,4	12,3	12,9	14	15,1	16,3	17,6	19	20,5	22,1	23,8	25,3	27,3	29,2
6,9	10,6	11,4	12,3	13,3	14	15,1	16,3	17,7	19	20,6	22,1	23,1	25,7	27,4	29,5	31,5
7,4	11,3	12,6	13,3	14,2	15	16,2	17,6	19	20,4	22,1	23,6	25,6	27,6	29,4	31,7	33,9
8	12,3	13,2	14,4	15,4	16,3	17,6	19	20,5	22,1	23,9	25,7	27,7	29,9	31,9	34,3	36,7
8,6	13,1	14,2	15,5	16,6	17,6	18,9	20,5	22,1	23,8	25,7	27,7	29,9	32,2	34,4	36,9	39,5
9,3	14,3	15,4	16,6	17,9	19	20,5	22,2	24	25,8	29,9	30	32,3	34,8	37,2	40	42,8
10	15,4	16,6	17,9	19,3	20,5	22,1	23	25,8	27,8	30	32,3	34,8	37,5	40,1	43,1	46,1
10,8	16,8	17,9	19,3	20,9	22,9	23,9	25,9	27,9	30,1	32,4	34,9	37,6	40,5	43,4	46,6	49,9
11,6	17,9	19,3	20,8	22,4	23,9	25,7	27,8	30	32,3	34,9	37,5	40,5	43,6	46,7	50,1	53,6
12,5	19,8	20,8	22,4	24,2	25,8	27,8	30	32,4	34,9	37,6	40,5	43,6	47	50,4	54,1	57,9

(36)

L'épaisseur de l'isolation pour une bobine sans galette est donnée dans le tableau ci-dessous =

U_n KV	<10	20	30	40	60	70	80	90	100	120	140
δ_{is} mm $sw < 20 \text{ mm}^2$	0,64	0,84	0,84	0,94	1,24	1,44	1,44	1,54	1,64	1,84	2,04
δ_{is} mm $20 > sw < 60 \text{ mm}^2$	0,84	0,94	1,04	1,24	1,44	1,64	1,64	1,74	1,84	2,04	2,24

l'isolation bilatérale correspondante sera 0,64 mm

$$\delta_{is} = 0,64 \text{ mm}$$

$$b' = b + \delta_{is} = 4,44 + 0,64 = 5,04 \text{ mm}$$

$$a' = a + \delta_{is} = 3,8 + 0,64 = 4,44 \text{ mm}$$

- Calcul de la densité réelle de courant.

$$J_1 = \frac{I_{g1}}{sw_1}$$

$$= \frac{577,37}{10 \cdot 16,2} = 3,56 \text{ A/mm}^2$$

la limite de variation relative de la densité réelle de courant par rapport à la densité moyenne ne doit pas excéder $\pm 5\%$ - ce qui est vérifié:

$$\Delta J_1 = \frac{3,56 - 3,51}{3,56} = 1,4\% < 5\%$$

Pour faciliter l'exécution de l'enroulement, la disposition à plat du conducteur sera adoptée.

- Hauteur de la bobine B.T.

- l'utilisation de plusieurs conducteurs élémentaires en parallèle nécessitera une transposition des

conducteurs afin d'uniformiser les pertes et les longueurs des conducteurs.

- Pour permettre à l'agent de refroidissement d'être en contact avec ces conducteurs, des canaux radiaux de refroidissement seront laissés. La hauteur h_c du canal de refroidissement peut varier de 4 à 6 mm.
- Un dépassement de 1 cm sera laissé aussi pour stabiliser la bobine.

Pour un enroulement hélicoïdal, la hauteur de l'enroulement est donnée par =

$$h_0 = (w_{sp} + 1) h_{sp} + (w_{sp} - 1) h_c + (n_{el} - 1) h_{per} + 10 \text{ mm}$$

- w_{sp} = nombre de spires de l'enroulement.

- h_{sp} = hauteur de la spire, elle est égale à la longueur b du conducteur isolé, car la disposition à plat du conducteur a été adoptée.

- h_{per} = hauteur nécessaire pour la transposition d'un conducteur élémentaire

$$\text{Généralement } h_{per} = 1,5 \div 2 h_{sp}$$

Pour faciliter la transposition, h_{per} est choisie égale à $2 h_{sp}$. Puisque le nombre de conducteur élémentaire n_{el} est égal à 10, le nombre de permutation sera $(n_{el} - 1)$ c'est à dire 9.

les valeurs des paramètres de l'enroulement en question sont =

38

$$W_s = 95$$

$$h_{sp} = 5,04 \text{ mm}$$

$$h_c = 4,1 \text{ mm}$$

$$h_{per} = 2 \cdot 5,04 = 10,08 \text{ mm}$$

$$n_{el} = 10$$

La hauteur de l'enroulement est donc =

$$h_B = (95+1) \cdot 5,04 + 94 \cdot 4,1 + 9 \cdot 2 \cdot 5,04 + 10 = 97 \text{ cm}$$

$$h_B = 97 \text{ cm.}$$

Epaisseur de la bobine B-T

$$a_1 = n_{el} \cdot a' \quad a': [\text{mm}]$$

$$= 10 \cdot 4,44 = 4,44 \text{ cm}$$

Calcul définitif du diamètre du canal de fuite =

$$D_{12} = D + 2a_{01} + 2a_1 + a_{12}$$

$$= 35,2 + 2 \cdot 1,5 + 2 \cdot 4,44 + 2,7 = 49,78 \text{ cm}$$

$$D_{12} = 49,78 \text{ cm}$$

Une fois que les paramètres de l'enroulement sont connus, il est nécessaire de calculer le facteur de sveltesse β et de vérifier que sa variation relative n'exécède pas la limite relative de $\pm 20\%$.

- Calcul définitif de β .

$$\beta = \frac{\pi D_{12}}{h_B}$$

$$= \frac{3,14 \cdot 49,78}{97} = 1,61.$$

$$\Delta\beta \% = \frac{1,8 - 1,61}{1,61} = 11,8\% < 20\%$$

b. Calcul de l'enroulement H.T

L'enroulement H.T est muni de 2 prises de réglage de la tension. l'une des prises est -5% et l'autre +5% de la tension nominale.

- Nombre de spire pour la prise nominale.

$$W_2 = W_1 \frac{U_{f2}}{U_{f1}}$$

$$= 95 \frac{35000}{2886,84} = 1151,78 \text{ sp.}$$

- Nombre de spire arrondi

$$W_{2ar} = 1152 \text{ spires.}$$

- Nombre de spire pour la prise -5%

$$W''_2 = 0,95 \cdot W_2$$

$$= 0,95 \cdot 1152 = 1094 \text{ spires}$$

- Nombre de spire pour la prise +5%

$$W'_2 = 1,05 W_2$$

$$= 1,05 \cdot 1152 = 1210 \text{ spires}$$

- Nombre de spire de réglage

$$W_{ré} = W'_2 - W''_2$$

$$= 1210 - 1094 = 116 \text{ spires}$$

- Calcul et vérification du rapport de transformation nominal.

$$K = \frac{W_2}{W_1} = \frac{1152}{95} = 12,126$$

$$K' = \frac{U_{f2}}{U_{f1}} = \frac{35000}{2886,84} = 12,124$$

(40)

Les 2 rapports $\frac{W_2}{W_1}$ et $\frac{482}{491}$ sont pratiquement égaux.

- Densité de courant

Elle est égale ou diffère légèrement de la densité de courant de l'enroulement B.T.

La densité de courant de l'enroulement est choisie égale à celle de la B.T.

$$J_2 = 3,56 \text{ A/mm}^2$$

- Section du conducteur nu

$$\begin{aligned} s_{W_2} &= \frac{I_{\beta_2}}{J_{m_2}} \\ &= \frac{47,62}{3,56} = 13,37 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

- La section normalisée choisie est:

$$s_{W_2} = 13,9 \text{ mm}^2$$

- Pour cette section les dimensions du conducteur nu sont

$$b = 5,1 \text{ mm}$$

$$a = 2,83 \text{ mm}$$

- La section s_{W_2} est inférieure à 50 mm^2 . Donc un seul conducteur élémentaire est suffisant pour réaliser l'enroulement.

- La disposition à plat sera adoptée

Densité réelle de courant

$$J_2 = \frac{I_{\beta_2}}{s_{W_{2n}}} = \frac{47,62}{13,9} = 3,43 \text{ A/mm}^2$$

$$J_2 = 3,43 \text{ A/mm}^2$$

(41)

- Variation de la densité réelle de courant par rapport à la densité moyenne.

$$\Delta J_2 \text{ \%} = \frac{3,51 - 3,43}{3,43} = 2,3 \text{ \%} < 5 \text{ \%}$$

la valeur de la densité de courant réelle $J_{m2} = 3,43 \text{ A/mm}^2$ est donc acceptable.

Type de l'enroulement

Pour la H-T de valeur nominale 35 KV et un courant de l'ordre de 50 A, l'expérience de construction montre qu'un enroulement en galette continue est convenable.

- Pour faciliter la disposition du commutateur de prises le nombre de galette de réglage sera pair
- Pour avoir les mêmes dimensions radiales pour chaque galette de l'enroulement, il est nécessaire d'avoir le même nombre de spire par galette.

les spires de réglage sont réparties en 8 galettes.

- Nombre de spire par galette de réglage

$$W_{sp} / \text{gal. rég} = \frac{W_{sp \text{ rég}}}{8} = \frac{116}{8} = 14,5 \text{ sp/gal. rég.}$$

les autres spires formeront 75 galettes =

Nombre de spire par galette

$$\frac{1094}{75} = 14,59 \text{ sp/gal.}$$

(42)

- Dimensions du conducteur isolé :

Pour les bobines des enroulements en galette continue

l'isolation des conducteurs est renforcée -

cette isolation renforcée est fonction :

- de la disposition de la bobine par rapport à la colonne. La bobine peut être disposée en première ou en seconde position comme c'est le cas.

- de la tension nominale de l'enroulement

- de la section du conducteur.

Le tableau suivant donne les valeurs de ces isolations.

U_n KV	<10	20	30	40	60	70	80	90	100	120
2 ^e position. δ_{is} mm $S_w < 20 \text{ mm}^2$	0,84	0,94	1,04	1,24	1,84	2,24	2,64	3,04	3,64	4,84
2 ^e position. δ_{is} mm $20 < S_w < 60 \text{ mm}^2$	1,04	1,14	1,24	1,44	2,04	2,44	2,84	3,24	3,84	5,04
1 ^e position. δ_{is} mm $S_w < 20 \text{ mm}^2$	0,84	1,14	1,54	1,94	2,94	3,54	4,24	4,84	5,54	7,04
1 ^e position. δ_{is} mm $20 < S_w < 60 \text{ mm}^2$	1,04	1,34	1,74	2,04	3,14	3,74	4,44	5,04	5,74	7,24

$$\delta_{is} = 1,24 \text{ mm}$$

$$b' = b + \delta_{is} = 5,1 + 1,24 = 6,34 \text{ mm}$$

$$a' = a + \delta_{is} = 2,83 + 1,24 = 4,07 \text{ mm.}$$

- Hauteur de l'enroulement :

Pour un enroulement en galette continue la hauteur est donnée par :

(43)

$$H_B = n_g \cdot h_{sp} + (n_g - 1) h_c + 10$$

n_g = nombre total de gallette

h_c = hauteur du canal de refroidissement

le chiffre 10 signifie 10 mm pour la stabilisation de la bobine.

Les valeurs de ces paramètres sont :

$$n_g = 83 \text{ gallettes}$$

$$h_c = 5,29 \text{ mm}$$

$$h_{sp} = b' = 6,34 \text{ mm}$$

La valeur de la hauteur est :

$$H_B = 83 \cdot 6,34 + 82 \cdot 5,29 + 10 = 97 \text{ cm.}$$

Les hauteurs des 2 enroulements B-T et H-T sont égales.

Épaisseur de la bobine H-T

$$a_2 = a' \cdot w_s / g_{ol}$$

$$= 4,07 \cdot 15 = 61,1 \text{ mm.}$$

$$a_2 = 6,11 \text{ cm.}$$

(44)

Caractéristiques des Enroulementsa. Enroulement B. T

Diamètre moyen de la spire

$$D_{m1} = D + 2a_{o1} + a_1$$

$$= 35,2 + 2 \cdot 1,5 + 4,44 = 42,64 \text{ cm}$$

Longueur moyenne de la spire

$$l_{w1} = \pi D_{m1}$$

$$= 3,14 \cdot 42,64 = 133,89 \text{ cm}$$

Longueur totale du conducteur

$$l_{t1} = W_1 l_{w1}$$

$$= 95 \cdot 133,89 = 127,20 \text{ m}$$

Résistance de l'enroulement

$$R_1 = \rho \frac{l_{t1}}{S_{w1}} \quad [\Omega]$$

$$= 0,021 \frac{127,2}{10 \cdot 16,2} = 16,49 \cdot 10^{-3} \Omega$$

$\rho_{100^\circ\text{C}} = 0,021 \text{ } \Omega \text{mm}^2/\text{m}$
 $S_{w1} = [\text{mm}^2]$
 $l_{t1} : [\text{m}]$

Poids du matériel actif

$$G_1 = \gamma l_{t1} S_{w1} 10^{-3} \quad [\text{kg}]$$

$\gamma = [\text{kg}/\text{dm}^3]$
 $S_{w1} [\text{mm}^2]$
 $l_{t1} [\text{m}]$

 γ : poids spécifique

$$G_1 = 8,9 \cdot 127,2 \cdot 162 \cdot 10^{-3} = 183,40 \text{ kg}$$

(45)

Enroulement H.T

Diamètre moyen de la spire

$$D_{m2} = D + 2a_{10} + 2a_1 + a_2$$

$$= 35,2 + 3 + 2 \cdot 4,44 + 6,11 = 53,19 \text{ cm}$$

longueur moyenne de la spire

$$l_{w2} = \pi D_{m2}$$

$$= 3,14 \cdot 53,19 = 167,02 \text{ m}$$

longueur totale du conducteur

$$l_{t2} = w'_2 l_{w2}$$

$$= 1210 \cdot 167,62 = 2021 \text{ m}$$

Résistance de l'enroulement

$$R_2 = \rho \frac{l_{t2}}{sw_2}$$

$$= 0,021 \frac{2021}{13,9} = 3,05 \Omega$$

Poids du matériel actif

$$G_2 = \sigma l_{t2} sw_2 \cdot 10^{-3}$$

$$= 8,9 \cdot 2021 \cdot 13,9 \cdot 10^{-3} = 250,02 \text{ Kg}$$

Poids total des enroulements

$$G = 3 (G_1 + G_2)$$

$$= 3 (183,40 + 250,02) = 1300,26 \text{ Kg.}$$

Suite du calcul des dimensions du circuit magnétique.

Dimensions de la culasse.

les culasses assurent la liaison magnétique entre les colonnes et ne portent pas de bobine.

La section adoptée pour la culasse est rectangulaire. Pour assurer la circulation de l'huile, la culasse comportera un canal longitudinal de refroidissement qui coïncidera avec celui de la colonne - la culasse sera formée comme la colonne de 2 paquets égaux.

- Section de la culasse.

la section de la culasse est supérieure de 15 à 20% à celle de la colonne

$$S_j = 1,15 S_{Fe c} \\ = 1,15 \cdot 828,69 = 953 \text{ cm}^2$$

- Section d'un tronçon de culasse

$$S'_j = \frac{S_j}{2} = \frac{953}{2} = 476,5 \text{ cm}^2$$

- hauteur de la culasse

$$h_j = \frac{S'_j}{l'_j}$$

l'_j largeur d'un tronçon de culasse. Elle est la même que pour un tronçon de la colonne.

$$h_j = \frac{476,5}{16,5} = 28,8 \text{ cm.}$$

(47)

Induction dans la culasse :

la conservation du flux entraîne :

$$B_j S_j = \hat{B}_c S_{fec}$$

$$B_j = \hat{B}_c \frac{S_{fec}}{S_j} = 1,15 \hat{B}_c$$

$$B_j = \frac{\hat{B}_c}{1,15} = \frac{1,65}{1,15} = 1,44 \text{ T.}$$

Induction dans les coins

Dans les coins existe une induction de transition, entre la colonne et la culasse, dont la valeur est estimée à la moyenne des 2 inductions

$$\hat{B}_m = \frac{B_j + \hat{B}_c}{2}$$

$$= \frac{1,65 + 1,44}{2} = 1,55 \text{ T.}$$

longueur de la fenêtre

$$l_f = 2(a_{10} + a_1 + a_{12} + a_2) + a_{22}$$

a_{22} = distance séparant les bobines H.T. de 2 colonnes voisines. Elle fonction de leur tension nominale.

U_n KV	3 ÷ 6	10	15	20	35
a_{22} cm	1	1,4	1,7	2	3
l_{02} cm	2	3	4	5	7,5

$$a_{22} = 3 \text{ cm}$$

$$l_f = 2(a_{10} + a_1 + a_{12} + a_2) + a_{22}$$

$$l_{02} = 7,5 \text{ cm}$$

$$l_f = 2(1,5 + 4,44 + 2,7 + 6,11) + 3 = 32,5 \text{ cm}$$

$$l_f = 32,5 \text{ cm.}$$

Hauteur de la fenêtre

$$h_f = h_B + 2l_e$$

$$= 97 + 2 \cdot 7,5 = 112 \text{ cm}$$

Hauteur totale du circuit magnétique

$$H_{cm} = h_f + 2h_j$$

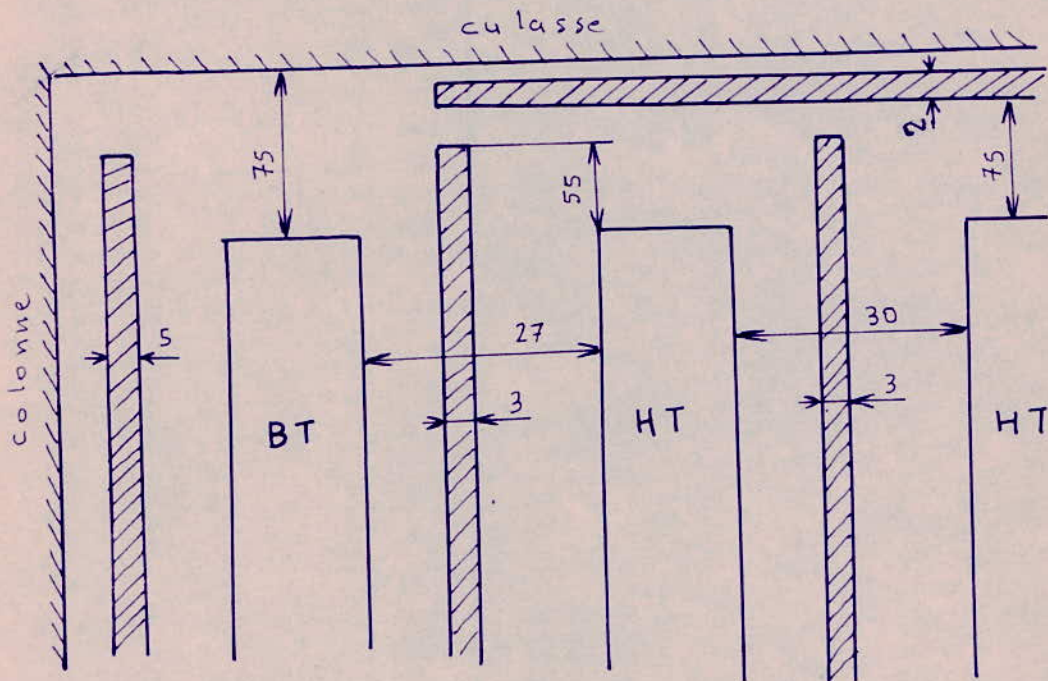
$$= 112 + 2 \cdot 28,8 = 169,6 \text{ cm.}$$

Longueur du circuit magnétique

$$L_{cm} = 3D + 2l_f$$

$$= 3 \cdot 35,2 + 2 \cdot 32,5 = 170,6 \text{ cm.}$$

Isolation principale du transformateur de classe 35 kV.



(49)

Poids du circuit magnétique

- Poids des colonnes.

$$G_{col} = 3 \gamma' v_{col}$$

 v_{col} : volume de la colonne

$$v_{col} = S_{col} h_{col}$$

$$= K_g \frac{\pi D^2}{4} h_{col}$$

$$G_{col} = 3 \gamma' K_g \frac{\pi D^2}{4} h_{col}$$

$$= 3 \cdot 7,65 \cdot 0,906 \cdot \frac{3,14 \cdot 35,2^2}{4} 112 \cdot 10^{-3}$$

$$= 2265,10 \text{ Kg}$$

- Poids des classes

$$G_j = 4 \gamma' v_j$$

 v_j : volume de la classe

$$v_j = S_j l_F$$

$$G_j = 4 \gamma' S_j l_F$$

$$= 4 \cdot 2 \cdot 7,65 \cdot 476,49 \cdot 35,2 \cdot 10^{-3} = 1026,47 \text{ Kg}$$

- Poids des coins

$$G_c = 6 \gamma' v_c$$

 v_c : volume du coin

$$v_c = S_{col} \cdot h_j$$

$$G_c = 6 \cdot 7,65 \cdot 0,906 \cdot \frac{3,14 \cdot 35,2^2}{4} 28,8 \cdot 10^{-3} = 1164,90 \text{ Kg}$$

- Poids total du circuit magnétique

$$G' = G_{col} + G_j + G_c$$

$$= 2265,10 + 1026,47 + 1164,90 = 4456,47 \text{ Kg}$$

Etude du rendement

c'est le rapport entre la puissance fournie et la puissance absorbée.

$$\eta \% = \frac{P_2}{P_1} 100$$

P_2 puissance fournie

P_1 puissance absorbée

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

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

$$P_{cu} = RI^2 = RI_{cc}^2 \frac{I^2}{I_{cc}^2}$$

$$\alpha = \frac{I}{I_{cc}} : \text{coefficient de charge}$$

$$RI_{cc}^2 = P_K$$

$$P_{cu} = \alpha^2 P_K$$

$$P_2 = (S_n \cos \varphi) \alpha$$

l'expression finale du rendement est :

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

le rendement est maximum quand les pertes Joules sont égales aux pertes dans le fer

$$P_0 = \alpha^2 P_K$$

le coefficient de charge est :

$$\alpha = \sqrt{\frac{P_0}{P_K}} = \sqrt{\frac{11,9}{42,4}} = 0,53$$

Caractéristique du rendement

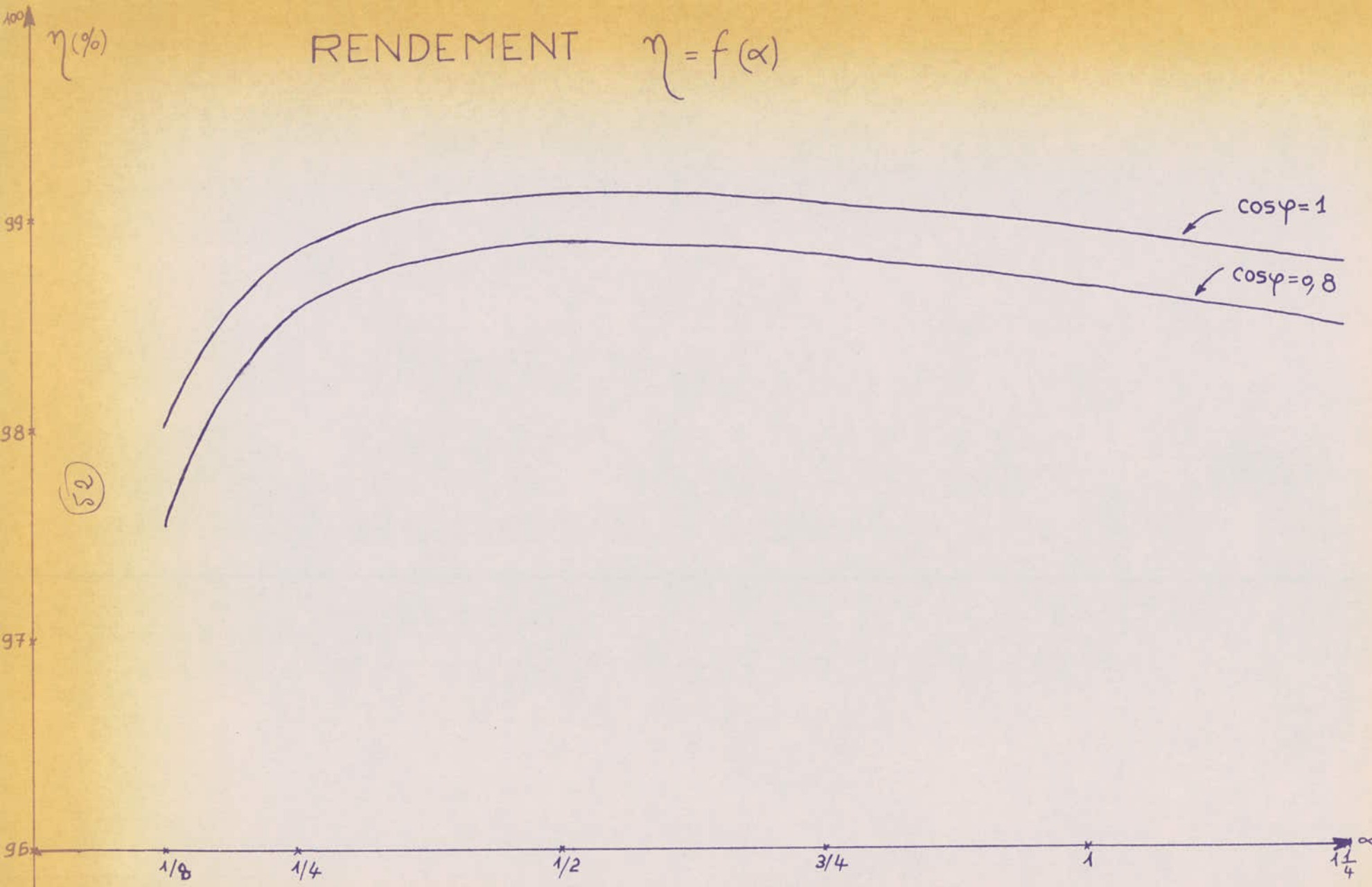
- Pour une charge résistive $\cos \varphi = 1$.

α	$\alpha^2 P_K \text{ kW}$	$P_0 + \alpha^2 P_K \text{ kW}$	$\alpha S_n \cos \varphi \text{ kW}$	$\alpha S_n \cos \varphi + P_0 + \alpha^2 P_K \text{ kW}$	$\eta \%$
1/4	2,65	14,55	1250	1264,55	98,85
1/2	10,6	22,5	2500	2522,5	99,11
0,53	11,9	23,8	2650	2673,8	99,12
3/4	23,85	35,75	3750	3785,75	99,06
1	42,4	54,3	5000	5054,3	98,93
5/4	66,25	78,15	6250	6328,15	98,77

- Pour une charge à $\cos \varphi = 0,8$.

α	$\alpha^2 P_K \text{ kW}$	$P_0 + \alpha^2 P_K \text{ kW}$	$\alpha S_n \cos \varphi \text{ kW}$	$\alpha S_n \cos \varphi + P_0 + \alpha^2 P_K \text{ kW}$	$\eta \%$
1/4	2,65	14,55	1000	1014,55	98,57
1/2	10,6	22,5	2000	2022,5	98,88
0,53	11,9	23,8	2120	2143,8	98,89
3/4	23,85	35,75	3000	3035,75	98,82
1	42,4	54,3	4000	4054,3	98,66
5/4	66,25	78,15	5000	5078,15	98,46

RENDEMENT $\eta = f(\alpha)$



Caracteristiques en charge $U_2 = f(I_2)$

- Variation de la tension secondaire avec la charge pour un facteur de puissance donné

Une charge est définie comme étant le rapport de sa puissance sur la puissance nominale

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

la chute de tension au secondaire est définie par

$$\Delta U \% = \frac{U_{2n} - U_2}{U_{2n}} 100$$

U_2 = tension secondaire pour un facteur de puissance donné

U_{2n} : tension secondaire nominale

Soient U'_{2n} et U'_2 les tensions secondaires ramenées au primaire -

l'expression de la chute de tension est :

$$\Delta U \% = \frac{U'_{2n} - U'_2}{U'_{2n}} 100 = \frac{U_{1n} - U'_2}{U_{1n}} 100$$

avec $U'_{2n} = U_{1n}$

$$\Delta U' = U_1 - U'_2$$

la chute de tension est approximée par la méthode analytique de la façon suivante :

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

où $U_{ka} = 0,83 \%$
 $U_{kr} = 6,91 \%$

54

Cas d'une charge resistive [$\cos \varphi_2 = 1, \sin \varphi_2 = 0$]

$$\Delta u \% = \alpha u_{ka} \% = 0,83 \alpha.$$

α	$\Delta u \%$	$\Delta u' \text{ v}$	$u_2' \text{ v}$	$u_2 \text{ v}$	u_2 / u_{2n}	I_2 / I_{2n}	$I_2 \text{ A}$
1/4	0,207	20,7	34979,2	4989,6	0,998	0,251	145
1/2	0,415	41,5	34959,5	4979,25	0,996	0,502	290
3/4	0,623	62,3	34937,7	4968,85	0,994	0,755	436
1	0,83	83	34917	4958,5	0,992	1,008	582
5/4	1,038	103,7	34896,2	4948,1	0,990	1,263	728

Cas d'une charge inductive [$\cos \varphi_2 = 0,8, \sin \varphi_2 = 0,6$]

$$\Delta u \% = \alpha [0,8 \cdot 0,83 + 6,91 \cdot 0,6] = 4,81 \alpha$$

α	$\Delta u \%$	$\Delta u' \text{ v}$	$u_2' \text{ v}$	$u_2 \text{ v}$	u_2 / u_{2n}	I_2 / I_{2n}	$I_2 \text{ A}$
1/4	1,203	120,3	34890	4940	0,988	0,316	192,5
1/2	2,419	241	34759	4979,5	0,976	0,64	369,5
3/4	3,618	361	34639	4919,5	0,964	0,973	562
1	4,81	481	34519	4759,5	0,952	1,3	756,5
5/4	6,01	601	34399	4699,5	0,940	1,662	960

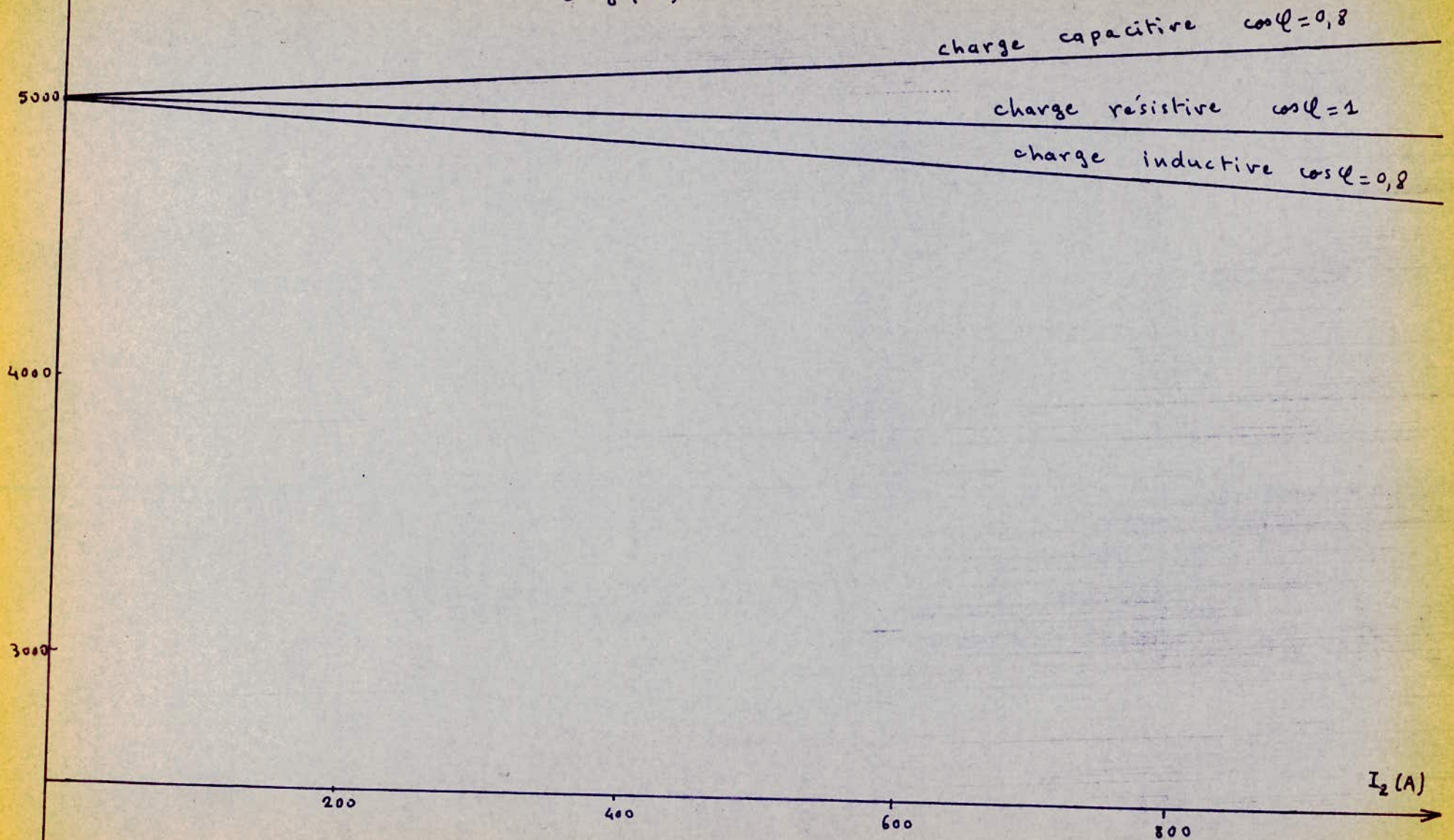
Cas d'une charge capacitive [$\cos \varphi_2 = 0,8$, $\sin \varphi_2 = -0,6$]

$$\Delta u \% = -3,48 \alpha$$

α	$\Delta u \%$	$\Delta u' \text{ V}$	$u_2' \text{ V}$	$u_2 \text{ V}$	u_2 / u_{2n}	I_2 / I_{2n}	$I_2 \text{ A}$
1/4	-0,87	-87	35087	5043,5	1,009	0,310	179
1/2	-1,74	-174	35174	5087	1,017	0,615	355
3/4	-2,61	-261	35261	5130,5	1,026	0,914	528
1	-3,48	-348	35348	5174	1,035	1,208	697,5
5/4	-4,35	-435	35435	5217,5	1,044	1,497	864,5

caractéristiques en charge

$$U_2 = f(I_2)$$



Verification et calcul de la tension de court-circuit

- Largeur rapportée au canal de fuite

$$a_r = a_{1,2} + \frac{a_1 + a_2}{3}$$

$$= 2,7 + \frac{4,44 + 6,11}{3} = 6,22 \text{ cm}$$

$$a_r = 6,22 \text{ cm}$$

- Calcul du coefficient de Rogowski

La valeur définitive du coefficient de Rogowski est donnée par :

$$K_R = 1 - \frac{1}{2\pi} \frac{2a_{1,2} + a_1 + a_2}{h_B}$$

$$= 1 - \frac{1}{2 \cdot 3,14} \frac{2 \cdot 2,7 + 4,44 + 6,11}{97} = 0,97$$

Calcul de la tension de court-circuit

- la composante réactive est donnée par :

$$u_{kr} = \frac{2\pi f M_0 W_1^2 a_r \beta K_R I_{g1}}{4g_1} \cdot 100 \text{ [%]}$$

$$= \frac{2\pi \cdot 50 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 95^2 \cdot 6,22 \cdot 10^{-2} \cdot 1,61 \cdot 0,97 \cdot 577,37}{2886,84} \cdot 100$$

$$= 6,91 \%$$

Tension de court-circuit

$$u_k = \sqrt{u_{kr}^2 + u_{ka}^2}$$

$$= \sqrt{6,91^2 + 0,83^2} = 6,96 \%$$

Variation par rapport au cahier des charges

$$\Delta u_k \% = \frac{7 - 6,96}{6,96} = 0,5 \% < 10 \%$$

u_k est très peu différente de la valeur du cahier des charges.

Vérification du courant de marche à vide

Le courant de marche à vide a 2 composantes

- une composante active I_{0a} en phase avec la tension
c'est d'elle que résultent les pertes dans le fer
- une composante réactive $I_{0\mu}$ qui crée le flux magnétique principal et qui est en phase avec lui.

Calcul de la composante active:

$$I_{0a} = \frac{P_0}{\sqrt{3} U_1} \quad [A]$$

$$= \frac{11,9}{\sqrt{3} \cdot 35} = 0,2 A$$

Calcul de la composante réactive.

$$I_{0\mu} = \frac{Q_0}{\sqrt{3} U_1}$$

Q_0 pertes réactives dans le fer

A chaque valeur de l'induction les pertes spécifiques réactives sont données par la courbe suivante:

- Dans les colonnes

$$\hat{B}_c = 1,65 T$$

$$q_{0col} = 12,8 \text{ VAR/Kg}$$

$$Q_{col} = q_{0col} G_{col}$$

$$= 12,8 \cdot 2265,1 = 28993,28 \text{ VAR}$$

- Dans les culasses:

$$\hat{B}_j = 1,44 T$$

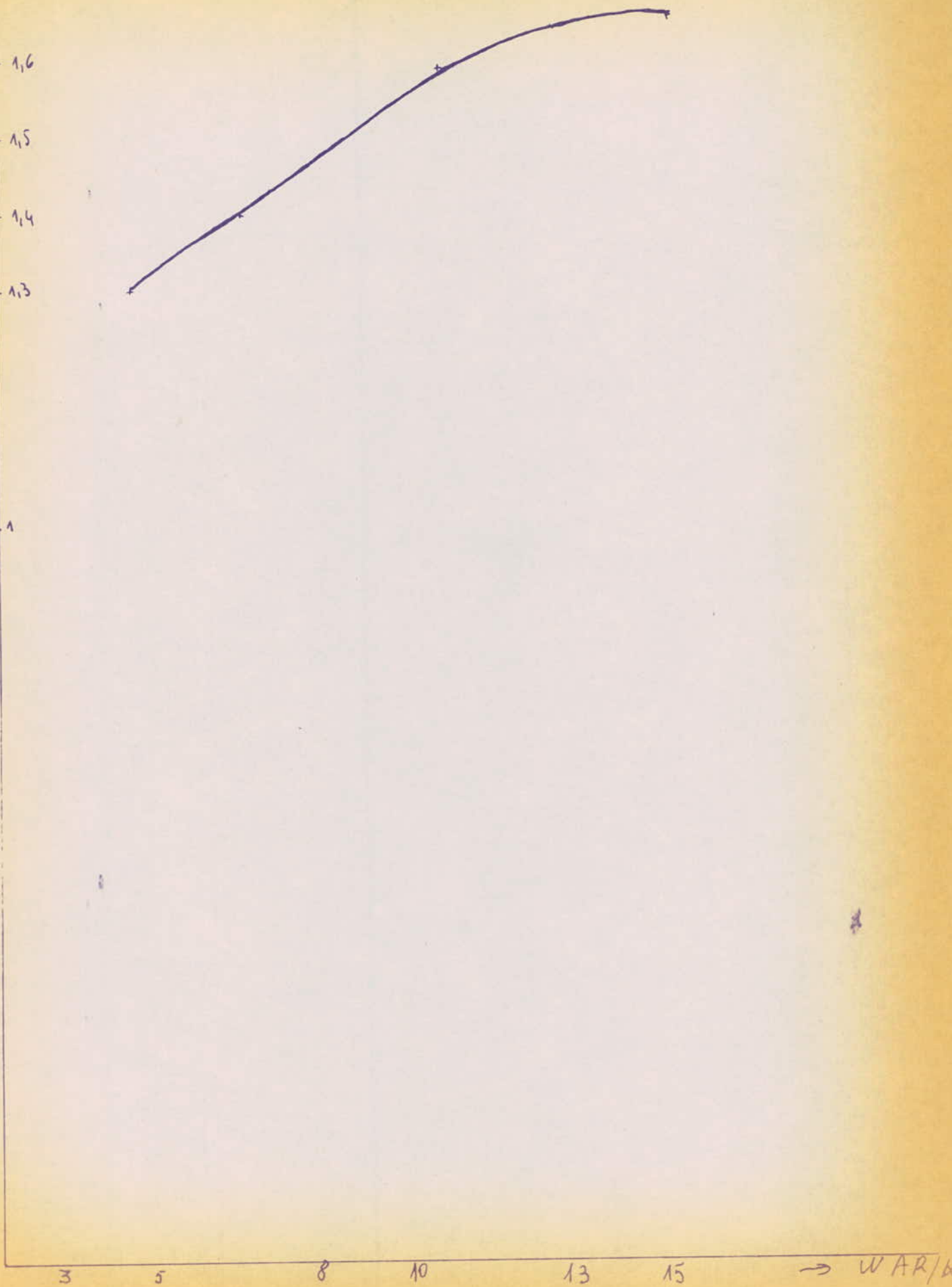
$$q_{0j} = 7,3 \text{ VAR/Kg}$$

$$Q_{0j} = q_{0j} G_j$$

$$= 7,3 \cdot 1026,47 = 7493,23 \text{ VAR}$$

COURBE DES PERTES RÉACTIVES

(57)



- Dans les coeurs

$$\hat{B}_{\text{coi}} = 1,55 \text{ T}$$

$$q_{0 \text{ coi}} = 9,8 \text{ VAR/Kg}$$

$$Q_{\text{coi}} = q_{0 \text{ coi}} G_{\text{coi}}$$

$$= 9,8 \cdot 1164,9 = 11416,02 \text{ VAR}$$

- Dans les entrefers

le nombre d'entrefers est estimé égal à 7. = n_s

En supposant que l'induction magnétique circulant dans l'entrefers est la même que celle de la colonne, la valeur des pertes par unité de surface est = $q_{0s} = 2,5 \text{ VAR/cm}^2$

$$Q_s = q_{0s} \cdot n_s \cdot S_s$$

$$= 2,5 \cdot 7 \cdot 828,69 = 14502,07 \text{ VAR.}$$

Puissance totale

$$Q_0 = Q_{\text{col}} + Q_s + Q_{\text{coi}} + Q_s$$

$$= 28993,28 + 7493,23 + 11416,02 + 14502,07$$

$$= 62,4 \text{ KVAR}$$

$$I_0 \mu = \frac{Q_0}{\sqrt{3} U_n} = \frac{62,4}{\sqrt{3} \cdot 35} = 1,03 \text{ A}$$

Valeur du courant de marche à vide

$$I_0 = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0\mu}^2}$$

$$= \sqrt{0,2^2 + 1,03^2} = 1,05 \text{ A}$$

En grandeur réduite

$$i_0 \% = \frac{I_0}{I_n} \cdot 100 = \frac{1,05}{47,62} \cdot 100 = 2,21 \%$$

Calcul et verification des pertes

Pertes dues à la charge

Comme tout conducteur parcouru par un courant, l'enroulement est le siège de perte par effet Joule - les pertes par effet Joule représentent les pertes de base

les pertes supplémentaires sont dues aux courants de circulation entre conducteurs en parallèle et à l'effet pelliculaire qui se manifeste surtout dans les conducteurs de section importante

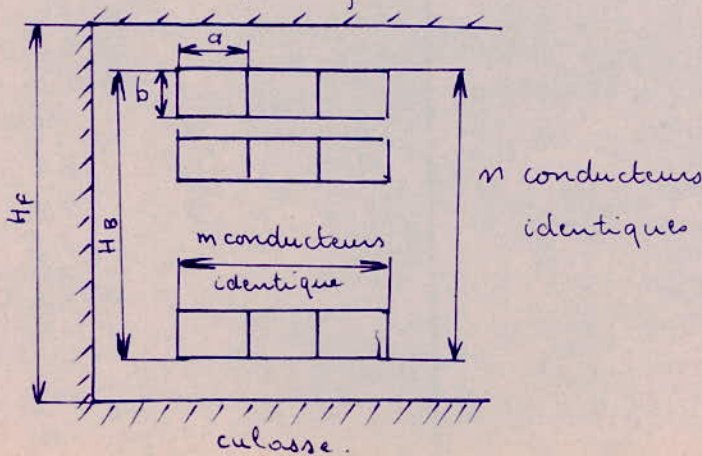
les courants de circulation sont diminués en faisant la permutation des conducteurs en parallèle.

l'effet pelliculaire est caractérisé par un coefficient de majoration de la résistance en courant alternatif.

Ce coefficient de majoration K_{mR} pour un conducteur méplat est donné par :

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

$$\alpha = \sqrt{\frac{nb}{h_F} \frac{\omega \mu_0}{2\rho}}$$



calcul des pertes.

a. Enroulement B-T

Pertes de base

- Pertes dans l'enroulement

$$P_{J_1} = m R_1 I_{\phi_1}^2$$

$$= 3 \cdot 577,37^2 \cdot 16,49 \cdot 10^{-3} = 16491,12 \text{ W}$$

- Pertes dans les connexions

la B-T est connecté en étoile, dans ce cas la longueur des connexions est.

$$l_{\text{con}_1} = 7,5 l_B$$

$$= 7,5 \cdot 97 = 7,28 \text{ m}$$

et la section des connexions est

$$S_{\text{con}_1} = S_w$$

Résistance de la connexion

$$R_{\text{con}_1} = \rho \frac{l_{\text{con}_1}}{S_{\text{con}_1}}$$

$$= 0,021 \frac{7,28}{162} = 0,94 \cdot 10^{-3} \Omega$$

Pertes

$$P_{J_1, \text{con}_1} = R_{\text{con}_1} I_n^2$$

$$= 0,94 \cdot 10^{-3} \cdot 577,37^2 = 313,35 \text{ W}$$

- Pertes supplémentaires

$$K_{mR_1} = 1 + \frac{m^2 - 0,2}{9} (\alpha a)^4$$

$m = 10$ car 10 inducteurs sont en parallèle

$n = 95$ nombre de spire.

(62)

$$\alpha = \left(\frac{95 \cdot 4,4 \cdot 314 \cdot 10^{-7} \cdot 4\pi}{1120 \cdot 2 \cdot 2,1 \cdot 10^{-8}} \right)^{1/2} = 59,21$$

$$(\alpha a)^4 = (59,21 \cdot 3,8 \cdot 10^{-3})^4 = 2,56 \cdot 10^{-3}$$

$$K_{MR1} = 1 + \frac{10^2 - 0,2 \cdot 2,56 \cdot 10^{-3}}{9} = 1,03$$

les pertes supplémentaires dans la B.T sont :

$$P_{sup,1} = m(K_{MR1} - 1) R_1 I_{f,1}^2$$

$$= 3(1,03 - 1) \cdot 16,49 \cdot 10^{-3} \cdot 577,37^2 = 494,73 \text{ W}$$

Pertes totales dans l'enroulement

$$P_{cu1} = P_{J1} + P_{J,un1} + P_{sup,1}$$

$$= 16491,12 + 313,35 + 494,73$$

$$= 17299,2 \text{ W}$$

b. Enroulement H.T.

- Pertes dans l'enroulement

$$P_{J2} = m R_2 I_{f,2}^2$$

$$= 3 \cdot 3,05 \cdot 47,62^2 = 20749,12 \text{ W}$$

- Pertes dans les connexions

Pour une connexion de l'enroulement en triangle :

$$l_{cn} = 14 l_0 = \text{longueur des connexions.}$$

$$= 14 \cdot 97 = 1358 \text{ m}$$

et $SW_{cn} = \sqrt{3} SW = \text{section des connexions.}$

$$= \sqrt{3} \cdot 13,9 = 24,07 \text{ mm}^2$$

Résistance de la connexion

$$R_{un2} = \rho \frac{l_{cn2}}{SW_{cn2}}$$

$$R_{cu2} = 0,021 \frac{13,58}{24,07} = 11,85 \cdot 10^{-3} \Omega$$

Pertes dans les annexes.

$$\begin{aligned} P_{sum} &= R_{cu2} I^2 \\ &= 11,85 \cdot 10^{-3} \cdot 47,62^2 \\ &= 26,87 \text{ W} \end{aligned}$$

Pertes supplémentaires dans l'enroulement.

$$K_{mR2} = 1 + \frac{m^2 - 0,2}{9} (\alpha a)^4$$

m = nbre de spire / galette

n = nbre de galette

$$\alpha = \sqrt{\frac{83 \cdot 5,1 \cdot 314 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}}{1120 \cdot 2 \cdot 2,1 \cdot 10^{-8}}} = 59,3$$

$$(\alpha a)^4 = 0,8 \cdot 10^{-3}$$

$$K_{mR2} = 1 + \frac{15^2 - 0,2}{9} = 1,02$$

$$\begin{aligned} P_{sup2} &= m (K_{mR2} - 1) R_2 I_{\phi 2}^2 \\ &= 3 \cdot (1,02 - 1) \cdot 3,05 \cdot 47,62^2 = 414,98 \text{ W} \end{aligned}$$

Pertes totales dans l'enroulement H.T.

$$\begin{aligned} P_{cu2} &= P_{J2} + P_{sum} + P_{sup2} \\ &= 20749,12 + 26,87 + 414,98 \\ &= 21190,97 \text{ W} \end{aligned}$$

Pertes totales dues à la charge

$$P_K = K_{PK} (P_{cu1} + P_{cu2})$$

$K_{PK} = 1,10$ facteur de perte supplémentaire.

L'introduction du facteur K_{P_k} sert à approximer les pertes dues à la charge. Car en plus des pertes calculées existent d'autres pertes dans les parties mécaniques et dont le calcul est très compliqué.

$$\begin{aligned} P_k &= K_{P_k} (P_{cu1} + P_{cu2}) \\ &= 1,10 (21\,190,97 + 172\,99,2) \\ &= 42,4 \text{ kW} \end{aligned}$$

En valeur par rapport au cahier des charges.

$$\Delta P_k \% = \frac{42,4 - 41,5}{42,4} = 2,1\% < 10\%.$$

la valeur calculée de P_k est admissible car elle ne dépasse pas de 10% celle imposée par le cahier des charges.

Calcul des pertes dans le fer.

la majeure partie de ces pertes sont les pertes principales dues aux effets de l'hysteresis et des courants de Foucault.

Les pertes par hysteresis P_h sont dues aux frottements entre les cristaux lors de l'inversion d'aimantation alternative qui crée des forces électromotrices induites dans les tôles. Les courants qui en résultent provoquent les pertes par courant de Foucault.

L'autre partie des pertes fer est constituée par les pertes supplémentaires.

Les pertes fer dépendent de l'induction magnétique et de la fréquence.

Pour les tôles utilisées les pertes spécifiques sont déterminées pour des inductions comprises entre 0,5 et 1,7 T et des fréquences jusqu'à 100 Hz.

Les pertes spécifiques sont données par :

$$P = P_{10} B^n \left(\frac{f}{50} \right)^{1,35}$$

$$\text{où } n = 5,7 \log \frac{P_{15}}{P_{10}}$$

P_{10} perte en W/Kg pour $B = 1\text{T}$ - $P_{10} = 0,90\text{ W/Kg}$

P_{15} perte en W/Kg pour $B = 1,5\text{T}$ - $P_{15} = 1,90\text{ W/Kg}$

$$n = 5,7 \log \frac{1,90}{0,90} = 1,85$$

(66)

Détermination des pertes spécifiques P_s

- Dans la colonne

l'induction dans la colonne est égale à 1,65 T

$$P_{1,65} = P_{1,0} (1,65)^{1,85} = 0,9 (1,65)^{1,85} = 2,27 \text{ W/Kg}$$

- Dans la culasse

l'induction dans la culasse est égale à 1,44 T

$$P_{1,44} = 0,9 (1,44)^{1,85} = 1,77 \text{ W/Kg}$$

- Dans les wangs

l'induction dans les wangs est égale à 1,55 T

$$P_{1,55} = 0,9 (1,55)^{1,85} = 2,03 \text{ W/Kg}$$

Évaluation des pertes principales.

- Dans les colonnes

$$P_{fec} = P_s \text{ vol } G_{\text{col}}$$

$$= 2,27 \cdot 2265,1 = 5141,78 \text{ W}$$

- Dans les culasses

$$P_{fe_j} = P_{s_j} G_j$$

$$= 1,77 \cdot 1026,47 = 1816,85 \text{ W}$$

- Dans les wangs

$$P_{fe_m} = P_{s_m} G_m$$

$$= 2,03 \cdot 1164,9 = 2364,75 \text{ W.}$$

Pertes supplémentaires

Elles sont évaluées approximativement et l'expérience montre qu'elles sont de 15 à 20% des pertes principales dans les colonnes et les culasses et qu'elles sont de 50% dans

(67)

coins. Car dans les coins, s'ajoutent aux pertes supplémentaires réelles les pertes par distorsion du flux magnétique

Pertes principales dans les colonnes et les culasses:

$$P_{\phi_0} = P_{\text{ecol}} + P_{\text{ecj}} \\ = 5141,78 + 1816,85 = 6958,63 \text{ W}$$

les pertes supplémentaires sont estimées à 20% de P_{ϕ_0}

$$P_{s_0} = 0,2 \cdot 6958,63 = 1391,73 \text{ W}$$

Pertes supplémentaires dans les coins

$$P_{s_{\text{coi}}} = 0,5 P_{\text{ec}_{\text{coi}}} \\ = 0,5 \cdot 2364,75 \text{ W} = 1182,38 \text{ W}$$

Pertes totales dans le fer.

$$P_0 = P_{\phi_0} + P_{s_0} + P_{\text{ec}_{\text{coi}}} + P_{s_{\text{coi}}} \\ = 6958,63 + 1391,73 + 2364,75 + 1182,38 \\ = 11,9 \text{ KW}$$

Calcul mécanique.

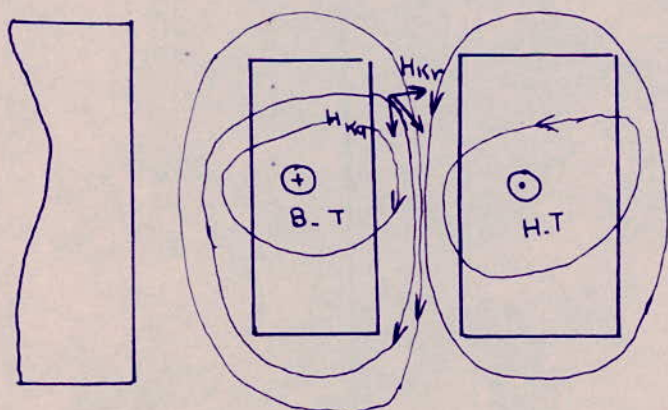
Le but de ce calcul est d'évaluer pendant un court-circuit brusque les efforts électrodynamiques et de vérifier qu'ils sont supportables par les enroulements.

Les enroulements du transformateur sont soumis aussi à des forces dues à leur poids propre - les forces qui apparaissent lors d'un court-circuit du secondaire du transformateur peuvent atteindre des valeurs considérables et mettre ainsi l'appareil hors de service.

Un transformateur est bien conçu s'il résiste à l'action de ces forces.

Les forces de court-circuit ont 2 directions d'action, elles se divisent en 2 parties

- forces radiales
- forces axiales



Le champ de fuite a 2 composantes

H_{kr} = composante radiale

H_{ka} = composante axiale

les forces axiales dépendent surtout des dissymétries dans la disposition des enroulements.

les forces radiales tendent à écarter l'enroulement HT (extérieur) et à comprimer l'enroulement BT (intérieur).

D'autres efforts tendent à comprimer l'enroulement dans le sens de la hauteur.

Tous ces efforts se produisent aussi pendant le fonctionnement normal du transformateur mais ils sont petits et ne présentent pas un danger.

Ce n'est que pendant un court-circuit qu'ils prennent une importance considérable et présentent un énorme danger pour le transformateur.

le cas de court-circuit le plus défavorable est celui du court-circuit triphasé symétrique.

Dans ce cas, la valeur maximale du courant de court-circuit est donnée par :

$$i_{kmax} = \sqrt{2} K_m I_{kdin} \quad [A]$$

K_m = coefficient de crête ou d'impulsion

I_{kdin} = courant stationnaire de court-circuit

$$K_m = 1 + e^{-\pi \frac{4k_a}{4k_r}} = 1 + e^{-\pi \frac{0,83}{6,91}} = 1,69$$

$$I_{kdin} = I_n \frac{100}{4k}$$

les efforts admissibles pour le cuivre sont $\sigma_{ad} = 700 \text{ kgf/cm}^2$

(70)

Expression des forces :

Force radiale

$$F_r = \frac{6,4 (W i_{kmax})^2 l_{moy} K_R 10^{-8}}{h_B}$$

K_R = coefficient de Rogowski

l_{moy} = longueur moyenne de la spire [m]

W = nombre de spire

h_B = hauteur de l'enroulement [m]

Force axiale

$$F_a = F_r \frac{a_r}{2h_B}$$

a_r largeur reportée au canal de fuite

F_r force radiale

Calcul mécanique de l'enroulement B-T.

valeur du court stationnaire

$$\begin{aligned} I_{k \text{ din } 1} &= I_{n1} \frac{100}{u_k} \\ &= 577,37 \frac{100}{6,96} = 8,35 \cdot 10^3 \text{ A} \end{aligned}$$

courant maximal dans l'enroulement

$$i_{kmax,1} = \sqrt{2} \cdot 1,69 \cdot 8,35 \cdot 10^3 = 19,95 \cdot 10^3 \text{ A}$$

Force radiale

$$F_{r,1} = \frac{6,4 (95 \cdot 19,95 \cdot 10^3)^2 \cdot 1,34 \cdot 0,97 \cdot 10^{-8}}{0,97} = 3,08 \cdot 10^5 \text{ Kg f}$$

Force axiale

$$F_{a,1} = F_{r,1} \frac{a_r}{2h_B} = \frac{3,08 \cdot 10^5 \cdot 6,22 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 97 \cdot 10^{-2}} = 9,88 \cdot 10^3 \text{ Kg f}$$

(71)

Effort dû aux forces radiales

$$\sigma_{r1} = \frac{F_{r1} \cdot 10^2}{2\pi w_1 \Delta w_1} \quad [\text{kgf/cm}^2] \quad s w_1 \quad [\text{mm}^2]$$

$$= \frac{3,08 \cdot 10^5 \cdot 10^2}{2 \cdot 3,14 \cdot 95 \cdot 162} = 318,68 \quad \text{kgf/cm}^2$$

Effort dû aux forces axiales

$$\sigma_{a1} = \frac{F_{a1}}{S_1}$$

$$S_1 = \pi D_{m1} a_1$$

 D_{m1} diamètre moyen de la BT. a_1 épaisseur de l'enroulement BT.

$$\sigma_{a1} = \frac{9,88 \cdot 10^3}{3,14 \cdot 42,64 \cdot 4,44} = 16,62 \quad \text{kgf/cm}^2$$

Calcul mécanique de l'enroulement H.T

courant stationnaire

$$I_{x \text{ din } 2} = I_{h2} \frac{100}{u_x}$$

$$= 47,62 \frac{100}{6,96} = 6,88 \cdot 10^2 \quad \text{A}$$

courant maximum de court-circuit dans l'enroulement

$$i_{x \text{ max } 2} = \sqrt{2} \cdot 1,69 \cdot 6,88 \cdot 10^2 = 1,645 \cdot 10^3 \quad \text{A}$$

Force radiale

$$F_{r2} = \frac{6,4 (1210 \cdot 1,645 \cdot 10^3)^2 \cdot 1,67 \cdot 0,97 \cdot 10^{-8}}{0,97} = 4,24 \cdot 10^5 \quad \text{kgf}$$

Effort dû aux forces radiales

$$\sigma_{r2} = \frac{F_{r2} \cdot 10^2}{2\pi w_2 s w_2}$$

$$= \frac{4,24 \cdot 10^5 \cdot 10^2}{2 \cdot 3,14 \cdot 1210 \cdot 13,9} = 401,47 \quad \text{kgf/cm}^2$$

(72)

Force axiale

$$F_{a2} = \frac{F_{r2} a_r}{2h_3}$$
$$= \frac{4,24 \cdot 10^5 \cdot 6,22 \cdot 10^{-2}}{97 \cdot 10^{-2}} = 27,19 \cdot 10^3 \text{ Kg f.}$$

Effort dû aux forces axiales

$$\sigma_{a2} = \frac{F_{a2}}{S_2}$$

$$S_2 = \pi D_m a_2$$

$$= 3,14 \cdot 53,19 \cdot 6,11 = 1020,47 \text{ cm}^2$$

$$\sigma_{a2} = \frac{27,19 \cdot 10^3}{1020,47} = 26,65 \text{ Kg / cm}^2$$

Tous les efforts radiaux et axiaux sont inférieurs aux efforts admissibles donc les enroulements sont résistants aux court-circuits.

Calcul thermique

Le calcul permet de vérifier que les échauffements sont admissibles par les diverses parties du transformateur.

L'échauffement est la surelevation de température d'un point en question par rapport à la température de référence.

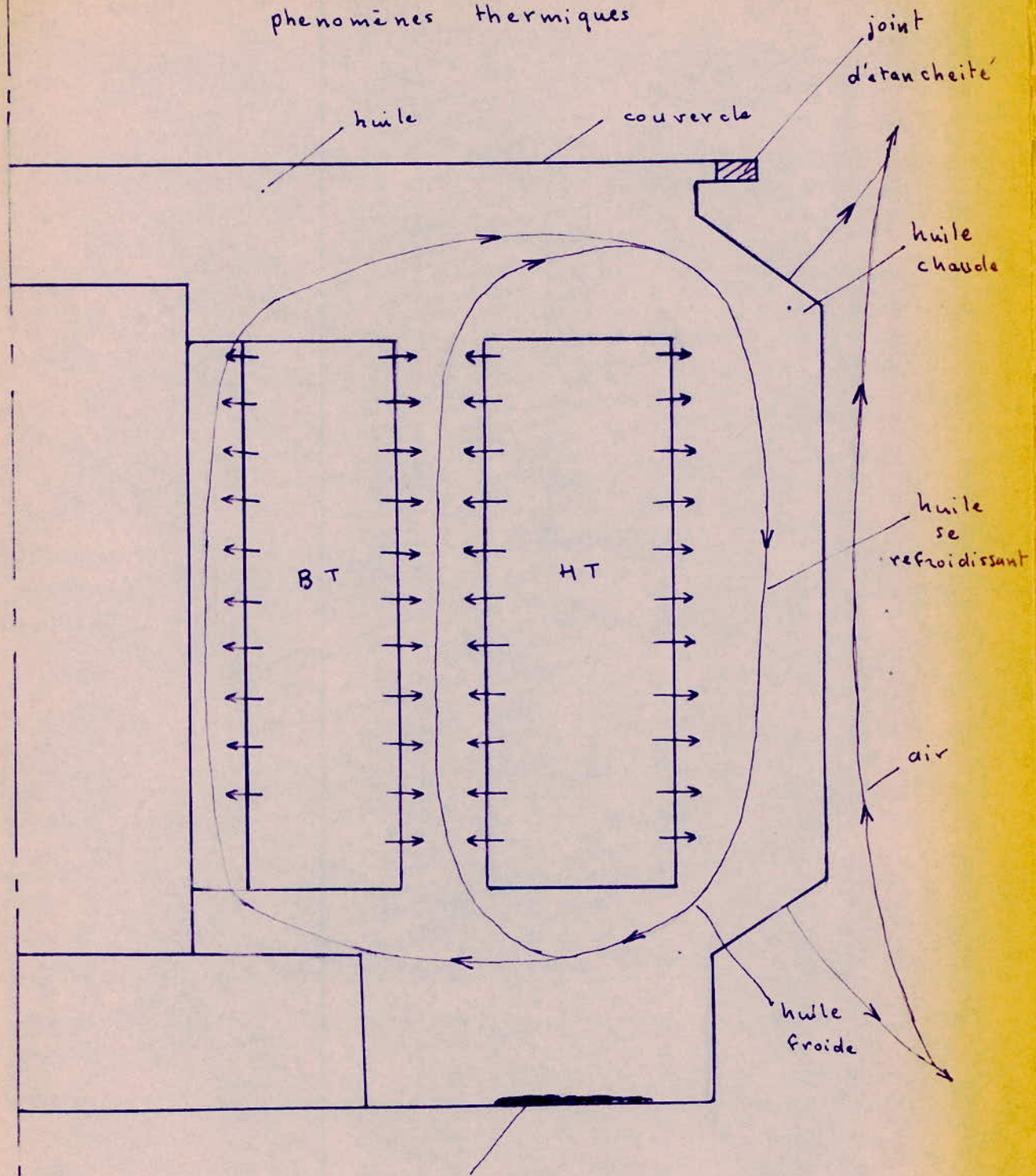
Les diverses pertes d'énergie de la machine se transforment en chaleur et provoquent les échauffements des différentes parties du transformateur.

Les échauffements sont très nuisibles et modifient les propriétés :

- électriques = augmentation de la résistivité
- diélectriques = vieillissement des matériaux magnétiques et isolants
- mécaniques = diminution de la ténacité et de l'élasticité, dilatation
- chimiques = favorisation de l'oxydation.

Un accroissement excessif de température peut influer d'avantage de façon négative sur ces propriétés. C'est ainsi que la durée de service de l'isolation peut être extrêmement courte si la température admissible est dépassée. Pour cela les normes fixent les échauffements admissibles pour tous les matériaux utilisés dans la construction des machines.

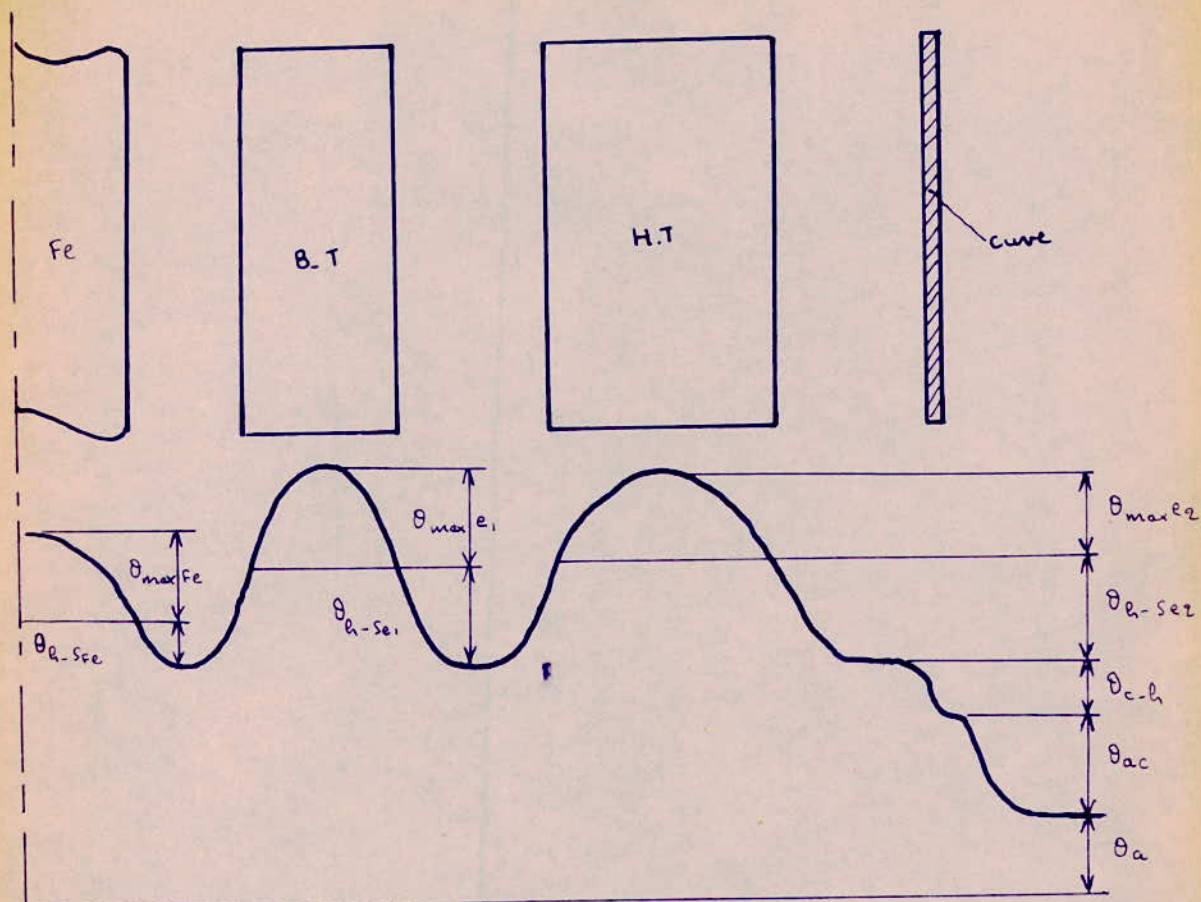
schéma de principe des
phenomènes thermiques



dépôt dû à la décomposition
de l'huile

(75)

Différents échauffements
dans le transformateur.



θ_a température de l'air ambiant.

θ_{ac} échauffement de la cuve par rapport à l'air

θ_{c-h} échauffement de l'huile par rapport à la cuve

θ_{h-se_2} : échauffement surface enroulement H.T par rapport à l'huile

$\theta_{max e_2}$ échauffement enroulement H.T par rapport à sa surface

θ_{h-se_1} échauffement surface fer par rapport à l'huile

$\theta_{max e_1}$ échauffement fer - surface

θ_{h-se_1} échauffement surface enroulement B.T par rapport à l'huile.

$\theta_{max e_1}$ échauffement B.T par rapport à sa surface.

Le système de refroidissement utilisé consiste en l'immersion du transformateur dans une cuve pleine d'huile. Par l'effet de l'échauffement, de cette huile, dû aux matériaux actifs et de son refroidissement le long des parois de la cuve s'établit une circulation naturelle de l'huile. La transmission de chaleur par la surface des parois de la cuve à l'ambiance a lieu par convection, elle est minimale par rayonnement.

Echauffement des enroulements par rapport à l'huile.

La température dans un enroulement se répartit de façon non uniforme suivant la hauteur d'une part et la largeur d'autre part.

L'agent de refroidissement ne baigne pas tous les conducteurs dans les mêmes conditions. Les côles axiales et radiales nécessaires pour supporter les spires, empêchent les conducteurs qui s'appuient sur elles de contacter l'agent de refroidissement.

C'est à cause de tout ça que seule la température moyenne, par rapport à l'huile, est considérée.

Echauffement moyen de l'enroulement H.T

L'échauffement moyen pour un enroulement à disque comme c'est le cas, est donné par =

$$\theta_{h.H.T} = q_2 \left(\frac{\delta_{is2}}{\alpha_{dis}} + \frac{1}{\alpha_{cm2}} \right)$$

(77)

δ_{is2} = épaisseur de l'isolation d'un seul côté du conducteur -

$$\delta_{is2} = 0,62 \text{ mm}$$

λ_{is} = conductivité thermique du papier imprégné à l'huile

$$\lambda_{is} = 0,15 \text{ W/m}^2\text{C}$$

q_2 = flux thermique spécifique qui traverse l'isolation vers l'huile baignant la galette

q_2 est donné par l'expression suivante =

$$q_2 = \frac{500 \cdot K_{mR2} \cdot \rho \cdot J_2^2 \cdot S_{w2} \cdot W_{sp/gal}}{\varphi (b' + W_{sp/gal} \cdot a')} \quad [\text{W/m}^2]$$

K_{mR2} = coefficient de majoration des pertes en courant alternatif.

$$K_{mR2} = 1,02$$

ρ = résistivité du cuivre chaud -

$$\rho = 0,021 \text{ } \Omega\text{mm}^2/\text{m}$$

J_2 = densité de courant

$$J_2 = 3,43 \text{ A/mm}^2$$

a' = largeur du conducteur isolé

$$a' = 2,83 \text{ mm}$$

b' = hauteur du conducteur isolé

$$b' = 6,34 \text{ mm}$$

S_{w2} = section du conducteur

$$S_{w2} = 13,9 \text{ mm}^2$$

$W_{sp/gal}$ = nombre de spires par galette

$$W_{sp/gal} = 15$$

φ = coefficient qui tient compte du fait que les côtes axiales et radiales diminuent la surface de contact avec l'huile.

φ est calculé d'après la relation ci-après =

$$\varphi = \frac{\varphi_v \cdot b' + \varphi_h \cdot W_{sp/gal} \cdot a'}{b' + W_{sp/gal} \cdot a'}$$

φ_v = coefficient qui tient compte des côtes axiales

φ_h = coefficient qui tient compte des côtes radiales

(78)

$$\varphi_e = \frac{\frac{\pi}{4} (D_e^2 - D_i^2) - n_{\text{câle}} \cdot S_{\text{câle radiale}}}{\frac{\pi}{4} (D_e^2 - D_i^2)} = 1 - \frac{n_{\text{câle}} \cdot S_{\text{câle radiale}}}{\frac{\pi}{4} (D_e^2 - D_i^2)}$$

$$\varphi_v = \frac{\pi D_e b' - n_{\text{câle}} \cdot S_{\text{câle axiale}}}{\pi D_e b'} = 1 - \frac{n_{\text{câle}} \cdot S_{\text{câle axiale}}}{\pi D_e b'}$$

$n_{\text{câle}}$ = nombre de câble

$S_{\text{câle}}$ = surface de la câble.

D_i = diamètre intérieur de la bobine

$$D_i = D_{12} + a_{12}$$

$$= 49,78 + 2,7 = 52,48 \text{ cm}$$

D_e = diamètre extérieur de la bobine

$$D_e = D_i + 2a_2$$

$$= 52,48 + 2 \cdot 6,11 = 64,7 \text{ cm}$$

Le nombre de câble est fonction du diamètre extérieur du bobinage.

$D_e \text{ mm}$	150 ÷ 250	250 ÷ 380	380 ÷ 500	500 ÷ 600	600 ÷ 900
$n_{\text{câle}}$	6	8	10	12	12 - 14

$n_{\text{câle}} = 13.$

$$\varphi_e = \frac{\frac{\pi}{4} (64,7^2 - 52,48^2) - 13 \cdot 25 \cdot 6,11}{\frac{\pi}{4} (64,7^2 - 52,48^2)} = 0,82$$

$$\varphi_v = \frac{\pi \cdot 64,7 \cdot 0,634 - 13 \cdot 1,6 \cdot 0,634}{\pi \cdot 64,7 \cdot 0,634} = 0,89$$

$$\varphi = \frac{0,89 \cdot 6,34 + 0,82 \cdot 15 \cdot 4,07}{6,34 + 15 \cdot 4,07} = 0,82$$

Calcul du flux thermique

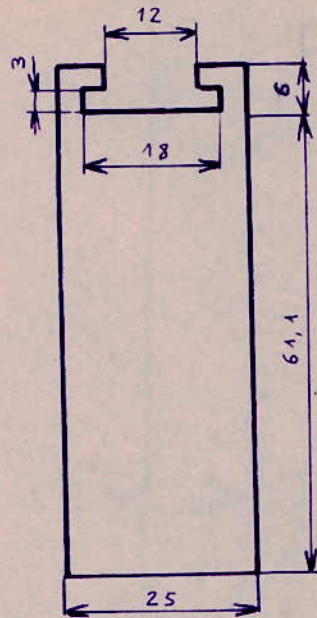
$$q_2 = \frac{500 \cdot 1,02 \cdot 0,021 \cdot 3,43^2 \cdot 13,9 \cdot 15}{0,82 (6,34 + 6,11)} = 475,07 \text{ W/m}^2$$

79

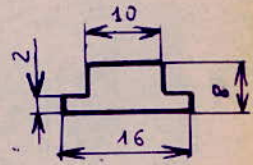
càles

ENROULEMENT HT

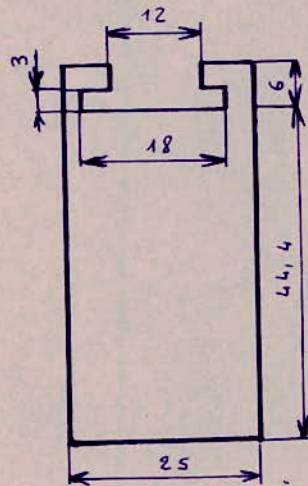
cale radiale



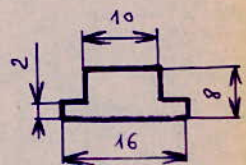
cale axiale



ENROULEMENT BT



cale axiale



cale radiale

Calcul de la température moyenne θ_{h-HT}

θ_{h-HT} = température moyenne de l'enroulement H.T par rapport à l'huile.

$$\theta_{h-HT} = q_2 \left(\frac{\delta_{is2}}{\lambda_{is}} + \frac{1}{\alpha_{cm2}} \right)$$

α_{cm} = coefficient de transmission par convection (donnée par la courbe)

C'est un coefficient global de transmission

$$\alpha_{cm2} = 61 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

$$\theta_{h-HT} = 475,07 \left(\frac{0,62 \cdot 10^{-3}}{0,15} + \frac{1}{61} \right) = 9,8^{\circ}\text{C}$$

$$\theta_{h-HT} = 9,8^{\circ}\text{C}$$

Echauffement de l'enroulement B.T.

La même méthode de calcul sera appliquée pour l'enroulement B.T.

Pour un enroulement hélicoïdal avec commencement à un fil, la température moyenne est donnée par :

$$\theta_{h-BT} = q_1 = \left(\frac{\delta_{is1}}{\lambda_{is}} + \frac{1}{\alpha_{cm1}} \right)$$

$$q_1 = \frac{500 \text{ kVA}_1 \cdot f \cdot J_1^2 \cdot S_{w1} \cdot n_{el}}{\varphi (b' + a_1)}$$

$$\text{avec } \varphi = \frac{\varphi_v \cdot b' + \varphi_h \cdot a_1}{b' + a_1}$$

les coefficients φ_v et φ_h sont donnés par :

$$\varphi_v = \frac{\pi D_i h_B + \pi D_e h_B - n_{cale} l_{cale} \cdot h_B}{\pi (D_i + D_e) h_B}$$

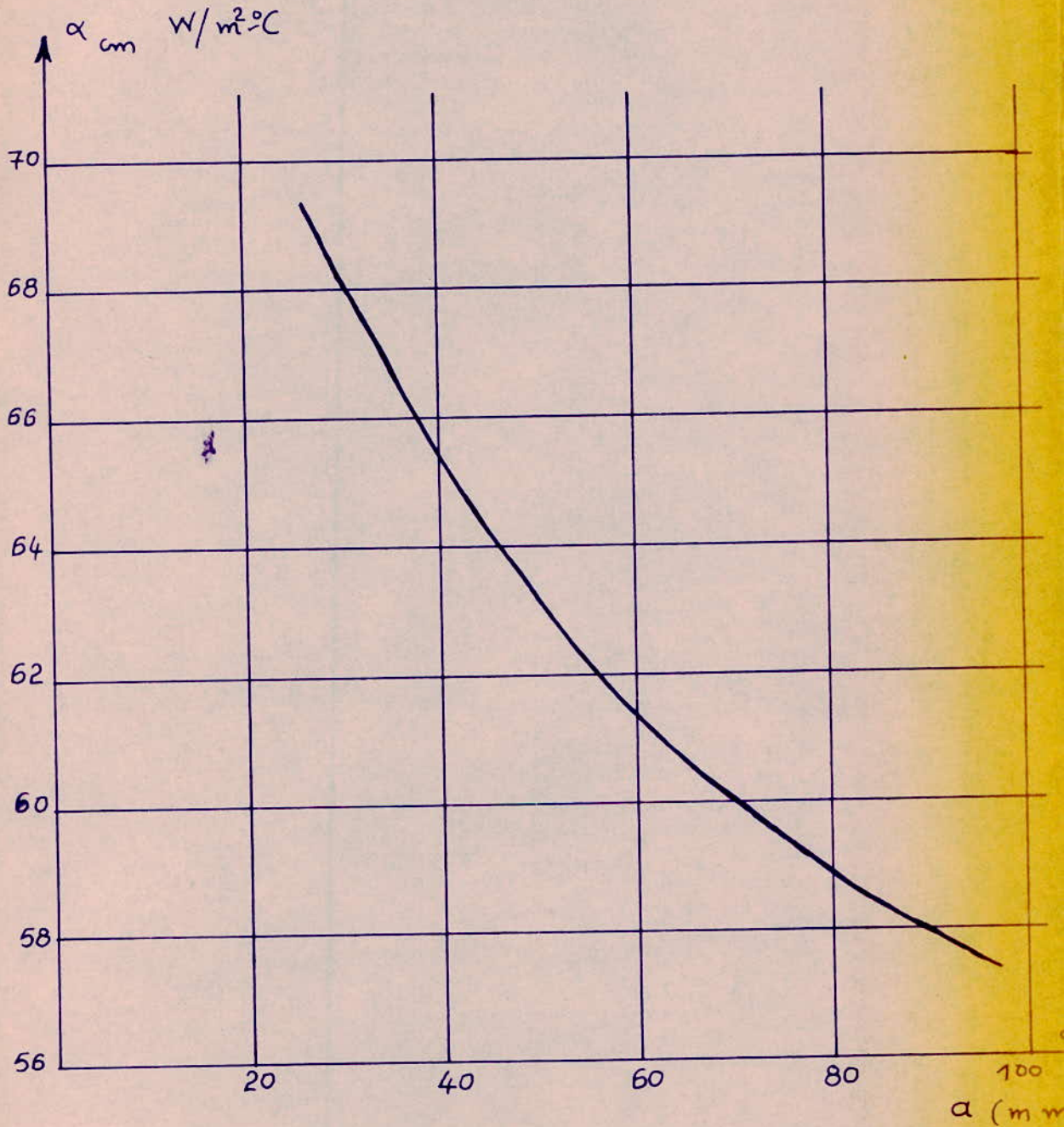
$$= 1 - \frac{n_{cale} l_{cale}}{\pi (D_i + D_e)}$$

l_{cale} = largeur de la cale

81

coefficient global de convection
en fonction de l'épaisseur de la
bobine

$$\alpha_{con} = f(a)$$



(82)

$$\varphi_h = \frac{\pi \left(\frac{D_e + D_i}{2} \right) a_1 - n_{\text{câble}} l_{\text{câble}} a_1}{\pi \left(\frac{D_e + D_i}{2} \right) a_1} = 1 - \frac{n_{\text{câble}} l_{\text{câble}}}{\pi \left(\frac{D_e + D_i}{2} \right)}$$

Diamètre intérieur de la bobine

$$D_i = D + 2 a_1$$

$$= 35,2 + 2 \cdot 1,5 = 38,2 \text{ cm}$$

Diamètre extérieur de la bobine

$$D_e = D_i + 2 a_1$$

$$= 38,2 + 2 \cdot 4,44 = 47,08 \text{ cm}$$

D'après le tableau précédent le nombre de câble

$n_{\text{câble}}$ est égal à 10.

Calcul des coefficients φ_v , φ_h et φ

$$\varphi_v = 1 - \frac{10 \cdot 1,6}{3,14 (38,2 + 47,08)} = 0,94$$

$$\varphi_h = 1 - \frac{10 \cdot 2,5}{3,14 \left(\frac{38,2 + 47,08}{2} \right)} = 0,81$$

$$\varphi = \frac{0,94 \cdot 0,634 + 0,81 \cdot 4,44}{0,634 + 4,44} = 0,82$$

Flux thermique =

$$q_1 = \frac{500 \cdot 1,03 \cdot 0,021 \cdot 3,56^2 \cdot 10 \cdot 16,2}{0,82 (6,34 + 44,4)} = 533,68 \text{ W/m}^2$$

le coefficient α_{air} est égal à $63 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ (tiré de la courbe)

La température moyenne de l'enroulement B-T est =

$$\theta_{\text{B-T}} = 533,68 \left(\frac{0,32 \cdot 10^{-3}}{0,15} + \frac{1}{63} \right) = 9,7^\circ\text{C}$$

Echauffement du noyau.

les conditions de refroidissement du noyau sont les plus délicates vu la position qu'il occupe.

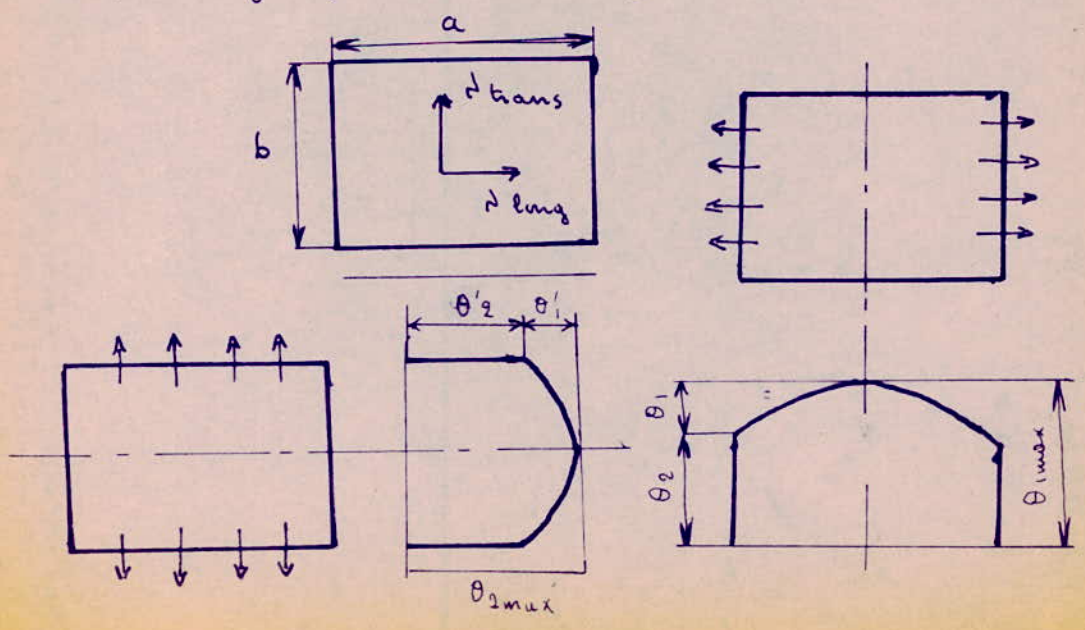
le circuit magnétique n'est pas homogène :

La transmission transversale de la chaleur rencontre sur son chemin l'isolation, entre les tôles, dont la conductivité thermique est très petite devant celle de l'acier.

les surfaces latérales du circuit magnétique sont partiellement couvertes par des câbles longitudinaux, bandages de serrage etc ----

la culasse a des conditions de refroidissement plus améliorées. C'est pour cette raison que seul l'échauffement du noyau, est calculé.

la méthode de calcul consiste à assimiler le noyau à un rectangle qui a même surface.



Le rectangle est équivalent à un paquet de tôle du noyau

Dimensions du rectangle :

- longueur = elle est égale à $0,9 D$

$$a = 0,9 D = 0,9 \cdot 35,2 = 31,68 \text{ cm}$$

- largeur = elle est égale à $\frac{S_{\text{col}}}{a}$

$$b = \frac{S_{\text{col}}}{a} = \frac{828,64}{2 \cdot 31,68} = 13,1 \text{ cm.}$$

Pertes spécifiques des tôles par unité de volume

$$P = P_{\text{sp}} \gamma$$

$$P_{\text{sp}} = \text{perte spécifique par unité de masse} = 2,27 \text{ W/Kg}$$

$$\gamma = \text{poids spécifique des tôles} = 7,65 \text{ Kg/dm}^3$$

$$P = 7,65 \cdot 10^3 \cdot 2,27 = 17,37 \cdot 10^3 \text{ W/m}^3$$

Pour une répartition uniforme des pertes :

$$\theta_1 = \frac{P a^2}{8 \lambda_l}$$

$$\theta_2 = \frac{P a}{2 \alpha_{\text{cm}}}$$

$$\theta'_1 = \frac{P b^2}{8 \lambda_t}$$

$$\theta'_2 = \frac{P b}{2 \alpha_{\text{cm}}}$$

$$\text{avec } \begin{cases} \alpha_{\text{cm}} = 100 \text{ W/m}^2\text{°C} \\ \lambda_l = 20 \text{ W/m}^{\circ}\text{C} \\ \lambda_t = 3 \text{ W/m}^{\circ}\text{C} \end{cases}$$

$$\theta_1 = \frac{17,37 \cdot 10^3 \cdot 0,3168^2}{8 \cdot 20} = 10,9^{\circ}\text{C}$$

$$\theta_2 = \frac{17,37 \cdot 10^3 \cdot 0,3168}{2 \cdot 100} = 27,5^{\circ}\text{C}$$

$$\theta'_1 = \frac{17,37 \cdot 10^3 \cdot 0,131^2}{8 \cdot 3} = 12,5^{\circ}\text{C}$$

$$\theta'_2 = \frac{17,37 \cdot 10^3 \cdot 0,131}{2 \cdot 100} = 11,4^{\circ}\text{C}$$

(85)

L'échauffement maximal du noyau par rapport à l'huile est donné par

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

$$\begin{aligned}\theta_{1\max} &= \theta_1 + \theta_2 \\ &= 10,9 + 27,5 = 38,4^\circ\text{C}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\theta_{2\max} &= \theta'_1 + \theta'_2 \\ &= 12,5 + 11,4 = 23,9^\circ\text{C}\end{aligned}$$

$$\theta_{\max \text{ h. cm}} = 23,9 \frac{11,4 + 1,5 \cdot 12,5}{23,9 + 11,4 + 1,5 \cdot 12,5} = 13,3^\circ\text{C}$$

Echauffement de l'huile

Dimensions de la cuve

- Par l'intermédiaire de ses parois la cuve évacue la chaleur de l'huile qu'elle contient vers le milieu ambiant. La cuve abrite le transformateur - Elle est réalisée avec une tôle d'acier de 3mm d'épaisseur, par contre son couvercle est réalisé avec une épaisseur d'acier de 5mm.
- Les cuves à section rectangulaire et à tôles ondulées peuvent être construites pour des transformateurs de 8000 KVA et des H.T jus qu'à 50 KV.
- Les ondules avec les profils usuels à canaux d'air larges d'environ 30 mm et à canaux d'huile larges d'environ 15 mm n'empêchent pas la circulation respective de l'air et de l'huile - la profondeur maximale de l'ondule est 40 cm.

Longueur de la cuve

$$\begin{aligned}
 L_c &= 3D + 2l_c + 2(a_{20} + a_1 + a_{12} + a_2) + a'_{20} + a'_{20} \\
 &= 3 \cdot 35,2 + 2 \cdot 32,5 + 2(1,5 + 4,44 + 2,7 + 6,11) + 16 + 10 \\
 &= 226 \text{ cm.}
 \end{aligned}$$

les valeurs de a_{20} et a'_{20} sont tirées du tableau suivant =

U_n HT KV	6	10	35	110
a'_{20} mm	30	30	80 ÷ 100	200 ÷ 250
a_{20} mm	30 ÷ 50	40 ÷ 60	120 ÷ 160	300 ÷ 400

$a_{20} > a'_{20}$ afin d'améliorer l'isolation de la cuve des prises des enroulements vers les isolations.

Largeur de la cuve :

$$\begin{aligned}
 l_c &= D + 2(a_{20} + a_1 + a_{12} + a_2) + 2a'_{20} \\
 &= 35,2 + 29,5 + 2 \cdot 10 = 84,7 \approx 85 \text{ cm.}
 \end{aligned}$$

Hauteur de la cuve

$$H_c = H_{cm} + d_{jfc} + d_{jcc}$$

d_{jfc} = distance entre la cuisse inférieure et le fond de la cuve

$d_{jfc} \geq 50 \text{ mm}$ pour une H-T de 35 KV

d_{jcc} = distance entre la cuisse supérieure et la couverture de la cuve.

d_{jcc} est telle que $h_s = h_j + d_{jcc} \leq 0,75 h_f$.

h_j = hauteur de la cuisse

h_f = hauteur de la fenêtre.

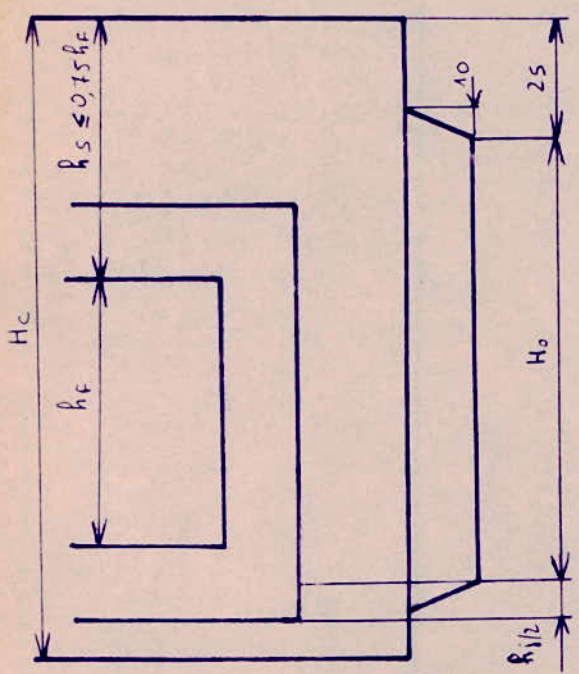
la hauteur de la cuve est =

$$H_c = 169,6 + 5,6 + 44,8 = 220 \text{ cm}$$

où $d_{jfc} = 5,6 \text{ cm}$

$$d_{jcc} = 44,8 \text{ cm car } 28,8 + 44,8 < 0,75 \cdot 112 = 84 \text{ cm.}$$

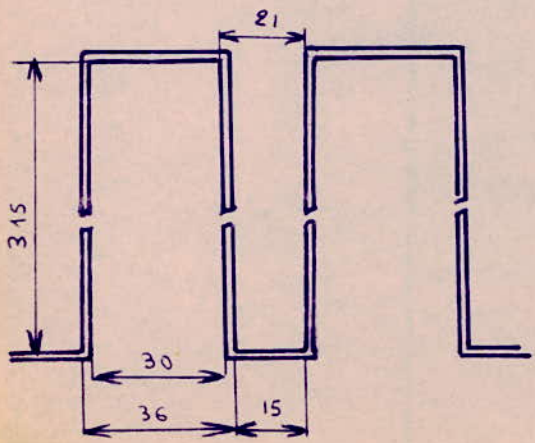
Hauteur de l'ondule =



$$H_o = H_c - (d_{jfc} + h_f/2) - 25$$

$$= 220 - (5,6 + 14,4) - 25 = 175 \text{ cm}$$

Dimensions des ondules.



- profondeur = 31,5 cm
- largeur du canal d'huile 1,5 cm
- largeur du canal d'air 3 cm
- l'épaisseur de la tôle des ondules est de 3 mm.

Calcul du nombre d'ondule

- Sur la longueur

$$m \cdot 21 + (m-1) 30 = 2260 \text{ mm.}$$

$$m = \frac{2260 + 30}{51} = 44 \text{ ondules}$$

longueur restante:

$$2260 - 44 \cdot 21 + 43 \cdot 30 = 46 \text{ mm}$$

- Sur la largeur

$$m \cdot 21 + (m-1) 30 = 850$$

$$m = \frac{850 + 30}{51} = 16$$

longueur restante

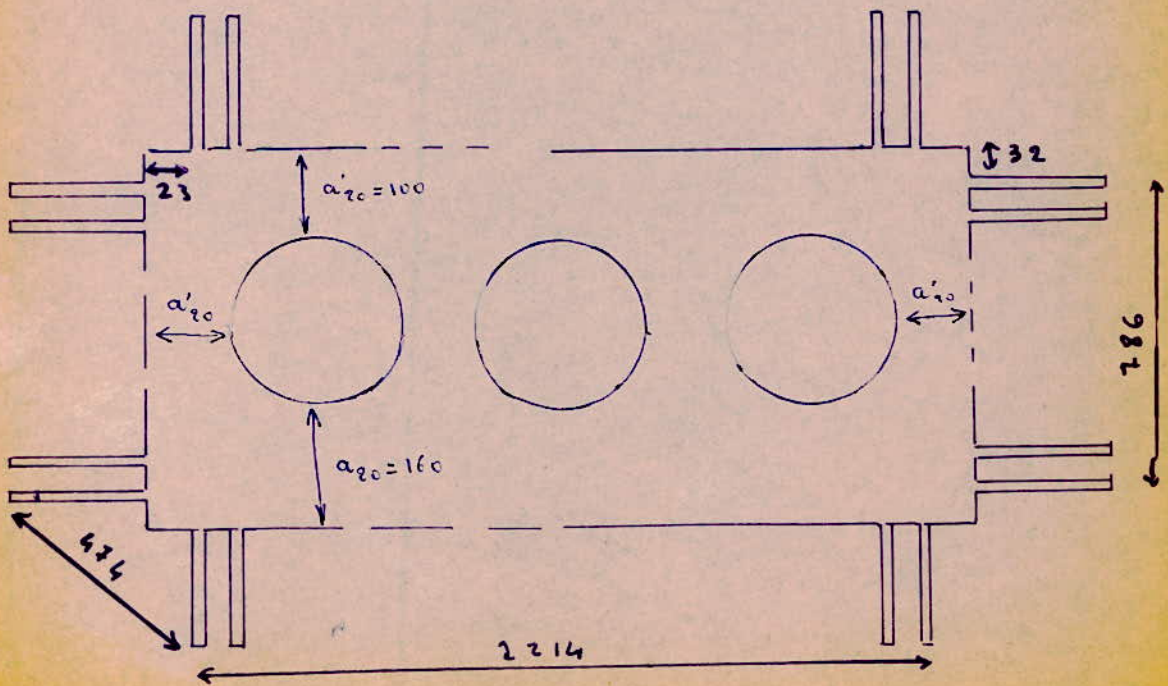
$$850 - 16 \cdot 21 + 15 \cdot 30 = 64 \text{ mm.}$$

Nombre total d'ondule.

$$2 \cdot (44 + 16) = 120$$

Le périmètre de la cuve avec les ondules est =

$$120 (3 + 2 \cdot 31,5 + 1,5) + 4 \cdot (3,2 + 2,3) = 8120 \text{ cm}$$



(89)

Echauffement de la cuve par rapport à l'air

cet échauffement est donné par :

$$\theta_{a-c} = \left(\frac{1,05 (P_o + P_k)}{2,8 S_r + 2,55 C_c} \right)$$

S_r = surface radiante de la cuve, elle est égale à la somme de la surface enveloppant la cuve et de la surface du couvercle.

$$S_r = P_e \cdot h_o$$

P_e = périmètre extérieur enveloppant la cuve

$$P_e = 4 \cdot 47,4 + 2 (78,6 + 221,4) = 789,6 \text{ cm}$$

Surface radiante

$$S_r = 789,6 \cdot 1,75 + 1,92 = 15,73 \text{ m}^2$$

Température cuve - air

$$\theta_{a-c} = \left[\frac{1,05 \cdot 54300}{2,8 \cdot 15,73 + 2,5 \cdot 147,67} \right]^{0,8} = 52,6^\circ \text{C}$$

Echauffement de l'huile par rapport à l'air

l'échauffement admissible de l'huile par rapport au milieu ambiant est 60°C

$$\theta_{a-h} = \theta_{c-h} + \theta_{a-c} = 6 + 52,6 = 58,6^\circ \text{C} < 60^\circ \text{C}$$

Echauffement des enroulements par rapport à l'air

Enroulement BT

$$\begin{aligned} t_{e_{BT}} &= t_a + \theta_{a-c} + \theta_{c-h} + \theta_{h-BT} \\ &= 35 + 6 + 52,6 + 9,7 = 103,3^\circ \text{C} < 105^\circ \text{C} \end{aligned}$$

(90)

Enroulement H-T

$$\begin{aligned} t_{\text{HT}} &= t_a + \theta_{a-c} + \theta_{c-l} + \theta_{l-\text{HT}} \\ &= 35 + 6 + 52,6 + 9,8 = 103,4^\circ\text{C} < 105^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Echauffement du noyau magnétique par rapport à l'air

$$\begin{aligned} t_{\text{cm}} &= \theta_{\text{cm}} + \theta_{\text{ac}} + \theta_{\text{cl}} + t_a \\ &= 13,4 + 6 + 52,6 + 35 = 107^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Pour les tôles cette température est acceptable.

Complément.

Masse décurvable est approximativement:

$$M_{dec} = 1,2 (M_{Fe} + M_{Cu})$$

 M_{Fe} = masse totale de fer

 M_{Cu} = masse totale de cuivre.

$$M_{dec} = 1,2 (4456,47 + 1300,26) = 6908,08 \text{ Kg}$$

Le volume décurvable est:

$$V_{dec} = \frac{M_{dec}}{\gamma_{dec}} \text{ avec } \gamma_{dec} = 5,5 \text{ à } 6 \text{ Kg/dm}^3$$

$$V_{dec} = \frac{6908,08}{5,5} = 1256,02 \text{ dm}^3$$

Volume de la cuve =

$$V_c = L_c \cdot l_c \cdot H_c + n_o \cdot h_o \cdot s_o$$

$$= 22,6 \cdot 8,5 \cdot 22 + 120 \cdot 17,5 \cdot 3,15 \cdot 0,15 = 5218,45 \text{ dm}^3$$

Volume de l'huile

$$V_h = V_c - V_{dec}$$

$$= 5218,45 - 1256,02 = 3962,43 \text{ dm}^3$$

Masse de l'huile

$$M_h = \gamma_h \cdot V_h$$

$$= 0,9 \cdot 3962,43 = 3566,19 \text{ Kg}$$

Volume du conservateur

$$V_{cons} = (0,07 \text{ à } 0,1) V_h$$

$$V_{cons} = 0,08 \cdot 3962,43 = 317 \text{ dm}^3$$

Longueur du conservateur

$$l_{cons} \leq \text{longueur de la cuve}$$

$$l_{\text{cons}} = 80 \text{ cm}$$

Diamètre du conservateur

$$D_{\text{cons}} = \sqrt{\frac{4 V_{\text{cons}}}{\pi l_{\text{cons}}}}$$

$$= \sqrt{\frac{4 \cdot 317}{3,14 \cdot 8}} = 7,1 \text{ dm} = 71 \text{ cm}$$

Poids du Transformateur :

le poids du transformateur se compose

- du poids du circuit magnétique
- du " de l'isolation, des pièces de serrage et de fixation
- " de la cuve
- " de l'huile
- " du conservateur

Poids de l'isolation, des pièces de serrage et de fixation

$$M_p = 0,2 (M_{\text{Fe}} + M_{\text{cu}})$$

$$= 0,2 (4456,47 + 1300,26) = 1151,35 \text{ Kg}$$

Poids de la cuve

les épaisseurs des parois sont : 5 mm pour couvercle et fond
3 mm pour parois latérales

$$7,8 (22,6 \cdot 8,5 \cdot 0,05 + 22,6 \cdot 8,5 \cdot 0,05 + 811 \cdot 19,5 \cdot 0,03) = 3850,43 \text{ Kg}$$

Poids du conservateur

$$M_{\text{cons}} = 7,8 \cdot \pi \cdot 7,1 \cdot 8 \cdot 0,05 = 69,56 \text{ Kg}$$

Poids total du transformateur

$$M = M_{\text{Fe}} + M_{\text{cu}} + M_c + M_h + M_{\text{cons}}$$

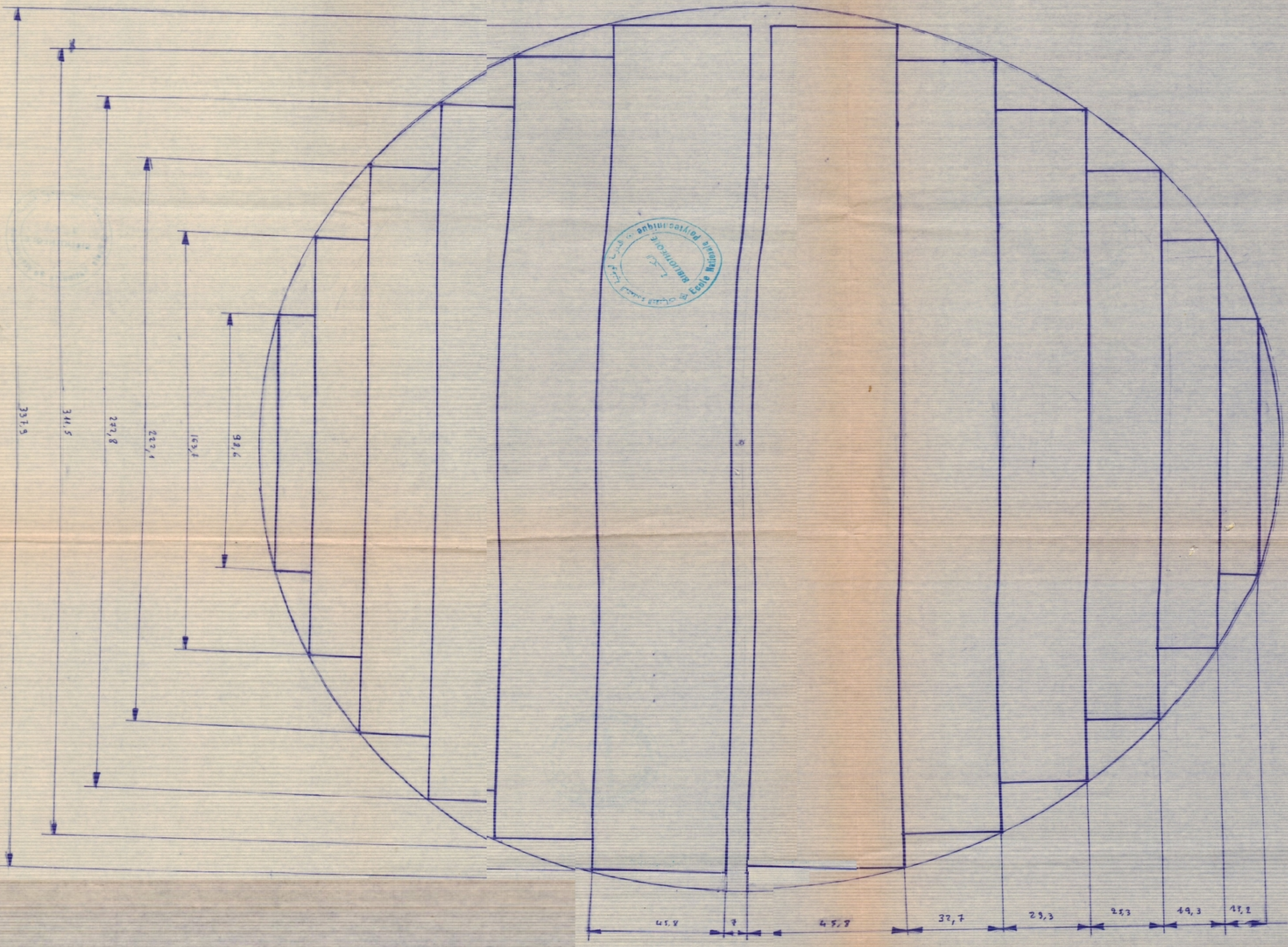
$$= 4456,47 + 1300,26 + 3850,43 + 3566,19 + 69,56$$

$$M = 13243 \text{ Kg}$$

BIBLIOGRAPHIE

- 1) A. PARLOG
cours poly copie' = CONSTRUCTION des MACHINES
- 2) M. KOSTENKO & L. PIOTROVSKI
MACHINES ELECTRIQUES : Tome 1 et 2.
EDITION DE MOSCOU 1976.
- 3) M. LIWSCHITZ
Calcul des machines électriques : PARIS 1968-1970
- 4) N. I. BULGACOV
Calculul Transformatorilor.
Edition TECNICA. Bucaresti : 1951.
- 5) Theses de fin d'étude.

— 000 —



Section de la colonne Fch: 1

