

UNIVERSITE D'ALGER

16/78

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

2er

DEPARTEMENT ELECTRICITE

PROJET DE FIN D'ETUDES

المكتبة

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
BIBLIOTHEQUE

**CONSTRUCTION D'UN
TRANSFORMATEUR**

3000 kva 35/5 kv

المدرسة لوطنية للعلوم الهندسية

المكتبة

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

BIBLIOTHEQUE

Proposé Par :

V. STIRBU

Etudié par :

B. NEZLI

Promotion Juin 1978

UNIVERSITE D'ALGER

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT ELECTRICITE

PROJET DE FIN D'ETUDES

***CONSTRUCTION D'UN
TRANSFORMATEUR***

3000 kva 35/5 kv

Proposé Par :

V. STIRBU

Etudié par :

B. NEZLI

Promotion Juin 1978

- MA FAMILLE

- MES AMIS

-o- R E M E R C I E M E N T S -o-

- JE REMERCIE TOUS LES PROFESSEURS ET ASSISTANTS
QUI ONT CONTRIBUE A MA FORMATION.

 - PLUS PARTICULIEREMENT, Mr V. STIRBU A LE DROIT A MES
REMERCIEMENTS POUR LES CONSEILS QU'IL N'A PAS CESSÉ
DE ME DONNER TOUT AU LONG DE L'ELABORATION DE CETTE ETUDE.

 - QU'ILS SOIENT REMERCIÉS TOUS CEUX QUI ONT CONTRIBUE A LA
REALISATION DE CE DOCUMENT.
-

-- CACUL D'UN TRANSFORMATEUR --

Sn = 3.000 KVA
35/5 Kv \pm 5 % 50 HZ

COUPLAGE Y/d 11

CAHIER DE CHARGE

- PUISSANCE APPARENTE NOMINALE : $S_n = 3000 \text{ KVA}$
 - TENSION PRIMAIRE NOMINALE : $U_{n1} = 35 \text{ KV}$
 - TENSION SECONDAIRE NOMINALE : $U_{n2} = 5 \text{ KV}$
 - FREQUENCE NOMINALE : $f = 50 \text{ Hz}$
 - PRISE DE REGLAGE : $\pm 5 \%$
 - C O N N E X I O N : $Y/\Delta-11$
 - TENSION DE COURT-CIRCUIT : $U_k = 7 \%$
 - PERTES A VIDE : $P_0 = 10,5 \text{ KW}$
 - PERTES DUES A LA CHARGE : $P_K = 31,5 \text{ KW}$
-

- I N T R O D U C T I O N -

L'expansion de l'énergie électrique ne cesse de s'étendre à de nombreux domaines (industrielle, agricole et domestique) grâce à ses nombreux avantages dont nous citons le transport, la distribution et l'absence de pollution.

Dans les centrales électriques, l'énergie est produite par des alternateurs sous une tension de 5,10 et 15 KV, donc une tension faible et un courant fort pour son transport. La réduction des pertes ainsi que d'autres raisons économiques dans les lignes reliant le lieu de production et celui d'utilisation imposent l'élévation de la tension au niveau des centrales. A haute tension l'énergie électrique est utilisable pour des raisons d'isolation et de protection, d'où la nécessité d'abaisser la tension est obligatoire. Ces opérations ne se font qu'au moyen de transformateur élévateur et abaisseur.

Le rôle des transformateurs est donc très important dans les réseaux électriques sans mentionner leur rendement très élevé.

- C H A P I T R E I -

Ce chapitre donne une présentation générale du transformateur qu'on se propose de construire.

I. - QU'EST CE QU'UN TRANSFORMATEUR :

Le transformateur est un appareil électromagnétique statique destiné à transformer un courant alternatif primaire en un autre courant secondaire de même fréquence ayant dans le cas général d'autres caractéristiques, en particulier une autre tension et un autre courant.

On appelle :

- Enroulement primaire (ou le primaire) l'enroulement par lequel le transformateur est alimenté. Il est relié à la source d'énergie de courant alternatif.

- Enroulement secondaire (ou le secondaire) l'enroulement qui fournit l'énergie reçue au transformateur par le primaire aux pertes près.

- Enroulement de haute tension (HT), l'enroulement connecté au réseau de tension plus élevée.

- Enroulement de basse tension (BT), l'enroulement connecté au réseau de tension inférieure.

La tension, le courant, la résistance etc... qui se rapportent à l'enroulement primaire sont nommés primaires et ceux qui se rapportent à l'enroulement secondaire sont nommés secondaires.

Un transformateur est dit élévateur si sa tension secondaire est supérieure à sa tension primaire, dans le cas contraire il est abaisseur.

Par son principe même basé sur le phénomène d'induction électromagnétique, le transformateur est une machine réversible ; n'importe lequel de ses enroulements peut être le secondaire ou le primaire.

Selon le type de refroidissement, on distingue :

- Les transformateurs secs qui sont de faibles puissances et refroidis par l'air.

- Les transformateurs immergés qui sont de grandes puissances et ayant leurs noyaux et enroulements dans un bain d'huile.

II. - GRANDEURS NOMINALES :

Les grandeurs nominales d'un transformateur (puissance, tension, courant, fréquence etc...) sont les grandeurs indiquées sur la plaque signalétique accrochée sur la cuve et qui est toujours bien visible.

Le régime de fonctionnement qui correspond à ces grandeurs est nommé régime nominale. Les grandeurs qui ne figurent pas sur la plaque signalétique et qui se rapportent au régime nominale sont dit grandeurs nominales, par exemple rendement nominal, condition nominale de température du milieu de refroidissement.

1. - PUISSANCE APPARENTE :

C'est la puissance fournie aux bornes de l'enroulement secondaire. Elle est pratiquement égale à celle reçue aux bornes de l'enroulement primaire vu que le rendement des transformateurs est très élevé.

2. - TENSION ET COURANT DE L'ENROULEMENT (BT)

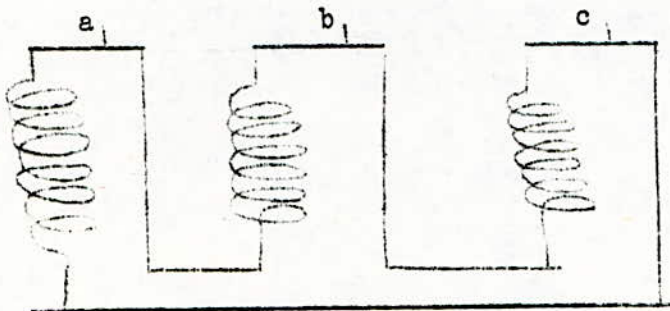
Un1 : Tension nominale de l'enroulement (BT)

In1 : Courant " " " "

Uf1 : Tension par phase de l'enroulement (BT)

If1 : Courant " " " " "

L'enroulement de basse tension est connecté en triangle.



Pour ce mode de couplage, nous avons :

$$U_{f1} = U_{n1}$$

$$I_{f1} = \frac{I_{n1}}{\sqrt{3}}$$

$$S_n = 3 U_{n1} I_{n1} = 3 U_{f1} I_{f1}$$

$$U_{n1} = 5 \text{ KV}$$

$$U_{f1} = U_{n1} = 5 \text{ KV}$$

$$U_{f1} = 5 \text{ KV}$$

$$I_{n1} = \frac{S_n}{3 U_{n1}}$$

$$= \frac{3000 \cdot 10^3}{3 \cdot 5 \cdot 10^3} = 346,42 \text{ A}$$

$$I_{n1} = 346,42 \text{ A}$$

$$I_{f1} = \frac{S_n}{3 U_{f1}}$$

$$= \frac{3000 \cdot 10^3}{3 \cdot 5 \cdot 10^3} = 200 \text{ A}$$

$$I_{f1} = 200 \text{ A}$$

.../...

3. - TENSION ET COURANT DE L'ENROULEMENT (HT)

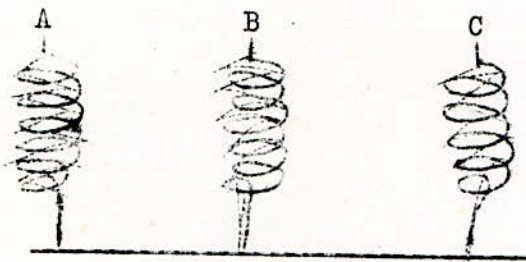
Un2 : Tension nominale de l'enroulement (HT)

Un2 : Courant " " " "

Uf2 : Tension par phase de l'enroulement (HT)

If2 : Courant " " " "

L'enroulement de haute tension est connecté en étoile.



Pour ce mode de couplage, nous avons :

$$Uf2 = \frac{Un2}{3}$$

$$If2 = In2$$

$$Sn = 3 Un2 In2 = 3Uf2.If2$$

$$Un2 = 35 \text{ KV}$$

$$Uf2 = \frac{Un2}{3} \\ = \frac{35}{3} = 20,2078 \text{ KV}$$

$$If2 : In2 = \frac{Sn}{3 \cdot Un2} \\ = \frac{3000 \cdot 10^3}{3 \cdot 35 \cdot 10^3} = 49,48 \text{ A}$$

4. - FREQUENCE NOMINALE :

La fréquence nominale est égale à la fréquence industrielle

$$f = 50 \text{ Hz}$$

5. - RAPPORT DE TRANSFORMATION :

$$K = \frac{Uf2}{Uf1} = \frac{20,2078}{5} = 4,0415$$

III. - PRINCIPAUX ELEMENTS DU TRANSFORMATEUR :

C'est un transformateur de puissance ayant les caractéristiques suivantes :

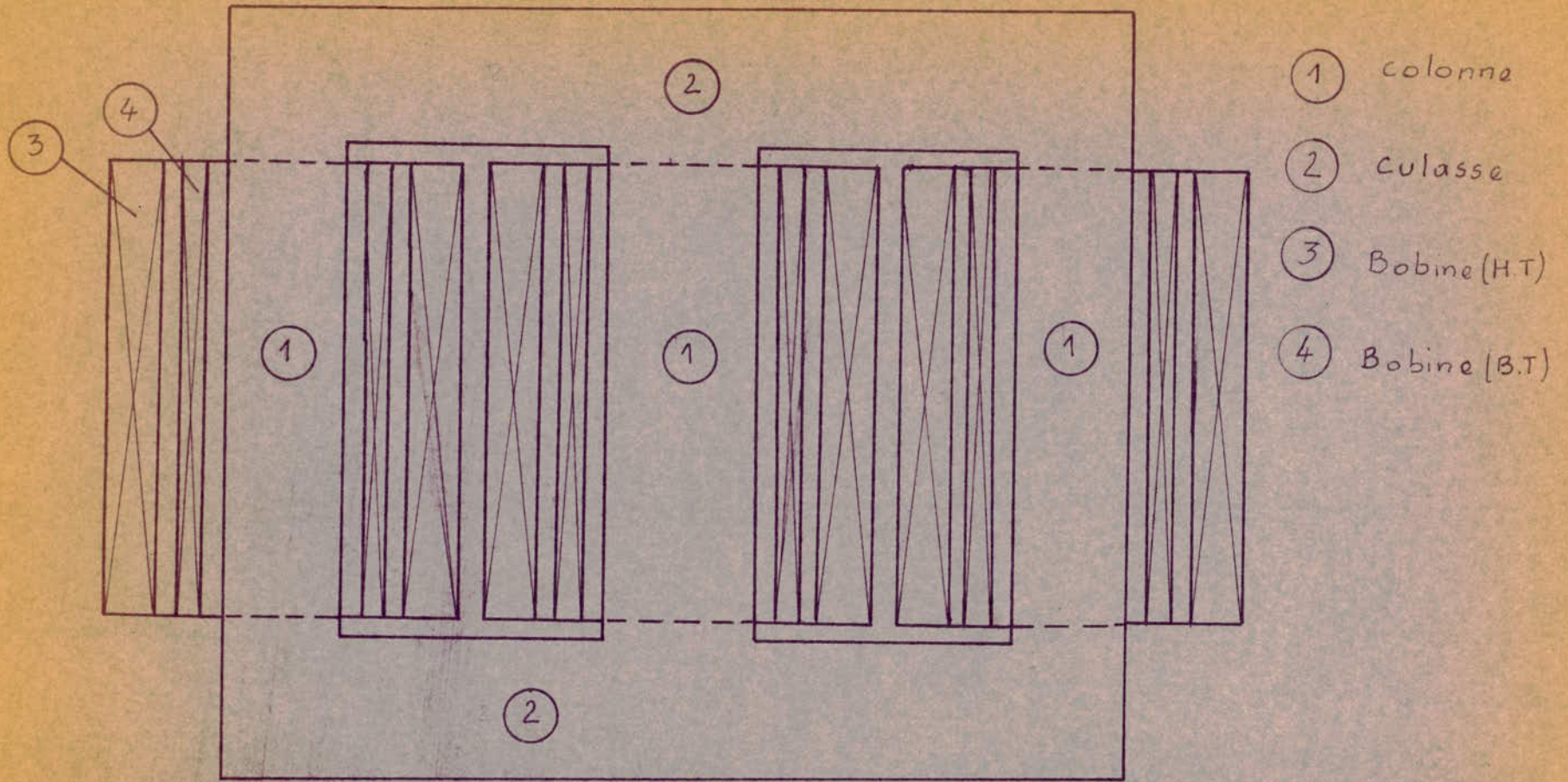
- Triphasé
- Circuit magnétique à 3 colonnes situées dans le même plan (fig 1)
- Circuit électrique à 2 enroulements concentriques.
- A prise sur le côté haute tension.
- Immergé à refroidissement naturel.

1. - CIRCUIT MAGNETIQUE

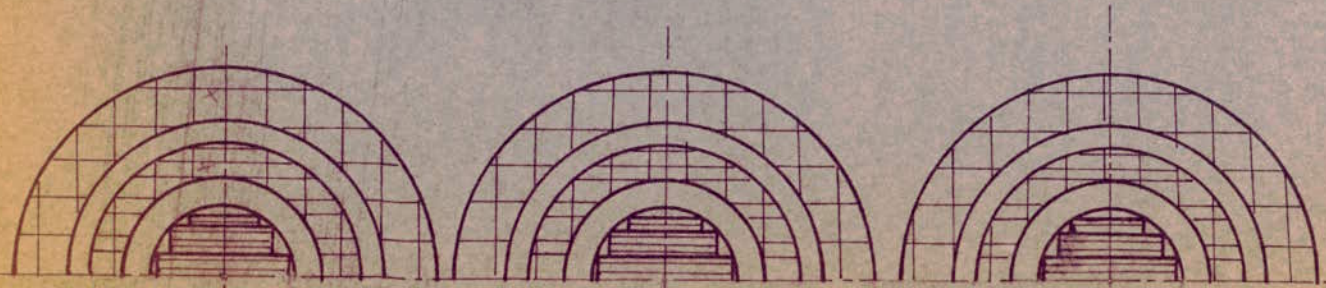
Le circuit magnétique est réalisé avec des tôles en acier laminé à froid de 0,35 mm d'épaisseur.

L'acier laminé à froid contient un certain pourcentage de silicium. L'addition de ce dernier à l'acier l'améliore au point de vue magnétique : diminution des pertes par hystérisis et par courant de Foucault et abolition

(fig-1)



- ① colonne
- ② culasse
- ③ Bobine (H.T)
- ④ Bobine (B.T)



du vieillissement (stabilité des pertes dans le temps). Ces qualités dépendent de la teneur en silicium mais au delà d'une augmentation de 4 à 5 % l'acier devient cassable ce qui est une limitation que nous ne devons pas dépasser.

Pour exploiter au maximum les qualités de l'acier laminé à froid, nous devons l'utiliser de telle façon que le flux magnétique circule dans une direction voisine à celle du laminage.

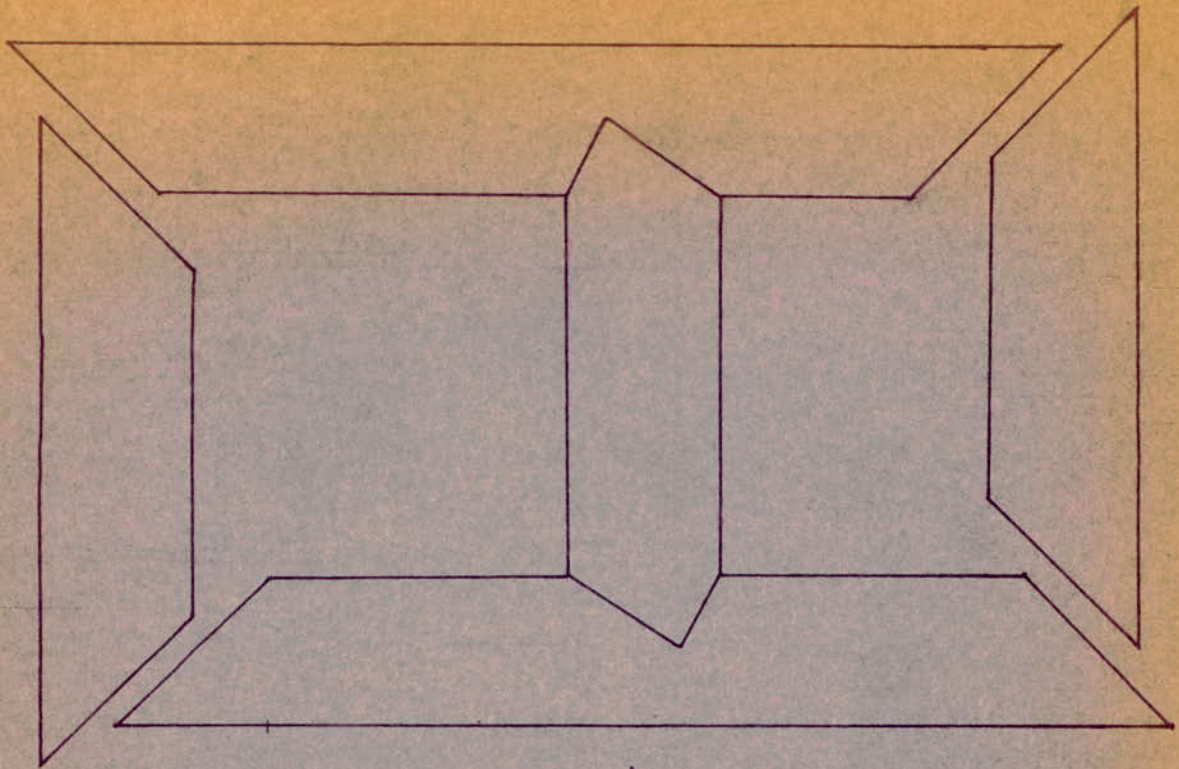
Angle en degrés entre les sens du laminage et le champ magnétisant.	Pertes totales en W/KG à 50 Hz Bmax = 1,5 T
9	1,3
10	1,4
30	2,2
60	3,4
75	3,5
90	2,2

Le tableau ci-dessus montre l'influence du sens relatif du laminage et du champ sur les pertes des tôles en acier laminé à froid.

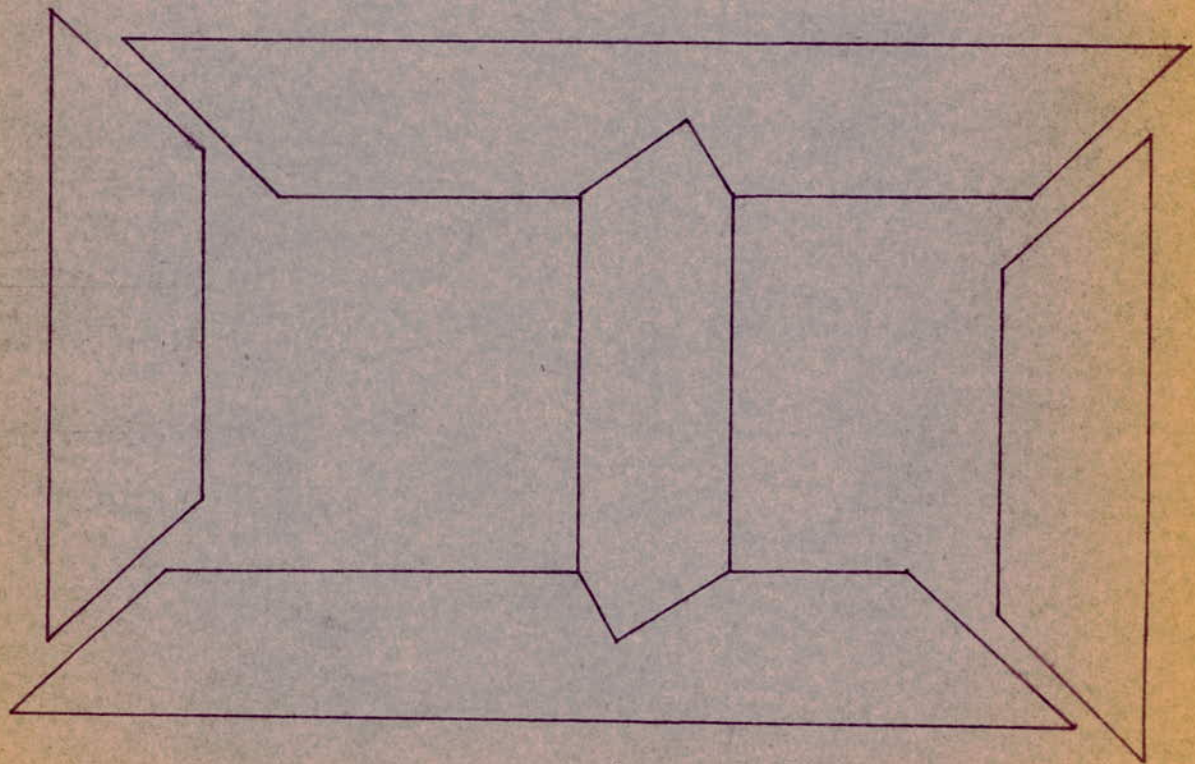
On exploite cette propriété pour l'assemblage du circuit magnétique en découpant les tôles à 45° au lieu des joints (f.2).

La comparaison de la courbe d'aimantation des tôles d'acier laminé à froid à celle des tôles d'acier laminé à chaud nous donne la possibilité d'avoir des valeurs d'induction magnétique élevées relatives au coude de saturation (f.3)

ASSEMBLAGE DES TOILES (fig 2)

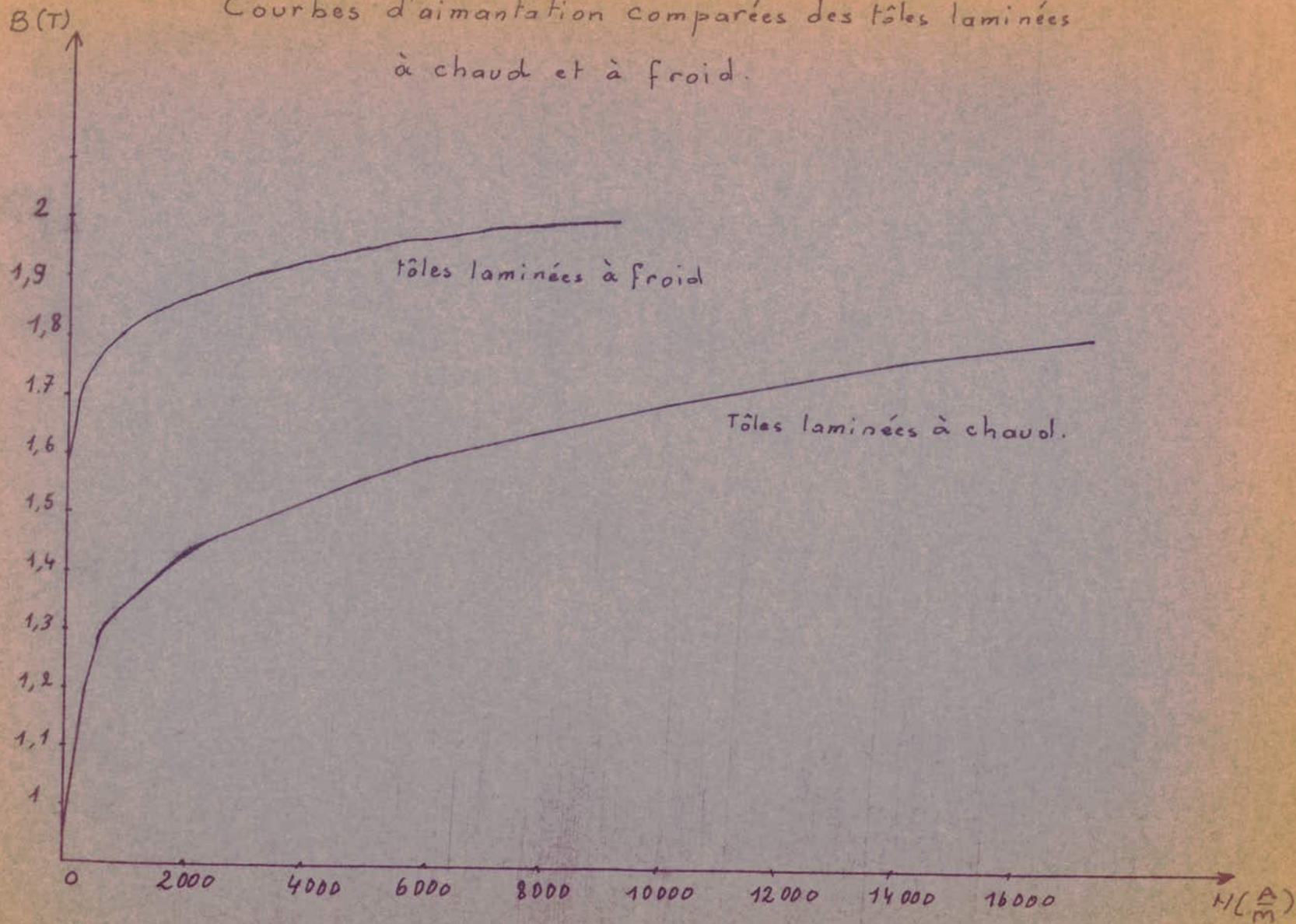


Cycle I

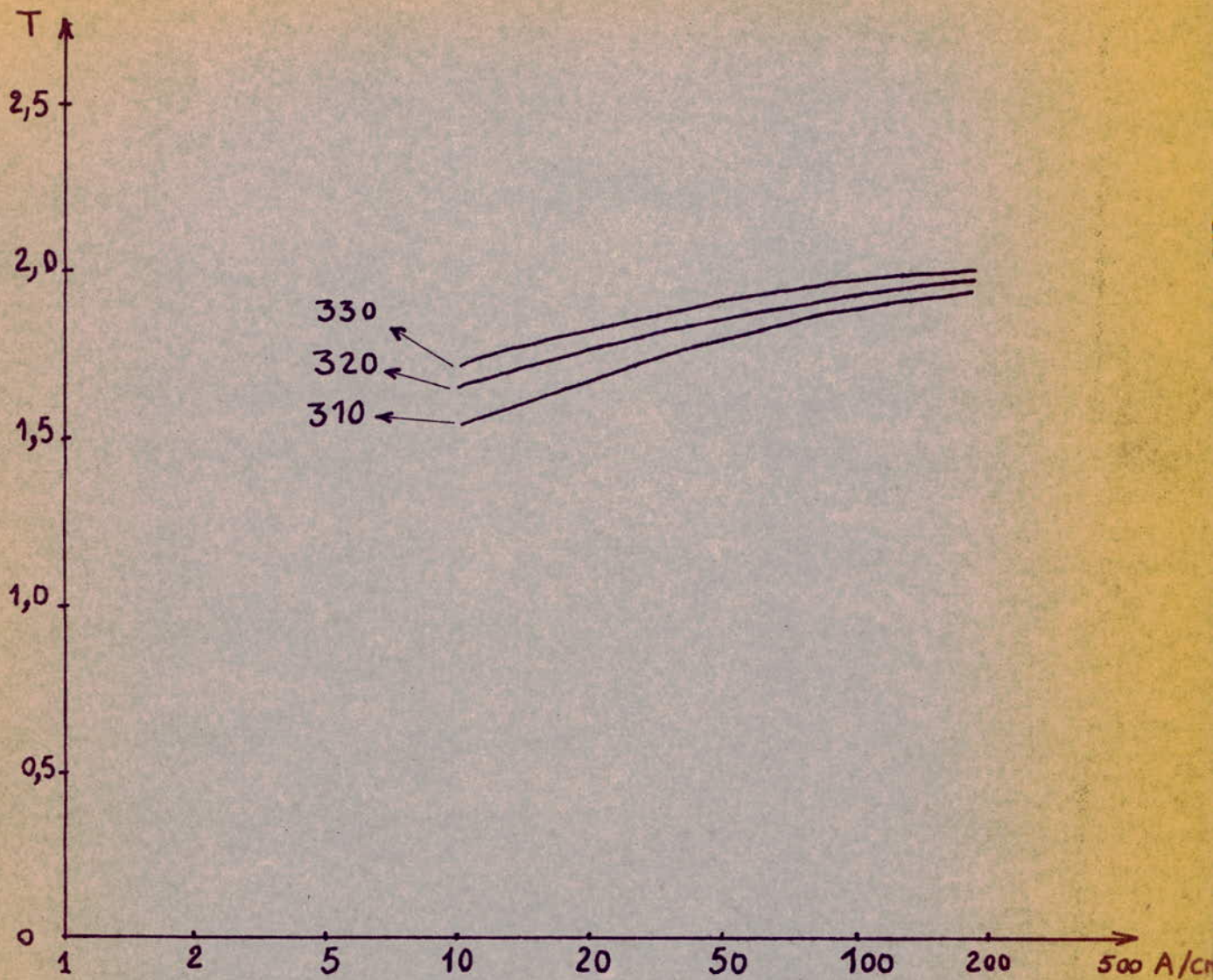


Cycle II

Courbes d'aimantation comparées des tôles laminées
à chaud et à froid.



(fig. 3)



Courbes d'aimantation des aciers laminés à froid.
de nuance \ni 310 - \ni 320 - \ni 330 .

Pour la fabrication du circuit magnétique nous utilisons les tôles d'acier de nuance 330 (Norme Soviétique).

- La lettre -) signifie qu'il s'agit d'acier magnétique.
- Le chiffre 3 (premier après le lettre) signifie qu'il s'agit que l'acier est de teneur augmentée en silicium.
- Le chiffre 3 (deuxième après la lettre) signifie qu'il s'agit d'un acier de perte spécifique faible à la fréquence de 50 HZ.
- Le chiffre 0 (troisième après la lettre) signifie qu'il s'agit d'un acier laminé à froid texturé.

NUANCE DE L'ACIER	TENEUR EN SILICIUM %	POIDS SPECIFIQUE MOYEN g/cm ³
Faiblement allié	0,8 à 1,8	7,80
Moyennement allié	1,8 à 2,8	7,75
A. Teneur en silicium augmentée		
a) - Laminé à chaud	2,8 à 4	7,65
b) - Laminé à froid	2,5 à 3,5	7,65
Hautement allié	4,0 à 4,8	7,55

D'après le tableau ci-dessus les tôles qu'on utilise ont :

- Teneur en silicium 2,5 à 3,5 %
- Poids spécifique = 7,65 kg/dm³

Les pertes spécifiques sont données par le tableau suivant

NUANCE DE L'ACIER	EPAISSEUR NOMINALE DE LA TOLE mm	PERTES SPECIFIQUES (W/KG)		
		Pf 10 - 50HZ	Pf 1,5 - 50 HZ	Pf 1,7 - 50 HZ
		VALEURS MAXIMALES		
-) 11	1,0	5,80	13,4	-
-) 11	0,50	3,30	7,90	-
-) 12	0,50	2,80	6,80	-
-) 21	0,50	2,50	6,10	-
-) 31	0,50	2,00	4,50	-
-) 31	0,35	1,60	3,60	-
-) 41	0,50	1,60	3,60	-
-) 42	0,50	1,40	3,20	-
-) 43	0,50	1,25	2,90	-
-) 41	0,35	1,35	3,20	-
-) 42	0,35	1,20	2,80	-
-) 43	0,35	1,05	2,50	-
-) 310	0,50	1,25	2,80	3,80
-) 320	0,50	1,15	2,50	3,50
-) 330	0,50	1,05	2,30	3,20
-) 310	0,35	1,00	2,20	3,20
-) 320	0,35	0,90	1,90	2,90
-) 330	0,35	0,80	1,70	2,60

2. - CIRCUIT ELECTRIQUE

Le circuit électrique de notre transformateur triphasé est constitué d'un enroulement de basse tension (BT) triphasé connecté en triangle et d'un autre de haute tension (HT) triphasé connecté en étoile.

Il existe deux types d'enroulements :

- Enroulement concentrique qui dans chaque section transversale représente des cercles avec centre commun.

- Enroulements alternés dans lesquels les parties des enroulements (BT) et (HT) se suivent alternativement suivant la hauteur de la colonne.

On choisit l'enroulement concentrique en plaçant l'enroulement (BT) plus près de la colonne car il pose moins de problèmes d'isolation.

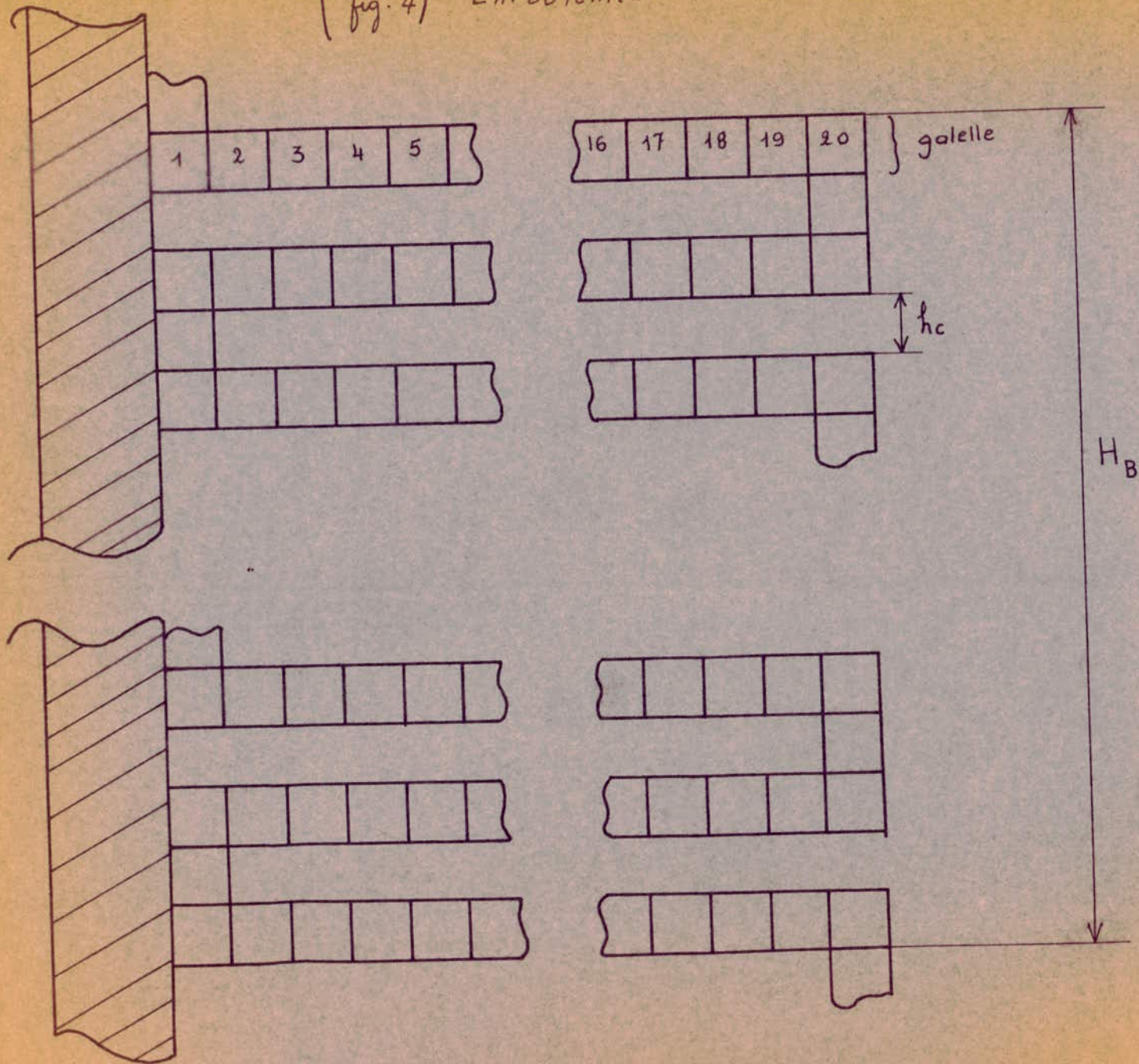
Des différents enroulements concentriques nous appliquons l'enroulement en galettes continues avec des conducteurs méplats (fig.4).

Ce type d'enroulement représente une série de bobines plates (disques) séparées l'une de l'autre par des canaux utiles pour le refroidissement. Ce type présente l'avantage lors du passage d'une galette à l'autre elles sont réunies sans soudure ; nous enroulons le conducteur sans trop serrer les spires et à la main on renverse les galettes impaires. Cet enroulement est caractérisé par :

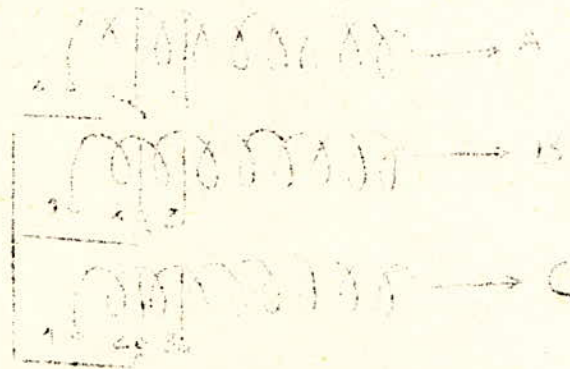
- le nombre total de spires.
- le nombre de galettes (obligatoirement impair).
- le nombre de spires par galette qui ne doit pas dépasser 20 spires en tiers ou fractionnaire.

On isole l'enroulement (BT) par rapport au noyau par un cylindre isolant de 2 mm d'épaisseur.

(fig. 4) Enroulement En Galettes Continues



L'enroulement (HT) porte trois prises de réglage (nominale $\pm 15\%$ par rapport à la nominale) - Ces prises permettent de neutraliser les variations de tensions du réseau. Le passage d'une prise à une autre se fait soit manuellement (avec coupure de la tension) soit à l'aide d'un régleur en charge commandé par un régulateur de tension. Les galettes de réglage sont placées soit au milieu de l'enroulement soit au terminal de celui-ci du côté du point neutre.



Prise 1 + 5 %
" 2 Nominale
" 3 - 5 %

La fig. 5 représente un enroulement en galettes avec les prises au milieu de l'enroulement avec commutateur rotatif pour la connexion en étoile.

3. - ACCESSOIRES :

A - LA CUVE

Le type de cuve qu'on a adopté est la cuve rectangulaire à ondules de forme de rectangle. Elle doit assurer une rigidité mécanique suffisante. On peut la renforcer par l'emploi d'une double ou triple ceinture sur les parois extérieures. Elle contient le diélectrique, abrite la partie active et évacue la chaleur dégagée au niveau des colonnes et des enroulements.

B - COUVERCLE

Sur le couvercle de la cuve sont placés :

- les isolateurs HT et BT
- le conservateur d'huile
- le tube d'échappement des gaz
- les relais de BUCHHOLZ

a) - ISOLATEUR

Pour une tension de,35 KV on utilise des isolateurs en porcelaine remplis d'air ou d'huile. Les poids des isolateurs ainsi que ses dimensions croissent rapidement avec la tension (fig.6)

b) - CONSERVATEUR D'HUILE

Le conservateur d'huile est un récipient en tôles. On l'installe sur le couvercle de la cuve. Son volume varie de 7 à 10 % du volume total d'huile que contient la cuve. Il doit être rempli à un certain niveau de telle façon que la cuve soit toujours pleine. LA température d'huile dans le conservateur est toujours beaucoup plus basse à, celle de la partie supérieure de la cuve. De cette façon l'oxydation de l'huile se fait plus lentement et assure une protection de l'huile et de l'isolation du transformateur.

c) - TUBE D'ECHAPPEMENT

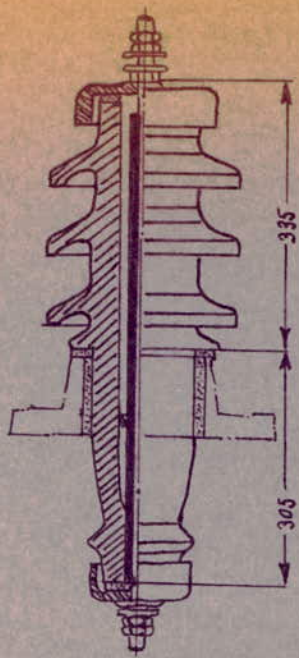
Pour les transformateurs comme le nôtre de puissance supérieure à 1000 KVA. On doit prévoir un tube de l'échappement des gaz. Le rôle de ce tube est de protéger la cuve contre tout endommagement car toute avarie au niveau des enroulements est suivie d'une décomposition des isolants et dégagement de gaz et d'une augmentation brusque de la pression.

C'est un tube en acier qui communique d'un côté avec la cuve et l'autre est fermé par un disque en verre qui est expulsé dans le cas d'une avarie en laissant passer les gaz avec l'huile vers l'extérieur.

d) - RELAIS BUCHHOLZ (fig.7)

Les relais BUCHHOLZ est un organe qui assure la protection du transformateur contre les défauts internes à la cuve.

Ce relais est composé de deux flotteurs B1 et B2 introduits dans la canalisation de la liaison de la cuve du transformateur à son réservoir d'expansion d'huile.



Isolateur de 35 kV rempli d'huile

(fig. 6)

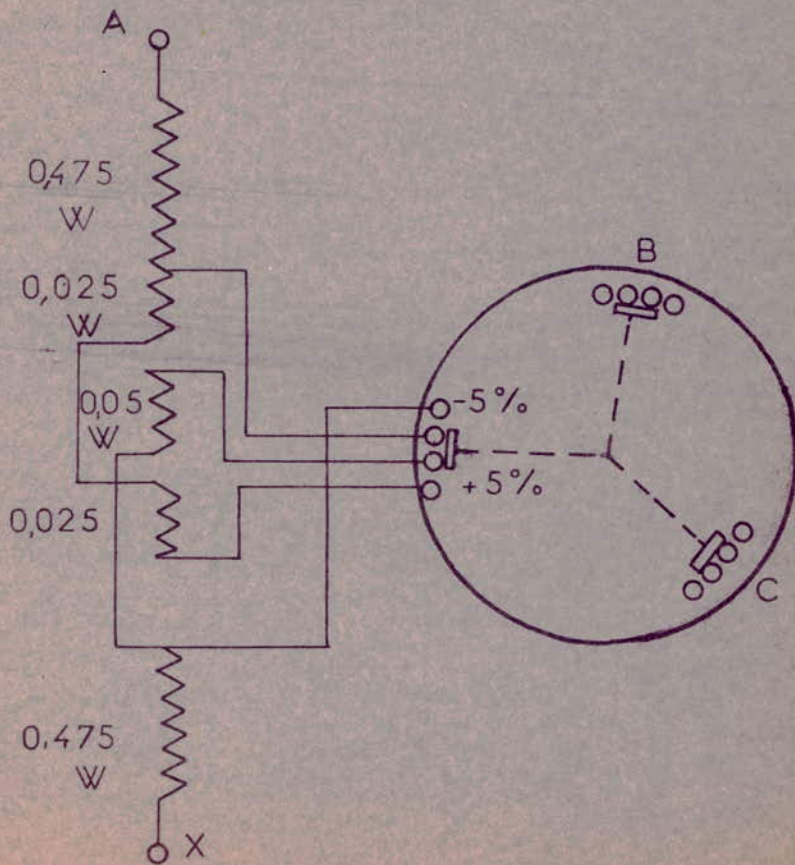
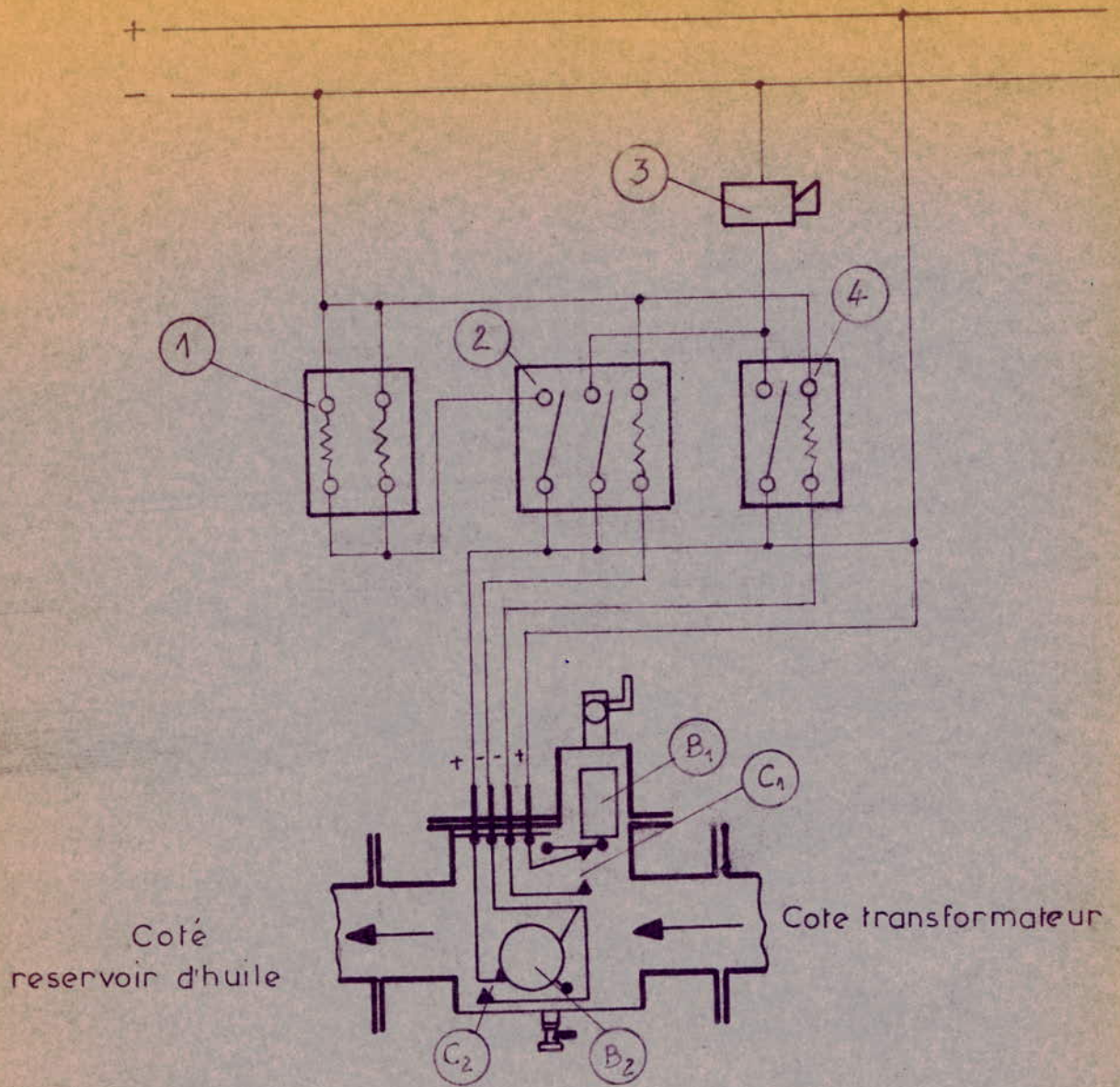


fig 5) Enroulement en galettes avec les prises au milieu de l'enroulement avec commutateur rotatif pour la connexion en étoile



- (B₁) flotteur B₁
- (B₂) " B₂
- (C₁) Contact C₁
- (C₂) " C₂
- (1) Bobines de declenchement des disjoncteurs
- (2) Relais de declenchement
- (3) Signal sonore
- (4) Relais d'alarme

fig 7. Protection Buchholz

Le flotteur B2 bascule quand un courant d'huile important circule dans la canalisation de liaison lors d'un amorçage entre enroulement. L'autre flotteur B1 bascule lorsqu'un dégagement de gaz émane de la cuve et parcourt la canalisation, lors d'un amorçage entre spires d'un même enroulement.

Le basculement du flotteur B2 ferme le contact C2 qui provoque la mise hors tension du transformateur (déclenchement du disjoncteur). Le flotteur B1 quand il ferme son contact provoque seulement une alarme.

Cette protection est sensible à tous les défauts internes à la cuve ou à ses bornes communicantes quelque soit leur emplacement, leur forme, leur importance, les parties atteintes : connexions, bobinages.

Cette protection est d'autant plus rapide que le défaut est plus important et sa lenteur relative en cas de défaut faible ne présente pas de danger du fait même de la faible valeur du courant de défaut.

e) -- HUILE

L'huile le plus couramment utilisé est l'huile minérale obtenue par la distillation du pétrole brut. Elle joue un double rôle, en l'absence de trace d'humidité ; bon isolant avec une rigidité diélectrique de 100 KV/cm environ et agent de refroidissement. L'inflammabilité vers 150° est son plus grand inconvénient.

CHAPITRE II

CALCUL DE DIMENSIONNEMENT DU TRANSFORMATEUR.

Ce chapitre comprend deux parties : un calcul préliminaire et un calcul définitif.

Le calcul préliminaire de dimensionnement d'un transformateur consiste à déterminer les deux dimensions principales : diamètre du cercle où est inscrit la section de la colonne et la hauteur des enroulements. Pour cela deux genres de paramètres interviennent ; des paramètres déduits du cahier de charge et d'autres donnés par l'expérience de la construction des transformateurs déjà réalisés.

Ce calcul sera suivi d'un calcul définitif pour la détermination des enroulements et les dimensions du circuit magnétique de telle façon que les données du cahier de charge soient vérifiées.

A - CALCUL PRELIMINAIRE DES DIMENSIONS PRINCIPALES.

A. 1. Grandeurs déduites du cahier de charge .

1 - Tension et courant (Voir CHI)

Un 1 = 5 KV
In 1 = 346, 42 A
Un 2 = 35 KV
In 2 = 49, 48 A

Uf 1 = 5 KV
If 1 = 200 A
Uf2 = 20, 2078KV
If2 = 49, 48 A

2 - Puissance apparente par colonne

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

S_n : puissance nominale

S_c : puissance par colonne

$$= \frac{3000}{3} = 1000 \text{ KVA}$$

m_c : nombre de colonnes

3 - Tension de court-circuit.

La tension de court circuit U_k est la tension aux bornes d'un enroulement quand dans l'autre enroulement en court-circuit circule un courant égal au courant nominale. Elle s'exprime en % de la tension nominale correspondante.

La tension de court circuit à deux composantes :

U_{ka} : composante active

U_{kr} : composante réactive .

La tension de court circuit est relié à ses composants par la relation :

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

d'où en déduit $U_{kr} = U_k^2 - U_{ka}^2$

$$U_{ka} = \frac{P_k}{S_n} \cdot 100$$

$$= \frac{31,5}{3000} \cdot 100$$

$$= 1,05 \%$$

$$U_{kr} = \sqrt{7^2 - 1,05^2} = 6,9\%$$

P_k : perte due à la charge (KW)

S_n : (KVA)

U_{kr} : (%)

A. 2. Grandeur déduites de l'expérience de construction des transformateurs.

1 - Facteur de remplissage.

K_r est un facteur qui, tient compte du fait que les tôles sont isolées, ce qui fait que seulement une partie de la section apparente du fer est occupée de fer. Ce facteur dépend donc de la nature d'isolation et de l'épaisseur de la tôles.

$$K_r = \frac{S_{eff} \text{ Fer}}{S_g}$$

S_g

$S_{eff} \text{ Fer}$: Section effective du fer

S_g : Section géométrique du fer.

Epaisseur de la tôle mm	Isolation papier	Isolation carlite
0,5	0,875	0,97 - 0,98
0,35	0,85	0,94 - 0,95
0,28	-	0,93 - 0,94

Pour les tôles de 0,35 mm d'épaisseur isolées au carlite on prend :

$$K_r = 0,94$$

2 - Facteur géométrique K_g .

K_g est un facteur qui tient compte du fait que la section de la colonne est à gradins et non pas circulaire - Sa valeur dépend du nombre de gradins.

$$K_g = \frac{S_g}{S_D}$$

S_D : Section du cercle où la section de la colonne est inscrite

Sc KVA	5	5 - 15	15 - 45	45 - 5000
ng	2	4	5	6
d'approximatif en cm	8	8 - 12	12 - 16	16-51
Kg	0,786	0,886	0,91	0,93

Pour S = 1000 KVA ou a : ng = 6 Kg = 0,93

3. Facteur d'utilisation Ku

$Ku = Kr \cdot Kg$, $Ku = \frac{Seffe. Fer}{SD}$

SD

$= 0,94 \cdot 0,93 = 0,874$

4. Facteur de sveltesse

Le facteur de sveltesse est donné par la relation suivante :

$$B = \frac{D \cdot 12}{4B}$$

D 12 = Diamètre du canal de fuite

HB = Hauteur des enroulements.

La relation ci-dessus nous rend compte que le facteur de sveltesse influence toute la géométrie du transformateur, donc la valeur de B aura une influence directe sur les quantités de matériel nécessaire pour la réalisation. La valeur de B varie de 1,15 à 3,4.

Pour la valeurs de B proche de 1,15 le transformateur est svelti ayant la hauteur des colonnes plus grande par rapport au diamètre par contre pour B proche de la limite supérieure ils sont trapus.

Si B s'approche de la limite inférieure, le poids des colonnes, des enroulements et le prix général de réalisation augmentent, mais le poids des culasses, les pertes dues à la charge, le courant à vide, la tension de court-circuit et le prix d'exploitation diminuent.

L'augmentation du facteur de sveltesse se présente aussi sur la stabilité thermique car les enroulements trop épais sont mal refroidis.

Le tableau suivant nous donne les valeurs de B en fonction de la puissance par colonne et la tension la plus grande.

Sc KVA	3 - 2000		2000 à 2000	
U KV	6 - 10	35		110
B	3,4 - 1,75	3 - 1,8	1,8-1,3	2 - 1,5

On choisit B = 1,9

5 - Induction de crête \hat{B}_c (T)

La valeur de l'induction magnétique \hat{B}_c est choisie en fonction de la puissance par colonne et type de tôles utilisé.

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

On choisit $B_c = 1,65$ T

6 - Epaisseur rapportée du canal de fuite

Pour les enroulements concentriques elle est donnée par la relation suivante :

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

- a_{12} : = largeur du canal de fuite
- a_1 : = épaisseur de l'enroulement BT
- a_2 : = épaisseur de l'enroulement HT

Le tableau suivant nous donne a_{12} (largeur du canal de fuite) en fonction de la tension d'essai de l'enroulement avec la tension la plus grande pour les transformateur immergés.

U_n (KV)	3	6	10	15	20	35
U d'après CEI-KV	3,6	7,2	12	17,5	24	36
U d'essai KV	16	22	28	38	50	70
a_{12} cm	0,6 à 1		0,8-1,1,2	1-1,5	1,2-1,8	2,1 - 2,7

On choisit $a_{12} = 2,5$ cm

Dans le calcul préliminaire, le facteur $\frac{a_1 + a_2}{3}$ est donné par l'égalité suivante :

$$\frac{a_1 + a_2}{3} = K \sqrt[4]{S_c} \text{ en (Cm) si } S_c \text{ en (KVA)}$$

Le facteur K est donné par le tableau suivant en fonction de la puissance par colonne et la tension la plus grande des enroulements.

Sc - KVA	100	100-560	750 - 5600	7500 - 31500
Un KV	10		10 à 35	
K	0,6 - 0,8	0,48 - 0,6	0,4 - 0,5	0,44 - 0,46

On comprend K = 0,5

$$a_1 + a_2 = 0,5 \sqrt[4]{1000} = 2,8 \text{ cm.}$$

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

$$= 2,5 + 2,8 = 5,3 \text{ cm.}$$

7. - Facteur de ROGOVSKI KR

Kr. tient compte du fait que les lignes dans le canal; de fuite ne sont pas parallèles mais incurvées.

Kr. est donné par la relation suivant e

$$K_r = 1 - \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{2a_{12} + a_1 + a_2}{HB}$$

Mais le calcul préliminaire on le prend égal à :

$$K_r = 0,95$$

A. 3 Diametre de la Colonne

La section de la colonne est inscrit dans un cercle de diamètre .

D donné par la relation :

$$D = 1,0674 \sqrt[4]{\frac{a_r B K_r S_c}{K_u^2 B_c^2 U_k r}}$$

$$A. MD = 1,0674 \sqrt[4]{\frac{5,3 \cdot 10^{-2} \cdot 1,9 \cdot 0,95 \cdot 10^6}{0,874^2 \cdot 1,65^2 \cdot 6,92^2 \cdot 10^{-2}}} = 30,48 \text{ cm}$$

$$a_r = (m)$$

$$S_c = (Va)$$

$$B_c = (T)$$

$$D := (cm)$$

$$D = 30,48 \text{ cm.}$$

A/4. HAUTEUR DES ENROULEMENTS

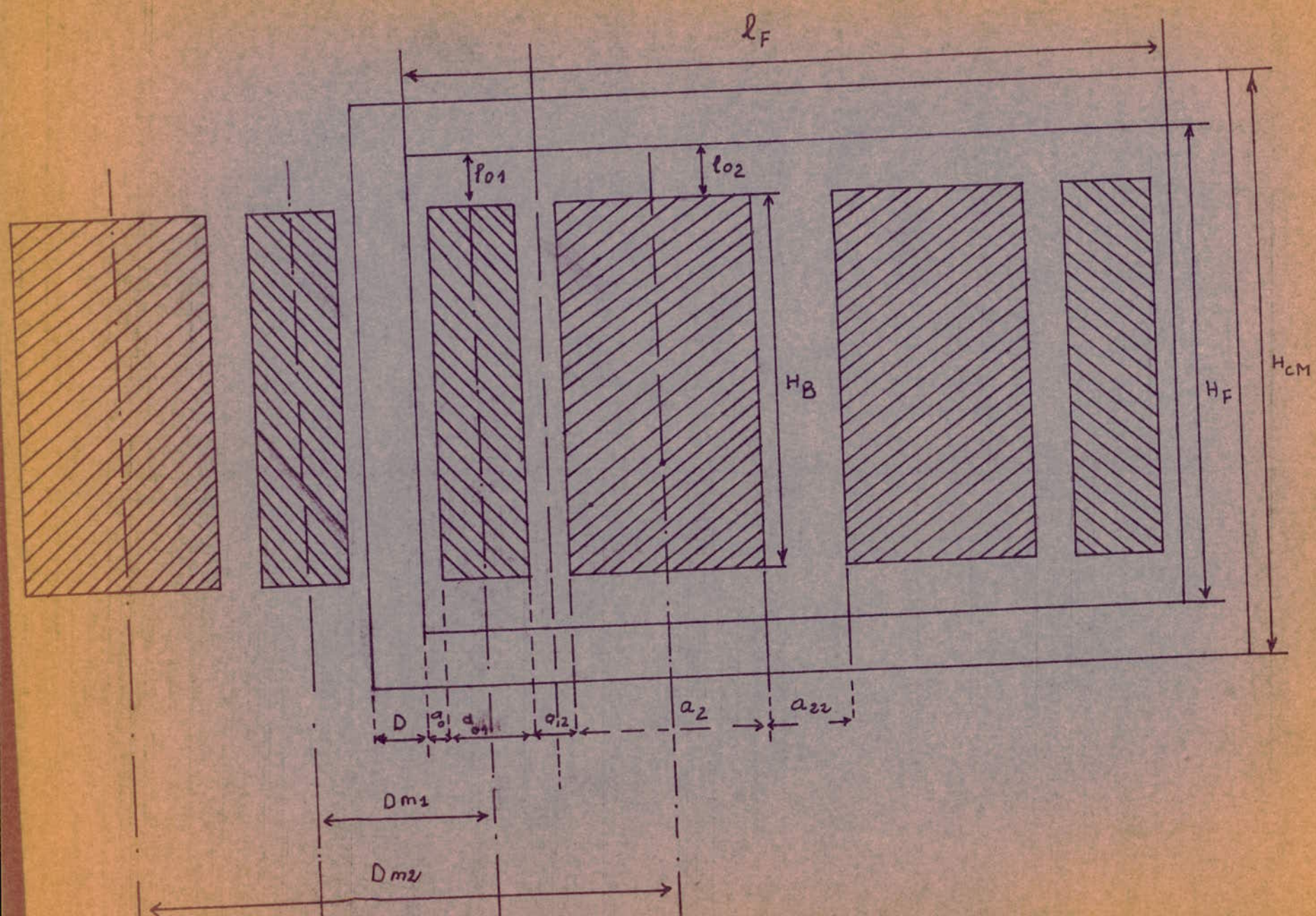
HB la hauteur des enroulements est donné par la relation

$$HB := \frac{\pi D_{12}}{B}$$

Determination de D₁₂ (diamètre du canal de fuite)

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

a₀₁ est la distance entre le noyau de la colonne et l'enroulement de basse tension . Elle est déterminée d'après le tableau ci-dessous en fonction de la tension de l'enroulement



Un Kv	1	3	6	10	15	20	35
a ₀₁ cm	0,5	1,2	1,2-1,5	1,8	1,8-2	2,1-2,3	2,1 - 2,7

Pour Un1=5KV on prend a01=1,5cm

a₁ est l'épaisseur de l'enroulement de basse tension, elle doit être estimée. Sa valeur exacte est obtenue après le calcul définitif des enroulements.

a₁, est donnée par la relation suivante :

$$a_1 = K_{01} \sqrt[4]{S_c} \quad a_1 : (\text{cm})$$

S_c : (kv)

0,55 pour Un2:35 KV

K₀₁ { 0,45 pour Un2:110 KV

$$a_1 = 0,55 \sqrt[4]{1000} = 3,1 \text{ cm.}$$

La valeur du diamètre du canal de fuite est égale à :

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

$$= 30,48 + 2 \cdot 1,5 + 2 \cdot 3,1 + 2,5 = 42,18 \text{ cm}$$

Calcul de la hauteur des enroulements

$$H_b = \frac{\pi D_{12}}{\beta} \quad H_b : (\text{cm})$$

D₁₂ (cm)

$$= 3,14 \frac{42,18}{1,9} = 69,7 \text{ cm}$$

B CALCUL DES ENROULEMENTS .

Le calcul d'un enroulement représente la détermination :

- du nombre de spire de l'enroulement
- de la section des conducteur qui sonstitue la spire
- du type d'enroulement
- de leur résistance
- de leur poids.

a) Enroulement de basse tension -(BT)-

a-1 Nombre de spires W₁.

Le nombre de spire dépend de la tension par spire et de la tension par phase de l'enroulement.

$$W_1 = \frac{U_{f1}}{U_{sp}}$$

- Calcul de U_{sp}(tension par spire)

La tension par spire est la même pour l'enroulement BT et HT . Elle est donné par la relation :

U_{sp} : (V)

S_{Fer col} : (m)²

B_c : (T)

$$U_{sp} = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot S_{\text{Fer col}} \cdot B_c$$

...../...

Calcul de la section de fer de la colonne (SFercol)
la section du fer de la colonne est donnée par la relation

$$SFercol := TT \frac{D^2}{4} Ku \quad D : (cm) \\ Sfercol : (cm)^2$$

- Sans canal de fuite

$$SFercol = TT \frac{30,48^2}{4} 0,874 = 637,72 \text{ cm}^2,$$

- Section fer avec canal de refroidissement.

Pour les colonnes à six gradins la norme donne $L_1 = 0,96 D$

L_1 = Longueur du premier gradin

On laisse un canal de refroidissement de 6 mm de large alors la section du fer s'élève à :

$$SFercol = 637,72 - (0,96 \cdot 30,48 \cdot 0,6) = 620,16 \text{ cm}^2$$

La tension par spire est donc :

$$U_{sp} = 1,414 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 1,65 \cdot 620,16 \cdot 10^{-4} = 22,727 \text{ Volets.}$$

Le nombre de spire est donc :

$$W_1 = \frac{U_{FI}}{U_{sp}} \\ = \frac{5000}{22,727} = 220 \text{ spires}$$

La tension par spire est conforme aux valeurs données par le tableau suivant concernant les transformateurs déjà réalisés .

n	Kv	10	20	30	50	75	100	125	160
sp	V	1,2-1,6	1,6-2	2-2,5	2,6-3	3,2-3,7	3,7-4,3	4,3-4,8	5-5,5
n	Kv	200	250	315	400	500	630	800	1000
sp	V	5,5-6,2	6,5-7	7-7,5	7,5-8	8-9	9-10	10-12	12-14
n	Kv	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300
sp	V	13-16	15-17	16-20	18-23	21-26	26-30	30-34	34-38

a2 Densité moyenne du courant J_m .

La densité moyenne du courant est normalement valable pour les deux enroulements.

Elle est calculée d'après la formule suivante :

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

$P_k = (KW)$, $S_n (KVA)$, $U_{sp} (V)$, $D_{12} (m)$, $J_m : (A/mm^2)$

Kpk est le facteur des pertes supplémentaires, on le détermine d'après le tableau suivant :

Sn KVA	30	180	600	1000	2000	2500	4000	6000	10.000
Kpk	1,02	1,025	1,05	1,06	1,075	1,08	1,09	1,11	1,125

On prend Kpk = 1,084

$$A.M. \quad J_m = 7,34 \frac{1}{1,084} \frac{31,5}{3000} \frac{22,727}{42,18} = 3,83 \text{ A/mm}^2$$

a - 3 Section des conducteurs

$$SW 1 = \frac{I_f}{J_m}$$

$$= \frac{200}{3,83} = 52,219 \text{ mm}^2$$

On choisit une section normalisée égale ou légèrement supérieure à la section calculée ci-dessus de telle manière que la densité de courant ne varie pas plus de 5%.

La section choisie est : SW n1 = 54,1 mm². On prend un seul conducteur méplat. La section du conducteur nu a pour dimensions : a = a = 4,4 mm
b = 12,5 mm

Densité de courant recalculée .

$$J_r 1 = \frac{200}{54,1} = 3,69 \text{ A/mm}^2$$

Cette valeur est acceptable car l'erreur est inférieure à 5%

. Dimension du conducteur isolé

L'isolation en feuille mince de papier présente une bonne rigidité d'électrique. On utilise des rubans de 0,05 mm et de 0,12 mm. On choisit l'épaisseur de l'isolation en fonction de la section du conducteur et de la tension nominale par spire, ce qui revient à la tension nominale de l'enroulement.

Le tableau suivant nous donne l'épaisseur totale de l'isolation des conducteurs en fonction de la tension de l'enroulement et de la section du conducteur.

Un KV	10	20	30	40	60	70	80	90	100
Bis mm 20mm ²	0,64	0,84	0,84	0,94	1,24	1,44	1,44	1,54	1,64
Normale 20-60 mm ²	0,84	0,94	1,04	1,24	1,44	1,64	1,64	1,74	1,84
Bis mm 20 mm ²	0,84	0,94	1,04	1,24	1,84	2,24	2,64	3,04	3,64
IIé bobine 20-60	1,04	1,14	1,24	1,44	2,04	2,44	2,84	3,24	3,84
Bis mm 20	0,84	1,14	1,54	1,94	2,94	3,54	4,24	4,84	5,54
Ié bobine 20-60	1,04	1,34	1,74	2,04	3,14	3,74	4,44	5,04	5,74

a \ b	1,56	1,68	1,81	1,95	2,10	2,26	2,44	2,63	2,83	3,05	3,28	3,53	3,88	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	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	13	14	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	12,90	13,90	15	16,20	17,10	18,50	-
4,50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4,70	7,12	7,79	8,30	8,96	9,36	10,10	11	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	11,90	12,90	13,90	15,10	16,20	17,50	18,90	20	21,50	-
5,50	8,37	9,03	9,75	10,50	11,10	11,90	12,90	14	15,10	16,30	17,50	18,90	20,40	21,70	23,30	25
5,90	8,89	9,70	10,50	11,30	11,90	12,80	13,90	15	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	15,10	16,30	17,60	19	20,50	22,10	23,80	25,30	27,30	29,20
6,90	10,60	11,40	12,30	13,30	14	15,10	16,30	17,70	19	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	16,20	17,60	19	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	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	22,10	23,80	25,70	27,70	29,90	32,20	34,40	36,90	39,50
9,30	14,30	15,40	16,60	17,90	19	20,50	22,20	24	25,80	29,90	30	32,30	34,80	37,20	40	42,80
10,00	15,40	16,60	17,90	19,30	20,50	22,10	23	25,80	27,80	30	32,30	34,80	37,50	40,10	43,10	46,10
10,80	16,80	17,90	19,30	20,90	22,20	23,90	25,90	27,90	30,10	32,40	34,90	37,60	40,50	43,40	46,60	49,90
11,60	17,90	19,30	20,80	22,40	23,90	25,70	27,80	30	32,30	34,90	37,50	40,50	43,60	46,70	50,10	53,60
12,50	19,80	20,80	22,40	24,20	25,80	27,80	30	32,40	34,90	37,60	40,50	43,60	47	50,40	54,10	57,90
13,50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	43,80	-	-	-	-	-

Sections des conducteurs profilés (a x b) mm²

$$a' = a + \text{bis}$$

$$= 4,4 + 1,04 = 5,44 \text{ mm}$$

$$b' = b + \text{bis}$$

$$= 12,5 + 1,04 = 13,54 \text{ mm}$$

Bis est l'épaisseur totale d'isolation réalisé par :

- 4 rubans de papier de 0,05 mm d'épaisseur enroulés avec recouvrement 1/2.

- 1 ruban de papier de 0,12 mm d'épaisseur enroulé sans recouvrement.

$$\text{Bis} = [(4)(2 \cdot 0,05) + 0,12] = 1,04 \text{ mm}$$

a - 4 choix du type d'enroulement.

Vu le nombre de spires W, élevé, le type d'enroulement choisi d'après le tableau suivant est l'enroulement à galettes continues.

If A	Un Kv	SW mm ²	Wel max :	Type d'Enroulement
30 - 50	35	10	1 - 2	Stratifié
Justqu'à 250	0,525	50	1	Cylindrique une seule couche
250 - 800	0,525	300	5	Cylindrique une seule couche
800 - 1600	1	600	2 x 5	Cylindrique avec 2 fils de commencement. Plusieurs couches (3)
1600 - 3000	0,525	1200	20	Spiralé
3000 - 4500	0,525	2400	2 x 20	Hobart
4500 - 20.000		14000	8 x 30	Avec conducteur Rœbel - cylindrique
50	3,6	400	6	Galettes continues

- Hauteur de l'enroulement.

$$HB = ng \cdot hsp + (ng - 1) he + 5 : 15 \text{ mm}$$

hsp : hauteur de la galette ou de la spire

he : hauteur du canal de refroidissement de 4 à 6 mm.

ng : nombre de galettes.

5 : 15 mm : dépassement nécessaire pour la stabilisation de la bobine

En adoptant la disposition à plat des conducteurs on a :

$$hsp = b' = 13,54 \text{ mm,}$$

.../...

Et pour $n_g = 37$ et $h_c = 5$ mm on a :

$$HB = 13,54 \cdot 37 + 36 \cdot 5 + 15 = 696 \text{ mm.}$$

Nombre de spires par galette

$$WG = \frac{W_i}{n_g}$$

$$= \frac{220}{37} = 5,9459$$

$$\text{donc } WG = 5 \text{ sp } \frac{94,59}{100}$$

- épaisseur de la bobine

$$\begin{aligned} a_1 &= W_g \cdot D_L \\ &= 6,5,44 = 32,64 \text{ mm.} \end{aligned}$$

.../...

Valeur recalculée du diamètre du canal de fuite

$$DI2 = D + 2 A_{o1} + 2 a_1 + AI2 \\ = 30,48 + 2.1,5 + 2.3,26 + 2,5 = 42,5 \text{ cm.}$$

Valeur recalculée du facteur de sveltesse

$$B = \pi \frac{DI2}{HB} \\ = 3,14 \cdot \frac{42,5}{69,6} = 1,918$$

L'erreur sur B est $\frac{\Delta B}{B} = \frac{1,9 - 1,918}{1,9} = 0,009$ ou 0,9%

Cette valeur d'erreur est acceptable car l'erreur limitée acceptable est 20%.

a-5 Résistance de l'enroulement

- Diamètre moyen de l'enroulement (BT)

$$DmI = D + 2a_{oI} + aI \\ = 30,48 + 2.1,5 + 3,2 = 36,7 \text{ cm.}$$

- Longueur moyenne d'une spire LwI .

$$LwI = \pi DmI \cdot 10^2 \quad DmI : (\text{cm}), LwI (\text{m}) \\ = 3,14 \cdot 36,7 \cdot 10^2 = 1,1536 \text{ m}$$

- Longueur totale du conducteur LtI

$$LtI = W1 \cdot LwI = 220 \cdot 1,1536 = 253,79 \text{ m.}$$

- Résistance du conducteur

$$R = \frac{LtI}{swm} \quad \begin{matrix} \text{à } 100^\circ\text{C} = 0,021 \text{ } \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m} \\ LtI : (\text{m}) \\ swm : (\text{mm}^2) \text{ et } R : (\Omega) \end{matrix} \\ = 0,021 \frac{253,79}{54,1} = 0,0985 \Omega$$

a-6 Poids de l'enroulement (3 bobines)

$$GI = 3 \cdot W1 \cdot LtI \cdot swm \cdot 10^3 \quad \begin{matrix} W1 = \text{Poids spécifique du Cu} \\ 8,9 \text{ kg/dm}^3 \end{matrix}$$

$LtI : (\text{m})$

$swm (\text{mm}^2)$

$GI : (\text{kg})$

$$GI = 3 (8,9 \cdot 253,79 \cdot 54,1 \cdot 10^3) = 366,59 \text{ Kg}$$

b) Enroulement de haute tension (HT)

b.1 Calcul du nombre de spires de l'enroulement HT.

$$\frac{W2}{W1} = \frac{Uf2}{Uf1}$$

$$\text{d'ou } W2 = W1 = \frac{Uf2}{Uf1}$$

$$W2 = 220 \cdot \frac{2062078}{5} = 889,14$$

On prend un nombre arrondi de spires $W_{2ar} = 889$ sp.

- Vérification du rapport de transformation

$$\frac{W_2}{W_1} = \frac{889}{220} = 4,0409$$

$$W_1 \quad 220$$

$$\frac{U_{f2}}{U_{f1}} = \frac{20,2078}{5} = 4,0415$$

$$U_{f1} \quad 5$$

Ils sont pratiquement égaux car l'erreur n'excède pas 0,1%

$$\frac{D_k}{k} = \frac{4,0415 - 4,0409}{5} = 0,0001$$

$$k \quad 5$$

Nombres de spires correspondant aux prises de réglage

- Prise de tension nominal

$$W_2 = 889$$

- Prise de tension à + 5% de la tension nominal

$$W_2 = 1,05 W_2$$

$$W_2' = 1,05 \cdot 889 = 933,45 \text{ sp.}$$

- Prise de tension à - 5% de la tension nominale

$$W_2'' = 0,95 W_2$$

$$= 0,95 \cdot 889 = 844,53 \text{ sp.}$$

- Nombre de spires de réglage

$$W_2 = W_2' - W_2''$$

$$= 933,45 - 844,53 = 88,9 \text{ sp.}$$

b - 2 section du conducteur

On prend une densité du courant J_{m2} égal à J_{m1}

$$J_{m2} = J_{m1} = 3,83 \text{ A/mm}^2.$$

$$sw_2 = \frac{I_{f2}}{J_{m2}}$$

$$= \frac{49,48}{3,83} = 12,91 \text{ mm}^2$$

On choisit une section normalisé égale à :

$$sw_2 = 12,9 \text{ mm}^2$$

La section du conducteur nu à les dimensions :

$$a = 2,44 \text{ mm}$$

$$b = 5,50 \text{ mm.}$$

L'épaisseur d'isolation totale est choisie d'après le tableau du paragraphe (a-3)

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

d'où :

$$a' = a + c_{is}$$

$$= 2,44 + 1,24 = 3,68 \text{ mm}$$

$$b' = b + c_{is}$$

$$= 5,50 + 1,24 = 6,74 \text{ mm.}$$

b - 3 Choix du type d'enroulement

Le type d'enroulement convenable est l'enroulement à galettes continues (tableau du paragraphe a-4)

Hauteur de l'enroulement

$$H^R = m g \text{ hsp} + (ng - 1) h c + 5 \quad I5 \text{ mm}$$

$$\text{hsp} = 6,74 \text{ mm (conducteur à plat)}$$

$$h c = 5 \text{ mm}$$

$$ng = 59$$

$$A.N. Hb = 59 \cdot 6,74 + 58 \cdot 5 + 8,34 = 696 \text{ mm}$$

Elle est égale à la hauteur de l'enroulement de basse tension.

Nombre de spires par galette.

L'enroulement comprend :-

- 6 galettes de réglage dont $Wg = \frac{14 \cdot 81,56}{100} \text{ sp}$

$$Wg = 14 \text{ sp} \frac{81,66}{100}$$

- 53 galettes dont $Wg = \frac{15 \cdot 93,49}{100} \text{ sp}$

$$Wg = 15 \text{ sp} \frac{93,49}{100}$$

Epaisseur de l'enroulement de haute tension

$$\begin{aligned} - a_2 &= Wg \cdot a' \\ &= 16 \cdot 3,68 = 58,8 \text{ mm} \end{aligned}$$

b-4 Résistance de l'enroulement de haute tension

- Diamètre moyen de l'enroulement

$$\begin{aligned} Dm_2 &= D + 2a_0 I + 2 a I + 2a I_1 + a_2 \\ &= 30,48 + 2 \cdot 15 + 2 \cdot 3,1 + 2 \cdot 2,5 + 5,8 = 50,8 \text{ cm.} \end{aligned}$$

- Longueur moyenne d'une spire Lw_2

$$\begin{aligned} Lw_2 &= \pi Dm_2 \cdot 10^{-2} \quad Dm_2 : (\text{cm}), Lw_2 : (\text{m}) \\ &= 3,14 \cdot 50,8 \cdot 10^{-2} = 1,596 \text{ m} \end{aligned}$$

- Longueur totale du conducteur

$$\begin{aligned} Lt_2 &= W_2 \cdot Lw_2 \\ &= 1,596 \cdot 933,45 = 1490 \text{ m} \end{aligned}$$

- Résistance de l'enroulement

$$\begin{aligned} R_2 &= \rho \frac{Lt_2}{sw_2} \\ &= 0,021 \cdot \frac{1490}{12,9} = 2,42 \end{aligned}$$

b - 5 Poids de l'enroulement (3 bobines)

$$\begin{aligned} G_2 &= 3 \cdot 2 \cdot Lt_2 \cdot sw_2 \cdot 10^{-3} \\ &= 3 \cdot 7,9 \cdot 1490 \cdot 12,9 \cdot 10^{-3} = 513,2 \text{ Kg.} \end{aligned}$$

B - 6 Vérification de la tension de court-circuit.

- 27 -

A ce niveau de calcul, on doit recalculer la valeur de la tension de court-circuit. On vérifie qu'elle n'excède pas une erreur de + 10%.

- Valeur définitive de l'épaisseur rapporté du canal de fuite.

$$Or = aI2 + \frac{aI + a2}{3}$$

$$= 2,5 + \frac{3,2 + 5,8}{3} = 5,5 \text{ cm}$$

- Valeur du coefficient de ROGOVSKI

$$Kr = I - \frac{I}{2II} \cdot \frac{2 aI2 + aI + a2}{HB}$$

$$aI - a2 - aI2 : (\text{cm}) - Hb : (\text{cm})$$

$$Kr = I - \frac{I}{2.3,14} \cdot \frac{2.2,5 + 3,2 + 5,8}{3} = 0,96$$

- Valeur de la tension de court-circuit.

La valeur de la composante ré active de la tension de court-circuit est donnée par la relation.

$$Ukr = \frac{2 II . f . \rho . 0 . Wf . ar . \beta . Kr . IfI}{UfI} \quad I00$$

$$Ukr : (\%), \rho = 4 . II . 10^{-7}, ar (m), IfI : (A), UfI : (v)$$

$$A.N. \quad Ukr = \frac{2 . II . 50 . 4 II . 10^{-7} . (220)^2 . 5,5 . 10^{-2} . I,9 . 0,96 . 200}{5000} \quad I00$$

$$Ukr = 7,65 \%$$

Alors :

$$Uk = \sqrt{Ukr^2 + U^2ka}$$

$$= \sqrt{7,65^2 + 1,05^2} = 7,72\%$$

$$\frac{\Delta Uk}{Uk} = \frac{7 - 7,72}{7,72} = -0,09$$

$$\frac{\Delta Uk}{Uk} = -9\% \quad (\text{valeur acceptable}).$$

a) DIMENSIONS DES GRADINS (fig. 8)

Le nombre de gradins déjà déterminé est $n_g = 6$

La norme donne pour les longueurs des gradins les valeurs suivantes :-

$$L_1 = 0,96 D \\ = 0,96 \cdot 30,48 = 29,26 \text{ cm}$$

$$L_2 = 0,885 D \\ = 0,885 \cdot 30,48 = 26,97 \text{ cm}$$

$$L_3 = 0,775 D \\ = 0,775 \cdot 30,48 = 23,62 \text{ cm}$$

$$L_4 = 0,631 D \\ = 0,631 \cdot 30,48 = 19,23 \text{ cm}$$

$$L_5 = 0,465 D \\ = 0,465 \cdot 30,48 = 14,17 \text{ cm}$$

$$L_6 = 0,280 D \\ = 0,280 \cdot 30,48 = 8,53 \text{ cm.}$$

Nous appliquons le théorème de pythagore pour déterminer la largeur des gradins (notation : fig. 8)

$$H_1 = (D^2 - L_1^2)^{1/2} \quad i = 1,6 \\ H_1 = (30,48^2 - 29,26^2)^{1/2} = 8,53 \text{ cm} \\ H_2 = (30,48^2 - 26,97^2)^{1/2} = 14,20 \text{ cm} \\ H_3 = (30,48^2 - 23,62^2)^{1/2} = 19,26 \text{ cm} \\ H_4 = (30,48^2 - 19,23^2)^{1/2} = 23,64 \text{ cm} \\ H_5 = (30,48^2 - 14,17^2)^{1/2} = 26,98 \text{ cm} \\ H_6 = (30,48^2 - 8,53^2)^{1/2} = 29,26 \text{ cm}$$

Largeur des gradins.

$$l_1 = \frac{H_1 - 0,6}{2}$$

$$l_i = \frac{H_i - H_{i-1}}{2} \quad i = 2, \dots, 6$$

$$l_2 = \frac{8,53 - 0,6}{2} = 3,96 \text{ cm}$$

$$l_3 = \frac{19,26 - 14,20}{2} = 2,53 \text{ cm}$$

$$l_4 = \frac{23,64 - 19,26}{2} = 2,19 \text{ cm}$$

$$l_5 = \frac{26,98 - 23,64}{2} = 1,67 \text{ cm}$$

$$l_6 = \frac{29,26 - 26,98}{2} = 1,14 \text{ cm}$$

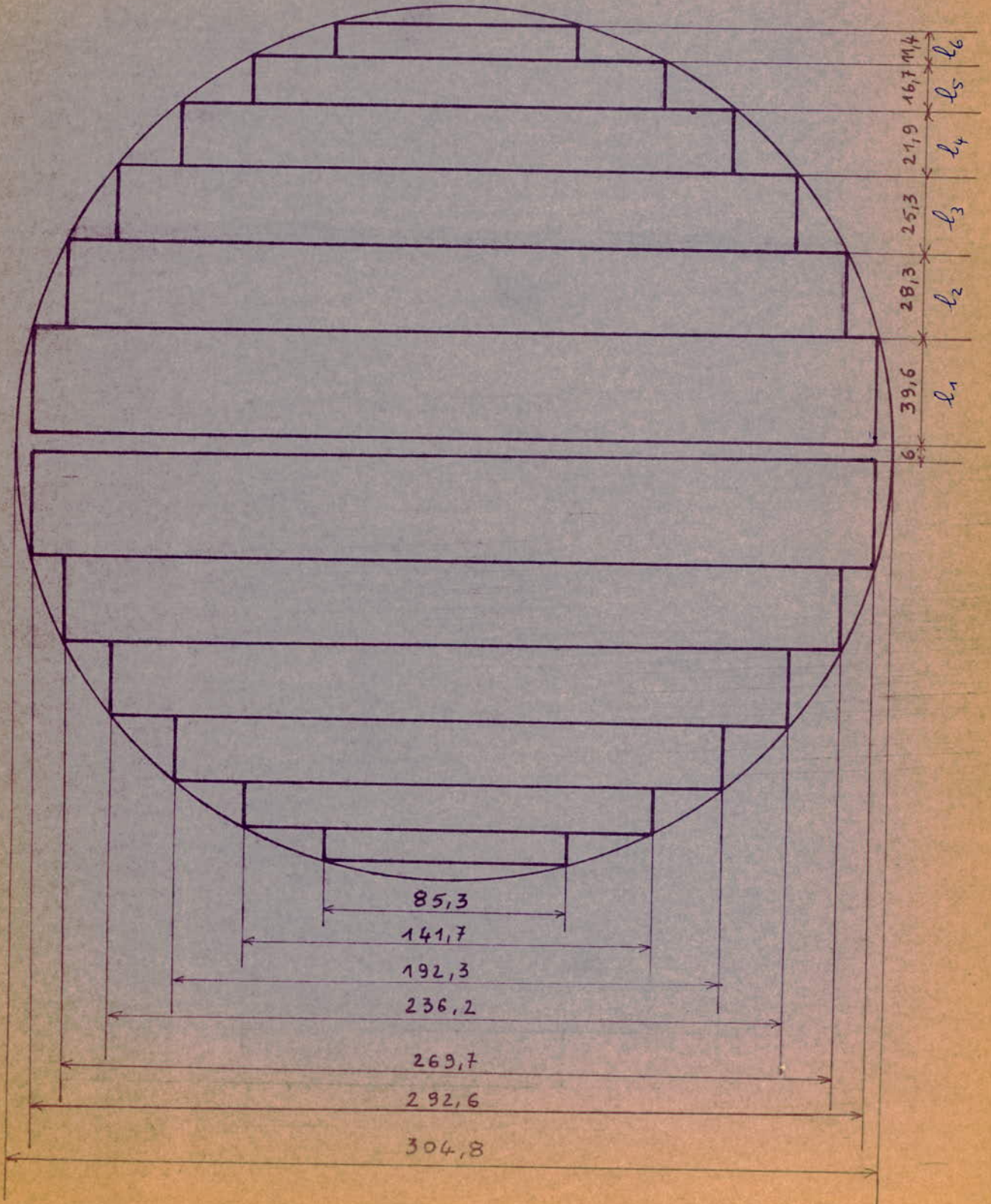
b) Dimensions de la section de la culasse.

Une majoration de 5 à 10% de la section active de la culasse par rapport à celle de la colonne est nécessaire pour réduire l'assymétrie du circuit magnétique.

$$S_{\text{culasse}} = 1,1 S_{\text{fercol.}} \\ = 1,1 \times 620,16 = 682,18 \text{ cm}^2$$

fig 8

Section de la colonne Ech: 1/2



Nous choisissons une section rectangulaire pour la culasse

Largeur : elle est égale à la longueur du premier gradin (LI)

$$l = 0,06 D = 29,26 \text{ cm}$$

Hauteur

$$h = \frac{S_{\text{culasse}}}{l - e}$$

e = largeur du canal de refroidissement égale à 0,6 cm

$$h = \frac{682,18}{29,26 - 0,6} = 23,8 \text{ cm.}$$

C. DIMENSIONS DE LA FENETRE.

Longueur

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

a₂₂ est la distance séparant deux bobines de haute tension (hb)

Elle est fonction de la tension nominale.

Un Kv	5	10	20	30 - 35
a ₂₂ - cm	1	1,4	1,7	2 - 3

Nous prenons a₂₂ = 3 cm.

$$L_f = 2 (1,5 + 3,26 + 2,5 + 5,88) + 3 = 29,28 \text{ cm.}$$

- hauteur

$$H_f = H_b + 2 \cdot L_{o2}$$

Un Kv	5	10	20	30 - 35
L _{o2} - cm	2 - 3	3 - 5	5	6 - 7,5

Nous prenons L_{o2} = 7,5 cm.

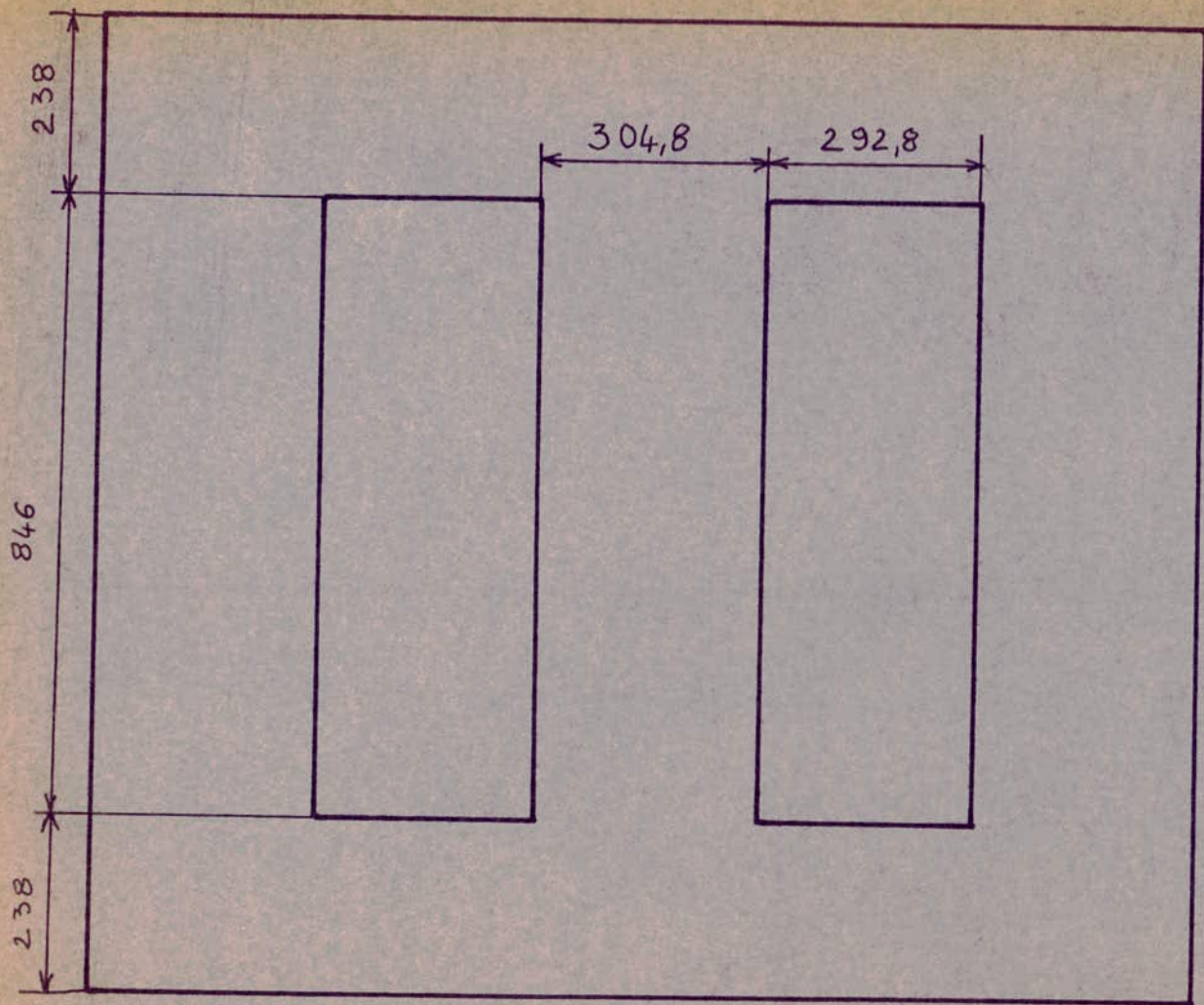
$$H_f = 69,6 + 2 \cdot 7,5 = 84,6 \text{ cm.}$$

d) Longueur entre les axes de deux colonnes

$$\begin{aligned} L_{cc} &= L_f + D \\ &= 29,28 + 30,48 = 59,76 \text{ cm} \end{aligned}$$

e) Hauteur totale du circuit magnétique

$$\begin{aligned} H_{cm} &= H_b + 2 (L_{o2} + h) \\ &= 69,6 + 2 (7,5 + 23,8) = 132,2 \text{ cm.} \end{aligned}$$



Circuit magnétique Ech: 1/10

f. Poids du circuit magnétique.

Afin de faciliter le calcul des pertes par la suite, nous partageons le circuit magnétique en trois parties (colonne, culasse, coins).

- Poids des colonnes

$G_{col} = 3 \gamma_t V_{col}$ $\gamma_t = 7,65 \text{ Kg/dm}^3$ $col : (\text{dm}^3)$

$V_{col} = S_{fercol} \cdot H_f$ $G_{col} : [\text{Kg}]$

A.N $V_{col} = 620,16 \cdot 84,6 = 52465,536 \text{ cm}^3$ ou $52,465 \text{ dm}^3$

$G_{col} = 3 \cdot 7,65 \cdot 52,465 = 1204 \text{ Kg.}$

- Poids des culasses

$G_{cul} = 4 \gamma_t V_{cul}$ $V_{cul} : (\text{dm}^3) - G_{cul} : (\text{kg})$

$V_{cul} = S_{fercul} \cdot L_f$

A.N $V_{cul} = 682,22 \cdot 29,28 = 19974,11 \text{ cm}^3$ ou $19,974 \text{ dm}^3.$

$G_{cul} = 4 \cdot 7,65 \cdot 19,974 = 611,2 \text{ kg.}$

- Poids des coins.

$G_{coins} = 6 \gamma_t V_{coin}$ $V_{coins} : (\text{dm}^3) - G_{coin} : (\text{kg})$

A.N $V_{coin} = 682,176 \cdot 30,48 = 20792,72$

$V_{coin} = 6 \cdot 7,65 \cdot 20,792 = 954,38 \text{ kg}$

- Poids total du circuit magnétique.

$G = G_{col} + G_{cul} + G_{coins}$

$= 1204 + 611,2 + 954,38 = 2769,58 \text{ kg.}$

C H A P I T R E I I I

PERTES - RENDEMENT - CHUTE DE TENSION - COURANT AVIDE

A) CULCAL DES PERTES :

Ce qu'on appelle pertes est la partie de la puissance du transformateur dissipée en chaleur. Elles constituent les pertes joule au niveau des enroulements et les pertes fer au niveau du circuit magnétique.

1) PERTES JOULE

a - Basse tension

.Pertes dans l'enroulement

$$P_{j_1} = mR_1 I_{f_1}^2$$

m : nombre de phase égal à 3
 P_{j_1} : Perte joule (W)
 R_1 : Résistance
 I_{f_1} : Courant de phase (A)

A.N. $P_{j_1} = 3 \cdot 0,0985 \cdot (200)^2 = 11820 \text{ W.}$

.Pertes dans les connexions.

Ces pertes sont dues à la résistance des fils de connexion formants le couplage en triangle de l'enroulement.

- Longueur des conducteurs

$$l_{\text{con}} = 14 \text{ HB} = 14 \cdot 69,6 = 974,4 \text{ cm}$$

- Section des conducteurs

$$sw_{\text{con}} = \sqrt[3]{3} sw_n = \sqrt[3]{3} 54,1 = 93,7 \text{ mm}^2$$

- Résistance des conducteurs

$$R_{\text{con}} = \rho \frac{l_{\text{con}}}{sw_{\text{con}}}$$

$R : ()$
 $\rho = 0,021 \text{ } \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$
 $l_{\text{con}} = (\text{m})$
 $sw_{\text{con}} : (\text{mm})^2$

$$R_{\text{con}} = 0,021 \frac{9,74}{93,7} = 0,002183$$

- P e r t e s

$$P'_{j_1} = R_{\text{con}} I_n^2 = 21,83 \cdot 10^{-4} \cdot (346,42)^2 = 262 \text{ W.}$$

• Pertes supplémentaires

Les pertes supplémentaires sont données par la relation suivante :

$$P_{sup 1} = m (K_{mri} - 1) R_1 I^2$$

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

$$\text{et } \lambda = \left(\frac{ngb}{HF} \frac{w}{2} \right)^{1/2}$$

K_{mri} , est un coefficient de majorations de la résistance en courant alternatif.

m = (nombre de spires par galette)

a : largeur du conducteur nu

b : longueur du conducteur nu

ng : nombre de galettes.

$$A.N. \quad \lambda = \frac{(37.12,5 \quad 314.4.II.10^{-7})^{1/2}}{846 \quad 2.2,1.10^{-8}} = 71,66$$

$$\frac{a}{\lambda} = 71,66.4,4 = 0,3153$$

$$(\frac{a}{\lambda})^4 = 31,53.10^{-2})^2 = 9,88.10^{-3}$$

$$K_{mri} = 1 + \frac{6^2 - 0,2}{9} . 9,88.10^{-3} = 1,0393$$

$$P_{sup 1} = (K_{mri} - 1) P_{J1}$$

$$= 0,0393 . 11820 = 464,5 \text{ W.}$$

b - Haute tension

• Perte dans l'enroulement

$$P_{J2} = 3R_2 I^2 f_2$$

$$= 3 . 2,42 (49,48)^2 = 17774 \text{ W.}$$

)
()
..

• Pertes dans les connexions.

L'enroulement (HT) est connecté en étoile.

- Longueur des conducteurs de connexion
 $l_{con} = 7,5 H_B$

$$= 7,5 \cdot 69,6 = 522 \text{ cm.}$$

- Section des conducteurs de connexion
 $sw_{con} = sw_n = 12,9 \text{ mm}^2$

- Résistance des conducteurs de connexion

$$R_{con} = \rho \frac{l_{con}}{sw_{con}}$$

$$= 0,021 \cdot \frac{5,22}{12,9} = 0,008497. \quad \Omega$$

- Perte supplémentaire

$$P_{J2} = R_{con} I_n^2 \\ = 84,97 \cdot 10^{-4} \cdot (49,48)^2 = 20,8 \text{ W}$$

• Pertes supplémentaires

$$P_{sup2} = (K_{mR2} - 1) P_{J2}$$

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

$$= \left(\frac{n_{gb}}{HF} \frac{w \mu_0}{2 \rho} \right)^{1/2}$$

A.N.

$$= \left(\frac{59 \cdot 5,5}{846} \frac{314 \cdot 4 \cdot 11 \cdot 10^{-7}}{2 \cdot 2,1 \cdot 10^{-8}} \right)^{1/2} = 60,03$$

$$\alpha a = 60,03 \cdot 2,44 \cdot 10^{-3} = 14,64 \cdot 10^{-2}$$

$$(\alpha a)^4 = 4,59 \cdot 10^{-4}$$

$$K_{mR2} = 1 + \frac{16^2 - 0,2}{9} \cdot 4,59 \cdot 10^{-4} = 1,013$$

$$\begin{aligned} P_{\text{sup}2} &= (K_{m_{R2}} - 1) P_{J2} \\ &= 0,013 \cdot 17774 = 231 \text{ W.} \end{aligned}$$

• Pertes Joule totale dues à la charge.

$$PK = K P_K (P_{\text{cu}1} + P_{\text{cu}2})$$

$P_{\text{cu}1}$: Pertes Joule dans l'enroulement (BT) dit aussi pertes cuivre.

$$\begin{aligned} P_{\text{cu}1} &= P_{J_1} + P'_{J_1} + P_{\text{sup}1} \\ &= 11820 + 262 + 464,5 = 12546,5 \text{ W.} \\ P_{\text{cu}1} &= 12,546 \text{ Kw.} \end{aligned}$$

$P_{\text{cu}2}$ = Perte Joule dans l'enroulement (HT)

$$\begin{aligned} P_{\text{cu}2} &= P_{J2} + P'_{J2} + P_{\text{sup}2} \\ &= 17774 + 20,8 + 231 = 18025,8 \text{ W.} \\ P_{\text{cu}2} &= 18,026 \text{ Kw.} \end{aligned}$$

$$PK = 1,084 (12,546 + 18,026) = 33,14 \text{ Kw.}$$

$$\text{L'erreur sur PK est : } \frac{\Delta PK}{PK} = \frac{31,5 - 33,14}{33,14} = 4,9 \%$$

Cette erreur est inférieure à 10% (limite admissible) donc cette valeur des pertes est acceptable par rapport à celle du cahier de charge.

2) PERTE DANS LE FER

Ces pertes comprennent les pertes principales P_{fo} et les pertes supplémentaires P_{so} .

a) Pertes principales P_{fo}

Ces pertes comprennent les pertes par hystérésis et les pertes par courant de FOUCAULT.

• Pertes dans les colonnes :

$$\begin{aligned} P_{f \text{ col}} &= P_{sp \text{ col}} \cdot G \text{ col} & - P_{f \text{ col}} &: (\text{ W }) \\ & & P_{sp \text{ col}} &: (\text{ W / Kg }) \\ & & G \text{ col} &: (\text{ Kg }). \end{aligned}$$

Psp col : Perte spécifique dans les colonnes.

Nous les déterminons d'après la relation suivante :

$$P_{sp} = P_{f 1,0} \cdot B^n \left(\frac{f}{50} \right)^{1,35};$$

$$\text{avec : } n = 5,7 \log \frac{P_{f 1,5}}{P_{f 1,0}}$$

$$\text{Pour } f = 50 \text{ Hz } \quad P_{sp} = P_{f 1,0} \cdot B^n$$

Pf 1,0 : Perte spécifique pour une induction de 1 T.

Pf 1,5 : " " " " " de 1,5 T.

B : Induction magnétique dans la colonne.

.../...

Pour les tôles de nuance 330 nous avons

$$Pf_{1,0} = 0,8 \text{ W/Kg}$$

$$Pf_{1,5} = 1,7 \text{ W/Kg.}$$

$$\text{D'où : } n = 5,7 \log \frac{1,7}{0,8} = 1,8659$$

$$P_{sp \text{ col}} = 0,8 (1,65)^{1,8659} = 2,036 \text{ W/Kg.}$$

$$\begin{aligned} Pf_{\text{ col}} &= P_{sp \text{ col}} \cdot G_{\text{ col}} \\ &= 2,036 \cdot 1204 = 2451 \text{ W.} \end{aligned}$$

• Perte dans la culasse :

- Induction magnétique dans la culasse pour que la loi de conservation du flux soit satisfaite nous devons avoir :

$$\hat{B}_c \cdot S_{\text{ fer col}} = \hat{B}_{\text{cul}} \cdot S_{\text{cul}}$$

$$\hat{B}_{\text{cul}} = \frac{S_{\text{ fer col}}}{S_{\text{cul}}} \hat{B}_c$$

$$= \frac{620,16}{682,17} \cdot 1,65 = 1,5T$$

$$\hat{B}_{\text{cul}} = 1,5T$$

• Perte spécifique de la culasse $P_{sp \text{ cul}}$

$$P_{sp \text{ cul}} = 0,8 (1,5)^{1,8659} = 1,7 \text{ W.}$$

• Perte dans la culasse

$$\begin{aligned} Pf_{\text{ cul}} &= P_{sp \text{ cul}} \cdot G_{\text{cul}} \\ &= 1,7 \cdot 611,2 = 1039 \text{ W.} \end{aligned}$$

• PERTES DANS LES COINS :

- Induction magnétique dans les coins. Nous estimons qu'elle soit égale à la moyenne de l'induction dans la colonne et de la culasse.

$$\hat{B}_{\text{ coin}} = \frac{\hat{B}_c + \hat{B}_{\text{cul}}}{2}$$

$$= \frac{1,65 + 1,5}{2} = 1,57 \text{ T.}$$

.../...

- Perte spécifique

$$P_{sp} \text{ coin} = 0,8 (1,57)^{1,8659} = 1,856 \text{ W.}$$

- Perte dans les coins

$$\begin{aligned} P_f \text{ coin} &= P_{sp} \text{ coin} \cdot G \text{ coin} \\ &= 1,856 \cdot 954,38 = 1771 \text{ W.} \end{aligned}$$

Les pertes principales dans la colonne et la culasse est :

$$\begin{aligned} P_{fo} &= P_f \text{ col} + P_f \text{ cul} \\ &= 2451 + 1039 = 3490 \text{ W.} \end{aligned}$$

b) Pertes supplémentaires. P_{so}

- Dans les colonnes et la culasse :

Elles sont évaluées de 15 à 20 % des pertes principales.

$$\begin{aligned} P_{so} &= 0,18 P_{fo} \\ &= 0,18 \cdot 3490 = 628,2 \text{ W.} \end{aligned}$$

- Dans les coins :

Elles sont évaluées à la moitié des pertes principales dans les coins.

$$\begin{aligned} P_{so} \text{ coin} &= 0,5 \cdot P_f \text{ coin} \\ &= 0,5 \cdot 1771 = 885,5 \text{ W.} \end{aligned}$$

- Perte totale dans le fer :

$$\begin{aligned} P_f &= P_{fo} + P_{so} + P_f \text{ coin} + P_{so} \text{ coin} \\ &= 2451 + 628,2 + 1771 + 885,5 = 5736 \text{ W.} \end{aligned}$$

.../...

B. - R E N D E M E N T

Le rendement η d'un transformateur ou toute autre machine électrique est le rapport entre la puissance fournie et la puissance absorbée par la machine.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad \begin{array}{l} P_1 : \text{Puissance absorbée} \\ P_2 : \text{" " fournie.} \end{array}$$

Généralement nous l'exprimons en % : $\eta (\%) = \left(\frac{P_2}{P_1} \right) 100$ %.

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

$$\eta (\%) = \frac{P_2}{P_2 + P_o + P_{cu}} \cdot 100$$

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

La puissance P_{cu} s'exprime :

$$P_{cu} = RI^2 = R I_{cc}^2 \left(\frac{I}{I_{cc}} \right)^2$$

$$K_{ch} = \frac{I}{I_{cc}} \text{ est le coefficient de charge.}$$

Nous avons : $P_K = R I_{cc}^2$

$$\text{et } P_{cu} = K_{ch}^2 P_K.$$

$$P_2 = K_{ch} S_n \cos \varphi$$

L'expression finale du rendement est alors :

$$\eta (\%) = \left\{ 1 - \frac{P_o + K_{ch}^2 P_K}{K_{ch} (S_n \cos \varphi) + P_o + K_{ch}^2 P_K} \right\} \cdot \%$$

Nous déterminons les caractéristiques du rendement pour $\cos \phi = 0,8$ et $\cos \phi = 1$ (Charge résistive).

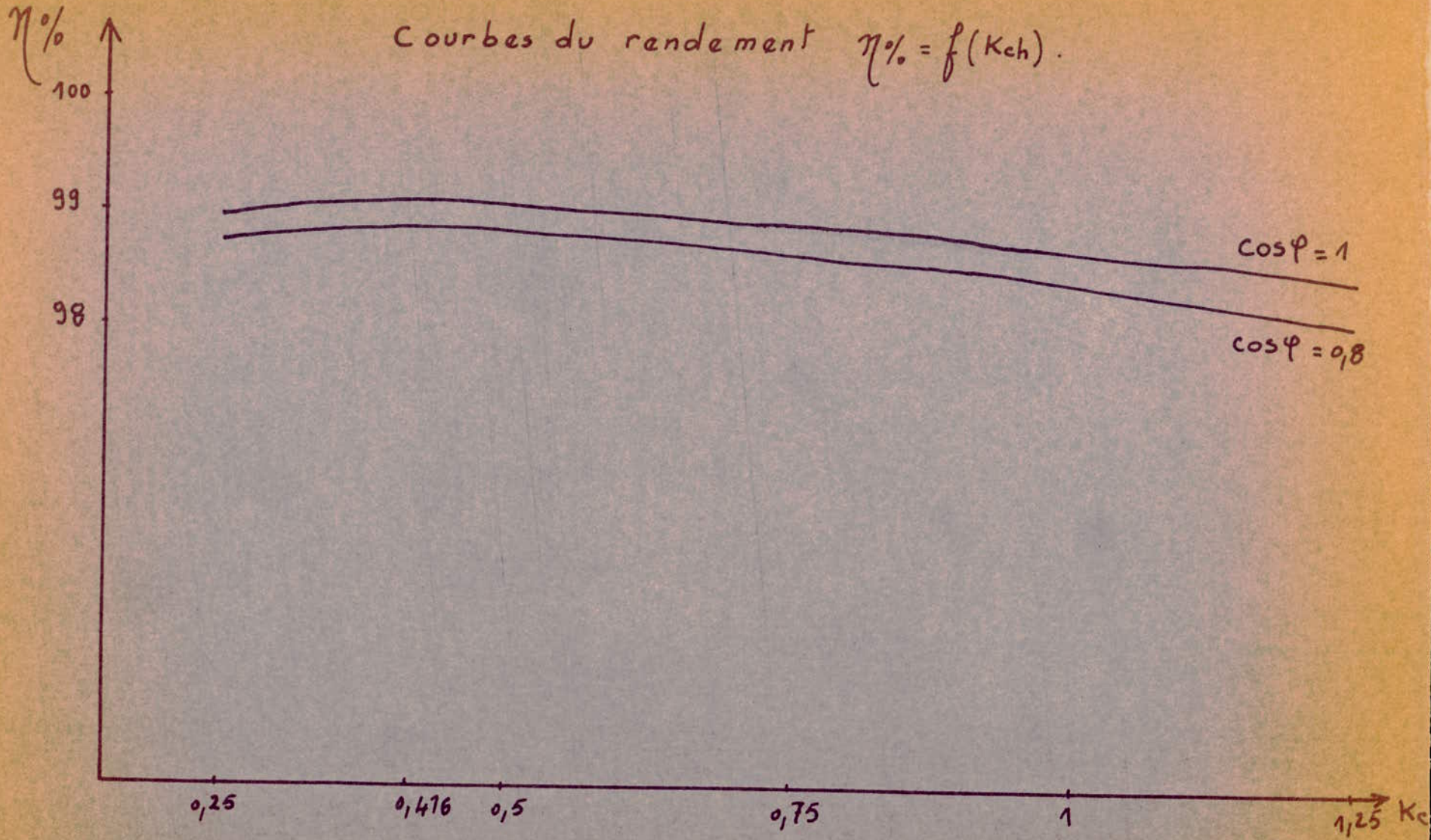
a) Rendement pour $\cos \phi = 1$.

Kch	$K^2_{ch} P_{KW}$	$P_o + K^2_{ch} P_{KW}$	Kch Sn Cos KW	Kch Sn Cos PK KW	$+P_o + K^2_{ch}$	η %
1/4	2,071	7,807	750	757,807		98,969
0,416	5,736	11,472	1248	1259,472		99,089
1/2	8,285	14,021	1500	1514,021		99,073
3/4	18,641	24,377	2250	2274,377		98,928
1	33,140	38,876	3000	3038,876		98,721
5/4	51,781	57,517	3750	3807,517		98,489

b) Rendement pour $\cos \phi = 0,8$.

Kch	$K^2_{ch} P_{KW}$	$P_o + K^2_{ch} P_{KW}$	Kch Sn Cos KW	Kch S cos PK	$+P_o + K^2_{ch}$	η %
1/4	2,071	7,807	600	607,804		98,715
0,416	5,736	11,472	990,4	1009,872		98,864
1/2	8,285	14,021	1200	1214,021		98,845
3/4	18,641	24,377	1800	18024,377		98,663
1	33,140	38,876	2400	2438,876		98,405
5/4	51,781	57,517	3000	3057,517		98,118

Courbes du rendement $\eta\% = f(K_{ch})$.



C. - VARIATION DE LA TENSION SECONDAIRE
AVEC LA CHARGE POUR UN FACTEUR DE PUISSANCE DONNE

Nous définissons le coefficient de charge comme le rapport de la puissance correspondante à une charge de la puissance nominale.

$$K_{ch} = \frac{P_{ch}}{P_n} = \frac{V_3 U_2 I_2 \cos \varphi_2}{V_3 U_{2n} I_{2n}}$$

$$K_{ch} = \frac{U_2 I_2}{U_{2n} I_{2n}} \cos \varphi_2$$

La chute de tension au secondaire est :

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

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

U_{2n} est la tension secondaire nominale.

U_2 est la tension secondaire pour une charge et un facteur de puissance donnée.

U'^2_{2n} et U'^2 sont les tensions secondaires ramenées au primaire.

Alors : $U'^2_{2n} = U_{1n}$ et $U' = U_1 - U_2$

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

Généralement nous approximations cette chute de tension à :

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

Nous déterminons les valeurs de chute de tension pour différentes charges avec les valeurs de :

$$U_{ka} = 1,05 \%$$

$$U_{kr} = 7,65 \%$$

.../...

a) Charge résistive : $\cos \varphi_2 = 1$; $\sin \varphi_2 = 0$

$$\Delta U \% = Kch \cdot Uka \%$$

$$\Delta U \% = Kch \cdot 1,05 \%$$

Kch	$\Delta U \%$	$\Delta U' (V)$	$U \cdot I_2 (V)$	$U_2 (V)$	U_2 / U_{2n}	I_2 / I_{2n}	$I_2 (A)$
1/4	0,263	26,3	34973,7	4992,11	0,998	0,251	87
1/2	0,525	52,5	34947,5	4984,25	0,997	0,502	174
3/4	0,788	78,8	34921,2	4976,36	0,995	0,754	261
1	1,05	105	34895	4967,5	0,990	1,01	350
5/4	1,313	131,3	34868,7	4960,61	0,992	1,26	436,5

b) Charge inductive : $\cos \varphi_2 = 0,8$; $\sin \varphi_2 = 0,6$

$$\Delta U \% = Kch (Uka (\%) \cdot \cos \varphi_2 + Ukr (\%) \sin \varphi_2)$$

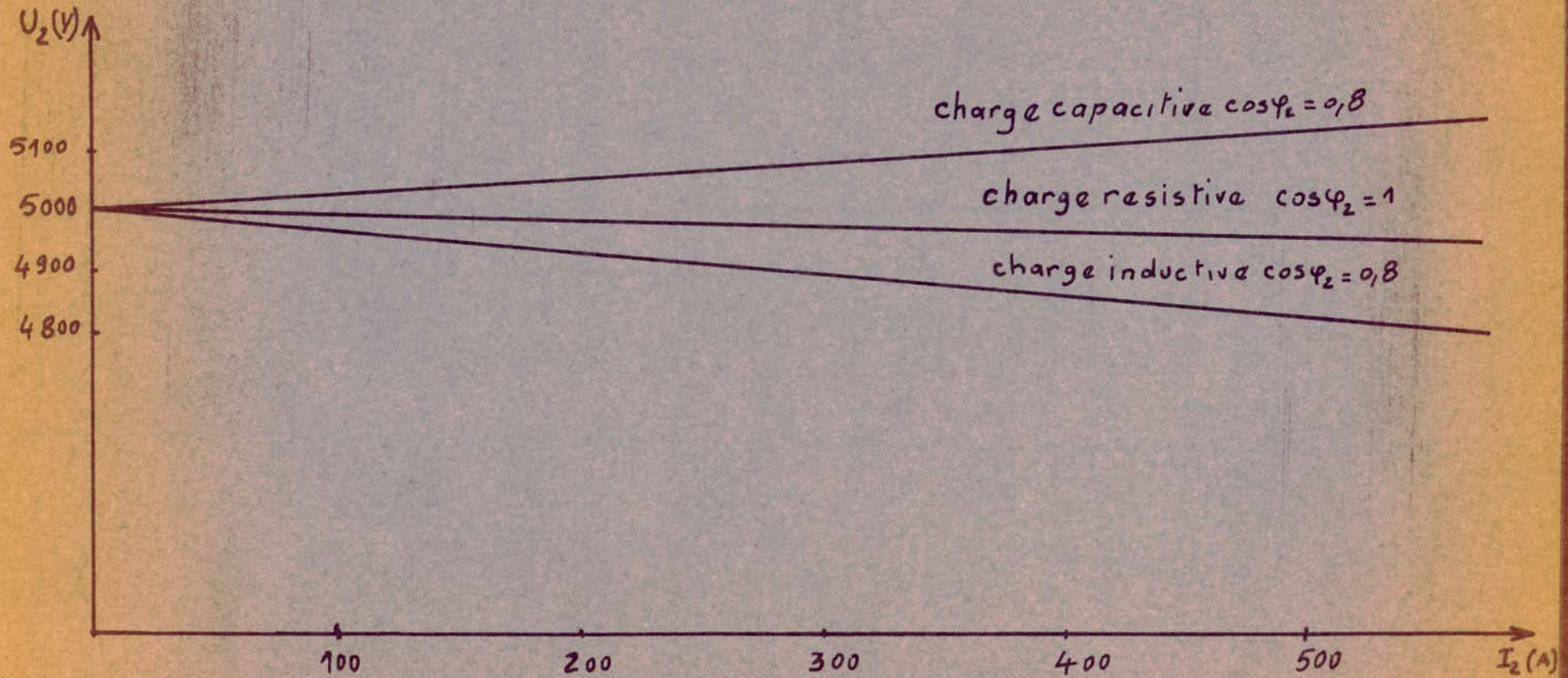
$$\Delta U \% = Kch (1,05 \cdot 0,8 + 7,65 \cdot 0,6)$$

$$\Delta U \% = Kch \cdot 5,43$$

Kch	$\Delta U \%$	$\Delta U' (V)$	$U \cdot I_2 (V)$	$U_2 (V)$	U_2 / U_{2n}	I_2 / I_{2n}	$I_2 (A)$
1/4	1,358	135,8	34 864	4959,26	0,992	0,315	109
1/2	2,715	271,5	34 728,5	4918,55	0,984	0,635	220
3/4	4,07	407	34 593	4878	0,976	0,961	333
1	5,43	543	34 457	4837	0,967	1,293	448
5/4	6,786	678,6	34 321,5	4796,5	0,959	1,629	574

.../...

caractéristique en charge $U_2 = f(I_2)$



c) Charge capacitive : $\cos \varphi_2 = 0,8$, $\sin \varphi_2 = - 0,6$

$$\Delta U \% = Kch (1,05 \cdot \cos \varphi_2 + 7,65 \sin \varphi_2)$$

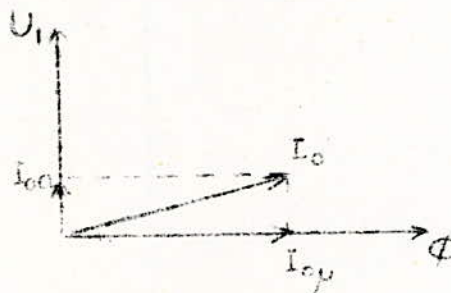
$$\Delta U \% = (1,05 \cdot 0,8 - 7,65 \cdot 0,6) = -3,75 \text{ Kch.}$$

Kch	U %	U (V)	U ² (V)	U ₂ (V)	U ₂ / U _n	I ₂ / I _{2n}	I ₂ (A)
1/4	- 0,938	93,8	35093,8	5028,14	1,006	0,316	109,5
1/2	- 1,875	187,5	35187,5	5056,25	1,011	0,618	214
3/4	- 2,813	281,2	35281,3	5084,39	1,017	0,922	319,5
1	- 3,75	375	35375	5112,5	1,023	1,222	423,5
5/4	- 4,688	468,8	35468,8	5140,64	1,028	1,606	556,35

D. - COURANT DE MARCHÉ A VIDE

Le courant de marche à vide peut être décomposé en :

- Une composante active I_{oa}
- Une composante reactive I_{oμ}



: Angle de retard magnétique

1) Composante active

Les pertes d' le fer résultent de la composante active du courant de marche à vide.

$$I_{oa} = \frac{P_o}{\sqrt{3} U_{1n}}$$

P_o : (W) , U_{1n} : (V) , I_{oa} = (A)

$$\text{A.N. } I_{oa} = \frac{5736}{\sqrt{3} \cdot 35} = 0,095 \text{ A.}$$

2) Composante réactive

Les puissances réactives dans le fer et dans les entre-fers correspondent à la composante réactive du courant de marche à vide.

Les pertes spécifiques réactives q_0 sont donnés par la courbe (fig) pour les différentes valeurs d'induction.

- Pertes réactives dans les colonnes :

$$\begin{aligned} \text{Pour } \hat{B}_c &= 1,65T & q_0 \text{ col} &= 12,5 \text{ VAR/Kg} \\ Q \text{ col} &= q_0 \text{ col} \cdot G \text{ col} \\ &= 12,5 \cdot 1204 = 15050 \text{ VAR.} \end{aligned}$$

- Pertes réactives dans la culasse :

$$\begin{aligned} \text{Pour } \hat{B}_{cul} &= 1,5T, & q_0 \text{ cul} &= 8,7 \text{ VAR/Kg.} \\ Q \text{ cul} &= q_0 \text{ cul} \cdot G \text{ cul} \\ &= 8,5 \cdot 611,2 = 5317,44 \text{ VAR.} \end{aligned}$$

- Pertes réactives dans les coins :

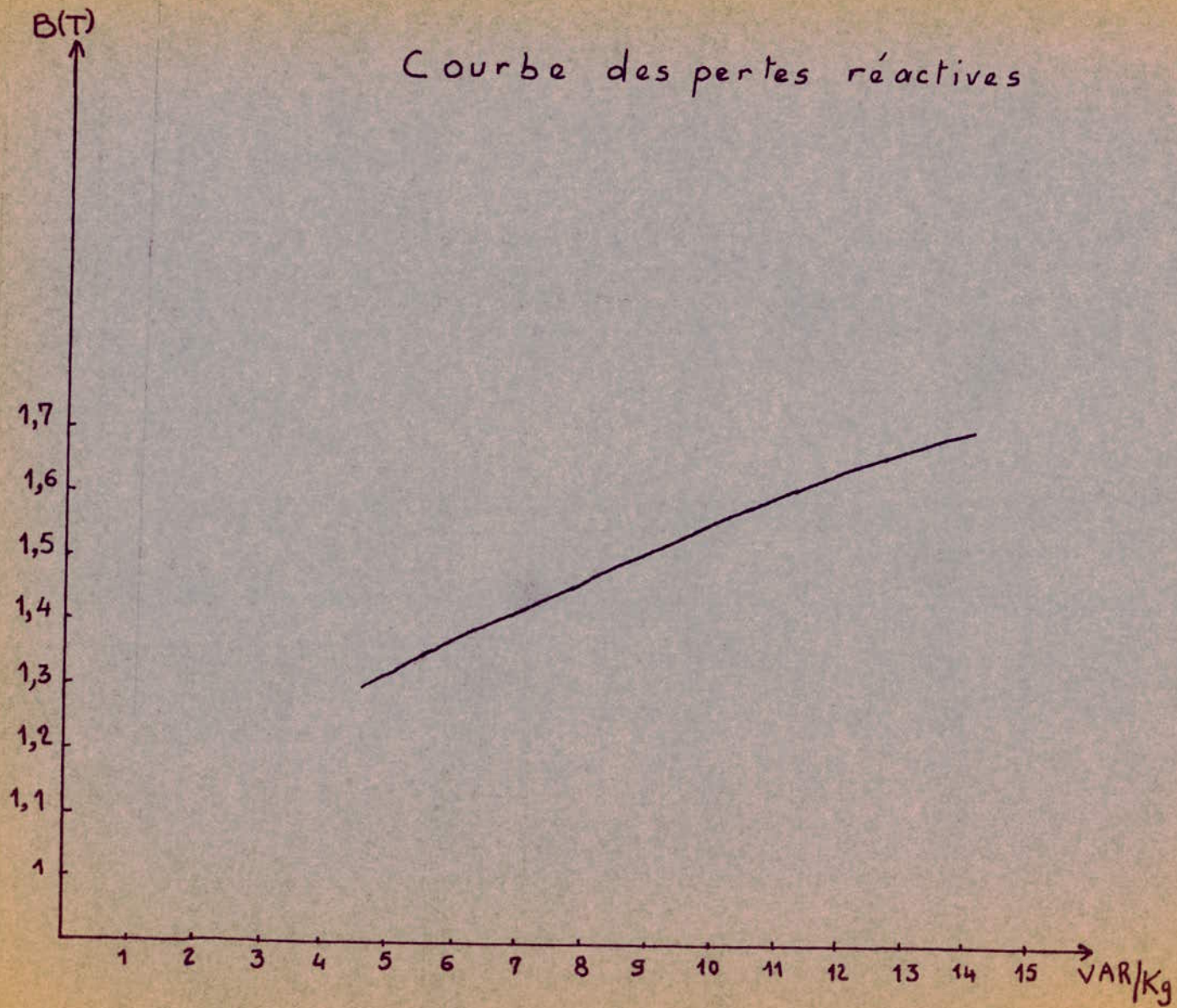
$$\begin{aligned} \text{Pour } \hat{B}_{coin} &= 1,57T, & q_0 \text{ coin} &= 12,2 \text{ VAR/Kg.} \\ Q \text{ coin} &= q_0 \text{ coin} \cdot G_{coin} \\ &= 12,2 \cdot 954,38 = 11643,43 \text{ VAR.} \end{aligned}$$

- Pertes réactives dans les entre-fers :

$$\begin{aligned} Q_{oS} &= q_{oS} \cdot N_s S_s \\ Q_{oS} &= 2,74 \cdot 7 \cdot 620,16 = 11894,66 \end{aligned}$$

.../...

Courbe des pertes réactives



Composante réactive du courant de marche à vide.

$$\begin{aligned} I_{o\mu} &= \frac{Q}{\sqrt{3} U_1} = \frac{Q_{cul} + Q_{col} + Q_{coin} + Q_S}{\sqrt{3} U_1} \\ &= \frac{43905.53}{\sqrt{3} 35000} = 0,724 \text{ A.} \end{aligned}$$

3) Courant de marche à vide :

$$\begin{aligned} I_o &= (I_{oa}^2 + I_{o\mu}^2)^{1/2} \\ &= (0,095^2 + 0,724^2)^{1/2} = 0,73 \text{ A} \end{aligned}$$

En grandeur réduite :

$$i_o \% = \frac{I_o}{I_n} \cdot 100 = \frac{0,73}{49,48} \cdot 100 = 1,475 \%$$

CHAPITRE IV

CALCUL THERMIQUE ET MECANIQUE

A.) CALCUL THERMIQUE

Dans les transformateurs la chaleur est produite essentiellement par les pertes dans le Fer au niveau du circuit magnétique et les pertes joule au niveau des enroulements. Un échauffement excessif réduit les qualités diélectriques des isolants, augmente la résistivité du cuivre et active l'oxydation de l'huile ce qui fait diminuer la vie du transformateur.

Le calcul thermique consiste à déterminer la température du circuit magnétique, des enroulements et de l'huile par rapport à la température ambiante du milieu où est placé le transformateur.

Comme mode de refroidissement, nous adoptons le refroidissement naturel où les températures ne doivent pas dépasser la valeur de 105°C (valeur limite pour les isolants de classe "A").

Les phénomènes thermiques qui se produisent dans le transformateur se resument aux :

- Dégagement de la chaleur par le circuit magnétique et les enroulements
- Transfert de la quantité de chaleur à l'huile élévation de sa température
- Montée de l'huile chaude vers la partie supérieure de la cuve
- Descente de l'huile refroidie vers le fond de la cuve après son passage dans les ondules.

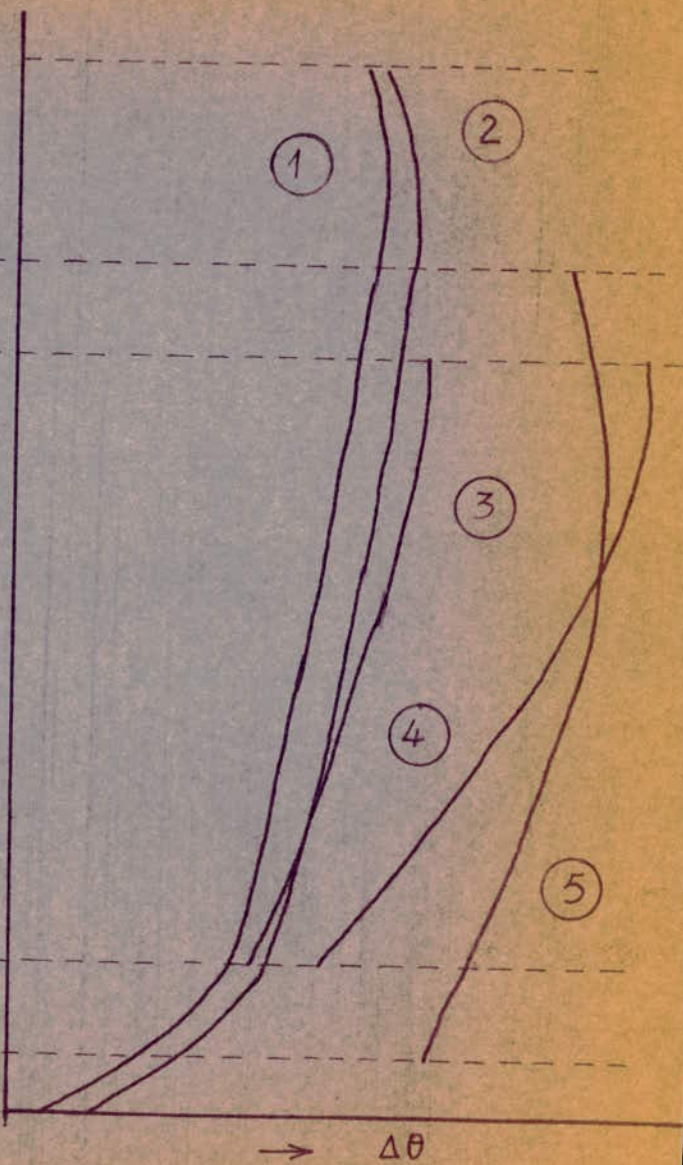
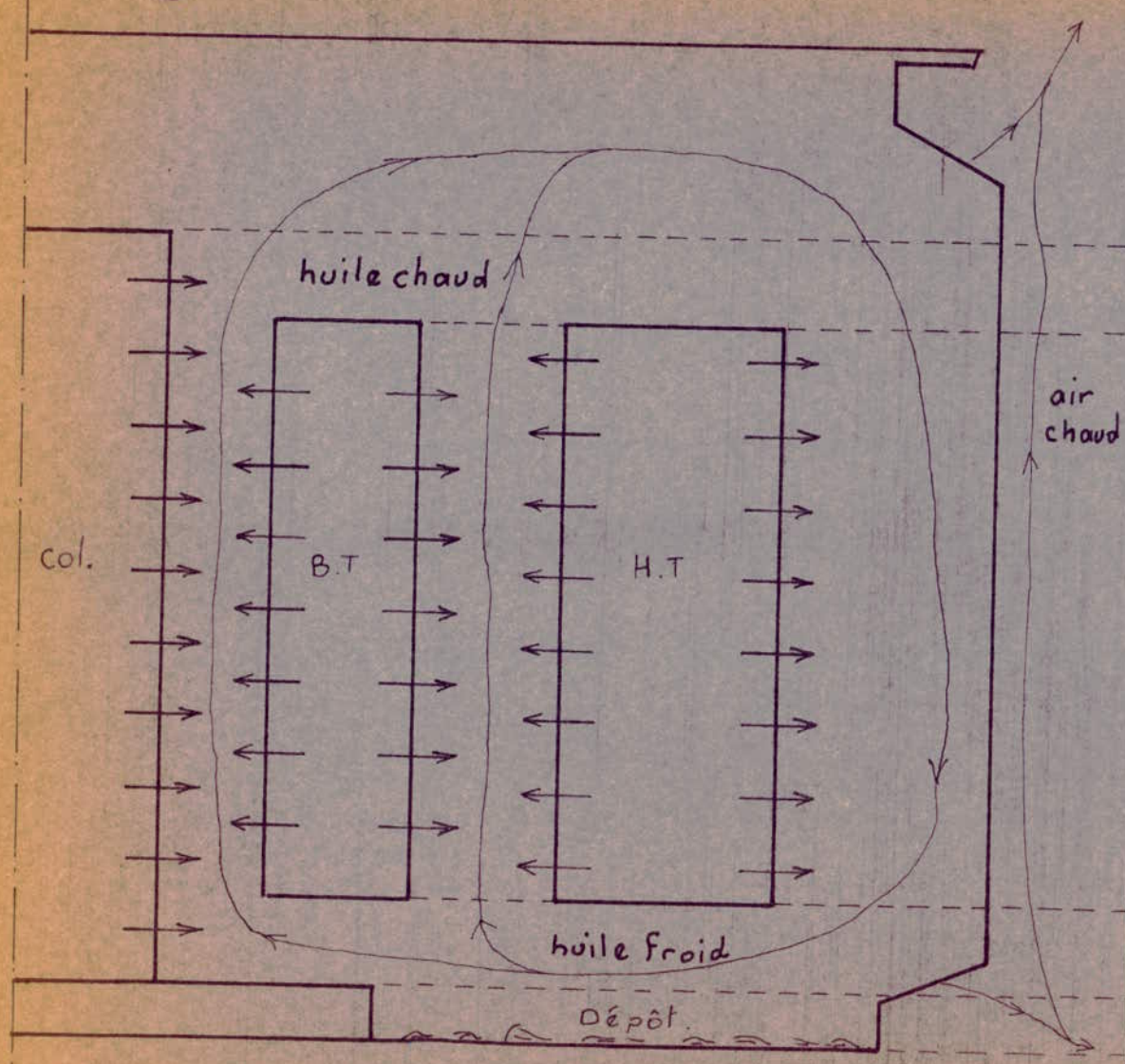
La circulation permanente de l'huile sans moyen artificiel provoque le refroidissement naturel du transformateur.

1. - Echauffement du circuit magnétique

Le calcul de l'échauffement du circuit magnétique est assez compliqué du fait qu'il a une constitution non homogène et que les colonnes et la culasse sont différemment refroidis.

Afin de simplifier le calcul, on assimile la section de la colonne et un rectangle (Fig C) relatif à la moitié de la section efficace du fer du fait de l'existence du canal de refroidissement.

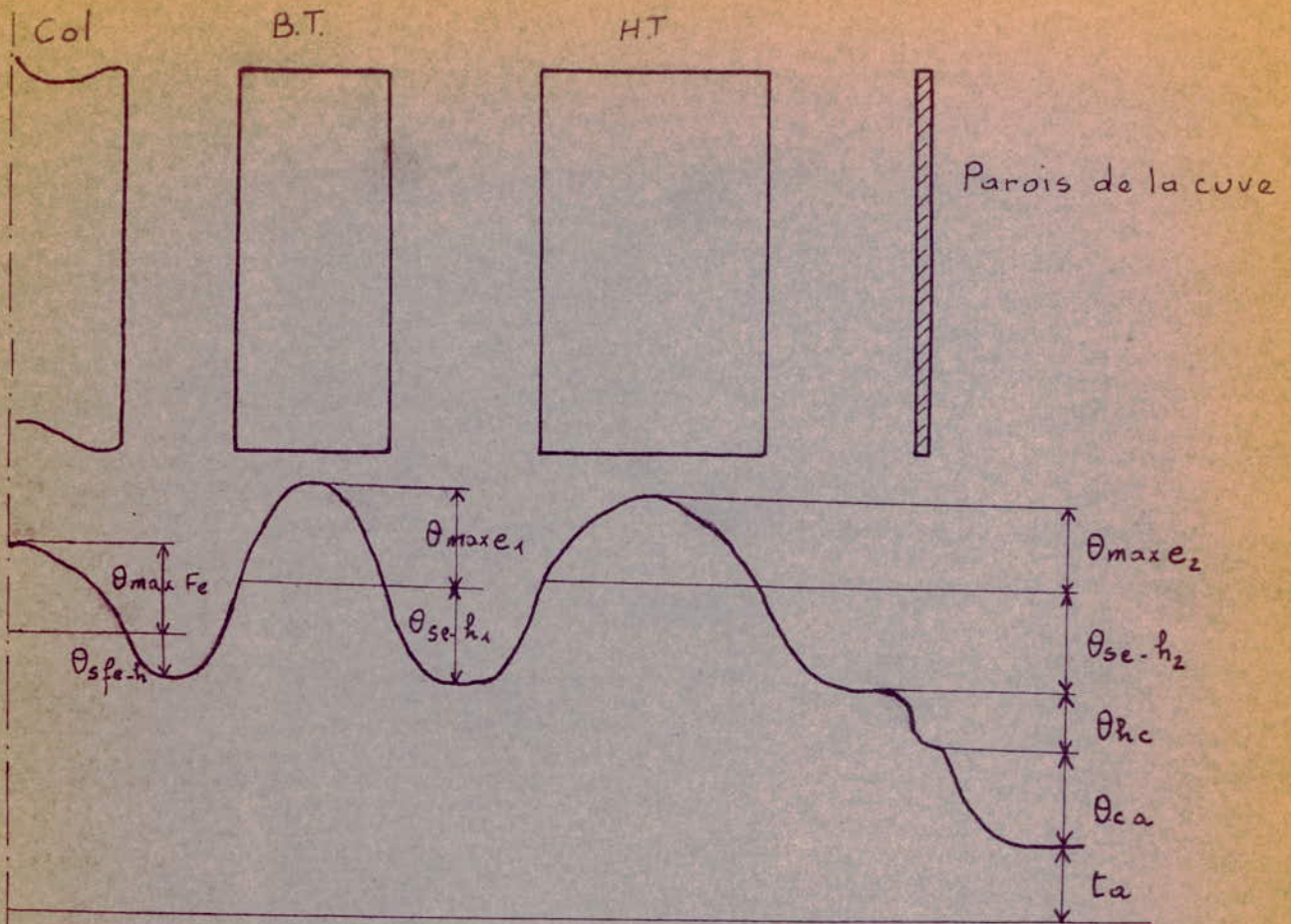
- ① huile dans le canal de l'enroulement
- ② huile extérieurement à l'enr^t
- ③ huile dans le canal de l'enroulement
- ④ surface des enroulements
- ⑤ surface du noyau



Schema de principe de phénomènes thermiques (Fig. A)

Répartition des élévations des températures

- Representation Des Différents Échauffements -



(fig. B)

θ_{sfe-h} : Échauffement surface fer - huile

$\theta_{max Fe}$: Échauffement fer - Surface

$\theta_{max e_1}$: " enroulement B.T. - Surface

θ_{se-h_1} : " surface enroulement B.T. - huile

$\theta_{max e_2}$: " enroulement H.T. - Surface

θ_{se-h_2} : " surface enroulement H.T. - surface

θ_{hc} : " huile - cuve

θ_{ca} : " cuve - air

t_a : température de l'air ambiant.

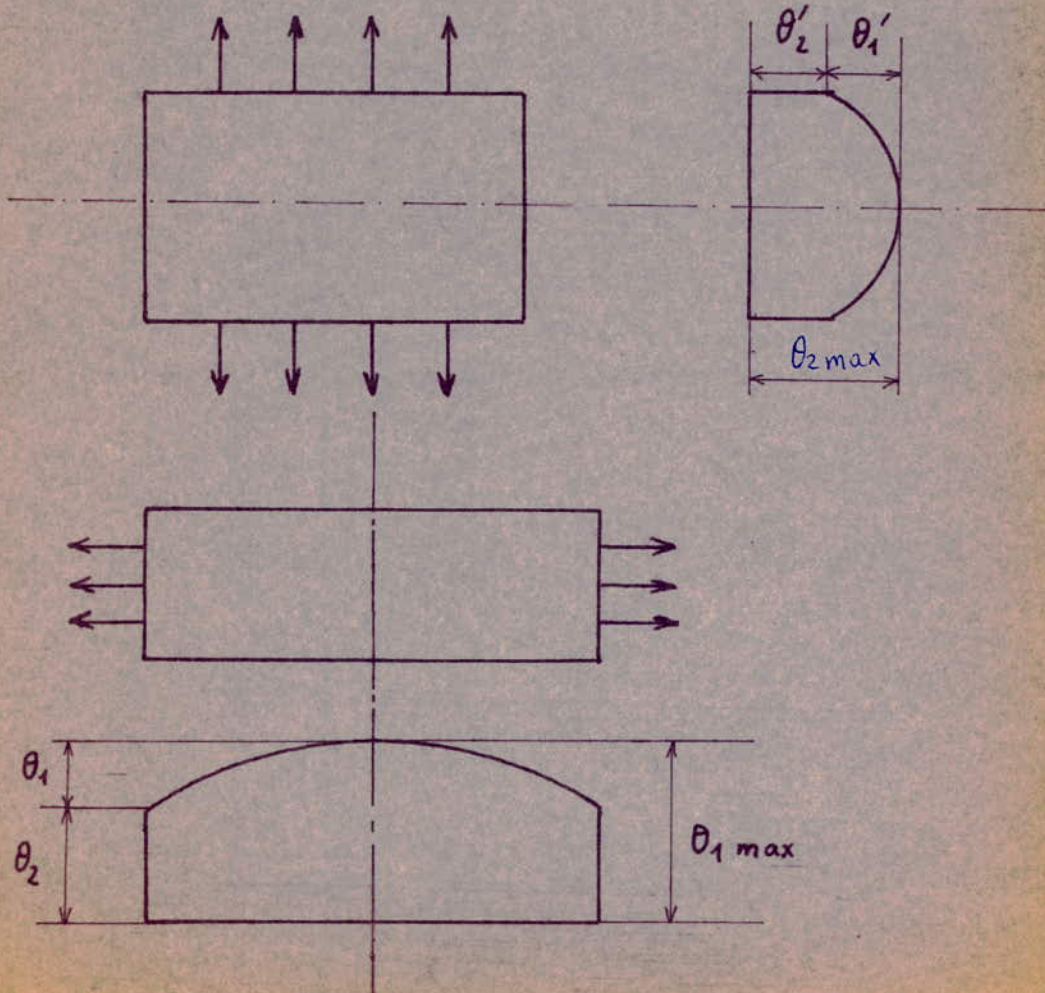
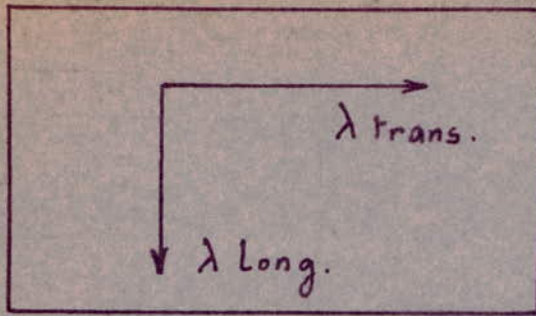


fig. c

Nous supposons que les pertes sont uniformément réparties.

Alors :

$$\theta_1 = \frac{Pa^2}{8 \lambda_1}$$

$$\theta_2 = \frac{Pa}{2 \alpha_{con}}$$

$$\theta_1' = \frac{Pb^2}{8 \lambda_t}$$

$$\theta_2' = \frac{Pa}{2 \alpha_{con}}$$

$$\theta_i : ^\circ C$$

$$\alpha_{con} = 110 \text{ W / m}^2\text{ }^\circ C$$

$$\lambda_1 = 20 \text{ W / m}^\circ C$$

$$\lambda_t = 3 \text{ W / m}^\circ C$$

$$P = \text{W / m}^3$$

- Dimension du rectangle :

$$a = 0,9 D \\ = 0,9 \cdot 30,48 = 27,43 \text{ cm}$$

$$b = \frac{S_{fer\ col}}{2 a} \\ = \frac{620,16}{2 \cdot 27,43} = 11,3 \text{ cm}$$

- Calcul des pertes P :

$$P = P_{sp\ col} \cdot 10^3 \\ = 2,036 \cdot 7,65 \cdot 10^3 = 15,575 \cdot 10^3 \text{ W / m}^3$$

- Calcul des échauffements (Température par rapport à celle de l'huile)

$$\theta_1 = \frac{15,575 \cdot 10^3 \cdot 0,2743^2}{8 \cdot 20} = 7,32^\circ C$$

$$\theta_2 = \frac{15,575 \cdot 10^3 \cdot 0,2743}{2 \cdot 110} = 19,42^\circ C$$

$$\theta_{1max} = \theta_1 + \theta_2 \\ = 7,32^\circ C + 19,42^\circ C = 26,74^\circ C$$

$$\theta_1' = \frac{15,575 \cdot 10^3 \cdot 0,113^2}{8 \cdot 3} = 8,28^\circ C$$

$$\theta_2' = \frac{15,575 \cdot 10^3 \cdot 0,113}{2 \cdot 110} = 8^\circ C$$

$$\begin{aligned}\theta_{2\max} &= \theta_1 + \theta_2 \\ &= 8,28^\circ\text{C} + 8^\circ\text{C} = 16,28^\circ\text{C}\end{aligned}$$

- Echauffement du circuit magnétique :

$$\begin{aligned}\theta_{\max} \text{ C.M à } h &= \theta_{1\max} \frac{\theta_2 + 1,5 \theta_1}{\theta_{1\max} + \theta_2 + 1,5 \theta_1} \\ &= 26,74 \frac{19,42 + 1,5 \cdot 7,32}{26,74 + 19,42 + 1,5 \cdot 7,32} = 14,22^\circ\text{C}.\end{aligned}$$

2. - Echauffement moyen de l'enroulement H.T par rapport à l'huile :

La température n'est pas répartie uniformément suivant la hauteur (Fig A-b) et la largeur (Fig C-b) de l'enroulement. Nous introduisons dans le calcul une surélévation moyenne de la température de l'enroulement par rapport à celle de l'huile.

Pour l'enroulement en galettes continues l'échauffement moyen est donné par la relation suivante :

$$\theta \text{ moye } h_2 = q_2 \left(\frac{\delta_{is_2}}{\lambda_{is_2}} + \frac{1}{\alpha \cos 2} \right)$$

is_2 : épaisseur de l'isolation de papier d'un seul côté ($is_2 = 0,62 \text{ mm}$)
 λ_{is_2} : conductivité thermique du papier.

pour le papier imprégné à l'huile $is_2 = 0,17 \text{ W/m}^\circ\text{C}$

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

$$q_2 = \frac{500 \cdot K_{mR2} \cdot J_2^2 \cdot sw_2 \cdot W_{sp} / \text{gal}}{(b' + a')^2 W_s / \text{gal}}$$

K_{mR2} : Coefficient de majoration des pertes en courant alternatif

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

ρ : Résistivité du cuivre chaud = $0,021 \text{ } \cdot \text{mm}^2/\text{m}$

J_2 : Densité de courant qui traverse le conducteur . $J_2 = 3,83 \text{ A/mm}^2$

a', b' : Dimensions de la section du conducteur isolé

$$a' = 3,68 \text{ mm} - b' = 6,74 \text{ mm}$$

W_{sp}/gal : Nombre de spires par galette. $W_{sp}/\text{gal} = 16$

ξ : Coefficient sous unitaire qui tient compte qu'une partie de la section de contact avec l'huile est occupée par des câbles axiaux et radiales.

$$v = \frac{v \cdot b' + h \cdot W_{sp} / gal. a'}{b' + W_{sp} / gal. a'}$$

v et h sont les coefficients qui tiennent compte respectivement des câbles axiaux et radiaux.

$$h = \frac{\frac{\pi}{4} \cdot (D_{e2}^2 - D_{i2}^2) - n \text{ câbles. s câbles radiales}}{\frac{\pi}{4} (D_{e2}^2 - D_{i2}^2)}$$

$$v = \frac{\pi \cdot D_{e2} \cdot b' - n \text{ câbles. s câbles axiales}}{\pi \cdot D_{e2} \cdot b'}$$

D_{e2} et D_{i2} sont respectivement le diamètre extérieur et intérieur de l'enroulement H.T (Fig. D-2)

$$\begin{aligned} D_{i2} &= D_{12} + a_{12} \\ &= 42,5 + 2,5 = 45 \text{ cm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} D_{e2} &= D_{i2} + 2a_2 \\ &= 45 + 2 \cdot 5,8 = 56,6 \text{ cm.} \end{aligned}$$

Le tableau ci-dessous nous donne le nombre de câbles en fonction du diamètre de la bobine.

D_e mm	150-250	250-380	380-500	500-600	900-1200
Nbre de câbles	6	8	10	12	14-16

Pour $D_{e2} = 566 \text{ mm}$, nous prenons $n \text{ câbles} = 12$

Les câbles ont les dimensions de la Fig. E-a.

.../...

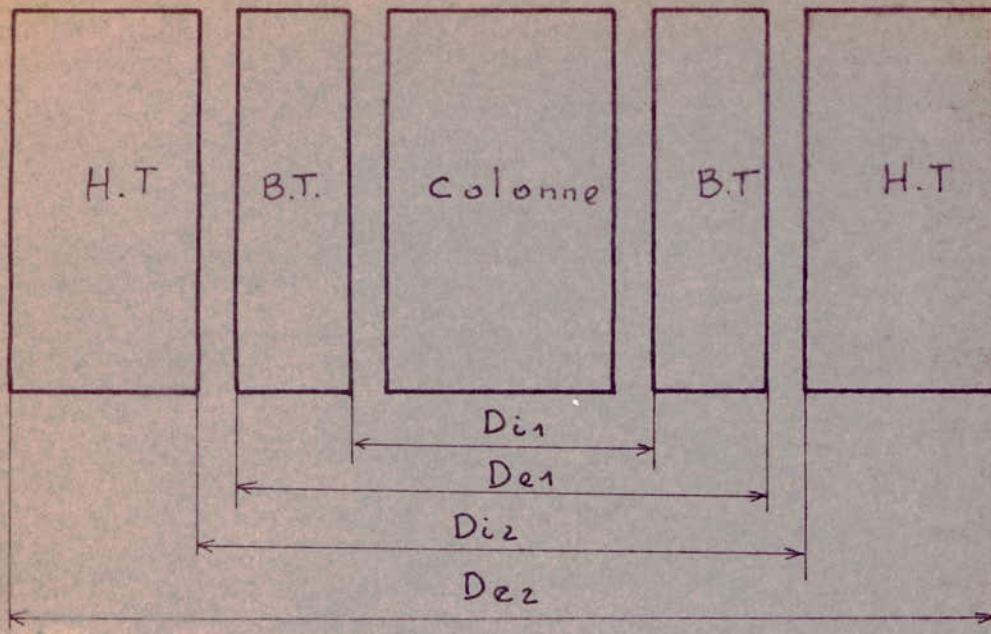


fig. C.a

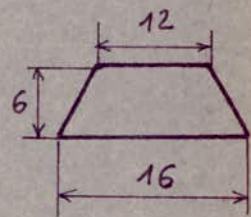
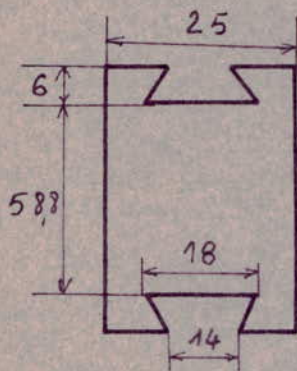


fig. D.a

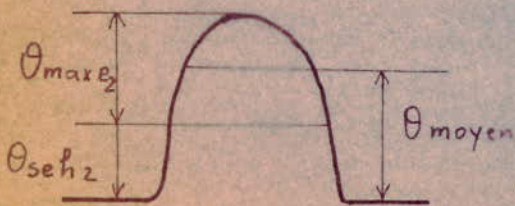


fig. C.b

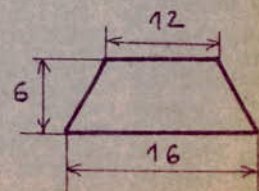
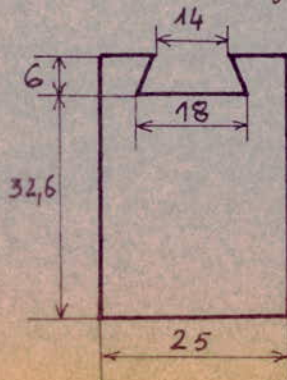


fig. D.b

- Valeurs numériques de h et v

$$h = \frac{\frac{II}{4} (566^2 - 450^2) - 12 \cdot 50,8 \cdot 25}{\frac{II}{4} (566^2 - 450^2)} = 0,81$$

$$v = \frac{II \cdot 566 \cdot 6,74 - 12 \cdot 16 \cdot 6,74}{II \cdot 566 \cdot 6,74} = 0,89$$

- Valeurs numériques du coefficient

$$\alpha_{con} = \frac{0,89 \cdot 6,74 + 0,81 \cdot 59 \cdot 3,68}{6,74 + 59 \cdot 3,68} = 0,81$$

- Valeurs numériques du flux thermique. q_2 .

$$q_2 = \frac{500 \cdot 1,02 \cdot 0,021 \cdot 3,83^2 \cdot 12,9 \cdot 16}{0,81 (6,74 + 16 \cdot 3,68)} = 610 \text{ W / m}^2$$

α_{con} = Coefficient de convection global pour toute la galette.

Il est donné par la relation :

$$\alpha_{con} = \frac{1 + \frac{\alpha_{con v} h \cdot a' \cdot W_{sp} / q_{al}}{\alpha_{con v}} \cdot \frac{h}{v}}{1 + \frac{a' W_{sp} / q_{al}}{b'} \cdot \frac{h}{v}}$$

A V E C :

$\alpha_{con v}$: Coefficient de transmission par convection pour les surfaces verticales.

Pour le papier baigné dans l'huile, ses valeurs sont comprises entre 100 et 110 W / m²°C - Nous prenons $\alpha_{con v} = 105 \text{ W / m}^2\text{°C}$.

$\alpha_{con h}$: Coefficient de transmission par convection pour les surfaces horizontales.

.../...

Dans le cas où l'épaisseur de la bobine est inférieure ou égale au diamètre de la hauteur du canal de refroidissement de la bobine de haute tension, le coefficient de transmission par convection pour les surfaces horizontales est égal à la moitié de celui pour les surfaces verticales.

$$a_2 = 58,8 \text{ mm} \text{ d'où } \frac{a_2}{10} = 5,88 > 5$$

Nous prenons α con h = 0,55 α con v.

A L O R S : α con h = 57,75 W / m²°C.

Nous déduisons la valeur du coefficient global de transmission par convection.

$$\alpha_{\text{con}_2} = 105. \frac{1 + 0,55 \frac{3,68}{6,74} \cdot 16 \cdot \frac{0,81}{0,89}}{1 + 16 \cdot \frac{3,68}{6,74} \cdot \frac{0,81}{0,89}} = 63 \text{ W/m}^2\text{°C.}$$

Finalement nous déduisons l'échauffement moyen de l'enroulement H.T. par rapport à l'huile.

$$\theta_{\text{moyeh}_2} = 610 \left(\frac{0,62 \cdot 10^{-3}}{0,17} + \frac{1}{63} \right) = 11,9^\circ\text{C}$$

C'est une valeur acceptable.

3. - ECHAUFFEMENT MOYEN DE L'ENROULEMENT "BT" PAR RAPPORT A L'HUILE

L'enroulement BT est aussi en galettes continues. Nous appliquons la même méthode de calcul que pour l'enroulement H.T.

- Diamètres extérieurs et intérieurs

$$\begin{aligned} D_{e_1} &= D_{12} - a_{12} \\ &= 42,5 - 2,5 = 30 \text{ cm} \\ D_{i_1} &= D + 2 \cdot a_{10} \\ &= 30,48 + 2 \cdot 1,5 = 33,48 \text{ cm.} \end{aligned}$$

Nous choisissons un nombre de câbles égal à 10 câbles.
Les dimensions des câbles sont donnés par la Fig E.b.

- Valeur numérique de h et v.

Avec : $a = 5,44$ m et $b = 13,54$ mm

$$h = \frac{\frac{II}{4} (400^2 - 334,8^2)}{\frac{II}{4} (400^2 - 334,8^2)} - 10 \cdot 32,6 \cdot 25 = 0,78$$

$$v = \frac{II \cdot 400 \cdot 13,54 - 10 \cdot 16 \cdot 13,54}{II \cdot 400 \cdot 13,54} = 0,87$$

- Valeur numérique déduite du coefficient

$$= \frac{0,87 \cdot 13,54 + 0,78 \cdot 6 \cdot 5,44}{13,54 + 6 \cdot 5,44} = 0,81$$

- Valeur numérique du flux thermique q1

$$q_1 = \frac{500 \cdot 1,02 \cdot 0,021 \cdot 3,69^2 \cdot 54,1 \cdot 6}{0,81 (13,54 + 6 \cdot 5,44)} = 1265 \text{ W/m}^2\text{°C.}$$

- Coefficient de transmission par convection

Nous choisissons $\alpha_{conv} = 110 \text{ W / m}^2\text{°C.}$

Le coefficient $\alpha_{conh} = 0,5 \cdot \alpha_{conv} \left(\frac{a_1}{10} \leftarrow hc \right)$

$$\alpha_{conh} = 55 \text{ W / m}^2\text{°C.}$$

Le coefficient global déduit est égal à :

$$\alpha_{con_1} = 110 \cdot \frac{1 + 0,5 \cdot 6 \cdot \frac{5,44}{13,54} \cdot \frac{0,78}{0,87}}{1 + 6 \cdot \frac{5,44}{13,58} \cdot \frac{0,78}{0,87}} = 72,4 \text{ W/m}^2\text{°C.}$$

.../...

- Valeur de l'échauffement moyen de l'enroulement BT par rapport à l'huile.

$$\theta \text{ moye h1} = q1 \left(\frac{\sum \lambda_{is1}}{\lambda_{is1}} + \frac{1}{\alpha_{con1}} \right)$$

$\delta_{is1} = 0,52 \text{ mm.}$ (Isolation d'un côté du conducteur).

$\lambda_{is1} = 0,17 \text{ W/m}^\circ\text{C.}$

$$\text{A.N. } \theta \text{ moye h1} = 1265 \left(\frac{0,52 \cdot 10^{-3}}{0,17} + \frac{1}{72,4} \right) = 21,34^\circ\text{C.}$$

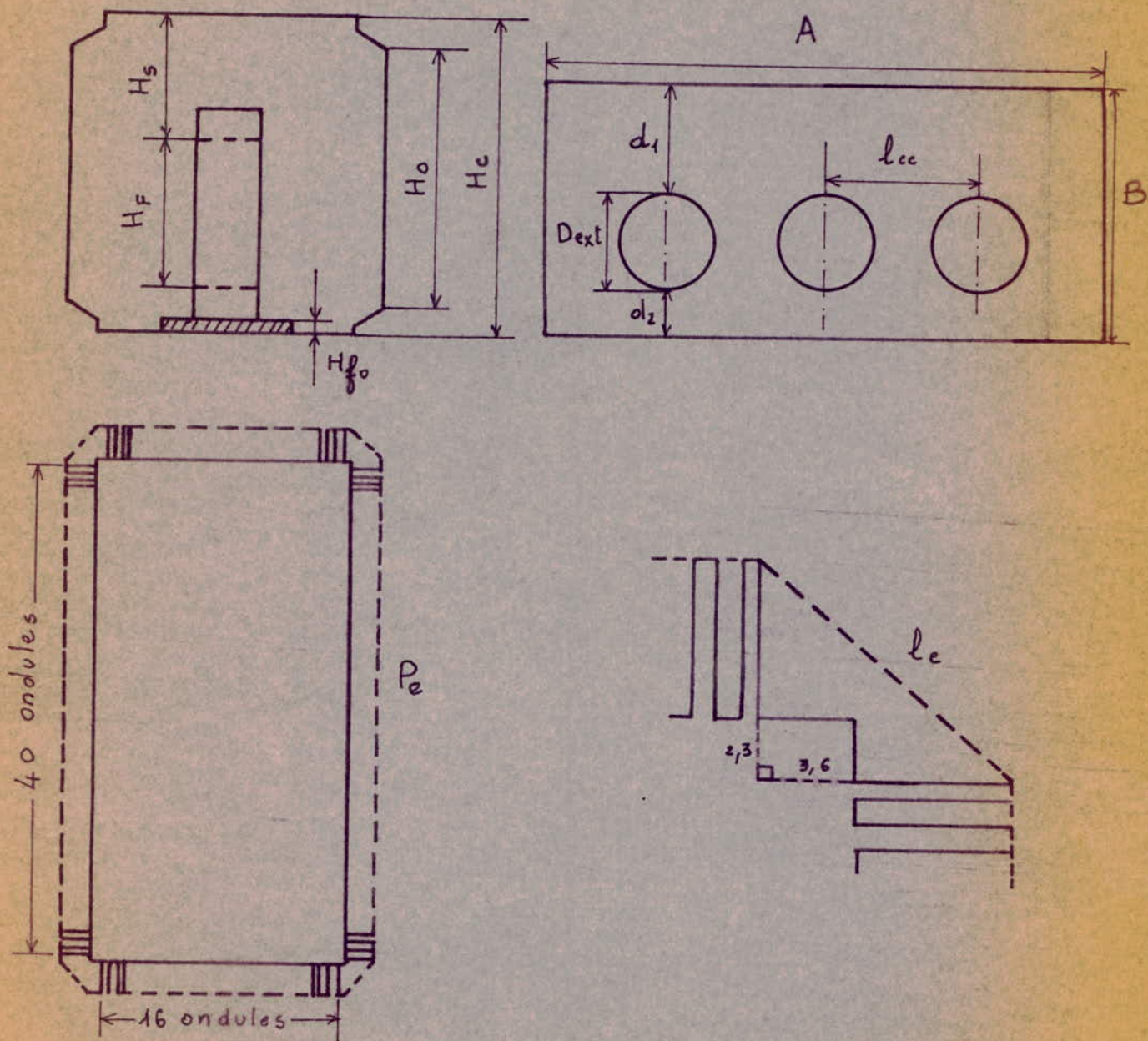
Cette valeur reste valable.

3. - DIMENSIONNEMENT DE LA CUVE

Nous adiptons une cuve à secteur rectangulaire avec ses parois en ondules rectangulaires.

- Longueur de la cuve

$$A = 2 \cdot lcc + D \text{ ext} + 2d1.$$



(fig. F.)

lec = distance entre axes des colonnes
lec = 59,76 cm. (ch. II.C)

D ext : diamètre extérieur de la bobine HT
D ext = 56,6 (ch IV A2)

Les distances d_1 et d_2 entre la bobine HT et les parois de la cuve sont données par le tableau ci-dessous en fonction de la tension.

TENSION KV	6	10	35	110
d_1 mm	30-50	40-60	120-160	300-400
d_2 mm	30	30	80-100	200-250

Nous prenons : $d_1 = 160$ mm
 $d_2 = 100$ mm.

$$A = 2 \cdot 59,76 + 56,6 + 2 \cdot 16,0 = 208,12 \text{ cm}$$

Nous prenons la valeur arrondie. : $A = 210$ cm.

- Largeur de la cuve

$$B = D_{\text{ext}} + d_1 + d_2 \\ = 56,6 + 16,0 + 10,0 = 82,6 \text{ cm}$$

Nous prenons la valeur arrondie. $B = 85$ cm

- Hauteur de la cuve (Fig F)

$$H_c = H_{cM} + H_{fo} + H_s - h$$

$$H_{cM} = 132,2 \text{ cm (hauteur du circuit magnétique)}$$

$$H_{fo} = 5 \text{ cm}$$

$$H_s = 0,75 H_F \quad - \text{ nous prenons } H_s = 0,75 H_F \\ = 0,75 \cdot 848 = 634,5 \text{ mm}$$

$$h = 23,8 \text{ cm (hauteur de la culasse)}$$

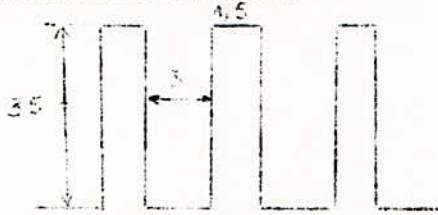
$$H_c = 132,2 + 5 + 63,4 - 23,8 = 176,8 \text{ cm}$$

- Hauteur des ondules

$$H_o = H_c - 23,8 \\ = 176,8 - 23,8 = 153,0 \text{ cm.}$$

Nous utilisons des tôles d'épaisseur = 3 mm

- Dimension d'une ondule en cm



- Largeur occupée par une ondule :

$$l_0 = 3 + 1,5 + 0,6 = 5,1 \text{ cm}$$

- Nombre d'ondules suivant la largeur de la cuve

$$Nb_2 = 16 \text{ ondules}$$

- Nombre d'ondules suivant la longueur de la cuve

$$Nb_1 = 40 \text{ ondules}$$

- Nombre total d'ondules

$$\begin{aligned} Nb &= 2 (Nb_1 + Nb_2) \\ &= 2 (40 + 16) = 112 \text{ ondules} \end{aligned}$$

- Surface d'une ondule

$$\begin{aligned} P_0 &= 2 \cdot 35 + 1,5 + 3 = 74,5 \text{ cm} \\ S_0 &= P_0 \cdot H_0 \cdot 10^{-4} \\ &= 74,5 \cdot 153,7 \cdot 10^{-4} = 1,145 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

- Surface des ondules

$$\begin{aligned} S_0 &= Nb \cdot s_0 \\ &= 112 \cdot 1,145 = 128,247 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

- Surface du couvercle

$$\begin{aligned} S_{\text{cou}} &= A \cdot B \\ &= 210 \cdot 85 \cdot 10^{-4} = 1,785 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

- Surface de contact avec l'huile

$$\begin{aligned} S_c &= S_0 + S_{\text{cou}} \\ &= 128,247 + 1,785 = 130,032 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

- Surface enveloppante (Fig F)

Nous appliquons le théorème du pythagore aux coins

$$\bullet l_e = (35 + 3,6)^2 + (35 + 2,3)^2)^{1/2} = 53,68 \text{ cm}$$

$$\bullet P_e = 2 (204 + 81,6 + 2 \cdot 53,68) = 785,92 \text{ cm}$$

$$S_e = P_e \cdot H_o \cdot 10^{-4}$$
$$= 785,92 \cdot 153,7 \cdot 10^{-4} = 12,0796 \text{ m}^2$$

- Surface radiante

$$S_r = S_e + S_{\text{côté}}$$
$$= 12,0796 + 1,785 = 13,8646 \text{ m}^2$$

5. - ECHAUFFEMENT DE L'HUILE par rapport à la cuve lors de la transmission par convection naturelle l'échauffement de l'huile par rapport à la cuve est donné par :

$$\theta_{hc} = 0,165 \left(\frac{1,05 (P_o + P_k)}{S_c} \right)^{0,6}$$

P_o et P_k en (W)

S_c : (m²)

θ_{hc} : °C

$$\theta_{hc} = 0,165 \left(\frac{1,05 (33140 + 5,736)}{130,032} \right)^{0,6} = 5,19^\circ\text{C}$$

.../...

6. - Echauffement de la cuve par rapport à l'air

6. - ECHAUFFEMENT DE LA CUBE PAR RAPPORT A L'AIR

La cuve transmet la chaleur à l'air environnant par convection et par rayonnement. Cet échauffement est donné par :

$$\theta_{ca} = \left(\frac{1,05 (P_o + P_k)}{2,8 S_n + 2,5 S_c} \right)^{0,8}$$

$$\theta_{ca} = \left(\frac{1,05 \cdot (33140 + 5736)}{2,8 \cdot 13,8646 + 2,5 \cdot 130,032} \right)^{0,8} = 43,64^{\circ}\text{C}.$$

7. - Temperature du circuit magnétique et des bobinaes

t_a : Température de l'air prise égale à 35°C

- Circuit magnétique

$$\begin{aligned} t_{cM} &= \theta_{cMh} + \theta_{hc} + \theta_{ea} + t_a \\ &= 14,22 + 5,19 + 43,64 + 35 = 98,05^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

- Bobine H.T.

$$\begin{aligned} t_{e2} &= \theta_{eh2} + \theta_{hc} + \theta_{ea} + t_a \\ &= 11,9 + 5,19 + 43,64 + 35 = 95,73^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

- Bobine B.T.

$$\begin{aligned} t_{e1} &= \theta_{eh1} + \theta_{hc} + \theta_{ea} + t_a \\ &= 21,34 + 5,19 + 43,64 + 35 = 105,17^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

Ces températures sont acceptables, elles sont égales environ ou inférieures à la norme fixée à 105°C .

Le calcul mécanique des enroulements consiste en la vérification des bobinages aux efforts électrodynamiques causés par des surintensités qui ont pour sources :-

- Le démarrage de moteur asynchrone ($I_d = 3$ à 7 fois I_n)
- La mise sous tension à vide ($I_o = 3$ à 8 fois I_n), dans ce cas seul l'enroulement primaire est sollicité.
- Court circuit aux bornes du secondaire ($I_k = 6$ à 25 fois I_n). Le plus important et le plus rare à la fois est le troisième cas, le seul d'ailleurs qu'on l'étudie.

I. COURANT DE COURT CIRCUIT.

Le cas le plus grave est le court circuit triphasé symétrique. La valeur maximale du courant est donnée par :-

$$I_{kmax} = \sqrt{2} \cdot K_m \cdot I_{kdin} \text{ (A)}$$

K_m est le coefficient de crête ou d'impulsion.

$$K_m = 1 + e^{-II} \frac{U_{ka}}{U_{kr}}$$

I_{kdin} est le courant stationnaire de court-circuit.

$$I_{kdin} = I_n \frac{100}{U_k}$$

- Valeur numérique du coefficient de crête.

$$K_m = 1 + e^{-II} \frac{1,05}{7,65} = 1,6497$$

- Valeur du courant de court-circuit dans l'enroulement (B.T)

$$\begin{aligned} I_{kdin} &= I_{fnI} \frac{100}{U_k} \\ &= 200 \frac{100}{7,72} = 2590 \text{ A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{kmaxI} &= \sqrt{2} \cdot K_m \cdot I_{kdinI} \\ &= \sqrt{2} \cdot 1,6497 \cdot 2590 = 6041 \text{ A.} \end{aligned}$$

- Valeur du courant de court-circuit dans l'enroulement (H.T)

$$\begin{aligned} I_{kdin2} &= I_{fr2} \frac{100}{U_k} \\ &= 49,48 \frac{100}{7,72} = 641 \text{ A.} \end{aligned}$$

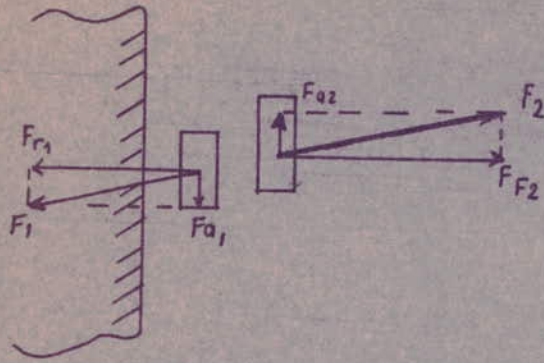
$$\begin{aligned} I_{kmax2} &= \sqrt{2} \cdot K_m \cdot I_{kdin2} \\ &= \sqrt{2} \cdot 1,6497 \cdot 641 = 1495 \text{ A.} \end{aligned}$$

2. CALCUL DES EFFORTS.

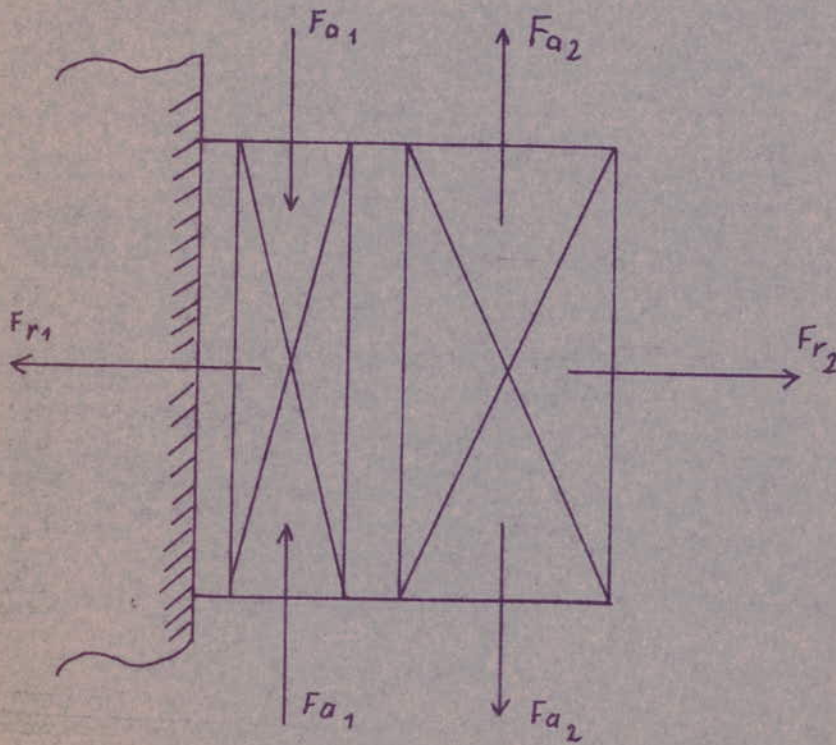
Généralement dans les transformateurs les courants circulent en sens inverse dans les enroulements (H.T) et (B.T). Entre les conducteurs apparaissent des forces qu'on peut les décomposer en forces axiales et forces radiales.

a) FORCES RADIALES.

Les forces radiales tendent à exercer une traction sur l'enroulement (H.T) et une compression sur l'enroulement (B.T). Ces forces sont données par :-



- Composantes radiales et axiales des efforts electrodynamique



- Bobines B.T et H.T. soumis aux forces radiales et axiales

$$Fr = \frac{6,4 (W_{ikmax})^2 L_{moy} K_r 10^{-8}}{HR}$$

- L_{moy} : longueur moyenne de la spire (m)
- W : nombre de spires
- K_r : coefficient de ROGOVSKI.
- H_b : hauteur de la bobine (m)

- Force radiales dans l'enroulement BT.

$$Fr1 = \frac{6,4 (220 \cdot 6,04I)^2 \cdot 10^6 \cdot I \cdot 1536 \cdot 0,96 \cdot 10^{-8}}{0,696} = 1,7987 \cdot 10^5 \text{ Kgf.}$$

- Force radiales dans l'enroulement HT

$$Fr2 = \frac{6,4 (889 \cdot I \cdot 495)^2 \cdot 10^6 \cdot I \cdot 596 \cdot 0,96}{0,696} = 2,4886 \cdot 10^5 \text{ Kgf.}$$

b) FORCES AXIALES.

Elles dépendent de la dissymétrie dans la disposition des enroulements et de la position des spires de réglages. Pour la même hauteur des enroulements ces forces sont données par :-

$$Fa = Fr \frac{ar}{2Hb}$$

- Fr : force radiale (Kgf)
- ar : largeur du canal de fuite (m)
- H_b : hauteur de l'enroulement (m)

- Force axiale dans l'enroulement -(B.T)

$$Fa1 = 1,7987 \cdot 10^5 \frac{0,055}{2 \cdot 0,696} = 7106,9 \text{ Kgf}$$

- Force axiale dans l'enroulement (H T)

$$Fa2 = 2 \cdot 4886 \cdot 10^5 \frac{0,055}{2 \cdot 0,696} = 9832,8 \text{ Kgf}$$

3 EFFORT UNITAIRE DANS LES ENROULEMENTS.

Les forces radiales et axiales produisent les efforts unitaires suivants.

a) Effort unitaire produit par les forces radiales. L'effort unitaire est donné par :-

$$\sigma_r = \frac{Fr \cdot 10^{+2}}{2 \cdot II \cdot W \cdot sw} \quad (\text{Kgf/cm}^2)$$

- Fr : force radiale (Kgf)
- W : nombre de spire
- Sw : section du conducteur (mm²)

- Effort unitaire de l'enroulement Bt

$$\sigma_{r1} = \frac{Fr1 \cdot 10^{+2}}{2 \cdot II \cdot W1 \cdot Sw1}$$

$$\sigma_{r1} = \frac{1,7987 \cdot 10^5 \cdot 10^2}{2 \cdot II \cdot 220 \cdot 54,1} = 240,5 \text{ Kgf/cm}^2.$$

- Effort unitaire de l'enroulement (H T)

$$\sigma_{m2} = \frac{Fr^2 I_0^2}{2 II W_2 \cdot Sw_2} \quad (\text{Kgf/cm}^2)$$

$$\sigma_{m2} = \frac{2 \cdot 4886 \cdot 10^5 \cdot 10^2}{2 II 889 I_{2,9}} = 34^5 = \text{Kgf/cm}^2$$

b) Effort unitaire produit par les forces axiales cet effort unitaire est donné par :-

$$F_a = \frac{F_a}{S} \quad (\text{Kgf/cm}^2)$$

F_a : force axiale

$$S = II D_{moy} a \quad (\text{cm}^2)$$

D_{moy} : Diamètre moyen

a : épaisseur de l'enroulement.

- Effort unitaire de l'enroulement (B.T)

$$\sigma_{a1} = \frac{7106,9}{II \cdot 36,7 \cdot 3,2} = 19,2 \text{ Kgf/cm}^2$$

- Effort unitaire de l'enroulement (H T)

$$\sigma_{a2} = \frac{9832,8}{II \cdot 50,8 \cdot 5,8} = 10,6 \text{ Kgf/cm}^2$$

Le cuivre a pour effort unitaire admissible $\sigma_{ad} = 700 \text{ Kgf/cm}^2$

Nous constatons que tous les efforts unitaires calculés sont inférieurs à cette valeur que nous pouvons admettre. Alors les enroulements auront une bonne tenue aux efforts électro-dynamique de court-circuit.

CONCLUSION

Comme la connaissance de la théorie du transformateur est insuffisante pour sa réalisation, le calcul de dimensionnement de ses différents éléments l'est aussi, d'où une Etude Technologique est nécessaire pour compléter l'Etude de Réalisation.

Pour fabriquer un Transformateur d'une certaine importance ayant un échauffement conforme aux normes de température, résistant aux efforts électrodynamiques lors de différents court-circuit, il faut essayer plusieurs solutions afin d'adopter la meilleure.

Enfin la construction des transformateurs repose sur la mise à profit de l'expérience ; l'amélioration continue des méthodes de calcul, l'emploi de nouveaux matériaux (par exemple de l'acier laminée à froid au lieu de celui laminé à chaud), la qualité d'exécution et les équipements d'Atelier.

B I B L I O G R A P H I E

- HEINY : Technologie d'Electricité - Tome 4 - 1970
- M.KOSTENKO et L.PIOTROVSKI : Machines Electriques
Tome 1 et 2 - 1967
- M.LIWSCHITZ : Calcul des Machines Electriques
Tome 1 et 2 - 1967
- N.I.BULGACOV : Calcul Transformatorilor
Edition-Tecnica - BUCARESTI - 1951
- Note du cours de construction des Machines Electriques
- Projet de fin d'Etudes : Construction d'un Transformateur
ENPA - Janvier 1978.
