

UNIVERSITE D'ALGER

12/79

DEPARTEMENT ELECTRICITE

Let.

FILIERE D'INGENIEUR EN ELECTROTECHNIQUE

المدرسة الوطنية للعلوم الهندسية  
PROJET DE FIN D'ETUDES

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE  
BIBLIOTHEQUE

SUJET

CONSTRUCTION D'UN  
TRANSFORMATEUR  
800 KVA 10KV-0,4 KV

Proposé par : M<sup>r</sup> V. STIRBU  
Docteur - Ingénieur  
Professeur à l'ENPA

Réalisé par : M<sup>r</sup> M. LARBANI

المدرسة لوطنية للعلوم الهندسية  
— المكتبة —  
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE  
BIBLIOTHEQUE

PROMOTION JANVIER 1979

**UNIVERSITE D'ALGER**

**DEPARTEMENT ELECTRICITE**

**FILIERE D'INGENIEUR EN ELECTROTECHNIQUE**

**PROJET DE FIN D'ETUDES**

**SUJET**

**CONSTRUCTION D'UN  
TRANSFORMATEUR  
800 KVA 10KV-0,4 KV**

**Proposé par : M<sup>r</sup> V. STIRBU  
Docteur - Ingénieur  
Professeur à l'ENPA**

**Réalisé par : M<sup>r</sup> M. LARBANI**

**PROMOTION JANVIER 1979**

A MES PARENTS

A MES PARENTS

Je tiens à remercier M.V. STIRBU, le promoteur, pour toute l'aide qu'il m'a apportée dans l'élaboration de ce projet.

Je garde aussi une profonde reconnaissance pour tous les professeurs qui'ont contribué à ma formation ainsi que pour tous mes camarades d'études.

# CAHIER DE CHARGES

Sujet : Construction d'un transformateur  
de 800 KVA 10/0,4 KV  
pour la distribution

Puissance nominale	$P_n = 800 \text{ KVA}$
Tension nominale primaire	$U_{2n} = 10 \text{ KV}$
Tension nominale secondaire	$U_{1n} = 0,4 \text{ KV}$
Reglage	$\pm 5 \%$
Connexion	$\Delta / Y$
Tension de court-circuit	$U_K = 6 \%$
Pertes dues à la charge	$P_K = 9 \text{ KW}$
Pertes à vide	$P_o = 1,45 \text{ KW}$
Courant à vide	$I_o = 1,5 \%$
Nombre de phases	$m = 3$
Frequence	$f = 50 \text{ Hz}$
Matériel des enroulements	Cuivre
Refroidissement naturel par air	
Les autres données nécessaires pour le calcul seront conformes aux normes en vigueur.	

## PLAN D'ETUDE

Introduction

Chapitre I : Calcul électromagnétique  
du dimensionnement

- I 1 Calcul préliminaire des dimensions principales
- I 2 Calcul des enroulements
- I 3 Calcul définitif du circuit magnétique
- I 4 Calcul des pertes et du rendement
- I 5 Calcul du courant de marche à vide
- I 6 Calcul thermique
- I 7 Calcul mécanique

Chapitre II Etude de la technologie.

- II 1 Technologie du montage
- II 2 Appareillage auxiliaire
  - 2.1 Conservateur d'huile
  - 2.2 Relais Buchholz
  - 2.3 Régulation
  - 2.4 Traversées isolantes
  - 2.5 Manutention .

**Conclusion**

## INTRODUCTION

Le transformateur a joué un rôle décisif dans l'électrotechnique c'est grâce à lui que l'on peut transporter sur de grandes distances une grosse puissance et avec de faibles pertes .

C'est lui qui a rendu possible l'interconnexion des réseaux dont on connaît les avantages .

L'énergie électrique est produite dans des centrales hydrauliques thermiques ou nucléaires situées en des endroits bien précis, souvent, fort éloignés des lieux d'utilisation .

Il faut donc transporter, le plus économiquement possible, cette énergie, des centres de production aux centres d'utilisation .

Pour réduire les pertes en ligne, l'énergie est transportée sous une haute tension (jusqu'à 220 KV en Algérie). Or les générateurs produisent l'énergie sous une tension qui ne dépasse pas 15 KV en général, à cause des problèmes d'isolement. Les récepteurs la consomment sous faible tension (220/ 380 V à cause des problèmes d'isolement et du danger pour les utilisateurs ). D'où la nécessité d'avoir des transformateurs, élévateurs près des centrales et abaisseurs près des centres d'utilisation.

### L'appareil

Le transformateur est le système électromagnétique le plus parfait car son circuit magnétique n'a pas d'entrefer.

Relativement aux autres machines ( alternateurs, dynamos, ... ) les enroulements des transformateurs sont faciles à isoler : ils sont dans l'air ou noyés dans l'huile, d'où la possibilité d'avoir des tensions très élevées (on a atteint 400 KV )

En ce qui concerne les pertes : aucun appareil ou machine électrique n'a un rendement aussi grand ( dans les transformateurs de grande puissance il est supérieur à 99 % ) ; ceci est très important quand on sait que le transformateur est traversé par une grosse énergie d'une part, que l'énergie produite dans une centrale peut être transformée trois à quatre fois avant d'arriver au récepteur d'autre part .

Je crois que le transformateur est vraiment une grande découverte pour l'homme.

CALCUL ELECTROMAGNETIQUE DU DIMENSIONNEMENT :

La méthode consiste en:

- Un calcul préliminaire permettant de déterminer, à partir du cahier de charge, les dimensions principales.

- Un calcul définitif qui, à partir des résultats précédents permet de dimensionner les enroulements, d'établir toutes les caractéristiques géométriques et électromagnétiques et de les comparer au cahier de charges.

I<sub>1</sub> CALCUL PRELIMINAIRE DES DIMENSIONS PRINCIPALES

Les dimensions principales d'un transformateur sont:

- Le diamètre de la colonne
- La hauteur des bobines.

1.1. PUISSANCE APPARENTE PAR COLONNE

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

$S_n$  : Puissance nominale apparente = 800 KVA

$m_c$  : Nombre de colonnes = 3

$S_c$  : Puissance apparente par colonne

$$S_c = \frac{800}{3}$$

$$S_c = 266,66 \text{ kVA}$$

1.2. 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 de phase dépend du mode de couplage.

En basse tension, les enroulements sont connectés en étoile donc la tension par phase sera:

$$U_{f1} = \frac{U_{1n}}{k_f}$$

$U_{1n}$  : Tension nominale entre phase = 0,4 kV

$U_{f1}$  : Tension nominale par phase

$k_f$  : Facteur de phase = 3

$$U_{f1} = \frac{0,4}{\sqrt{3}} \text{ ( kV )}$$

$$U_{f1} = 230,94 \text{ V}$$

En haute tension, les enroulements sont connectés en triangle donc la tension de phase sera:

$$U_{f2} = U_{2n} = 10 \text{ kV}$$

$$U_{2f} = 10 \text{ kV}$$

### 1.3. COURANT NOMINAL

Courant nominal de phase circulant dans l'enroulement basse tension: comme l'enroulement secondaire est en étoile ou a:

$$I_{f1} = I_n = \frac{S_3}{U_{f1}}$$

$$I_{f1} = \frac{266,66}{230,94 \cdot 10^{-3}} \qquad I_{f1} = 1154,67 \text{ A}$$

Courant nominal de phase circulant dans l'enroulement haute tension. Comme l'enroulement H T est connecté en triangle on a :

$$I_{f2} = \frac{I_n}{\sqrt{3}} = \frac{S_3}{U_{f2}} = \frac{266,66}{10} \qquad I_{f2} = 26,66 \text{ A}$$

### 1.4 TENSION DE COURT-CIRCUIT

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

La tension de court-circuit a deux composantes:

- $U_{ka}$  : Composante active due à la résistance
- $U_{kr}$  : Composante réactive due à l'inductance de l'enroulement.

$$U_k = \left( U_{ka}^2 + U_{kr}^2 \right)^{1/2}$$

on tire  $U_{kr} = \left( U_k^2 - U_{ka}^2 \right)^{1/2}$

La composante active étant imposée par le cahier de charge:

$$U_{ka} = \frac{P_k}{S_n} \cdot 100 \qquad P_k: \text{ Pertes dues à la charge} = 9 \text{ kW}$$

$$S_n = 800 \text{ kVA}$$

$$U_{ka}: (\%)$$

Les valeurs de  $P_k$  et  $S_n$  sont données dans le cahier de charge.

$$U_{ka} = \frac{9}{800} \cdot 100 \qquad U_{ka} = 1,125 \%$$

$$\text{par suite } U_{kr} = \left( \left( 6^2 - 1,125^2 \right) \cdot 10^{-4} \right)^{1/2} \qquad U_{kr} = 5,89 \%$$

### 1.5. DIAMÈTRE DE LA COLONNE

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

$$D = 1,0674 \left( \frac{a_r \beta K_R S_c}{K_u^2 B_c^2 U_{kr}} \right)^{1/4}$$

où

$\beta$  = Facteur de sveltesse ( sans unité )

$a_r$  = Canal de fuite rapporté m

$K_r$  = Facteur de Rogouski de sonctruccion ( sans unité )

$K_u$  = Facteur d'utilisation ( sans unité )

$\hat{B}_c$  = Induction magnétique de crête (T)

D = Diamètre de la colonne (m)

$U_{kr}$  = Composante réactive de la tension de court-circuit (%)

Coefficient de sveltesse

$$\beta = \pi \frac{D_{12}}{h_B} \quad (1.5.1) \quad \begin{array}{l} D_{12}: \text{Diamètre du canal de fuite (m)} \\ h_B: \text{Hauteur des bobines (m)} \end{array}$$

Ce facteur influe directement sur la géométrie du transformateur comme le montre la relation.  $\beta$  a des valeurs comprises entre 1,15 et 3,4; pour  $\beta$  proche de la limite inférieure le transformateur sera assez " svelte ", si  $\beta$  est proche de la limite supérieure le transformateur sera plutôt " trapu ". La valeur de  $\beta$  influe, d'une façon générale sur le prix du transformateur et sur ses performances; si  $\beta$  augmente par exemple, les pertes dues à la charge, le courant à vide et la tension de court-circuit augmentent donc le prix d'exploitation s'élève; par contre le poids de la colonne et des enroulements diminuent par suite le prix de la réalisation diminue.

Il faut donc trouver une valeur de  $\beta$  optimum c'est pour cela que le choix de  $\beta$  dans la phase préliminaire est délicat.

Sa valeur est fonction de la puissance par colonne, de la tension de l'enroulement H T et de la nature du matériau utilisé pour le bobinage.

Dans notre cas on utilise le cuivre.

$S_c$ kVA	3 à 2000	2000 à 3000		
U kV	6 - 10	35		110
$B_{cu}$	3,4-1,75	3 -1,8	1,8 - 1,3	2-1,5

On choisit pour le calcul préliminaire  $\beta = 2,1$ .

épaisseur rapportée du canal de fuite  $a_r$

Pour les enroulements concentriques elle est donnée par:

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

$a_{12}$ : Largeur du canal de fuite

$a_1$ : Epaisseur de l'enroulement B T

$a_2$ : Epaisseur de l'enroulement H T.

$a_{12}$  est fonction de la tension d'essai de l'enroulement H T, sa valeur est donnée par le tableau ci-dessous.

Valeurs de  $a_{12}$  pour les transformateurs immergés dans l'huile

$U_n$ kV	3	6	10	15	20	35	60	110	220
$U_{ces}$ kV	3,6	7,2	12	13,5	24	36	72,5	123	245
$U_{essai}$ kV	16	22	28	38	50	70	140	230	460
$a_{12}$ cm	0,6 à 1	0,8-1,2	1-1,5	1,2-1,8	2,1-2,7		6-8	13-22	

On choisit pour le calcul préliminaire :  $a_{12} = 1,2$  cm

Le terme  $\frac{a_1+a_2}{3}$  est fonction de la puissance par colonne du transformateur :

$$\frac{a_1+a_2}{3} = K (S_c)^{1/4} \quad \frac{a_1+a_2}{3} \text{ [cm]}$$

$$S_c \text{ [kVA]}$$

K est un facteur qui dépend de la puissance par colonne et de la tension la plus élevée. il est donné par le tableau ci-dessous.

$S_c$ kVA	< 100	100 à 560	750-5600	7500-31500
$U_n$ kV	≤ 10	10 à 35	10 à 35	10 à 35
K	0,6 - 0,8	0,48 - 0,6	0,4 - 0,5	0,44 - 0,46

On choisit pour le calcul préliminaire  $K = 0,6$

d'où  $\frac{a_1+a_2}{3} = 0,6 (266,66)^{1/4} \quad \frac{a_1+a_2}{3} = 2,42$  cm

ca épaisseur rapportée du canal de fuite

$$a_n = 1,2 + 2,42$$

$$a_n = 3,62 \text{ cm}$$

Facteur de Rogowski:  $K_R$

Ce facteur tient compte du fait que les lignes du champ de dispersion dans le canal de fuite ne sont pas parallèles, mais incurvées. on le choisit égal à 0,95

$$K_R = 0,95$$

Facteur d'utilisation de la section de fer :

$$K_u = K_R \cdot K_g$$

$K_R$  : coefficient de remplissage dépendant de l'isolation et de l'épaisseur des tôles

ca En adoptant des tôles de 0,35 mm d'épaisseur et une isolation à la cardite on choisit  $K_R$  du tableau suivant

$\delta_{\text{col}}$ mm	Isolation au papier	Isolation à la Carlite
0,5	0,875	0,97 - 0,98
0,35	0,85	0,94 - 0,95
0,28	-	0,95 - 0,94

On choisit

$$K_r = 0,94$$

$K_g$ : coefficient géométrique fonction du nombre de gradins formant la colonne et de la puissance par colonne  
On le choisit du tableau suivant:

$S_c$ KVA	< 5	5 - 15	15 - 45	45 - 5000
$n$ gradins	2	4	5	6
$D$ approché cm	< 8	8 - 12	12 - 16	16 - 51
$K_g$	0,786	0,886	0,91	0,93

En choisissant 6 gradins, le tableau donne

$$K_g = 0,93$$

$K_u$  tient donc compte de l'isolation entre les couches et du nombre de gradins, d'où

$$n = 6$$

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

$$K_u = 0,874$$

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

Elle est fonction de la puissance du transformateur et du type de tôles utilisées. La valeur de  $\hat{B}_c$  choisie influe considérablement sur le rendement du transformateur; quand  $\hat{B}_c$  augmente le courant à vide et les pertes à vide augmentent. De plus une grande induction sature le fer et la saturation provoque des distorsions dans les tensions de ligne.

En optant pour les tôles laminées à froid, on choisit  $\hat{B}_c$  du tableau suivant (tiré de l'expérience)

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

On choisit  $\hat{B}_c = 1,62$  T

Valeur numérique du diamètre de la colonne:

$$D = 1,0674 \left( \frac{3,62 \cdot 10^2 \cdot 2,1 \cdot 0,95 \cdot 266,66 \cdot 10^3}{0,874^2 \cdot 1,62^2 \cdot 5,89 \cdot 10^{-2}} \right)^{1/4}$$

$$D = 21,45 \text{ cm}$$

## 1.6 Diamètre du canal de fuite $D_{12}$

D'après la fig I1  $D_{12}$  est donné par :

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

$a_{10}$  = distance entre la colonne et l'enroulement BT sa valeur est fonction de la tension nominale de l'enroulement BT.

$U_{111}$ KV	$\leq 1$	3	6	10	15	20
$a_{10}$ cm	0,5	1,2	1,2 - 1,5	1,8	1,8 - 2	2,1 - 2,3

Le tableau donne

$$a_{10} = 0,5 \text{ cm}$$

$a_1$  = largeur de la bobine BT. Elle est donnée par la relation :

$$a_1 = K_{a1} (S_c)^{1/4} \quad \begin{array}{l} a_1 \text{ [cm]} \\ S_c \text{ [KVA]} \end{array}$$

$$\text{avec } K_{a1} = \begin{cases} 0,55 & U_n \leq 35 \text{ kV} \\ 0,45 & U_n \leq 110 \text{ kV} \end{cases}$$

La largeur de la bobine BT est donc égale à : On prend  $K_{a1} = 0,55$

$$a_1 = 0,55 (266,66)^{1/4}$$

$$a_1 = 2,22 \text{ cm}$$

Valeur du diamètre moyen du canal de fuite

$$D_{12} = 21,45 + 1 + 4,44 + 1,2$$

$$D_{12} = 28,09 \text{ cm}$$

## 1.7 Hauteur des enroulements $h_B$

Pour faciliter le montage et surtout pour diminuer les forces axiales créées par les flux de fuite (importantes lors d'un court-circuit), on donne la même hauteur pour les deux bobinages HT et BT. on applique la relation 1.5.1

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

$$h_B = \pi \frac{28,09}{2,1}$$

$$h_B = 42,02 \text{ cm}$$

$h_B$  : hauteur d'une bobine.



## I2 Calcul des enroulements

Un enroulement est complètement déterminé par la connaissance :

- du nombre de spires
- de la section du conducteur (ou des conducteurs en parallèle)
- des dimensions géométriques de l'espace occupé par l'enroulement
- de la structure de l'isolation.

### 2.1 Section du fer de la colonne

$$S_{\text{fercol}} = \pi \frac{D^2}{4} K_u$$

$D$  : [cm]

$S_{\text{fercol}}$  : [cm<sup>2</sup>]

$$S_{\text{fercol}} = \pi \frac{21,45^2}{4} \cdot 0,874$$

$$S_{\text{fercol}} = 315,83 \text{ cm}^2$$

### 2.2 Tension de spire.

Le flux utile étant commun aux deux enroulements, on admet alors qu'ils ont la même tension par spire et elle est donnée par la relation :

$$U_{\text{sp}} = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot \hat{B}_c \cdot S_{\text{fercol}} \quad (22.7)$$

$f$  : fréquence d'utilisation = 50 Hz

$\hat{B}_c$  : [T]

$S_{\text{fercol}}$  : [m<sup>2</sup>]

$U_{\text{sp}}$  : tension par spire [V]

$$U_{\text{sp}} = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot 50 \cdot 1,62 \cdot 315,83 \cdot 10^{-4}$$

$$U_{\text{sp}} = 11,36 \text{ V}$$

Nombre de spires de l'enroulement BT

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

$U_{f1}$  : [V]

$U_{\text{sp}}$  : [V]

$$W_1 = \frac{230,94}{11,36}$$

$$W_1 = 20,33$$

Le nombre de spires peut être arrondi mais dans une petite marge afin de ne pas modifier l'induction

$W_1$  arrondi

$$W_{1ar} = 20 \text{ sp}$$

Nombre de spires de l'enroulement HT

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{W_2}{W_1} \Rightarrow W_2 = W_{1ar} \frac{U_2}{U_1} = 20 \frac{10}{230,94 \cdot 10^{-3}}$$

$$W_2 = 866 \text{ sp}$$

Recalculons la tension par spire et l'induction magnétique avec  $W_{1ar}$  :

$$U_{\text{sp}} = \frac{U_{f1}}{W_{1ar}}$$

$$U_{sp} = \frac{230,94}{20}$$

$$U_{sp} = 11,55 \text{ V}$$

La valeur de cette tension est bien en correspondance avec les valeurs des tensions données dans le tableau ci-dessous (tirées de l'expérience)

$S_n$ kVA	10	20	30	50	75	100	125	160
$U_{sp}$ 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
$S_n$ kVA	200	250	315	400	500	630	800	1000
$U_{sp}$ V	5,5-6,2	6,5-7	7-7,5	7,5-8	8-9	9-10	10-12	12-14
$S_n$ kVA	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300
$U_{sp}$ V	13-16	15-17	16-20	19-23	21-26	26-30	30-34	34-38

Comme la tension de spire a été modifiée on doit recalculer l'induction de crête :

$$\hat{B}_{ca} = \frac{U_{spn}}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot S_{fercol}} \quad (\text{tirée de la relation 22.1})$$

$$\hat{B}_{ca} = \frac{11,55}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot 50 \cdot 315,83 \cdot 10^{-4}} \quad \hat{B}_{ca} = 1,646 \text{ T}$$

### 2.3. Calcul des sections des conducteurs

$$S_w = \frac{I_f}{J_m}$$

$$I_f : [\text{A}]$$

$$J_m : [\text{A}/\text{mm}^2]$$

$$S_w : [\text{mm}^2]$$

La densité moyenne de courant pour le cuivre est donnée par :

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

$$P_k : [\text{kW}]$$

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

$$U_{sp} : [\text{V}]$$

$$D_{12} : [\text{m}]$$

$$J_m : [\text{A}/\text{mm}^2]$$

$K_{Pk}$  est un facteur qui tient compte des pertes supplémentaires. Il est fonction de la puissance du transformateur :

tableau 2.3.

$S_n$ kVA	30	180	600	1000	1600	2000	2500	4000	6000	10000
$K_{Pk}$	1,02	1,025	1,05	1,06	1,07	1,075	1,08	1,09	1,11	1,125

Le tableau donne

$$K_{Pk} = 1,055$$

$$J_m = 7,34 \cdot \frac{1}{1,055} \cdot \frac{9 \cdot 11,55}{28,05 \cdot 10^{-2} \cdot 800}$$

$$J_m = 3,22 \text{ A/mm}^2$$

La valeur de la densité est fonction de la puissance et du mode de refroidissement. La densité influe sur les pertes joules et la consommation spécifique du cuivre.

### 2.3.1. Choix des conducteurs et du type d'enroulement.

#### a. Section du conducteur de l'enroulement BT

$$S_{w1} = \frac{I \cdot l_1}{J_m}$$

$$S_{w1} = \frac{1154,67}{3,22}$$

$$S_{w1} = 358,6 \text{ mm}^2$$

La géométrie de la section du conducteur (circulaire ou méplat) est fixée par les normes. Les conducteurs sont :

- circulaires si la section est inférieure à  $6 \text{ mm}^2$  (1 conducteur élémentaire).
- méplats si la section est supérieure à  $6 \text{ mm}^2$  (1 conducteur élémentaire).

On utilise plusieurs conducteurs méplats en parallèle, chaque conducteur élémentaire d'une section inférieure à  $50 \text{ mm}^2$ , si la section calculée est supérieure à  $50 \text{ mm}^2$ .

Or  $S_{w1} > 50 \text{ mm}^2$  on utilise donc plusieurs conducteurs élémentaires

Preons 8 conducteurs élémentaires en parallèle chacun de section :

$$S_w = \frac{358,6}{8}$$

$$S_w = 44,8 \text{ mm}^2$$

Pour assurer une répartition plus uniforme du courant entre les branches, ce qui réduit les pertes supplémentaires, on fait 3 permutations.

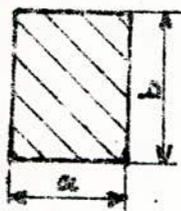
Les conducteurs étant normalisés (NFC 31.211)

on choisit la section  $S_{wn} = 42,0 \text{ mm}^2$  proche de celle calculée

Section normalisée

$$n_c = 3$$

$$S_{wn} = 42,0 \text{ mm}^2$$



dimensions du conducteur :

$$a = 4,7 \text{ mm}$$

$$b = 9,3 \text{ mm}$$

La valeur réelle de la densité sera :

$$J_{rn} = \frac{1154,67}{8 \cdot 42,0}$$

$$J_{rn} = 3,37 \text{ A/mm}^2$$

$$\frac{J_n - J_m}{J_m} \cdot 100 = \frac{3,37 - 3,22}{3,22} \cdot 100 = 4,7\%$$

La densité recalculée est acceptable car la différence entre les deux densités recalculées et moyenne n'exécède pas les 5% fixés par les normes

D'après le tableau ci-dessous l'enroulement choisi est du type cylindrique. L'enroulement sera formé d'une seule couche avec deux fils de commencement.

$I_f$ A	$U_n$ KV	$S_w$ mm <sup>2</sup>	$W_{el}$ max	Type d'enroulement.
30-50	< 35	10	1-2	Stratifié
jusqu'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 à 20000		14000	8 x 30	Avec conducteurs Roebel cylindrique
> 50	> 3,6	400	6	Galettes continues

Tableau 2.3.1

Dimensions géométriques de la bobine BT

hauteur de la bobine (propriété de l'hélice circulaire)

$$h_B = (W_1 + 1) h_{sp} + n_l h_p + 0,7 \text{ cm}$$

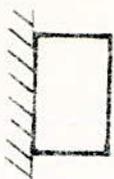
$h_p$ : hauteur nécessaire à une transposition, ou fine;

0,7 cm: déplacement nécessaire pour la stabilisation de la bobine.

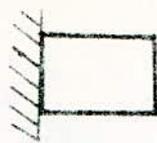
$h_{sp}$ : hauteur de la spirale

$$h_p = 6 \text{ mm}$$

On adopte la disposition à plat des conducteurs car elle facilite le travail d'enroulage, réduit les pertes supplémentaires (par contre la bobine est moins rigide qu'avec la disposition sur champ, donc plus sujette à des défauts d'isollements).

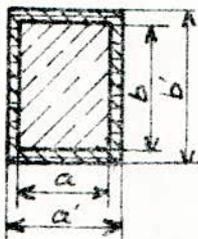


Disposition à plat



disposition sur champ

I isolation des conducteurs



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

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

$\delta_{is}$ : épaisseur d'isolation

Les conducteurs méplats sont isolés au vernis ou au papier. On utilise le papier en feuilles minces car celui-ci présente une rigidité diélectrique meilleure et une épaisseur réduite. Pratiquement on utilise les épaisseurs de 0,05, et 0,12 mm

L'épaisseur d'isolation  $\delta_{is}$  sera réalisée avec

- 2 rubans de 0,05 mm enroulés avec demi-recouvrement
- 1 ruban de 0,12 mm enroulé sans recouvrement

$$\text{d'où } \delta_{is} = 2(2(2 \cdot 0,05) + 0,12)$$

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

Le conducteur élémentaire aura donc pour dimensions:

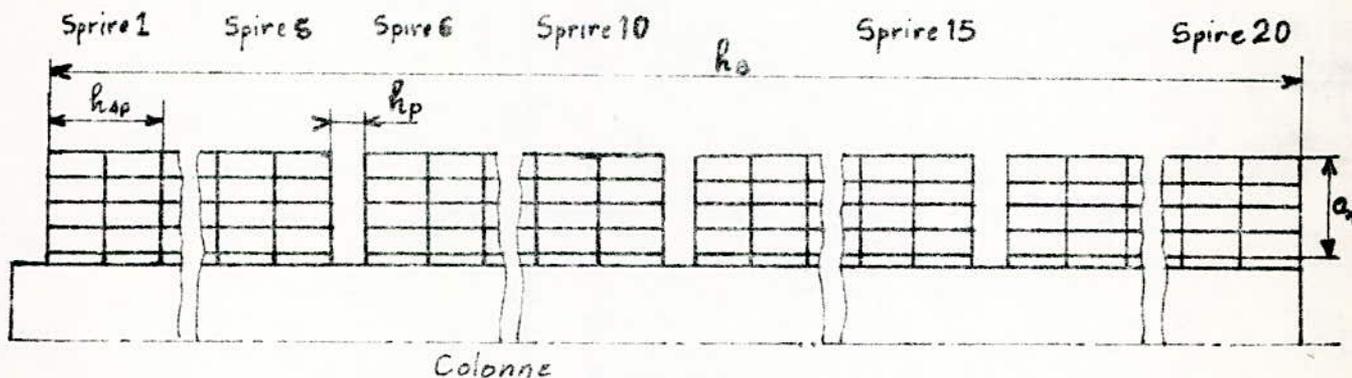
$$a' = a + \delta_{is} = 4,7 + 0,64$$

$$a' = 5,34 \text{ mm}$$

$$b' = b + \delta_{is} = 9,3 + 0,64$$

$$b' = 9,94 \text{ mm}$$

Schema du bobinage BT



$$h_{sp} = 2b'$$

$$= 2 \cdot 0,994$$

$$h_{sp} = 1,988 \text{ cm}$$

$$h_b = (20+1) \cdot 1,988 + 3 \cdot 0,6 + 0,7$$

$$h_b = 44,25 \text{ cm}$$

Épaisseur de la bobine B (voir fig ci-dessus)

On prévoit 0,1 mm de jeu pour les conducteurs élémentaires

$$\text{donc } a_1 = 4 ( a_1 + 0,1 )$$

$$a_1 = 4 ( 5,34 + 0,1 )$$

$$a_1 = 21,76 \text{ MM}$$

Valeur recalculée du diamètre de fuite:

$$D_{12} = 21,45 + 2 \cdot 0,5 + 2 \cdot 21,76 + 1,2$$

$$D_{12} = 28 \text{ cm}$$

Coefficient de sveltesse recalculé

$$\beta_r = \pi \frac{28}{44,25} = 1,99$$

$$\frac{(\beta - \beta_r)}{\beta} \cdot 100 = \left( \frac{2,1 - 1,99}{2,1} \right) \cdot 100 = 5,2 \%$$

La différence entre les deux coefficients recalculé et préliminaire n'excède pas les 20 % fixés par les normes.  $\beta_r$  est donc acceptable.

#### b - ENROULEMENT H T

Section de conducteur

$$s_{w2} = \frac{I_{f2}}{J_m}$$

$$s_{w2} = \frac{26,66}{3,22}$$

$$s_{w2} = 8,28 \text{ mm}^2$$

$I_f \leq 30 \text{ A}$ ;  $U_n \leq 35 \text{ KV}$ ;  $s_w \leq 10 \text{ mm}^2$ , d'après le tableau 2.3.1 l'enroulement H T sera de type stratifié. Il sera réalisé avec des fils formés de deux conducteurs élémentaires, chacun de section:

$$s_{w1} = \frac{8,28}{2} = 4,14 \text{ mm}^2$$

Diamètre du conducteur élémentaire:

$$d = \frac{(4 s_{w1})^{\frac{1}{2}}}{\pi} = \left( \frac{4 \cdot 4,14}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \quad d = 2,3 \text{ mm}$$

Le diamètre normalisée proche de 2,3 a pour valeur

$$d_{n0} = 2,36 \text{ mm d'après NFC 31. 423.}$$

$$d_n = 2,36 \text{ mm}$$

Le conducteur élémentaire sera isolé avec

trois couches de papier sans recouvrement : 2 couches de 0,05 mm chacune et 1 couche de 0,12 mm d'où :

$$S_{is} = (2 \cdot 0,05 + 0,12) 2$$

$$S_{is} = 0,44 \text{ mm}$$

Section correspondante :

$$S_{w2} = \frac{\pi d_n^2}{4} = \frac{\pi \cdot 2,36^2}{4}$$

$$S_{w2} = 4,37 \text{ mm}^2$$

diamètre extérieur du conducteur élémentaire isolé :

$$d' = d_n + 0,44$$

$$d' = 2,36 + 0,44$$

$$d' = 2,8 \text{ mm}$$

La section ayant changé, la densité change aussi, densité recalculée

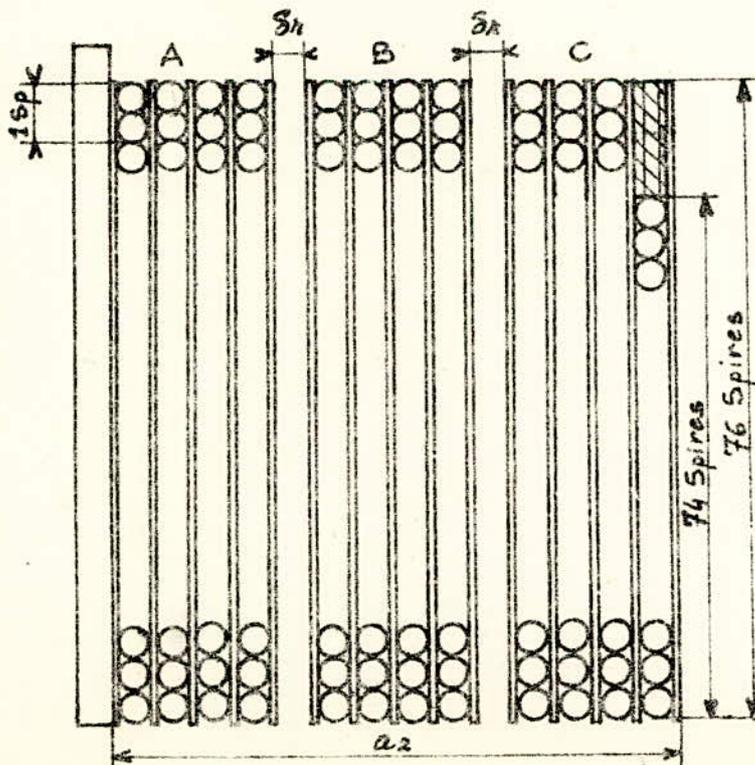
$$J_{2R} = \frac{2,66}{2 \cdot 4,37}$$

$$J_{2R} = 3,05 \text{ A/mm}^2$$

$$\frac{J_2 - J_{2R} \cdot 100}{J_2} = \frac{3,22 - 3,05}{3,22} \cdot 100 = 5,28 \%$$

La différence entre les deux densités moyenne et recalculée est très peu supérieure à 5%, la section choisie est donc acceptable

Schéma du bobinage HT



Pour pouvoir régler la tension à  $\pm 5\%$  il faut avoir un nombre de spires supérieur:

$$W'2 = 1,05 W2$$

$$W'2 = 1,05 \cdot 866 = 909,3 \quad \text{on arrondit à} \quad W'2 = 910 \text{ sp}$$

$$W''2 = 0,95 W2$$

$$W''2 = 0,95 \cdot 866 = 822,7 \quad \text{on arrondit à} \quad W''2 = 823 \text{ sp}$$

Nombre de spires de réglage

$$W'2 - W''2 = 910 - 823 = 87$$

Ces spires peuvent être placées soit à la fin de l'enroulement soit au milieu.

Dimensions de la bobine.

$$hb = 2d'(Ws + 1) + 1,13$$

$Ws$  = nombre de spires par couche

$2d'$  = hauteur d'une spire

$$d'où \quad Ws = \frac{hb - 1,13}{2d'} - 1 = \frac{44,25 - 1,13}{2 \cdot 0,28} - 1 \quad Ws = 76 \text{ spires}$$

On prend 11 couches de 76 spires et 1 couche de 74 spires

la couche de 74 spires servira de bobine de tête avec une isolation renforcée :  $\delta_{i5} = 0,58 \text{ mm}$

On laisse 2 canause de refroidissement de 5mm chacun (canaux asciaux)

les couches sont réparées par des feuilles de presspahn d'épaisseur 0,24mm

pour une tension entre deux couches égale à :

$$Uc = Ws \cdot Usp = 76 \cdot 11,55 = 878V$$

Tableau donnants l'épaisseur  $Sc$  des feuilles de séparation en fonction de la tension entre deux couches  $Uc$  :

$Uc \text{ Kv}$	$\leq 1,0$	1 - 2	2 - 3	3 - 3,5	3,5 - 4	4 - 4,5	4,5 - 5	5 - 5,5
$Sc \text{ mm}$	0,24	0,36	0,48	0,6	0,72	0,84	0,96	1,08

épaisseur de la bobine H T ( voir schema du bobinage H T )

$$a2 = 12 d' + Sc \cdot 15 + 2.5$$

$$a2 = 12 \cdot 2,8 + 0,24 \cdot 15 + 2.5$$

$$\frac{a2}{2} = 47,2 \text{ mm}$$

Vérification de la tension de court-circuit

$$ar = a12 + \frac{a1 + a2}{3}$$

$$ar = 1,2 + \frac{2,176 + 4,72}{3}$$

$$ar = 3,5 \text{ cm}$$

Le coefficient de rogowski est donné par le relation:

$$K_R = 1 - \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{2 a12 + a1 + a2}{Hb}$$

$$K_R = 1 - \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{2 \cdot 1,2 + 2,176 + 4,72}{44,25}$$

$$K_R = 0,97$$

Connaisont les valeurs définitives des différents paramètres on vérifie la valeur de la tension de court-circuit par la formule:

$$U_{kr} = \frac{2\pi f \mu_0 W^2 I_{f1}^2}{U_{f1}}$$

ou  $I_{f1} = (A)$

$U_{f1} : (V)$

$U_{k1} : (\%)$

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

$$U_{kr} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 202.3 \cdot 5 \cdot 10^{-2} \cdot 1.99 \cdot 0.97 \cdot 1154.67 \cdot 100}{230.94} \quad U_{kr} = 5.34 \%$$

$$U'_k = (U_{kr}^2 + U_{ka}^2)^{1/2}$$

$$U'_k = (5.34^2 + 1.125^2)^{1/2} = 5.46$$

$$\frac{U_k - U'_k}{U_k} \cdot 100 = \frac{6 - 5.46}{6} \cdot 100 = 9 \%$$

La différence entre les deux valeurs calculée et donnée par le cahier de charge ne dépasse pas les 10% fixés par les normes, la nouvelle tension de court-circuit est donc acceptable.

### 2.5. Caractéristiques des enroulements

Ce sont - la résistance

- le poids

a) Enroulement B T

Diamètre moyen de la spire ( voir fig I 1 )

$$D_{m1} = D + 2 a_{10} + a_1 = 21.45 + 2 \cdot 0.5 + 2.176$$

$$D_{m1} = 24.63 \text{ cm}$$

Longueur moyenne de la spire :

$$l_{w1} = \pi D_{m1} = \pi \cdot 24.63$$

$$l_{w1} = 77.38 \text{ cm}$$

Longueur totale du conducteur :

$$l_{t1} = W_1 \cdot l_{w1} = 20 \cdot 77.38$$

$$l_{t1} = 15.48 \text{ m}$$

Résistance de l'enroulement

$$R_1 = \rho \frac{l_{t1}}{S_{w1}}$$

$$\rho_{80^\circ} = 0.0211 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$$

$$S_{w1} : (\text{mm}^2)$$

$$l_{t1} : (\text{m})$$

$$R : (\Omega)$$

$$R_1 = 0,0211 \cdot \frac{15,48}{8,42,8}$$

$$R_1 = 9,54 \cdot 10^{-4} \Omega$$

Poids du cuivre

$$G_1 = \gamma_1 l_{t1} sw_1 \cdot 10^{-3}$$

$\gamma_1$  : poids spécifique du cuivre : 8,9Kg/dm<sup>3</sup>

$l_{t1}$  : ( m )

$sw_1$  : ( mm<sup>2</sup> )

$G_1$  : ( Kg )

$$G_1 = 8,9 \cdot 15,48 \cdot 8 \cdot 42,8 \cdot 10^{-3}$$

$$G_1 = 47,17 \text{ Kg}$$

b. Enroulement H T

Même calcul que pour l'enroulement B T :

Diamètre moyen de la spire :

$$D_{m2} = D + 2 a_{10} + 2 a_{12} + 2 a_1 + a_2$$

$$D_{m2} = 21,45 + 2 \cdot 0,5 + 2 \cdot 1,2 + 2 \cdot 2,176 + 4,72$$

$$D_{m2} = 33,92 \text{ cm}$$

Longueur moyenne de la spire :

$$l_{w2} = \pi D_{m2} = \pi \cdot 33,92$$

$$l_{w2} = 106,56 \text{ cm}$$

Longueur totale du conducteur

$$l_{t2} = W'2 \cdot l_{w2} = 910 \cdot 106,56$$

$$l_{t2} = 969,7 \text{ m}$$

Résistance de l'enroulement

$$R_2 = \rho \frac{l_{t2}}{sw_2} = 0,0211 \frac{969,7}{2,4,37}$$

$$R_2 = 2,34 \Omega$$

Poids du cuivre :

$$G_2 = \gamma_1 l_{t2} sw_2 \cdot 10^{-3} = 8,9 \cdot 969,7 \cdot 2,4,37 \cdot 10^{-3}$$

$$G_2 = 75,43 \text{ Kg}$$

Poids total des conducteurs :

comme nous avons trois enroulements

$$G = 3 ( G_1 + G_2 ) = 3 ( 47,17 + 75,43 )$$

$$G = 367,8 \text{ Kg}$$

I 3 Calcul définitif du circuit magnétique ( fig I<sub>1</sub> )

Il consiste à dimensionner définitivement le circuit magnétique :

- La culasse
- La fenêtre
- La hauteur totale
- Le poids

Longueur de la fenêtre :

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

$$l_F = 2 ( 0,5 + 2,176 + 1,2 + 4,72 ) + 1,4$$

$$l_F = 18,57 \text{ cm}$$

Hauteur de la fenêtre

$$h_F = h_B + 2 l_{02} = 44,25 + 2.4$$

$$h_F = 52,25 \text{ cm}$$

Longueur entre axe des colonnes

$$l_{cc} = l_F + D = 18,57 + 21,45$$

$$l_{cc} = 40,02 \text{ cm}$$

Section de la culasse

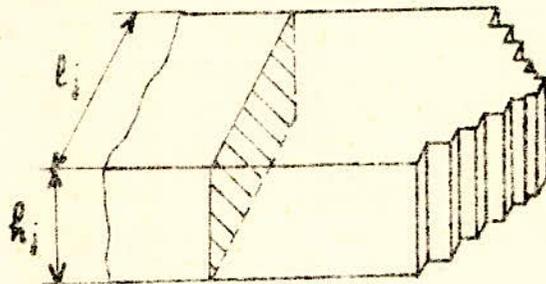
Pour réduire les pertes dans le fer de la culasse ainsi que le courant à vide, la section de la culasse sera égale à la section brute de la colonne. Les culasses ne portant pas de bobines, on leur donne une section plus simple : on adopte ici la section rectangulaire.

La largeur de la culasse doit être égale à la largeur de la tôle la plus large de la colonne.

Section de la culasse  $S_j$

$$S_j = \frac{S_{\text{fer col}}}{K_u} = \frac{315,83}{0,874}$$

$$S_j = 361,36 \text{ cm}^2$$



Induction magnétique dans la culasse :

Le flux se conserve donc

$$B_j S_j = S_{\text{fer col}} \cdot \hat{B}_c \Rightarrow B_j = \frac{S_{\text{fer col}} \cdot \hat{B}_c}{S_j}$$

$$\text{ou } B_j = K_u \cdot \hat{B}_c = 1,646 \cdot 0,874$$

$$B_j = 1,438 \text{ T}$$

Détermination des dimensions des gradins formant la colonne pour le noyau à 6 gradins les normes fixent :

$$l_{g1} = 0,96 D = 0,96 \cdot 21,45$$

$$l_{g1} = 20,59 \text{ cm}$$

$$l_{g2} = 0,885 D = 0,885 \cdot 21,45$$

$$l_{g2} = 18,98 \text{ cm}$$

$$l_{g3} = 0,775 D = 0,775 \cdot 21,45$$

$$l_{g3} = 16,62 \text{ cm}$$

$$l_{g4} = 0,631 D = 0,631 \cdot 21,45$$

$$l_{g4} = 13,53 \text{ cm}$$

$$l_{g5} = 0,465 D = 0,465 \cdot 21,45$$

$$l_{g5} = 9,97 \text{ cm}$$

$$l_{g6} = 0,28 D = 0,28 \cdot 21,45$$

$$l_{g6} = 6 \text{ cm}$$

voir figure I4

Hauteur des gradins (voir aussi fig I4)

On applique le théorème de Pythagore.  $h_{gi} = (D^2 - l_{gi}^2)^{1/2}$

$$h_{g1} = (21,45^2 - 20,59^2)^{1/2}$$

$$h_{g1} = 6,01 \text{ cm}$$

$$h_{g2} = (21,45^2 - 18,98^2)^{1/2}$$

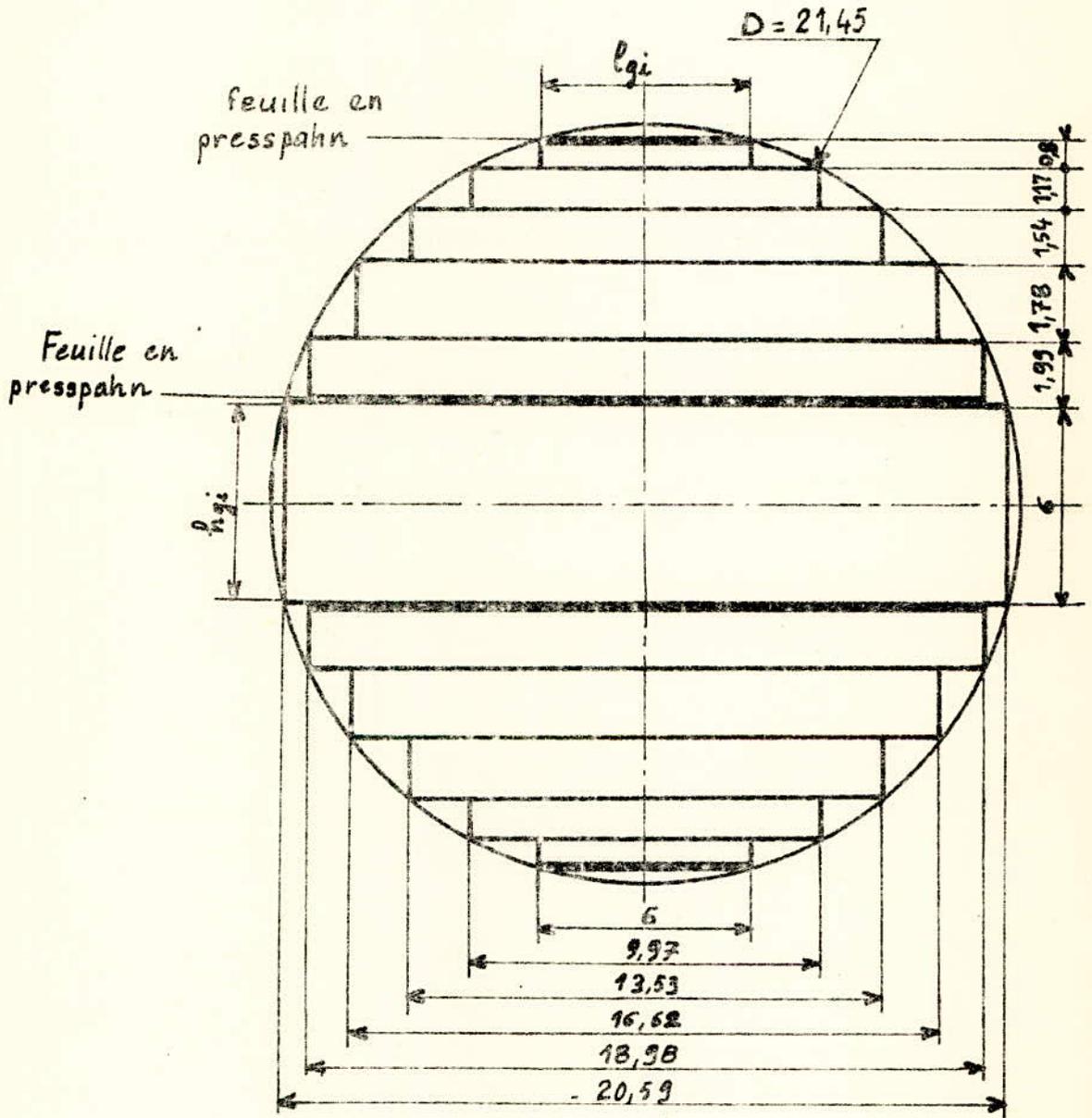
$$h_{g2} = 9,99 \text{ cm}$$

$$h_{g3} = (21,45^2 - 16,62^2)^{1/2}$$

$$h_{g3} = 13,56 \text{ cm}$$

Fig. I4 Section de la colonne Echelle 1/2

Dimensions en cm



$$h_{g_4} = (21,45^2 - 13,53^2)^{1/2}$$

$$h_{g_4} = 16,64 \text{ cm}$$

$$h_{g_5} = (21,45^2 - 9,97^2)^{1/2}$$

$$h_{g_5} = 18,99 \text{ cm}$$

$$h_{g_6} = (21,45^2 - 6^2)^{1/2}$$

$$h_{g_6} = 20,59 \text{ cm}$$

Longueur de la culasse

$$l_j = l_{g_6}$$

$$l_j = 20,59 \text{ cm}$$

hauteur de la culasse

$$h_j = \frac{S_j}{l_j} = \frac{361,36}{20,59}$$

$$h_j = 17,55 \text{ cm}$$

Hauteur totale du circuit magnétique

$$H_{CM} = h_F + 2h_j = 52,25 + 2 \cdot 17,55$$

$$H_{CM} = 87,35 \text{ cm}$$

Poids du circuit magnétique

Les pertes n'étant pas les mêmes dans les différentes parties du circuit magnétique, pour faciliter le calcul des pertes, on partage le circuit magnétique en trois parties :

- Colonnes ①
- Culasses ②
- Coins ③

3	2	3	2	3
1		1		1
3	2	3	2	3

Poids des colonnes :

$$G_{col} = 3 \gamma_2 \cdot V_{col}$$

$\gamma_2$  : densité des toles magnétiques, d'après NFC 28-920  $\gamma_2 = 7,65 \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3}$

Volume de la colonne :

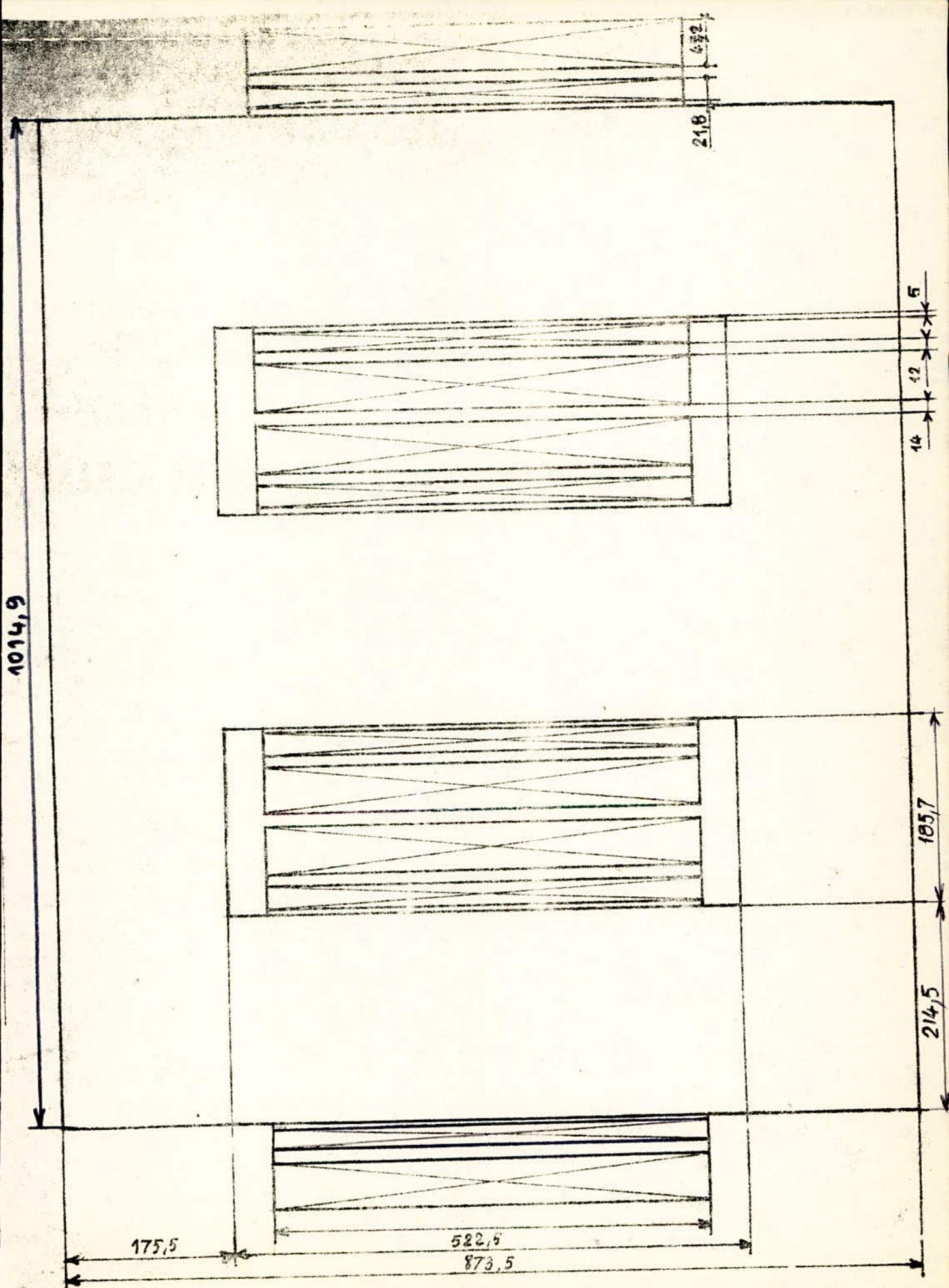


Fig. 2: Dimensions principales du circuit magnétique et du bobinage. Ech:  $\frac{1}{5}$

$$V_{col} = S_{fercol} \cdot H_{col} = S_{col} \cdot H_f = 315,83 \cdot 52,25$$

$$V_{col} = 16,5 \text{ dm}^3$$

$$G_{col} = 378,67 \text{ Kg}$$

$$G_{col} = 3 \cdot 7,65 \cdot 16,5$$

$$G_j = 4 \cdot 2 \cdot V_j$$

Volume de la culasse

$$V_j = S_j L_f = 361,36 \cdot 18,57$$

$$V_j = 6,71 \text{ dm}^3$$

$$\text{d'où } G_j = 4 \cdot 7,65 \cdot 6,71$$

$$G_j = 205,33 \text{ Kg}$$

Poids des coins

$$G_c = 6 \cdot 2 \cdot V_c$$

Volume du coin

$$V_c = S_j D = 361,36 \cdot 21,45$$

$$V_c = 7,75 \text{ dm}^3$$

$$\text{d'où } G_c = 6 \cdot 7,65 \cdot 7,75$$

$$G_c = 355,72 \text{ Kg}$$

Poids total du circuit magnétique

$$G_t = G_{col} + G_j + G_c = 378,67 + 205,33 + 355,72$$

$$G_t = 939,72 \text{ Kg}$$

#### I.4. CALCUL DES PERTES ET DU RENDEMENT

##### PERTES

Une partie de la puissance reçue par le transformateur est dissipée dans l'espace ambiant sous forme de chaleur: ce sont les pertes. On distingue:

- Les pertes Joule
- Les pertes fer qui se décomposent à leur tour en pertes par hysteresis, par courants de Foucault et supplémentaires.

Les pertes influent sur le rendement et l'échauffement autrement dit, sur la rentabilité et la durée de vie du transformateur d'où l'importance de l'étude des pertes.

A Pertes Joule

a- Basse tension

- Enroulements :

$$P_{j1} = m \cdot R_1 \cdot I^2 f_1 ; \quad m = \text{nombre de phases} = 3$$

$$P_{j1} = 3815,8 \text{ W}$$

$$P_{j1} = 3 \cdot 9,54 \cdot 10^{-4} \cdot 1154,67^2$$

- Connexions

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

Longueur et section de ces fils

Pour une connexion étoile, elles sont données par: longueur,

$$L_{conx} = 7,5 \cdot H_b = 7,5 \cdot 44,25$$

$$L_{conx} = 3,32 \text{ m}$$

section :  $S_{conx} = S_w$

$$S_{conx} = 342,4 \text{ mm}^2$$

Résistance du fil de connexion :

$$R_{conx} = \rho \frac{l_{conx}}{S_{conx}} = 0,0211 \frac{3,32}{342,4}$$

$$R_{conx} = 2,04 \cdot 10^{-4} \Omega$$

$$P_{j\text{conx}} = R_{\text{conx}} I_{f1}^2 = 2,04 \cdot 10^{-4} \cdot 1154,67^2$$

$$P_{j\text{conx}} = 272 \text{ W}$$

- Pertes supplémentaires

Elles sont dues à la circulation de courants parasites entre les conducteurs en parallèle et à l'effet pelliculaire.

Les pertes par effet pelliculaire sont les plus importantes, elles sont données par le relation:

$$P_{\text{snp1}} = (K_{\text{mr1}} - 1) \cdot m \cdot R_1 \cdot I_{f1}^2$$

$K_{\text{mr1}}$  : Coefficient de majoration de la résistance en courant alternatif.

$m$  : nombre de phases

Pour le conducteur meplat sa valeur est donnée par :

$$K_{\text{mR1}} = 1 + \frac{m^2 - 0,2}{9} (\alpha_a)^4$$

$m$  désigne ici, le nombre de couches de conducteurs (voir le schéma du bobinage BT et le croquis ci-dessous)

$$m = 4$$

$a$  : largeur du conducteur nu

$$a = 4,7 \text{ mm}$$

$$\alpha = \left( \frac{mb}{h_F} \cdot \frac{\omega \mu_0}{2P} \right)^{1/2}$$

$\alpha$ : coefficient caractérisant la profondeur de pénétration du champ.

$b$ : [mm]  
 $h_F$ : [mm]  
 $f$ : [Hz]  
 $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  H/m  
 $\alpha$ : [ $m^{-1}$ ]  
 $\omega = 314$  rad/s

$n$ : nombre de conducteurs par couche:  $n = 2 \cdot W_{\text{tot}} = 2 \cdot 20 \quad n = 40$

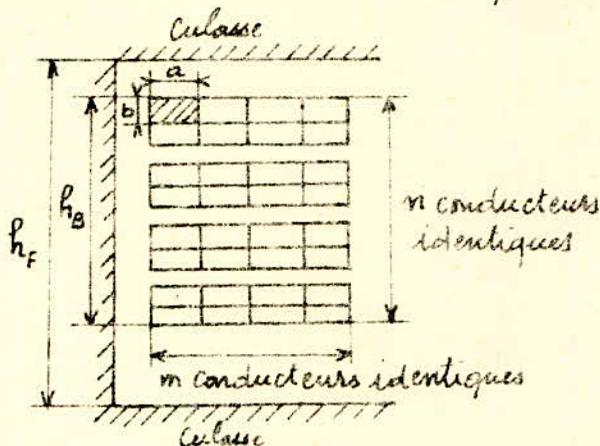


figure représentant les dimensions et notations dans le calcul de  $K_{MR_1}$

$b$ : longueur du conducteur nu  
d'où

$$b = 9,3 \text{ mm}$$

$$\alpha = \left( \frac{40 \cdot 9,3 \cdot 314 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}}{522,5 \cdot 2 \cdot 2,1 \cdot 10^{-8}} \right)^{1/2}$$

$$\alpha = 81,59 \text{ m}^{-1}$$

$$(\alpha a)^4 = (81,59 \cdot 4,7 \cdot 10^{-3})^4$$

$$(\alpha a)^4 = 21,62 \cdot 10^{-3}$$

$$K_{MR_1} = 1 + \frac{4^2 - 0,2}{9} \cdot 21,62 \cdot 10^{-3}$$

$$K_{MR_1} = 1,038$$

$$P_{\text{sup}_1} = (1,038 - 1) \cdot 3 \cdot 9,54 \cdot 10^4 \cdot 1154,67^2$$

$$P_{\text{sup}_1} = 145 \text{ W}$$

b. Haute tension

- Enroulements

$$P_{j_2} = m R_2 I_{f_2}^2 = 3 \cdot 2,34 \cdot 26,66^2$$

$$P_{j_2} = 4989,5 \text{ W}$$

- Connexions

Pour le couplage en triangle, la section et la longueur des fils sont données par:

$$l_{\text{conx}} = 14 h_0 = 14 \cdot 44,25$$

$$l_{\text{conx}} = 6,20 \text{ m}$$

$$S_{w \text{ conx}} = \sqrt{3} \cdot S_{w_2} = \sqrt{3} \cdot 8,74$$

$$S_{w \text{ conx}} = 15,14 \text{ mm}^2$$

$$\text{d'où } R_{\text{conx}} = 0,021 \frac{6,2}{15,14}$$

$$R_{\text{conx}} = 8,64 \cdot 10^{-3} \Omega$$

$$P_{j \text{ conx}} = 8,64 \cdot 10^{-3} \cdot 26,66^2$$

$$P_{j \text{ conx}} = 6,14 \text{ W}$$

- Supplémentaires

$$P_{\text{sup}_2} = (K_{mR_2} - 1) m R_2 I_{f_2}^2$$

Pour les conducteurs circulaires  $K_{mR}$  est donné par :

$$K_{mR_2} = 1 + \frac{m^2 - 0,2}{15,25} (d \cdot d)^4$$

$m$  : nombre de couches

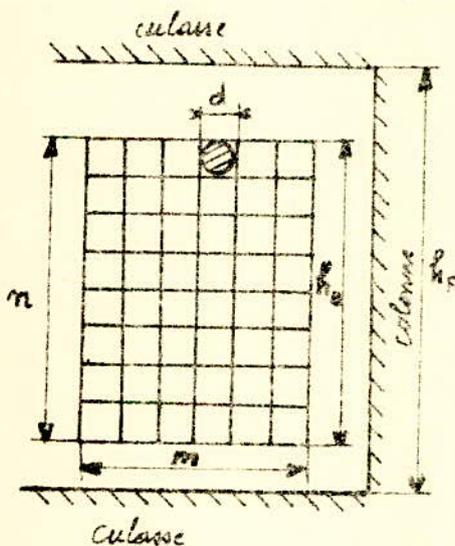
$$m = 12$$

$d$  : diamètre du conducteur nu

$$d = 2,36 \text{ mm}$$

$$\alpha = \left( \frac{m d w \mu_0}{2 h_f f} \right)^{1/2}$$

$n$  : nombre de conducteurs par couches  $n = 2 N_s = 2 \cdot 76 \quad n = 152$   
voir schéma de bobinage de l'enroulement HT et figure ci-dessous



$$\alpha = \left( \frac{152 \cdot 2,36 \cdot 314 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}}{2 \cdot 522,5 \cdot 2,11 \cdot 10^{-8}} \right)^{1/2} \quad \alpha = 80,12 \text{ m}^{-1}$$

$$(\alpha d)^4 = (80,12 \cdot 2,36 \cdot 10^{-3})^4 \quad (\alpha d)^4 = 1,28 \cdot 10^{-3}$$

$$K_{mR_2} = 1 + \frac{12^2 - 0,2}{15,25} \cdot 1,28 \cdot 10^{-3} \quad K_{mR_2} = 1,012$$

$$P_{\text{sup}_2} = (1,012 - 1) \cdot 3 \cdot 2,34 \cdot 26,66^2 \quad P_{\text{sup}_2} = 59,87 \text{ W}$$

Les pertes supplémentaires dans les parties mécaniques sont difficiles à calculer aussi on les approxime par le coefficient  $K_{p_x}$  donné par le tableau 2.3

Les pertes totales dues à la charge sont donc calculées par la relation :

$$P'_K = K_{Pk} ( P_{cu1} + P_{cu2} )$$

$$\text{avec } P_{cu1} = P_{j1} + P_{jcon x1} + P_{sup1} = 3815,8 + 272 + 145 \quad P_{cu1} = 4232,8 \text{ W}$$

$$P_{cu2} = P_{j2} + P_{jcon x2} + P_{sup2} = 4989,5 + 6,14 + 59,87 \quad P_{cu2} = 5055,5 \text{ W}$$

$$\text{d'où } P'_K = 1,055 ( 4232,8 + 5055,5 ) \quad P'_K = 9799,1 \text{ W}$$

Augmentation de  $P'_K$  calculé sur le  $P_K$  donné par le cahier de charge :

$$100 \cdot \frac{\Delta P_K}{P_K} = \frac{9,8 - 9}{9} \cdot 100 = 8,88 \%$$

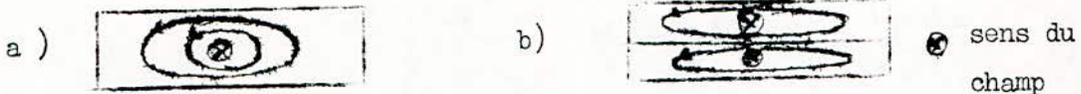
La valeur calculée ne dépasse pas la valeur imposée par le cahier de charge de plus de 10 % ( pourcentage fixé par les normes ), la valeur de  $P'_K$  est donc acceptable.

### B PERTES DANS LE FER

Elles comprennent les pertes principales  $P_{fo}$  qui se divisent en pertes par hystérésis et par courants de Foucault et les pertes supplémentaires  $P_{so}$ .

Les pertes par hystérésis sont dues aux frottements entre les cristaux lors de l'inversion d'aimantation alternative.

Les pertes par courants de Foucault sont dues à la circulation des courants induits dans les toles par la variation du flux.



Circulation de courants induits

a) circuit magnétique massif

b) circuit magnétique feuilleté ( toles isolées entre elles )

Il y a une diminution importante des courants de Foucault dans un circuit magnétique feuilleté par rapport au circuit massif.

Pour diminuer les pertes par hystérésis on utilise les toles dites " à grains orientés " à haute teneur en silicium ( 4 à 5 % ). Avec ces toles la surface du cycle d'hystérésis est très faible d'où des pertes faibles.

Les pertes supplémentaires sont les pertes dans les différentes pièces de serrage ( goujons, poutrelles, ... ) des culasses, de la cuve et les pertes dans le fer par suite de la variation de la structure des toles lors de leur usinage.

Les pertes principales seront calculées à l'aide de pertes spécifiques données pour chaque type de tole ( sous forme de courbe ).

Pour le circuit magnétique on utilise les toles laminées à froid, qualité : M 6 X avec une épaisseur de 0,35 mm. ( d'après N F C 28-920 ) avec un sens de laminage  $\alpha = 0$  ( induction parallèle à la direction du laminage )

De même que pour le calcul du poids, nous partageons le circuit magnétique en trois parties

- Pertes dans les colonnes
- Pertes dans les culasses
- Pertes dans les coins

#### PERTES DANS LES COLONNES.

à  $\hat{B}_{cr} = 1,646$  T correspond une perte spécifique  $P_{s1}$  de valeur:  $P_{s1} = 1,5 \frac{W}{Kg}$

$$P_{fer\ col} = P_{s1} \cdot G_{col} = 1,5 \cdot 378,67 \qquad P_{fer\ col} = 568 \text{ W}$$

Pertes dans les culasses

à  $B_j = 1,438$  T correspond une perte spécifique  $P_{s2} = 1 \text{ W Kg}$

$$P_{ferj} = P_{s2} \cdot G_j = 1 \cdot 178,7 \qquad P_{ferj} = 178,7 \text{ W}$$

Pertes principales

$$P_{fo} = P_{fercol} + P_{ferj} = 568 + 178,7 \qquad P_{fo} = 746,7 \text{ W}$$

Pertes supplémentaires

Elles ne peuvent être calculées, l'expérience montre qu'elles sont estimées à 15 ou 20 % des pertes principales

$$\text{on choisit } P_{so} = 0,17 \quad P_{fo} = 0,17 \cdot 746,7 \qquad P_{so} = 126,94 \text{ W}$$

Pertes dans les coins

On estime que la valeur de l'induction dans les coins est la valeur moyenne des deux inductions dans la colonne et la culasse

$$B_m = \frac{B_j + \hat{B}_{cr}}{2} = \frac{1,438 + 1,646}{2} \qquad B_m = 1,54 \text{ T}$$

à  $B_m = 1,54$  T correspond une perte spécifique  $P_{sc} = 1,18 \text{ W/kg}$

Dans les coins vont s'ajouter les pertes dues à

la distorsion du flux magnétique et elles sont estimées à 50 % des pertes principales dans les coins.

$$P_{\text{ferc}} = P_{\text{sc}} \cdot G_c = 1,18 \cdot 355,72$$

$$P_{\text{ferc}} = 419,75 \text{ W}$$

Pertes dues à la distorsion:

$$P_{\text{sd}} = 0,5 P_{\text{ferc}} = 0,5 \cdot 419,75$$

$$P_{\text{sd}} = 209,9 \text{ W}$$

Pertes totales dans le fer

$$P_o = P_{\text{fo}} + P_{\text{sc}} + P_{\text{ferc}} + P_{\text{sd}} = 746,7 + 126,94 + 419,75 + 209,9$$

$$P_o = 1503,3 \text{ W}$$

### R E N D E M E N T

D'une façon générale le rendement est le rapport de la puissance fournie à la puissance absorbée.

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

$P_2$ : Puissance fournie

$P_1$ : Puissance absorbée

La puissance absorbée est égale à la puissance fournie plus les pertes dans le transformateur:

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

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

$$\bullet \text{ ou } \eta (\%) = \left[ \frac{P_2 - (P_o + P_{\text{cu}})}{P_2 + P_o + P_{\text{cu}}} \right] \cdot 100$$

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

$$\text{On pose } \alpha = \frac{I}{I_{\text{cc}}} = \text{facteur de charge}$$

$$\text{On peut écrire } P_k = R I_{\text{cc}}^2$$

$$\text{où } R I_{\text{cc}}^2 \text{ est la puissance en court-circuit avec le courant correspondant à } S_n = U I_{\text{cc}} \sqrt{3} \text{ ( } I_{\text{cc}} = I_n \text{ ), par suite } P_{\text{cu}} = \alpha^2 P_k$$

Le facteur de charge est aussi égal à  $S / S_n$  en effet :  
comme  $S = U I \sqrt{3}$ ,  $S_n = U I_{\text{cc}} \sqrt{3}$

$$\frac{S}{S_n} = \frac{I}{I_{\text{cc}}} = \alpha \Rightarrow S = \alpha S_n$$

$$P_2 = S \cos \varphi = \alpha S_n \cos \varphi$$

d'où le rendement sous sa forme pratique :

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

Le rendement est maximum quand les pertes Joule sont égales aux pertes fer :

$$P_0 = \alpha^2 P_k$$

$$\text{d'où } \alpha = \left( \frac{P_0}{P_k} \right)^{1/2} = \left( \frac{1503,3}{5799,1} \right)^{1/2}$$

$$\alpha = 0,39.$$

Caractéristiques du rendement

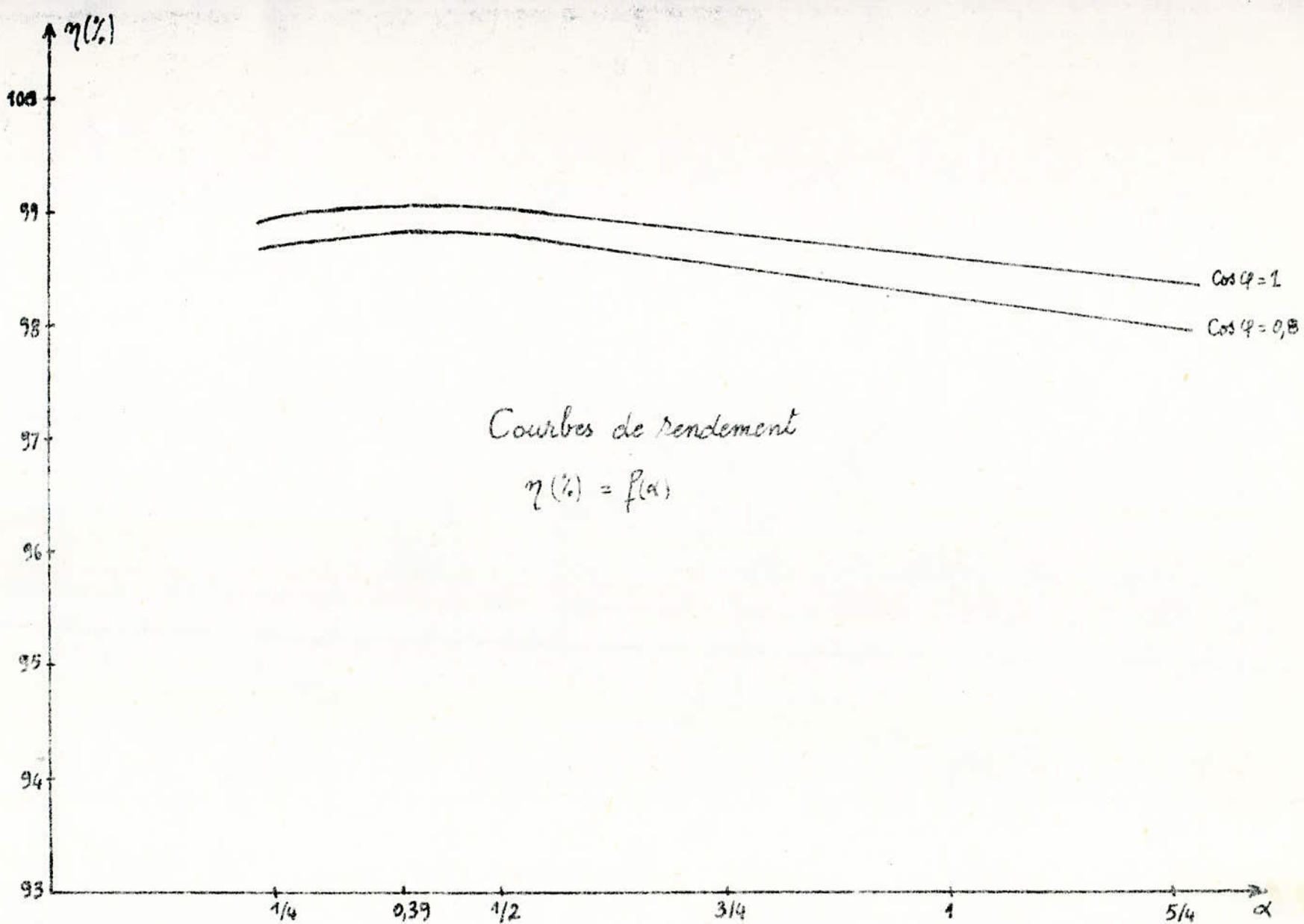
- Charge résistive :  $\cos \varphi = 1$

$\alpha$	$\alpha^2 P_k$ kW	$P_0 + \alpha^2 P_k$ kW	$\alpha S_n \cos \varphi$ kW	$\alpha S_n \cos \varphi + P_0 + \alpha^2 P_k$ kW	$\eta$ (%)
1/4	0,612	2,114	200	202,11	98,95
0,39	1,49	2,992	312	314,99	99,05
1/2	2,45	3,952	400	403,95	99,02
3/4	5,512	7,014	600	607,01	98,84
1	9,98	11,302	800	811,3	98,61
5/4	15,31	16,812	1000	1016,81	98,34

- Charge à  $\cos \varphi = 0,8$

$\alpha$	$\alpha^2 P_k$ kW	$P_0 + \alpha^2 P_k$ kW	$\alpha S_n \cos \varphi$ kW	$\alpha S_n \cos \varphi + P_0 + \alpha^2 P_k$ kW	$\eta$ (%)
1/4	0,612	2,114	160	162,11	98,7
0,39	1,49	2,992	249,6	252,59	98,82
1/2	2,45	3,952	320	323,95	98,78
3/4	5,512	7,014	480	487,01	98,56
1	9,98	11,302	640	651,3	98,26
5/4	15,312	16,812	800	816,81	97,94

Voir les courbes de rendement se rapportant à ces tableaux.



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 à la puissance nominale

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

$$\text{d'où } \alpha = \frac{U_2}{U_{2n}} \cdot \frac{I_2}{I_{2n}} \cdot \cos \varphi_2$$

La chute de tension au secondaire est définie par :

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

$U_2$ : tension secondaire pour une charge et un facteur de puissance donné  
 $U_{2n}'$ : tension secondaire ramenée au primaire

$$\text{ou } \Delta U (\%) = \frac{U_{2n}' - U_2}{U_{2n}} \cdot 100 \quad (1)$$

$U_2', U_{2n}'$ : tensions secondaires ramenées au primaire.

$$U_{2n}' = U_{1n}; \text{ on pose } \Delta U' = U_1 - U_2'$$

$$\text{la relation (1) devient: } \Delta U (\%) = \frac{U_{1n} - U_2'}{U_{1n}} \cdot 100$$

Cette chute de tension est approximativement égale à :

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

$$\text{où } U_{ka} = \text{chute de tension active} = 1,125 \%$$

$$U_{kr} = \text{chute de tension réactive} = 5,34 \%$$

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

$$\Delta U (\%) = \alpha U_{ka} (\%) = 1,125 \alpha$$

$\alpha$	$\Delta U (\%)$	$\Delta U (V)$	$U_2' (V)$	$U_2 (V)$	$U_2/U_{2n}$	$I_2/I_{2n}$	$I_2 (A)$
1/4	0,281	28,1	9971,9	398,88	0,997	0,251	90
1/2	0,562	56,2	9943,8	397,75	0,994	0,503	581
3/4	0,844	84,4	9915,6	396,62	0,991	0,757	874
1	1,125	112,5	9887,5	395,5	0,989	1,011	1167
5/4	1,406	140,6	9859,4	394,38	0,986	1,268	1464

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

$$\Delta U (\%) = 4,098 \alpha$$

$\alpha$	$\Delta U (\%)$	$\Delta U (V)$	$U_2' (V)$	$U_2 (V)$	$U_2/U_{2n}$	$I_2/I_{2n}$	$I_2 (A)$
1/4	1,07	102	9898	395,92	0,99	0,316	365
1/2	2,05	205	9795	391,8	0,973	0,638	737
3/4	3,07	307	9693	387,72	0,969	0,967	1116
1	4,1	410	9590	383,6	0,959	1,303	1504
5/4	5,12	512	9488	379,52	0,946	1,646	1900

Charge capacitive :  $\cos \varphi_2 = 0,8$  ;  $\sin \varphi_2 = -0,6$  ;  $\Delta U (\%) = -2,30 \alpha$

$\alpha$	$\Delta U (\%)$	$\Delta U (V)$	$U_2' (V)$	$U_2 (V)$	$U_2/U_{2n}$	$I_2/I_{2n}$	$I_2 (A)$
1/4	-0,57	57	10057	402,28	1,006	0,311	359
1/2	-1,15	115	10115	404,6	1,011	0,618	714
3/4	-1,72	172	10172	406,88	1,017	0,922	1065
1	-2,3	230	10230	409,2	1,023	1,222	1411
5/4	-2,87	287	10287	411,48	1,029	1,52	1755

Voir les caractéristiques en charge  $U_2 = f(I_2)$  se rapportant à ces tableaux.

## I.5. Calcul du courant de marche à vide.

Le courant de marche à vide  $I_0$  a deux composantes :

- Composante active  $I_{0a}$
- Composante réactive ou magnétisante  $I_{0r}$

Ce sont les pertes fer qui engendrent la composante active  $I_{0a}$ .

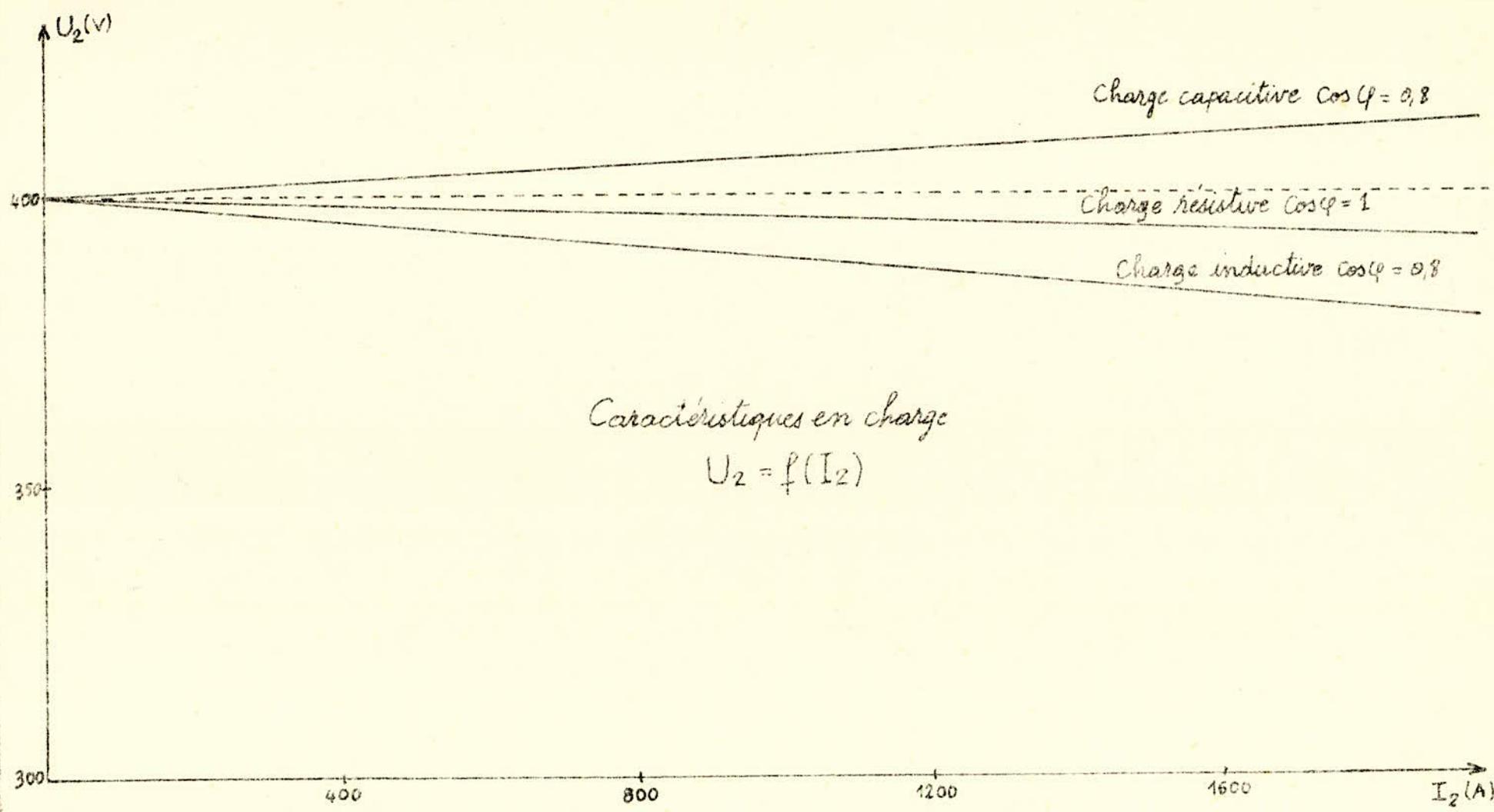
$$\text{donc } P_0 = \sqrt{3} U_2 I_{0a}$$

$$\begin{aligned} P_0 &: [W] \\ I_{0a} &: [A] \\ U_2 &: [V] \end{aligned}$$

$$\text{d'où } I_{0a} = \frac{P_0}{\sqrt{3} U_2} = \frac{1503,3}{\sqrt{3} \cdot 10^4}$$

$$I_{0a} = 0,087 A$$

Les puissances réactives mises en jeu dans le fer et dans les entrefers correspondent au courant magnétisant nécessaire à la circulation du flux dans le circuit magnétique. Le calcul sera analogue à celui



Des pertes actives, ici aussi, on se sert de courbes donnant les pertes spécifiques réactives en fonction de l'induction.

Puissance réactive dans les colonnes

à  $\hat{B}_c = 1,646 \text{ T}$  correspond la perte spécifique

$$q_{ocol} = 3,4 \frac{\text{var}}{\text{kg}}$$

et  $Q_{col} = q_{ocol} \cdot G_{col} = 3,4 \cdot 378,67$

$$Q_{col} = 1287 \text{ var}$$

Puissance réactive dans les culasse

à  $B_j = 1,438 \text{ T}$  correspond la perte spécifique

$$q_{oj} = 1,34 \text{ VAR / Kg}$$

et  $Q_j = q_{oj} \cdot G_j = 1,34 \cdot 205,33$

$$Q_j = 275 \text{ VAR}$$

Puissance réactive dans les coins

à  $B_m = 1,54 \text{ T}$  correspond la perte spécifique

$$q_{ocoin} = 1,7 \text{ VAR / Kg}$$

et  $Q_{coin} = q_{ocoin} \cdot G_c = 1,7 \cdot 355,72$

$$Q_{coin} = 605 \text{ VAR}$$

Puissance réactive dans les entrefers

Le circuit magnétique comprendra six entrefers et on considère que l'induction magnétique dans l'entrefer est la même que celle dans la colonne  $n_s = 6$

Perte spécifique dans l'entrefer : on l'estime à 95 % de celle de la colonne ( on l'exprime en VAR / cm<sup>2</sup> )

$$Q_s = q_{os} \cdot n_s \cdot S_s = 0,95 \cdot q_{ocol} \cdot n_s \cdot S_s$$

$$Q_s = 0,95 \cdot 3,4 \cdot 6 \cdot 315,83$$

$$Q_s = 6121 \text{ VAR}$$

Puissance magnétisante totale

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

$$Q = 1287 + 275 + 605 + 6121$$

$$Q = 8288 \text{ VAR}$$

Valeur du courant magnétisant :

$$I_{o\mu} = \frac{Q}{\sqrt{3} U_2} = \frac{8288}{\sqrt{3} \cdot 10^4}$$

$$I_{o\mu} = 0,478 \text{ A}$$

Connaissant les composantes de  $I_o$  on déduit sa valeur :

$$I_o = ( I_{o\mu}^2 + I_{oa}^2 )^{1/2} = ( 0,478^2 + 0,087^2 )^{1/2}$$

$$I_o = 0,486 \text{ A}$$

En grandeurs réduites :

$$i_o(\%) = \frac{I_o}{I_{2n}} \cdot 100 = \frac{0,486}{26,66} \cdot 100$$

$$i_o = 1,82 \%$$

Calculons la différence entre le courant calculé et le courant fixé par le cahier de charge ( 1,5 % )

$$\frac{\Delta i_0}{I_0} \cdot 100 = \frac{1,82 - 1,5}{1,5} \cdot 100 = 21,3 \%$$

La différence entre les deux courants calculé et donné par le cahier de charge n'excède pas les 33 % fixés par les normes, la valeur calculée est donc acceptable.

## I.6. CALCUL THERMIQUE

Le calcul thermique du transformateur consiste à vérifier les échauffements ( l'échauffement est la différence entre la température du point chaud et la température du milieu ambiant ) des différentes parties du transformateur, en fonctionnement à pleine charge:

- Enroulements
- Huile
- Circuit magnétique.

Les échauffements trouvés ne doivent pas dépasser les valeurs imposées par les normes.

Le calcul thermique est important, en effet, un échauffement exagéré du transformateur entraîne:

- Des pertes d'énergie plus grandes, donc baisse du rendement
- Vieillissement rapide des isolants qui a pour conséquence,

Une diminution de la durée de vie du transformateur.

Causes de l'échauffement:

- Pertes par effet Joule dans les enroulements
- Pertes par courants de Foucault et par hystérésis

dans le circuit magnétique

Le mode de refroidissement recommandé par le cahier de charge consiste en l'immersion dans une cuve d'huile minérale et refroidissement naturel par air.

Voir le schéma de principe des phénomènes thermiques et le diagramme des échauffements ci-dessous.

# Diagramme des échauffements dans le transformateur.

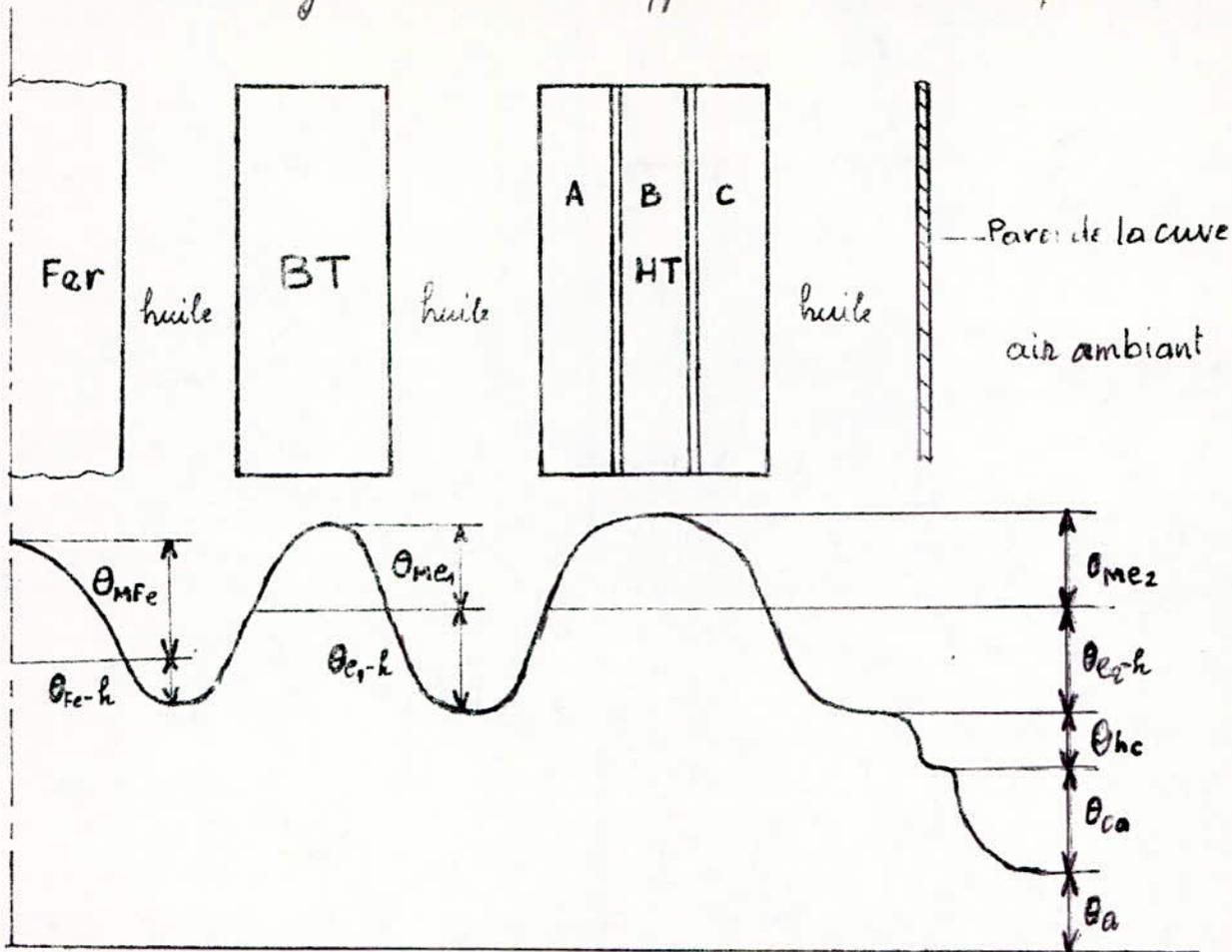


fig. I.6.1.

- $\theta_a$  : température de l'air ambiant
- $\theta_{ca}$  : échauffement cuve - air
- $\theta_{h-c}$  : échauffement huile - cuve
- $\theta_{e2-h}$  : échauffement surface enroulement HT - huile
- $\theta_{me2}$  : échauffement enroulement HT - surface
- $\theta_{Fe-h}$  : échauffement surface fer - huile
- $\theta_{e1-h}$  : échauffement surface enroulement BT - huile
- $\theta_{MFe}$  : échauffement enroulement BT - surface

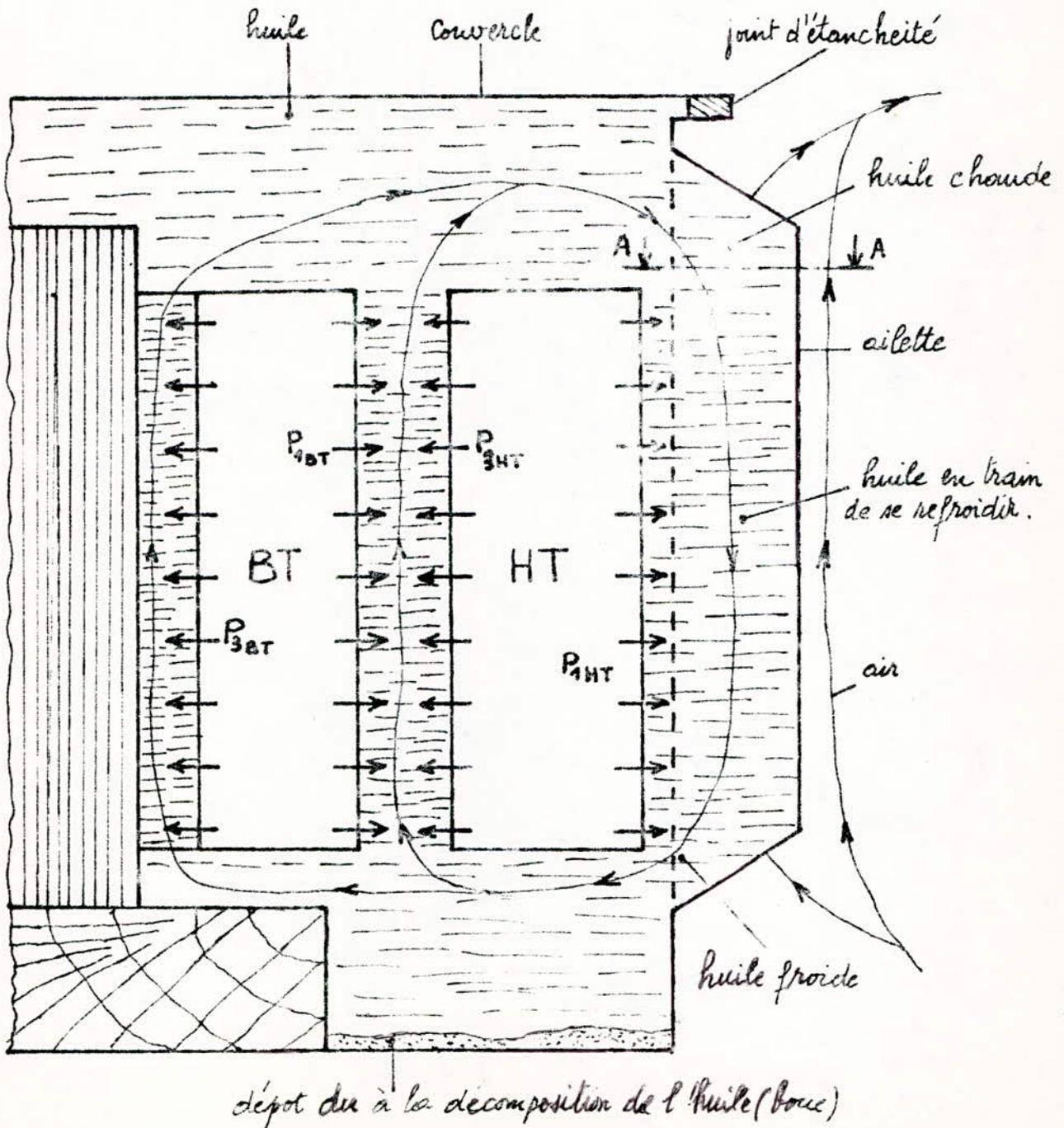
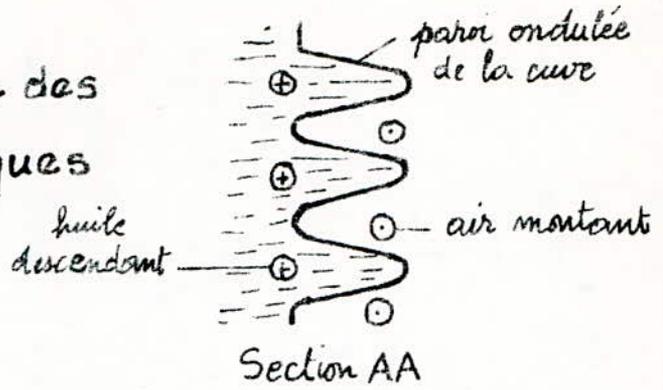
L'échauffement moyen  $\theta_{sm}$  des surfaces verticales externes des enroulements est liée à l'échauffement moyen de l'huile  $\theta_{hm}$  par la relation :

$$\theta_{sm} - \theta_{hm} = \frac{P}{\alpha_h k S} \quad (1)$$

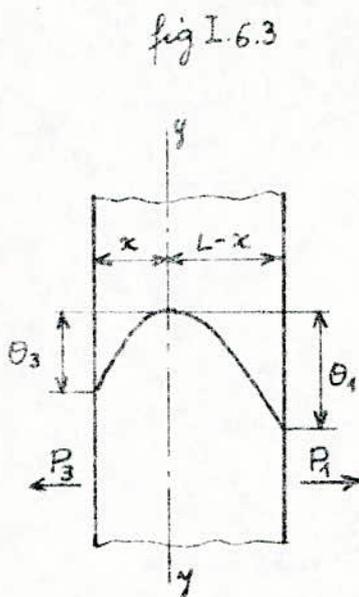
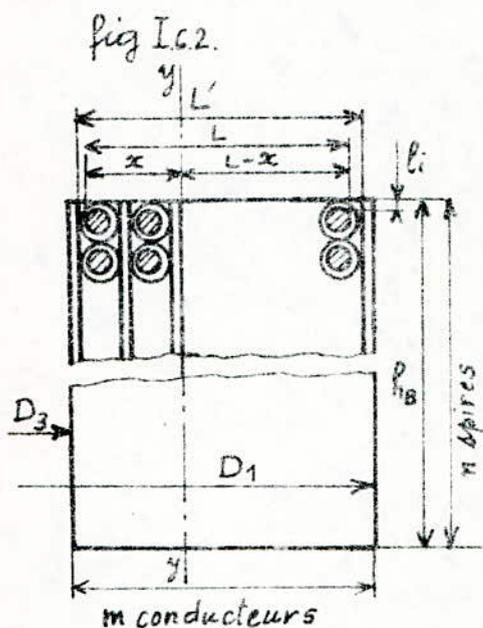
$\alpha_h$  : facteur de convection de l'huile, dans le cas de la convection naturelle de l'huile  $\alpha_h = 110 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{C}^{-1}$   $\alpha_h = 110 \text{ W/m}^2 \cdot \text{C}$

S : Aire de la surface géométrique des enroulements [ $\text{m}^2$ ]

# Schéma de principe des Phénomènes thermiques



$k$  : coefficient plus petit que 1 qui donne l'aire de la surface de contact avec l'huile à travers laquelle circule  $P$   
 $P$  : puissance thermique (W)



Schema relatif à la conductivité thermique.

Distribution des températures dans une plaque homogène émettant de la chaleur

$P_1, P_3$  : flux thermiques  
 $D_1$  : diamètre extérieur  
 $D_3$  : diamètre intérieur  
 $h_B$  : hauteur de l'enroulement  
 $\theta_1, \theta_3$  : différence entre la température max et les températures à la surfaces  
 Surface latérale correspondant à  $D_1$  :  $S_1 = \pi D_1 h_B$

Surface latérale correspondant à  $D_3$  :  $S_3 = \pi D_3 h_B$

Les flux thermiques  $P_1$  et  $P_3$  sont transmis des enroulements à travers les surfaces respectives  $k_1 S_1$  et  $k_3 S_3$ . La transmission à travers les surfaces de base est négligeable, on peut donc considérer que les pertes totales  $P_{cu}$  sont transmises à l'huile exclusivement à travers les surfaces latérales  $k_1 S_1$  et  $k_3 S_3$  et où la relation :

$$P_{cu} = P_1 + P_3 \quad (2)$$

Si les diamètres  $D_1$  et  $D_3$  sont suffisamment grands et si leur différence est petite (c'est notre cas) alors on peut assimiler l'enroulement cylindrique à deux plaques de surfaces planes et parallèles et où la distribution de température a une allure parabolique (fig I.6.3)

L'axe  $yy$  est la trace d'une surface de niveau thermique.  
 En se référant à la figure on démontre que :

$$\theta_1 = \delta_M - \delta_1 = \frac{1}{2} P_1 \frac{(L - X)}{S_1 \lambda_1} \quad (3)$$

$\delta_M$  : température maximale

$\delta_1$  : température sur la surface  $S_1$

$$\theta_3 = \delta_M - \delta_3 = \frac{1}{2} P_3 \frac{X}{S_3 \lambda_3} \quad (4)$$

$\delta_3$  : température sur la surface  $S_3$

$\lambda_1$  : conductivité thermique de la partie ( L - X )

$\lambda_3$  : conductivité thermique de la partie X .

L'enroulement axial peut être assimilé à cette plaque ; les enroulements étant constitués de conducteurs de cuivre et de couches de papier, on peut considérer comme nulles les chutes de températures à travers les conducteurs ( car la conductivité du cuivre est très grande devant celle du papier  $\lambda_{cu} = 380 \text{ W m}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  ). La chute totale de température  $\theta$  est la somme des chutes à travers les couches de papier. Le rapport  $\theta/P$  de la différence totale des températures  $\theta$  au flux  $P$  qui la détermine est la résistance thermique ou résultante de la plaque ; on en déduit la conductivité résultante :

$$\lambda_{res} = \frac{L}{Res \cdot S} \quad (5) \quad \lambda_{res} : \text{conductivité résultante de la plaque}$$

Res : résistance thermique de la plaque  
( résultante )

Considérons la fig I6 . 2 :

$$L = L' - 2 li$$

Pour  $m$  impair la résistance résultante commune à chaque partie est :

$$\frac{1}{2} Res = \frac{2 li \frac{m-1}{2}}{\lambda_i S_m} = \frac{1}{2} \frac{L}{\lambda_{res} S_m} \quad \lambda_i : \text{conductivité interne de l'enroulement (partie L de la fig I6.2)}$$

d'où on déduit la conductivité résultante ( pour  $\lambda_{res} = \lambda_1 = \lambda_3$  ) :

$$\lambda_{res} = \frac{\lambda_i L}{2 li (m-1)} \quad (6) \quad S_m : \text{aire de la surface moyenne cylindrique de l'enroulement.}$$

$$\text{Pour } m \text{ pair on a : } \frac{1}{2} Res = \frac{2 li \frac{m-2}{2}}{\lambda_i \cdot S_m} = \frac{1}{2} \frac{L}{\lambda_{res} S_m}$$

$$\text{d'où } \lambda_{res} = \frac{\lambda_i L}{2 li (m-2)} \quad (7)$$

Pour  $m = 1$ , en appliquant la relation ( 6 ) :  $\lambda_{res} = \infty$ , ici  $L$  coïncide avec la largeur du conducteur qui a justement une conductivité très grande ( pratiquement infinie ).

Pour  $m = 2$ , la relation ( 7 ) donne  $\lambda_{res} = \infty$  en raison de la symétrie, l'axe neutre  $yy$  traverse l'isolant central d'épaisseur  $2l_1$  ( sans intercouche ).

lequel n'est pas traversé par le flux thermique, les deux flux opposés traversant seulement les conducteurs de conductivité infinie.

Quand l'axe  $yy$  ne passe pas par le centre de la section, en général  $\lambda_1 \neq \lambda_3$  mais au fur et à mesure que  $m$  augmente  $\lambda_1 \rightarrow \lambda_3 \rightarrow \lambda_{res}$  et les résultats sont plus exacts.

## 6.1. Calcul de l'échauffement pour l'enroulement HT.

L'enroulement HT compte trois parties A, B, C séparées par deux canaux de refroidissement axiaux (voir schéma du bobinage HT et fig I 6.1)

Les trois parties A, B, C sont toutes en contact direct avec l'huile on peut donc considérer chacune d'elles comme un enroulement isolé et calculer son échauffement.

Les trois parties A, B, C sont identiques (même hauteur  $h_B$ , même nombre de conducteurs  $m$  suivant la largeur), seuls les diamètres  $D_1$  et  $D_3$  correspondants diffèrent d'une partie à l'autre par conséquent leurs surfaces latérales correspondantes aussi. Le calcul sera donc analogue pour les trois parties A, B, C.

Comme les diamètres varient très peu d'une partie à l'autre (les surfaces latérales varieront très peu aussi) donc l'échauffement sera, lui aussi, peu influencé en passant d'une partie à l'autre.

On exposera le calcul seulement pour la partie A qui est la plus défavorisée car ses surfaces latérales en contact avec l'huile sont les plus petites.

### Calcul de l'échauffement pour la partie A de l'enroulement.

- Calcul de  $L$ .

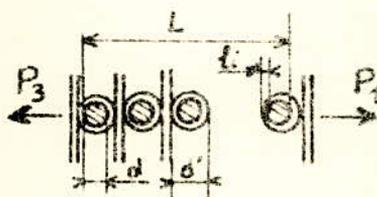
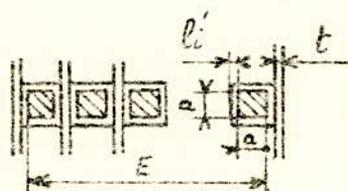


fig I 6.4 a)



b)

La conductivité thermique transversale d'un conducteur circulaire peut être considérée comme égale à celle d'un conducteur à section carrée de côté  $a = 0,886 d$  recouvert d'un isolant d'épaisseur totale:  $2 li' = d' - 0,886 d$

$$2 li' = 2,8 - 2,36 \cdot 0,886$$

$$2 li' = 0,71 \text{ mm}$$

La fig a se transforme alors en la fig b.

$$\text{et } E = m(a + 2 li') - 2 li' + t N_t$$

$N_t$ : nombre d'interconches = 3

$m$ : nombre de conducteurs = 4

Nt = épaisseur de l'intercouche : 0,24 mm

li = épaisseur de l'isolant d'un seul coté  
= 0,355 mm

a = 0,886 d = 0,886.2,36

a : coté du conducteur équivalent = 2,09 mm

d'où E = 4 ( 2,09 + 2. 0,355) - 2. 0,355 + 3. 0,24

E = 11,21 mm

En considérant  $\lambda_i$  la conductivité thermique commune de l'isolant et des intercouches on a :

$$\lambda_{res} = \frac{E \lambda_i}{2 li(m-1) + t Nt}$$

L'isolant est du papier imprégné d'huile qui a une conductivité thermique propre de :  $i = 0,3 \text{ W m}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  (NFC 26-152)

$i = 0,3 \text{ W / } ^\circ\text{C}$

$$\text{d'où } \lambda_{res} = \frac{11,21 \cdot 10^{-3} \cdot 0,3}{2 \cdot 0,355 \cdot 10^{-3} \cdot 3 + 3 \cdot 0,24 \cdot 10^{-3}}$$

$$\lambda_{res} = 1,18 \text{ W / } ^\circ\text{C}$$

Les flux thermiques  $P_1$  et  $P_3$  doivent vaincre la résistance thermique de l'isolant périphérique d'épaisseur (l'i + t) par suite les résistances correspondant aux flux  $P_1$  et  $P_3$  sont respectivement :

$$R_1 = \frac{l'i + t}{\lambda_i K_1 S_1} + \frac{1}{\alpha h K_1 S_1} = \frac{1}{K_1 S_1} \left( \frac{l'i + t}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha h} \right) \quad (8)$$

$$R_3 = \frac{l'i + t}{\lambda_i K_3 S_3} + \frac{1}{\alpha h K_3 S_3} = \frac{1}{K_3 S_3} \left( \frac{l'i + t}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha h} \right) \quad (9)$$

- Calcul de  $K_1 S_1$  et  $K_3 S_3$

$$S_3 = \pi D_3 h_B = \pi D_3 h_B$$

on a vu que  $h_B = 44,25 \text{ cm}$

$$D_3 = D_{12} + a_{12} = 28 + 1,2$$

$$D_3 = 29,2 \text{ cm}$$

La surface  $S_3$  porte 8 cales de largeur 1,5 cm et de hauteur  $h_a$  ( voir fig II.1)

Le tableau suivant donne le Nbre de cales approximatif en fonction du diamètre.

Dext mm	150- 250	250-380	380-500	500-600	900 - 1200
nbre de cales	6	8	10	12	14 - 16

Surface totale qu'occupent les cales :

$$Scal = 8(1,5.44,25)$$

$$Scal = 531 \text{ cm}^2$$

$$S_3 = \pi \cdot 29,2 \cdot 44,25$$

$$S_3 = 4059 \text{ cm}^2$$

d'où la surface en contact direct avec l'huile  $K_3 S_3$  :

$$K_3 S_3 = S_3 - Scal = 4059 - 531$$

$$K_3 S_3 = 3528 \text{ cm}^2$$

$$D_1 = D_3 + (4d' + 5t) \cdot 2 = 29,2 + (4 \cdot 0,28 + 5 \cdot 0,024) \cdot 2 \quad D_1 = 31,68 \text{ cm}$$

La surface  $S_1$  porte 8 cales de mêmes dimensions que celles que porte  $S_3$

$$Scal = 531 \text{ cm}^2$$

$$S_1 = \pi D_1 h_B = \pi \cdot 31,68 \cdot 44,25$$

$$S_1 = 4404 \text{ cm}^2$$

Surface en contact direct avec l'huile :

$$K_1 S_1 = S_1 - Scal = 4404 - 531$$

$$K_1 S_1 = 3873 \text{ cm}^2$$

On peut alors calculer les résistances thermiques :

$$R_1 = \frac{1}{3873 \cdot 10^{-4}} \left( \frac{(0,355 + 0,24) \cdot 10^{-3}}{0,3} + \frac{1}{110} \right) \quad R_1 = 0,0286 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W}$$

$$R_3 = \frac{1}{3528 \cdot 10^{-4}} \left( \frac{(0,355 + 0,24) \cdot 10^{-3}}{0,3} + \frac{1}{110} \right) \quad R_3 = 0,0314 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W}$$

En tenant compte de la variation parabolique de la température dans les deux parties de l'enroulement A traversé par les flux  $P_1$  &  $P_3$  ON OBTIENT les resistance internes suivantes :

$$R_{i1} = \frac{1}{2} \frac{L - x}{\lambda_{res} S_1} \quad (10); \quad R_{i3} = \frac{1}{2} \frac{x}{\lambda_{res} S_3} \quad (11)$$

déduites respectivement des relations (3) et (4)

- Elévation maximum de température  $\theta_M$

$\theta_M$  est la différence entre la température maximum  $S_M$  atteinte sur l'axe neutre  $yy$  et la température moyenne  $S_{hm}$  de l'huile

$$\theta_M = P_1 (R_1 + R_{i1}) \quad (12)$$

$$\text{ou } \theta_M = P_3 (R_3 + R_{i3}) \quad (13)$$

Les flux  $P_1$  et  $P_3$  peuvent être considérés comme proportionnels aux volumes limités par l'axe neutre .

en posant  $i = \frac{P_1}{P_3}$  (14) on a :  $i = \frac{P_1}{P_3} \approx \frac{(L-x) S_1}{x S_3}$

Cette relation jointe aux relations (12) et (13) permet de déterminer la distance  $x$  de l'axe neutre à la paroi interne en supposant que  $\lambda_1 = \lambda_3 = \lambda_{res}$  :

$$x = \frac{(R_1 S_1 + \frac{L}{2 \lambda_{res}}) L}{R_1 S_1 + R_3 S_3 + \frac{L}{\lambda_{res}}} \quad (14')$$

Des relations (2) et (14) on déduit :

$$P_1 = \frac{P_{cu}}{1 + \frac{1}{i}} \quad (15); \quad P_3 = \frac{P_{cu}}{1 + i} \quad (16)$$

En posant  $\lambda_1 = \lambda_3 = \lambda_{res}$  les formules (3) et (4) donnent :

$$\theta_1 = P_1 R_{i1} \quad (17)$$

$$\theta_3 = P_3 R_{i3} \quad (18)$$

Les élévations de températures moyennes  $\theta_{m1}$  et  $\theta_{m3}$  des deux parties de l'enroulement A ont pour expressions :

$$\theta_{m1} = \theta_M - \frac{1}{3} \theta_1 \quad (19)$$

$$\theta_{m3} = \theta_M - \frac{1}{3} \theta_3 \quad (20)$$

Echauffement moyenne  $\theta_m$  de l'enroulement entier rapporté à la température moyenne de l'huile  $\theta_{hm}$  :

$$\theta_m = \frac{P_1 \theta_{m1} + P_3 \theta_{m3}}{P_{cu}}$$

Cette expression jointe aux expressions (15), (16), (19), (20) donne :

$$\theta_m = \theta_M - \frac{i \theta_1 + \theta_3}{3(i+1)} \quad (21)$$

Application numérique .

Distance  $x$  de l'axe neutre à la paroi interne :

$$x = \frac{0,0286 \cdot 4404 \cdot 10^{-4} + \frac{11,21 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 1,18}}{0,0286 \cdot 4404 \cdot 10^{-4} + 0,0314 \cdot 4059 \cdot 10^{-4} + \frac{11,21 \cdot 10^{-3}}{1,18}} \cdot 11,21 \cdot 10^{-3}$$

- Resistances thermiques internes (formules (10) et (11) )  $x = 5,58$  mm

$$R_{i1} = \frac{(11,21 - 5,58) \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 1,18 \cdot 4404 \cdot 10^{-4}}$$

$$R_{i1} = 0,0054 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{W}$$

$$R_{i3} = \frac{5,58 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 1,18 \cdot 4059 \cdot 10^{-4}}$$

$$R_{i3} = 0,0058 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{W}$$

$$i = \frac{(L - x) S_1}{x S_3} = \frac{(11,21 - 5,58) \cdot 4404}{5,58 \cdot 4059}$$

$$i = 1,095$$

- Pertes  $P_{cu}$  dues à la partie A de l'enroulement H T.

Comme l'enroulement HT est partagé en trois parties égales( à 2 spires près pour la partie C ), la perte totale sera partagé également sur les trois parties :

$$P_{cu} = \left( \frac{P_{j2}}{3} + \frac{P_{sup}}{3} \right) \frac{1}{3}$$

$$P_{cu} = \left( \frac{4989,5}{3} + \frac{59,9}{3} \right) \frac{1}{3} \quad P_{cu} = 561 \text{ W}$$

- Calcul des puissances thermiques  $P_1$  et  $P_3$  ( relations (15) et (16) )

$$P_1 = \frac{561}{1 + \frac{1}{1,095}}$$

$$P_1 = 293,2 \text{ W}$$

$$P_3 = \frac{561}{1 + 1,095}$$

$$P_3 = 267,8 \text{ W}$$

- Calcul de la température maximum  $\theta_M$  ( relations (12) et (13) )

$$\theta_{M1} = 293,2 ( 0,0286 + 0,0054 )$$

$$\theta_{M1} = 9,969 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\theta_{M2} = 267,8 ( 0,0314 + 0,0058 )$$

$$\theta_{M2} = 9,962 \text{ } ^\circ\text{C}$$

on prend la moyenne des deux températures :

$$\theta_M = 9,96 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- Calcul des températures aux surfaces  $\theta_1$  et  $\theta_3$  ( relations (17) et (18) )

$$\theta_1 = 293,2 \cdot 0,0054$$

$$\theta_1 = 1,58 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\theta_3 = 267,8 \cdot 0,0058$$

$$\theta_3 = 1,55 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- Température moyenne de la partie A de l'enroulement HT :

La relation (21) donne :

$$\theta_{m_2} = 9,96 - \frac{1,095 \cdot 1,58 + 1,55}{3(1,095 + 1)}$$

$$\theta_{m_2} = 9,44^\circ\text{C}$$

Le calcul a été fait pour les parties B et C de l'enroulement HT on donne à titre indicatif les résultats de ces calculs

$$\theta_{m_B} = 8,36^\circ\text{C}$$

$$\theta_{m_C} = 7,15^\circ\text{C}$$

## 6.2. Calcul de l'échauffement pour l'enroulement BT

L'enroulement BT comporte quatre parties identiques à celles représentées ci-contre. (voir schéma de l'enroulement BT)  
L'enroulement comprend trois canaux radiaux pour la transportation des conducteurs, ils serviront aussi au refroidissement du bobinage

hauteur du canal radial :  $h_p = 5 \text{ mm}$

nombre de conducteurs en largeur :

$$m = 4$$

$m$  étant pair on applique la relation (7) :

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

$$L = L' - 2l_i$$

$$L = 4a' - 2l_i = 4 \cdot 5,34 - 2 \cdot 0,32 = 20,7 \text{ mm}$$

$$\text{d'où } \lambda_{\text{ress}} = \frac{0,3 \cdot 20,7 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 0,32 \cdot 10^{-3}(4-2)} = 4,85 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

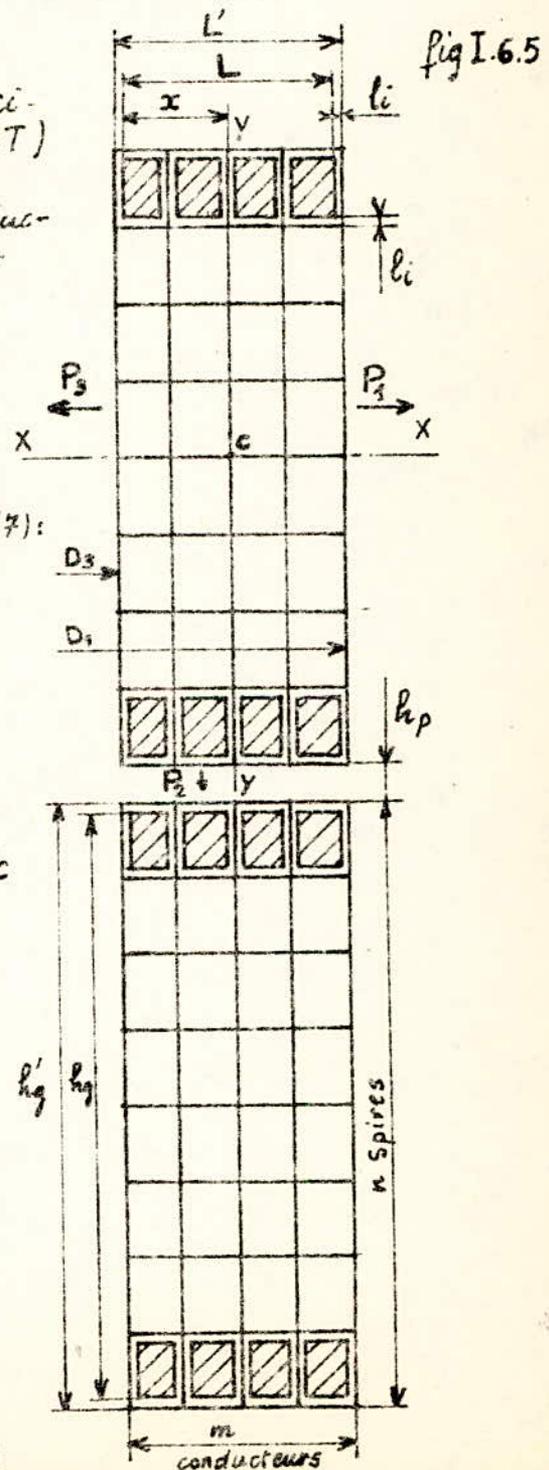
Calculons les surfaces en contact avec l'huile  $k_1 S_1, k_2 S_2, k_3 S_3$  :

$S_3$  porte 6 cales de 1 cm d'épaisseur et de hauteur  $h_B$   
d'où

$$S_{\text{cal}} = 6 \cdot (1 \cdot 44,25) = 265 \text{ cm}^2$$

$$D_3 = D + 2a_{10} = 21,45 + 2 \cdot 0,5 = 22,45 \text{ cm}$$

$$S_3 = \pi D_3 h_B$$



$$S_3 = \pi \cdot 22,45 \cdot 44,25$$

$$S_3 = 3121 \text{ cm}^2$$

Surface en contact direct avec l'huile

$$K_3 S_3 = S_3 - S_{\text{cal}} = 3121 - 265$$

$$K_3 S_3 = 2856 \text{ cm}^2$$

Calcul de  $\lambda_{\text{resy}}$  conductivité résultante suivant l'axe yy.

Il se fait de la même façon que pour  $\lambda_{\text{resx}}$ , mais ici, on suppose que le niveau thermique se situe exactement au milieu de de la bobine car les deux flux verticaux sont presque égaux (voir fig I.6.5) comme le nombre de conducteurs suivant la verticale est pair ( $n = 8$ ):

$$\lambda_{\text{resy}} = \frac{\lambda_i h_g}{2 li(m-2)}$$

$$\text{avec } h_g = h'_g - 2 li = 86' - 2 li$$

$$h_g = 8,9,94 - 2,0,32$$

$$h'_g = 78,88 \text{ mm}$$

$$\text{d'où } \lambda_{\text{resy}} = \frac{0,3 \cdot 78,9}{2,0,32 (8-2)}$$

$$\lambda_{\text{resy}} = 6,16 \text{ W/mc}^\circ$$

En fait il n'ya pas deux niveaux thermiques, mais seulement un point neutre C (intersection de l'axe XX avec l'axe yy) à température maximum  $S_m$

$$D_1 = D_3 + 2L' = 22,45 + 2 \cdot (4,0,534)$$

$$D_1 = 26,72 \text{ cm}$$

$$S_1 = \pi D_1 h_B = \pi \cdot 26,72 \cdot 44,25$$

$$S_1 = 3714 \text{ cm}^2$$

La surface  $S_1$  porte 8 cales de largeur 1cm, de hauteur  $h_B$  d'où

$$S_{\text{cal}} = 8(1 \cdot 44,25)$$

$$S_{\text{cal}} = 354 \text{ cm}^2$$

Surface en contact direct avec l'huile

$$K_1 S_1 = S_1 - S_{\text{cal}} = 3714 - 354$$

$$K_1 S_1 = 3360 \text{ cm}^2$$

La surface  $S_2$  représente la surface de base d'une spire et on suppose que toute cette surface est en contact avec l'huile car il n'ya pas de cales horizontales.

L'enroulement BF étant formé de 20 spires partagée en 5 groupes séparés par les canaux de refroidissement. Les 3 groupes de spires du milieu ont leurs deux surfaces de base en contact avec l'huile tandis que les deux groupes extrêmes n'ont qu'une seule surface de base chacun en contact avec l'huile; l'autre recevant les cylindres isolants de stabilisation (voir schéma du bobinage BF et fig II.1)

Considérons les groupes du milieu:

$$S_2 = \pi \cdot D_{\text{moy}} L' = \pi \cdot \left( \frac{D_1 + D_3}{2} \right) \cdot L'$$

$$S_2 = \pi \cdot \frac{26,72 + 22,45}{2} \cdot 2,07$$

$$S_2 = 160 \text{ cm}^2$$

$$k_2 S_2 = 160 \text{ cm}^2$$

- Calcul des résistances thermiques

$$R_1 = \frac{1}{k_1 S_1} \left( \frac{l_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_{h_1}} \right); \quad R_2 = \frac{1}{k_2 S_2} \left( \frac{l_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_{h_2}} \right); \quad R_3 = \frac{1}{k_3 S_3} \left( \frac{l_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_{h_3}} \right)$$

On estime  $\alpha_{h_2}$  à environ  $50 \text{ W/m}^2\text{°C}$  car il ne s'établit pas une circulation complète de l'huile à travers le canal radial comme le montre la figure ci-dessous.

$$R_1 = \frac{1}{3360 \cdot 10^{-4}} \left( \frac{0,32 \cdot 10^{-3}}{0,3} + \frac{1}{110} \right) = 0,0302 \text{ °C/W}$$

$$R_2 = \frac{1}{160 \cdot 10^{-4}} \left( \frac{0,32 \cdot 10^{-3}}{0,3} + \frac{1}{50} \right) = 1,316 \text{ °C/W}$$

$$R_3 = \frac{1}{2856 \cdot 10^{-4}} \left( \frac{0,32 \cdot 10^{-3}}{0,3} + \frac{1}{110} \right) = 0,0355 \text{ °C/W}$$

Calcul de  $\alpha$ : la formule (14') est applicable.

$$\alpha = \frac{\left( R_1 S_1 \frac{L}{2 \lambda_{\text{res}}} \right) L}{R_1 S_1 + R_3 S_3 + \frac{L}{\lambda_{\text{res}}}}$$

$$\alpha = \frac{\left( 0,0302 \cdot 3714 \cdot 10^{-4} + \frac{20,7 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 4,85} \right) \cdot 20,7 \cdot 10^{-3}}{0,0302 \cdot 3714 \cdot 10^{-4} + 0,0355 \cdot 3121 \cdot 10^{-4} + \frac{20,7 \cdot 10^{-3}}{4,85}}$$

$$\alpha = 10,43 \text{ mm}$$

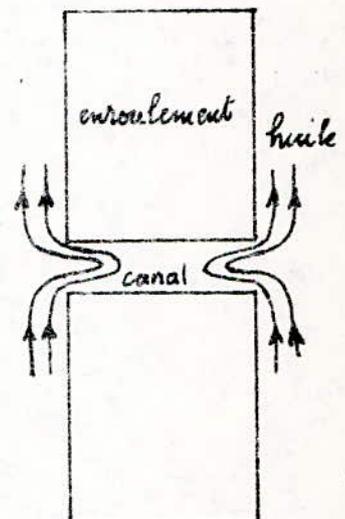
Calcul des résistances internes  $R_{i1}, R_{i2}, R_{i3}$ :

$$R_{i1} = \frac{L - \alpha}{2 \lambda_{\text{res}} S_1} = \frac{(20,7 - 10,43) \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 4,85 \cdot 3714 \cdot 10^{-4}}$$

$$R_{i1} = 0,0033 \text{ °C/W}$$

$$R_{i2} = \frac{l_g}{2 \lambda_{\text{res}} S_2} = \frac{78,9 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 6,16 \cdot 160 \cdot 10^{-4}}$$

$$R_{i2} = 0,400 \text{ °C/W}$$



$$Ri_3 = \frac{X}{2 \cdot \lambda \text{ res} \cdot S_3} = \frac{10,43 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 4,85 \cdot 3121 \cdot 10^{-4}} \quad Ri_3 = 0,0034^\circ\text{C/W}$$

Calcul de la différence de température maximum  $\theta_M$  entre celle du point C ( $\theta_M$ ) et celle de l'huile ( $\theta_{hm}$ )

Les relations sont analogues à celles déjà vues ( formules (12) et (13) )

$$\begin{aligned} \theta_M &= P_1 ( R_1 + Ri_1 ) \\ \theta_M &= P_2 ( R_2 + Ri_2 ) \\ \theta_M &= P_3 ( R_3 + Ri_3 ) \end{aligned} \quad (22)$$

Sachant que  $P_{cu}$  sont les pertes totales dues à l'enroulement BT, comme l'enroulement est partagé en 5 groupes de spires, les pertes par groupe sont :

$$P'_{cu} = \frac{P_{cu}}{5}$$

et  $P'_{cu}$  représente la somme des flux thermiques  $P_1, P_2, P_3$  :

$$P'_{cu} = P_1 + P_2 + P_3 \quad (23)$$

Des deux relations (22) et (23) on tire :

$$\theta_M = \frac{P'_{cu}}{\frac{1}{R_1 + Ri_1} + \frac{1}{R_2 + Ri_2} + \frac{1}{R_3 + Ri_3}}$$

Calcul de  $P_{cu}$  pour une seule bobine BT :

$$P_{cu} = \frac{P_{j1}}{3} + \frac{P_{sup1}}{3} = \frac{3815,8}{3} + \frac{145}{3} \quad P_{cu} = 1320 \text{ W}$$

$$\text{d'où } P'_{cu} = \frac{1320}{5} \quad P'_{cu} = 264 \text{ W}$$

$$\text{et } \theta_M = \frac{264}{\frac{1}{0,0033+0,0302} + \frac{1}{0,400 + 1,316} + \frac{1}{0,0034+0,0355}} \quad \theta_M = 4,7 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Des relations donnant  $\theta_M$  ( formules (22) ) on tire les flux thermiques  $P_1, P_2, P_3$  :

$$P_1 = \frac{\theta_M}{R_1 + Ri_1} = \frac{4,7}{0,0033 + 0,0302} \quad P_1 = 140,3 \text{ W}$$

$$P_2 = \frac{\theta_M}{R_2 + Ri_2} = \frac{4,7}{0,400 + 1,316} \quad P_2 = 2,74 \text{ W}$$

$$P_3 = \frac{\theta_m}{R_3 + R_{i3}} = \frac{4,7}{0,0034 + 0,0355}$$

$$P_3 = 120,8 \text{ W}$$

Calcul des chutes internes de températures (formules (17) et (18))

$$\theta_1 = P_1 R_{i1} = 140,3 \cdot 0,0033$$

$$\theta_1 = 0,46^\circ \text{C}$$

$$\theta_3 = P_3 R_{i3} = 120,8 \cdot 0,0034$$

$$\theta_3 = 0,41^\circ \text{C}$$

$$\lambda = \frac{P_1}{P_3} = \frac{140,3}{120,8}$$

$$\lambda = 1,16$$

et avec la relation (21) on déduit l'échauffement moyen  $\theta_{m_2}$  de la partie d'enroulement (groupe de spires) du bobinage BT

$$\theta_{m_2} = \theta_m - \frac{\lambda \theta_1 + \theta_3}{3(\lambda + 1)} = 4,7 - \frac{1,16 \cdot 0,46 + 0,41}{3(1,16 + 1)}$$

$$\theta_{m_2} = 4,55^\circ \text{C}$$

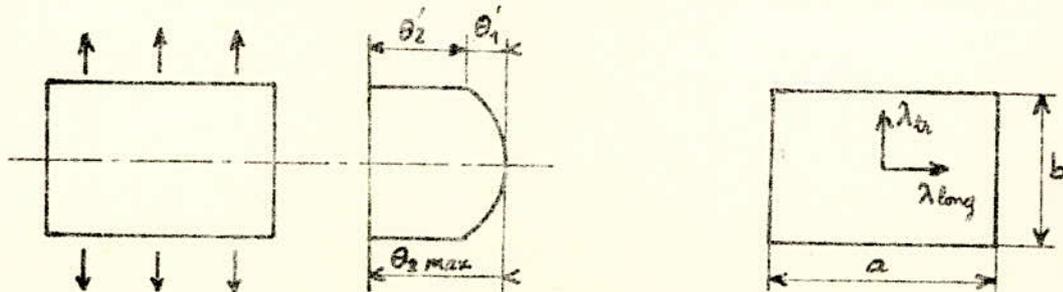
On ne fera pas le calcul pour les deux parties extrêmes du bobinage en raison de la complexité de celui-ci mais leur température moyenne reste à peu près égale à celle des parties du milieu car la puissance  $P_2$  qui est la seule à changer (les parties extrêmes ont une seule base en contact avec l'huile) est très petite et influe très peu sur la température moyenne  $\theta_m$ .

### 6.3. Echauffement du circuit magnétique.

Le calcul de l'échauffement du circuit magnétique est complexe à cause du fait que :

- Les conditions de refroidissement de la culasse et de la colonne sont différentes
- Les formes de la section de la culasse et de la colonne sont compliquées du point de vue calcul thermique.
- Les surfaces latérales du circuit magnétique sont partiellement couvertes par des cales longitudinales, des bandages de serrage etc.
- La constitution du circuit magnétique est non homogène.

On simplifie donc le calcul en ramenant la section de la colonne à une section équivalente rectangulaire inscrite dans le même cercle.



Supposons que les pertes sont uniformément réparties on a alors :

$$\theta_1 = \frac{p a^2}{8 \lambda_l} ; \theta_2 = \frac{p a}{2 \alpha_l}$$

$$\theta_1' = \frac{p b^2}{8 \lambda_t} \quad \theta_2' = \frac{p b}{2 \alpha_t}$$

avec  $p = p_{sp} \cdot \gamma$

$\lambda_l$  : coefficient de transmission longitudinal = 20 W/m°C

$\lambda_t$  : coefficient de transmission transversal = 3 W/m°C

$p_{sp}$  : pertes spécifiques des tôles par unité de masse = 1,5 W/kg (pour une induction de crête = 1,65 T)

$p$  : pertes spécifiques par unité de volume.

$\gamma$  : poids spécifique des tôles = 7,65 kg/dm<sup>3</sup>.

$$p = 1,5 \cdot 7,65 \cdot 10^3$$

$$p = 11,5 \cdot 10^3 \text{ W/m}^3$$

Dimensions de la section rectangulaire équivalente à celle de la colonne :

$$a = 0,9 D = 0,9 \cdot 21,45$$

$$a = 19,3 \text{ cm}$$

$$b = \frac{S_{fercol}}{a} = \frac{315,83}{19,3}$$

$$b = 16,36 \text{ cm}$$

d'où on déduit les différents échauffements :

$$\theta_1 = \frac{11,5 \cdot 10^3 \cdot 0,193^2}{8 \cdot 20}$$

$$\theta_1 = 2,68^\circ\text{C}$$

$$\theta_2 = \frac{11,5 \cdot 10^3 \cdot 0,193}{2 \cdot 110}$$

$$\theta_2 = 10,09^\circ\text{C}$$

$$\theta_1' = \frac{11,5 \cdot 10^3 \cdot 0,1636^2}{8 \cdot 3}$$

$$\theta_1' = 12,82^\circ\text{C}$$

$$\theta_2' = \frac{11,5 \cdot 10^3 \cdot 0,1636}{2 \cdot 110}$$

$$\theta_2' = 8,55^\circ\text{C}$$

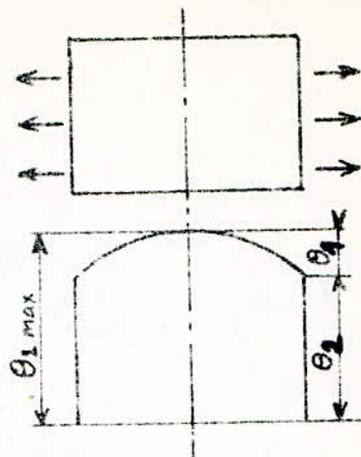
$$\theta_{1 \max} = \theta_1 + \theta_2 = 2,68 + 10,09$$

$$\theta_{1 \max} = 12,77^\circ\text{C}$$

$$\theta_{2 \max} = \theta_1' + \theta_2' = 12,82 + 8,55$$

$$\theta_{2 \max} = 21,37^\circ\text{C}$$

L'échauffement résultant du circuit magnétique est alors donné par la relation suivante :



$$\theta_{\max CM \cdot h} = \theta_{2 \max} \frac{\theta_2' + 1,5 \theta_1'}{\theta_{2 \max}' + \theta_2' + 1,5 \theta_1'}$$

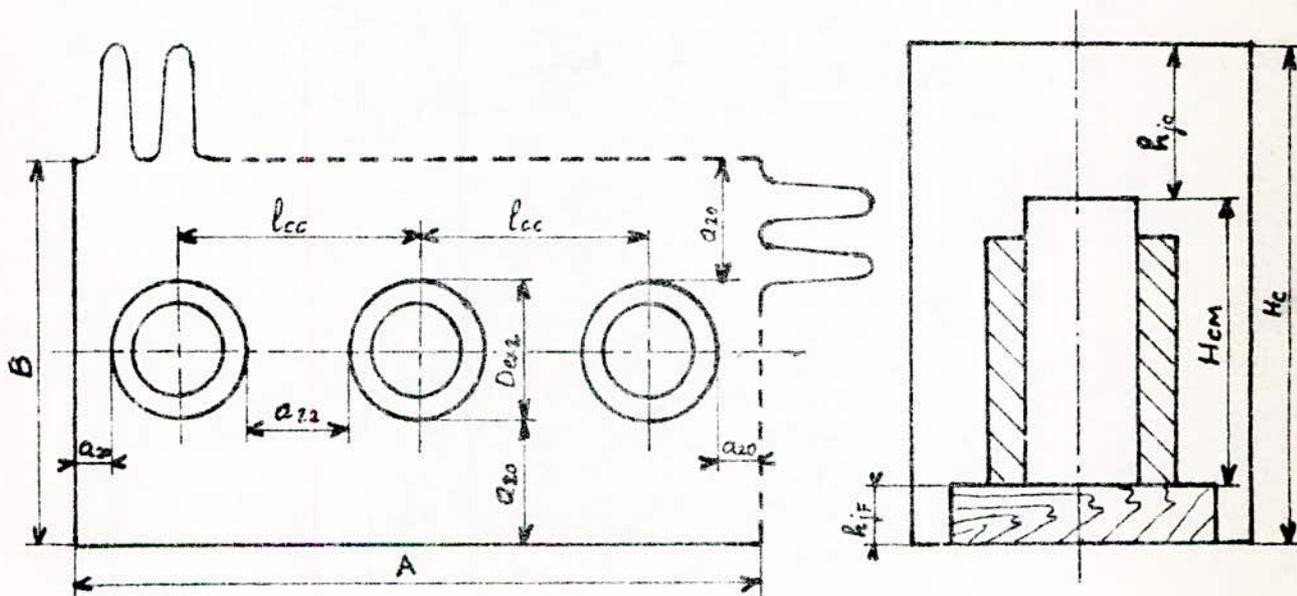
$$= 21,37 \cdot \frac{8,55 + 1,5 \cdot 12,82}{21,37 + 8,55 + 1,5 \cdot 12,82}$$

$$\theta_{\max CM \cdot h} = 12,08 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Cette valeur a seulement un caractère indicatif à cause du calcul simplifié mais elle indique cependant que le circuit magnétique n'est pas surchauffé.

## 6.4. Echauffement de l'huile.

### a) Dimensions de la cuve



La cuve est de section rectangulaire avec des tôles ondulées afin d'améliorer le refroidissement de l'huile. Ci-dessous un tableau donnant les dimensions en fonction de la haute tension et de la puissance nominale.

U	kV	S <sub>n</sub>	kVA	a <sub>20</sub>	mm	h <sub>jo</sub>	mm	h <sub>if</sub>	mm
< 20		20 - 160		55		150 - 250		30 a	
		200 - 1600		65		150 - 300			
		2000 - 10000		90		150 - 350			
> 20		20 - 160		65		150 - 300		40	
	< 30	200 - 1600		75		150 à			
		2000 - 10000		120		350			

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

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

$$H_c = H_{cm} + h_{j0} + h_{jF}$$

On tire du tableau :

$$a_{20} = 65 \text{ mm}$$

$$h_{j0} = 200 \text{ mm}$$

$$h_{jF} = 30 \text{ mm}$$

$$D_{ex2} = D + 2a_{10} + 2a_1 + 2a_{12} + 2a_2 = 21,45 + 2 \cdot 0,5 + 2 \cdot 2,176 + 2 \cdot 1,2 + 2 \cdot 4,71$$

$$D_{ex2} = 38,62 \text{ cm}$$

$$l_{cc} = D_{ex2} + a_{22} = 38,62 + 1,44$$

$$l_{cc} = 40,02 \text{ cm}$$

$$H_{cm} = 87,35 \text{ cm déjà calculée}$$

d'où  $A = 2 \cdot 40,02 + 38,62 + 2 \cdot 6,5$

$$A = 132 \text{ cm}$$

$$B = 38,62 + 2 \cdot 6,5$$

$$B = 52 \text{ cm}$$

$$H_c = 87,35 + 20 + 3$$

$$H_c = 110,3 \text{ cm}$$

Les épaisseurs des tôles d'acier utilisées pour la réalisation de la cuve sont données par le tableau ci-dessous

$S_n$ KVA	< 100	125-250	315-630	630-1600
épaisseur du fond $\Delta_f$ mm	3 - 4	4 - 5	5 - 6	6 - 8
épaisseur du couvercle $\Delta_c$ mm	4 - 5	5 - 6	6 - 8	10
épaisseur des parois latérales $\Delta_p$ mm	0,75 - 1	1 - 1,5	1,5	2,5

On choisit les épaisseurs suivantes :

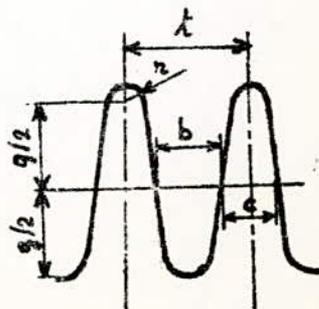
le fond  $\Delta_f = 6 \text{ mm}$   
 le couvercle  $\Delta_c = 10 \text{ mm}$   
 les parois  $\Delta_p = 2,5 \text{ mm}$

- Géométrie des ailettes de refroidissement

Indications générales

$$t_{min} = 40 \text{ mm}$$

d'après la figure:  
 $t = b + c + 2\Delta_p$



$$g_{\max} = 300 \text{ mm}$$

$$b_{\min} = 30 \text{ mm}$$

$$c_{\min} = 10 \text{ mm}$$

On choisit :

$$b = 30 \text{ mm}$$

$$t = 40 \text{ mm}$$

$$g = 160 \text{ mm}$$

$$c = 10 \text{ mm}$$

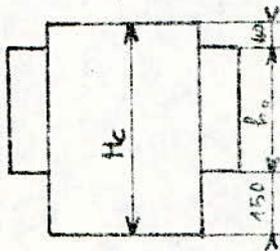
$$r = 5 \text{ mm}$$

Périmètre approximatif d'une ondule :

$$P_{on} = b + 2g + \pi r = 30 + 2 \cdot 160 + \pi \cdot 5$$

$$P_{on} = 365,7 \text{ mm}$$

Nous devons estimer aussi la hauteur de l'ondule :



$$h_0 = H_c - (150 + 40)$$

$$h_0 = 1103 - 190$$

$$h_0 = 913 \text{ mm}$$

- Déterminons le nombre d'ondules sur les parois

nombre d'ondules sur la longueur :

$$n_1 + 1 = \frac{A}{t} = \frac{132}{4}$$

$$n_1 = 32$$

nombre d'ondules sur la largeur :

$$n_2 + 1 = \frac{B}{t} = \frac{52}{4}$$

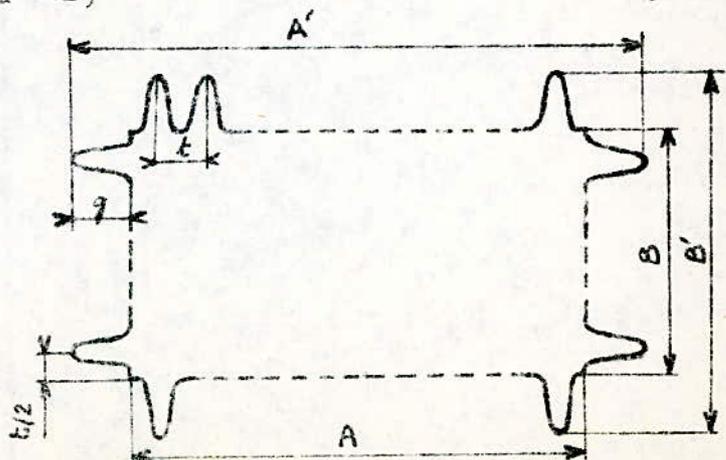
$$n_2 = 12$$

nombre total d'ondules :

$$n_0 = 2(n_1 + n_2) = 2(32 + 12)$$

$$n_0 = 88$$

Disposition des ondules :



La cuve avec les ondules peut être encadrée dans le rectangle de dimensions:

$$A' = A + 2g + r = 132 + 2.16 + 0,5 \quad A' = 164,5 \text{ cm}$$

$$B' = B + 2g + r = 52 + 2.16 + 0,5 \quad B' = 84,5 \text{ cm}$$

b) Echauffement de l'huile par rapport à la cuve

L'huile communique la chaleur qu'elle a reçu des enroulements et du circuit magnétique à la cuve par convection naturelle.

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

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

où  $P_o$  = pertes à vide

$P_k$  = pertes dues à la charge

$Sc$  = surface en contact avec l'huile ( $m^2$ )

$$Sc = S_{co} + S_{cc}$$

$S_{co}$  = surface des ondules

$S_{cc}$  = surface du couvercle en contact avec l'huile

$$S_{co} = n_o \cdot \frac{P_n}{3,14} \cdot h_o = 88 \cdot 0,3657 \cdot 0,913$$

$$S_{co} = 29,38 \text{ m}^2$$

$$S_{cc} = A \cdot B = 1,32 \cdot 0,52$$

$$S_{cc} = 0,686 \text{ m}^2$$

$$\text{d'où } Sc = 29,38 + 0,686$$

$$Sc = 30,07 \text{ m}^2$$

$$\text{et } \theta_{hc} = 0,165 \cdot \left\{ \frac{1,05 (1503,3 + 9799)}{30,07} \right\}^{0,6}$$

$$\theta_{hc} = 5,96 \text{ } ^\circ\text{C}$$

c) Echauffement de la cuve par rapport à l'air

La cuve transmet la chaleur à l'air environnant par convection et par radiation.

L'échauffement de la cuve par rapport à l'air est donné par la relation:

$$\theta_{c.a} = \left\{ \left( \frac{1,05 (P_o + P_k)}{2,8 S_r + 2,5 S_c} \right) \right\}^{0,8}$$

où  $S_r$  = surface radiante de la cuve en ( $m^2$ ), elle est égale à la somme de la surface enveloppante de la cuve et de la surface du couvercle

$$S_n = 2(A'+B') \cdot h_0 + S_{cc}$$

$$S_n = 2(1,645 + 0,845) \cdot 0,913 + 0,686$$

$$S_n = 5,23 \text{ m}^2$$

d'où

$$\theta_{ca} = \left( \frac{1,05(1503,3 + 9799)}{2,8 \cdot 5,23 + 2,5 \cdot 30,07} \right)^{0,8}$$

$$\theta_{ca} = 49,75 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- Températures des bobinages.

enroulement HT :  $t_{e1} = \theta_{m1} + \theta_{hc} + \theta_{ca} + \theta_a$

$$t_{e1} = 4,55 + 5,96 + 49,74 + 35$$

$$t_{e1} = 95,25 \text{ } ^\circ\text{C}$$

enroulement BT :  $t_{e2} = \theta_{m2} + \theta_{hc} + \theta_{ca} + \theta_a$

$$t_{e2} = 9,44 + 5,96 + 49,74 + 35$$

$$t_{e2} = 100,14 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- Température du circuit magnétique :

$$t_{cm} = \theta_{\max cm, h} + \theta_{hc} + \theta_{ca} + \theta_a$$

$$t_{cm} = 12,08 + 5,96 + 49,74 + 35$$

$$t_{cm} = 102,8 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Ces températures sont acceptables car elles sont inférieures aux valeurs fixées par les normes (105 °C pour les bobinages)

## I.7. Calcul mécanique

Le calcul mécanique du transformateur consiste en la vérification de la tenue des bobinages aux efforts électrodynamiques et le dimensionnement des différents éléments constructifs.

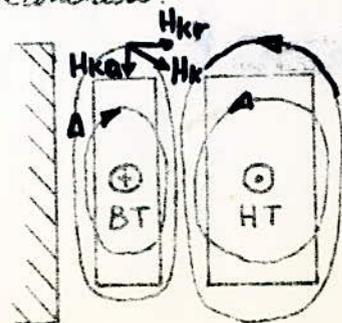
Les efforts électrodynamiques sont particulièrement importants lors d'un court-circuit.

### 7.1. Calcul mécanique des enroulements

Les enroulements doivent supporter les efforts électrodynamiques qui apparaissent lors d'un court-circuit au secondaire.

Distribution du champ de fuite dans un transformateur en court-circuit.  
(en court-circuit les courants circulent en sens inverse dans les conducteurs)

Le champ de fuite peut se décomposer suivant deux directions :



-  $H_{kr}$  : composante radiale

-  $H_{ka}$  : composante axiale

La composante radiale engendre une force radiale  
La composante axiale engendre une force axiale.

Les forces axiales tendent à comprimer  
l'enroulement BT et à écarter l'enroulement  
HT. Les forces axiales tendent à déplacer les  
enroulements dans le sens axial.

Le cas de court-circuit le plus défavorable  
est celui du court-circuit triphasé  
symétrique. Dans ce cas la valeur  
maximum du courant de court-circuit  
est donné par la relation :

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

$k_m$  : coefficient de crête ou d'impulsion.

$$k_m = 1 + e^{-\pi \cdot \frac{U_{ka}}{U_{kr}}}$$

$I_{kdin}$  : courant stationnaire de court-circuit.

On fait une hypothèse simplificatrice : on considère que la puissance  
du réseau qui alimente le transformateur est infinie.

Le courant  $I_{kdin}$  est donné par :  $I_{kdin} = I_n \frac{100}{U_k}$

Courant de court-circuit dans l'enroulement BT.

$$k_m = 1 + e^{-\pi \frac{1,125}{5,34}}$$

$$k_m = 1,516$$

$$I_{kdin1} = I_{n1} \frac{100}{U_k} = 1154,7 \frac{100}{5,46}$$

$$I_{kdin1} = 21,15 \cdot 10^3 \text{ A}$$

$$i_{kmax1} = \sqrt{2} \cdot 1,516 \cdot 21,15 \cdot 10^3$$

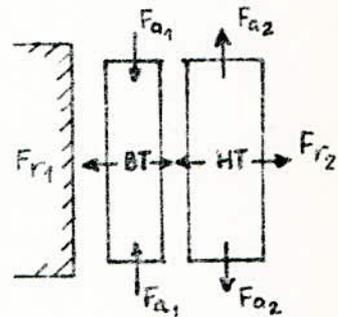
$$i_{kmax1} = 45,34 \cdot 10^3 \text{ A}$$

Courant de court-circuit dans l'enroulement HT

$$k_m = 1,516$$

$$I_{kdin2} = 26,66 \cdot \frac{100}{5,46}$$

$$I_{kdin2} = 488,3 \text{ A}$$



$$I_{Kmax2} = \sqrt{2} \cdot 1,516 \cdot 488,3$$

$$i_{Kmax2} = 1047 \text{ A}$$

Les forces radiales sont données par le relation:

$$F_{r1} = \frac{\mu_0 (W i_{Kmax})^2 l_{moy} K_R}{2 h_B} \quad (\text{k f})$$

où  $K_R$  : coefficient de Rogowski

$l_{moy}$ : longueur moyenne de la spire =  $lw$  (m)

$w$  : nombre de spires

$h_B$  : hauteur de la bobine. (m)

Forces axiales

La disymetrie dans la disposition des enroulements (en particulier la difference de hauteur) influe beaucoup sur la valeur de ces forces.

Dans notre cas la hauteur des bobines étant la même, les forces axiales sont données par:

$$F_a = Fr_1 \frac{ar}{2 h_B} \quad ar: \text{largeur du canal de fuite}$$

Valeur des forces s'exerçant sur l'enroulement BT

- radiales:

$$F_{r1} = \frac{4 \pi \cdot 10^{-7}}{2} \frac{(20 \cdot 45,34)^2 \cdot 0,77 \cdot 0,97}{0,4425} \quad F_{r1} = 0,872 \cdot 10^6 \text{ N}$$

- axiales

$$F_{a1} = 872 \cdot 10^3 \frac{3,5}{2,44,25} \quad F_{a1} = 34,48 \cdot 10^3 \text{ N}$$

Valeur des forces s'exerçant sur l'enroulement H T

- radiales

$$F_{r2} = \frac{4 \pi \cdot 10^{-7}}{2} \frac{(910 \cdot 1047)^2 \cdot 1,06 \cdot 0,97}{0,4425} \quad F_{r2} = 1,325 \cdot 10^6 \text{ N}$$

- axiales:

$$F_{a2} = 1325 \cdot 10^3 \frac{3,5}{2,44,25} \quad F_{a2} = 52,4 \cdot 10^3 \text{ N}$$

Efforts unitaires

L'effort unitaire est le rapport de la force sur la surface où elle est appliquée.

$$\sigma_{r1} = \frac{F_{r1}}{2 \pi W_1 \cdot sw_1} = \frac{0,872 \cdot 10^6}{2 \pi \cdot 20 \cdot (8,42,8)} \quad \sigma_{r1} = 2,03 \text{ k f/mm}^2$$

$$\sigma_{r2} = \frac{F_{r2}}{2 \pi W_1 \cdot sw_2} = \frac{1,325 \cdot 10^6}{2 \pi \cdot 910 \cdot (2,4,37)} \quad \sigma_{r2} = 2,65 \text{ K f/mm}^2$$

Les efforts admissibles de rupture pour le cuivre sont de 5 à 6 Kgf/mm<sup>2</sup>

Les enroulements résistent donc aux contraintes mécaniques lors d'un court-circuit

$$\sigma_{ad} = 5 \text{ à } 6 \text{ Kgf/mm}^2$$

Effort unitaires dus aux forces radiales:

$$\sigma_{a_1} = \frac{F_{a1}}{S_1} ; \sigma_{a_2} = \frac{F_{a2}}{S_2}$$

$$S_1 = 167,9 \text{ cm}^2$$

$$S_1 = \pi D_{m1} \cdot a_1 = \pi \cdot 24,63 \cdot 2,17$$

$$\sigma_{a_1} = \frac{34,48 \cdot 10^2}{16790}$$

$$\sigma_{a_1} = 0,2 \text{ Kgf/mm}^2$$

On a bien  $\sigma_{a_1} < \sigma_{ad}$

$$S_2 = \pi D_{m2} \cdot a_2 = \pi \cdot 33,92 \cdot 4,71$$

$$S_2 = 501,9 \text{ cm}^2$$

$$\sigma_{a_2} = \frac{52,4 \cdot 10^2}{50190}$$

$$\sigma_{a_2} = 0,1 \text{ Kgf/mm}^2$$

on a aussi  $\sigma_{a_2} < \sigma_{ad}$

On remarque que les efforts unitaires axiaux sont faibles, en effet pour les transformateurs de construction normale (pas de dissymétries) les forces axiales sont faibles en générale

#### CALCUL MECANIQUE DE LA CUVE

Pour faire le calcul mécanique de la cuve on doit déterminer auparavant les différents volumes et poids.

Volume occupé par les enroulements B T

$$v_1 = 3 (l_{t_1} \cdot sw_1 \cdot 10^{-3})$$

$$sw_1 : \text{mm}^2$$

$$l_{t_1} : (\text{m})$$

$$v_1 : (\text{dm}^3)$$

$$v_1 = 3(15,5 \cdot (8 \cdot 42,8) \cdot 10^{-3})$$

$$v_1 = 15,92 \text{ dm}^3$$

Volume occupé par les enroulements HT

$$v_2 = 3(l_{t_2} \cdot sw_2 \cdot 10^{-3}) = 3(969,7 \cdot (2 \cdot 4,37) \cdot 10^{-3})$$

$$v_2 = 25,42 \text{ dm}^3$$

Volume occupé par les culasses

$$v_j = 2 S_j (3D + 2 l_F) = 2 \cdot 361,36 (3 \cdot 21,45 + 2 \cdot 18,57)$$

$$v_j = 73,35 \text{ dm}^3$$

Volume occupé par les colonnes :

$$V_{col} = 3 \cdot S_{col} \cdot h_{col} = 3 \cdot 315,83 \cdot 52,25$$

$$V_{col} = 49,5 \text{ dm}^3$$

Volume occupé par les deux enroulements :

$$V_{cu} = V_1 + V_2 = 15,52 + 25,42$$

$$V_{cu} = 41,34 \text{ dm}^3$$

Volume occupé par le circuit magnétique

$$V_{cm} = V_{col} + V_j = 49,5 + 73,35$$

$$V_{cm} = 122,85 \text{ dm}^3$$

Volume de la masse decouvrable

On estime le volume du matériel de serrage (calos, pontres, boulons...) à 20% du volume du cuivre et du circuit magnétique.

$$V_{dec} = 1,20(V_{cu} + V_{cm}) = 1,20(41,34 + 122,85)$$

$$V_{dec} = 197,03 \text{ dm}^3$$

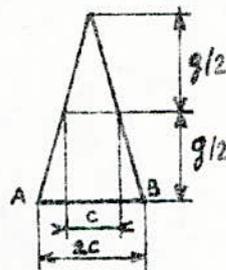
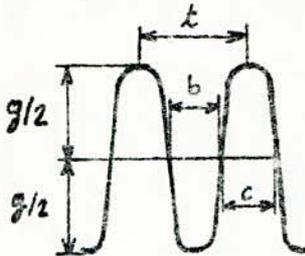
Volume de la cuve

$$V_{cuve} = ABHc = 13,2 \cdot 5,2 \cdot 11,03$$

$$V_{cuve} = 757,1 \text{ dm}^3$$

Volume des ondules

Pour faire le calcul du volume on assimile la surface de base de l'ondule à un triangle.



par homothétie on déduit que  $AB = 2c$ .

$$\text{Surface de l'ondule : } S_{om} = \frac{g \cdot 2c}{2} = gc = 1,6 \cdot 0,1$$

$$S_{om} = 0,16 \text{ dm}^2$$

$$\text{Volume de l'ondule : } V_{om} = S_{om} \cdot h_o = 0,16 \cdot 9,13$$

$$V_{om} = 1,46 \text{ dm}^3$$

$$\text{Volume total des ondules : } V_{om} = n_o \cdot V_{om} = 88 \cdot 1,46$$

$$V_{om} = 128,48 \text{ dm}^3$$

Volume total de la cuve

$$V_{cuveT} = V_{cu} + V_{om} = 757,1 + 128,48$$

$$V_{cuveT} = 885,58 \text{ dm}^3$$

On déduit le volume de l'huile

$$V_h = V_{cuveT} - V_{dec} = 885,58 - 197,03$$

$$V_h = 688,55 \text{ dm}^3$$

$$M_{max} = \frac{P}{8} (l_{cc} + l_{ca})^2$$

Le moment maximal supporté par la poutre est donné par la relation :

$$P = 4 \cdot 17,55 \cdot 101,49$$

$$P = 7124,6 \text{ kgf}$$

On choisissant pour  $p$  la valeur de  $4 \text{ kgf/cm}^2$  on a :

$$l_m = 2 l_{cc} + D = 2 \cdot 40,02 + 21,45$$

$$l_m = 101,49 \text{ cm}$$

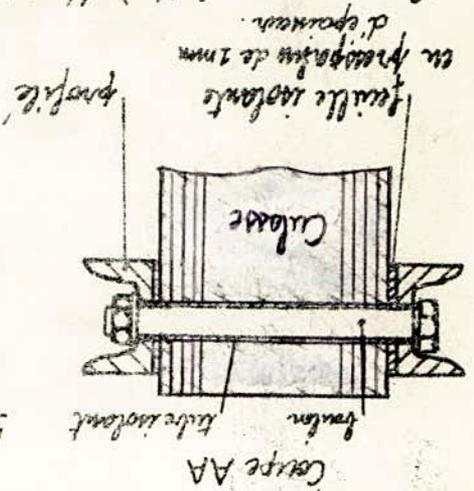
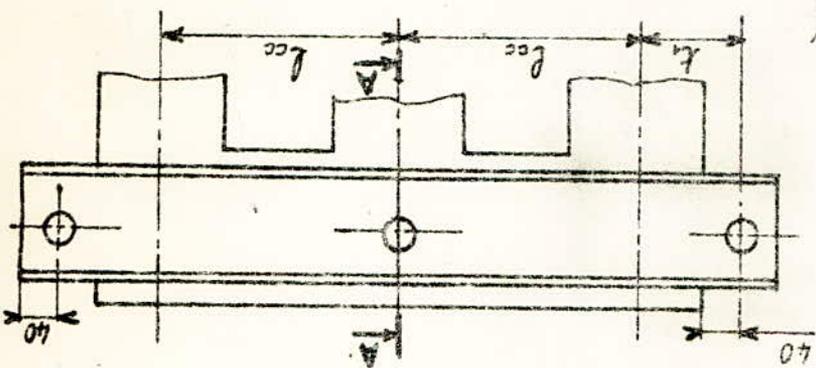
$l_m$  : longueur de la culasse

avec  $p$  : pression exercée sur la culasse, elle varie entre 2 et 6  $\text{kgf/cm}^2$

force totale de serrage :  $P = p \cdot h \cdot l_m$

Le serrage se fait à l'aide de trois boulons dont un seulement traverse le circuit magnétique. On considère que la force exercée par les boulons est répartie uniformément sur la culasse.

Fig I 7.2



Les culasses ont un contour par des profils en U. On dispose entre les culasses et les profils, des feuilles de papier pour l'isolation (on utilise aussi de faire un court-circuit magnétique)

9.2 Calcul mécanique des parties constructives

Poids de l'huile ( $\gamma_h = 0,9 \text{ kgf/dm}^3$ )

$$P_h = \gamma_h \cdot V_h = 0,9 \cdot 688,50$$

$$P_h = 619,7 \text{ kgf}$$

Poids du circuit magnétique ( $\gamma_{cm} = 7,65 \text{ kgf/dm}^3$ )

$$G_{cm} = \gamma_{cm} \cdot V_{cm} = 7,65 \cdot 122,85$$

$$G_{cm} = 939,8 \text{ kgf}$$

Poids du cuivre :  $G_{cu} = \gamma_{cu} \cdot V_{cu} = 8,9 \cdot 41,34$

$$G_{cu} = 367,92 \text{ kgf}$$

où  $h_j$ : [cm]  
 $l_{cc}, D$ : [cm]  
 $\rho$ : kgf/cm<sup>3</sup>  
 $M_{max}$ : kgf/cm

$$t_s = \frac{D}{2} + 4 = \frac{21,45}{2} + 4$$

$$t_s = 14,72 \text{ cm}$$

$$M_{max} = \frac{4 \cdot 17,55 \cdot (40,02 + 14,72)^2}{8}$$

$$M_{max} = 26,3 \cdot 10^3 \text{ kgf.cm}$$

Le module de résistance du profilé en U (suivant l'axe y) est donné par la relation:

$$W_y = \frac{M_{max}}{\sigma_a}$$

$\sigma_a$  = effort unitaire admissible pour l'acier de la poutre en kgf/cm<sup>2</sup>

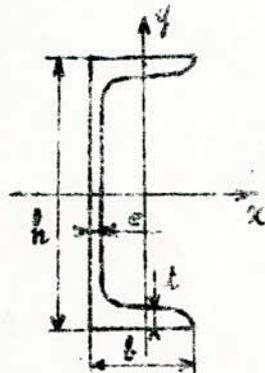
On utilise l'acier de nuance A33 qui a une charge admissible  $\sigma_a = 1209 \text{ kgf/cm}^2$  et une charge minimale de rupture de  $3300 \text{ kgf/cm}^2$ .

d'où  $W_y = \frac{26,3 \cdot 10^3}{1,2 \cdot 10^3}$

$$W_y = 21,9 \text{ cm}^3$$

D'après NTA 45.202 et 45.210 qui donne les caractéristiques mécaniques et les dimensions des profilés en U.

Le profilé qui a un module de résistance ou moins égal est l'UPM 180 qui a les dimensions suivantes:



$$h = 180 \text{ mm}$$

$$\text{aire} : 28 \text{ cm}^2$$

$$b = 70 \text{ mm}$$

$$\text{poids} : 22 \text{ kg/m}$$

$$e = 8 \text{ mm}$$

figure à l'échelle 1/5

$$t = 11 \text{ mm}$$

longueur de la poutre:

$$l_p = 2(l_{cc} + t_s + 4) = 2(40,02 + 14,72 + 4)$$

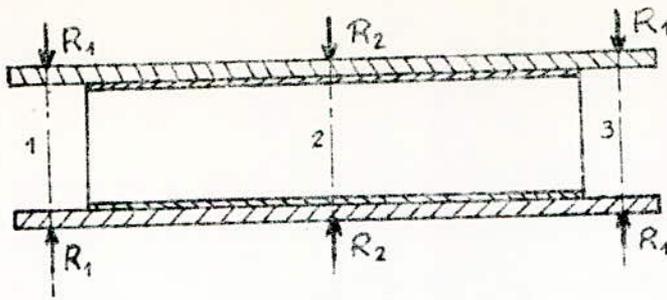
$$l_p = 117,48 \text{ cm}$$

- Boulons de serrage des poutres.

Sur ces boulons s'exercent:

- des efforts de traction dus à la réaction des toles serrées
- le poids du circuit magnétique suspendu au couvercle. Ce poids produit à la fois une flexion et un cisaillement des boulons.

Calcul des diamètres des boulons:



$R_1, R_2$ : forces qui s'exercent sur le profilé

En faisant l'approximation suivante: longueur de la poutre égale à la longueur entre les axes des boulons 1 et 3 les forces  $R_1$  et  $R_3$  auront pour valeur:

$$R_1 = \frac{3}{16} P = \frac{3}{16} \cdot 7124,6$$

$$R_1 = 1336 \text{ kgf}$$

$$R_2 = \frac{10}{16} P = \frac{10}{16} \cdot 7124,6$$

$$R_2 = 4453 \text{ kgf}$$

On remarque que le boulon du milieu est le plus sollicité. En ne considérant que les efforts de traction on doit avoir:

$$\sigma_{\text{tract}} = \frac{R_2}{S_2} = \frac{4R_2}{\pi d^2} < \sigma_{\text{tract}}$$

$d_2$ : diamètre du boulon central  
 $\sigma_{\text{tract}}$ : effort unitaire à la traction

Si on réalise le boulon avec l'acier A48 de résistance minimale de  $4800 \text{ kgf/cm}^2$  et de contrainte admissible  $\sigma_{\text{at}} = 1000 \text{ kgf/cm}^2$

Le diamètre du boulon sera:

$$d_2 = \left( \frac{4R_2}{\pi \sigma_{\text{at}}} \right)^{1/2} = \frac{4 \cdot 4453}{\pi \cdot 1000}$$

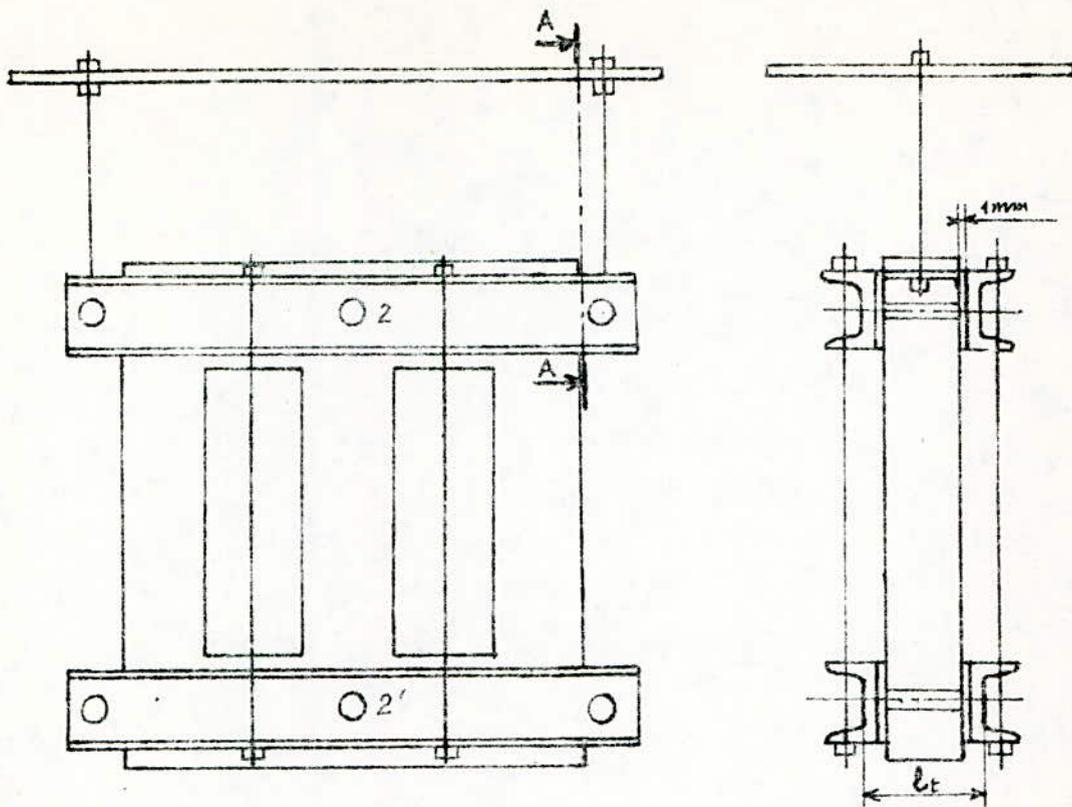
$$d_2 = 2,38 \text{ cm}$$

Le diamètre normalisé immédiatement supérieur est

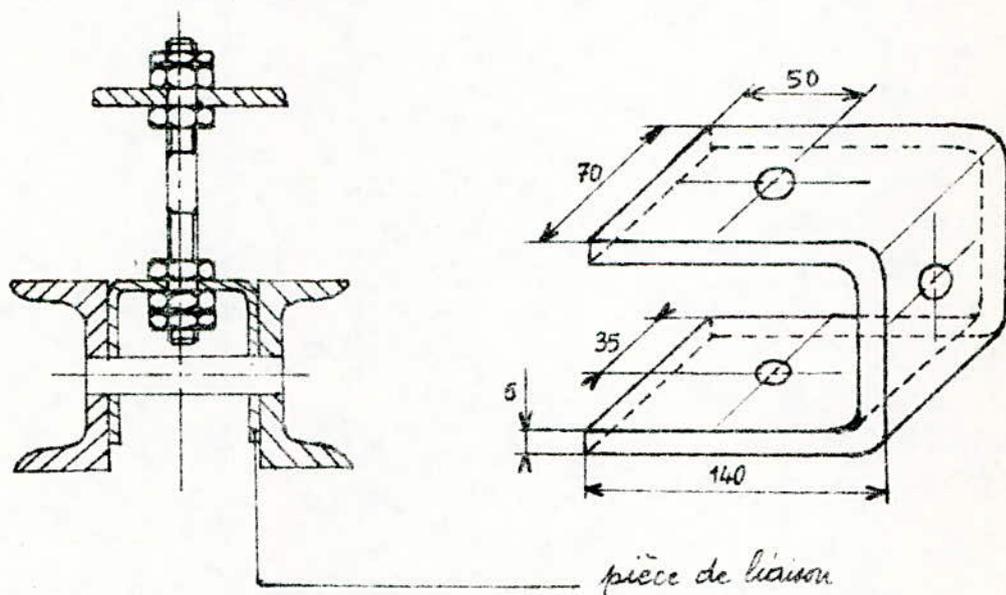
$$d_{2\text{ar}} = 2,4 \text{ cm}$$

#### - Les tirants

La partie démontable est attachée au couvercle par deux tirants courts. Les poutres inférieure et supérieure sont reliées elles aussi par quatre tirants qui servent à la fois, à serrer les relances contre les colonnes et à soulever le circuit magnétique. (voir figures ci-dessous)



Détail du montage des tirants (coupe AA)



pièce de liaison

fig I.7.3

Chaque tirant court supporte donc la moitié du poids de la partie décurvable et est donc soumis à la traction.

Poids de la partie décurvable :

$$G_{dec} = G_{cu} + G_{cm} + G_{po}$$

avec  $G_{po} = \text{poids total des poutres} = 4 \cdot l_p \cdot q_{po}$

$G_{po}$ : poids linéique = 22 Kg/m.

$$G_{po} = 4 \cdot 1,17 \cdot 22$$

$$G_{dec} = 367,92 + 939,8 + 103$$

$$G_{po} = 103 \text{ Kgf}$$

$$G_{décu} = 1410,7 \text{ Kgf}$$

Diamètre du tirant en acier A48:

$$d_t = \left( \frac{4G_{décu}}{(2 \pi \sigma_{at})} \right)^{\frac{1}{2}} \equiv \left( \frac{4 \cdot 1410,7}{(2 \pi \cdot 1000)} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$d'_t = 0,95 \text{ cm} = d_t$$

On choisit des tirants de diamètre

$$d'_t = 1 \text{ cm}$$

La partie des tirants comprise entre les poutre est isolée à l'aide de tubes en bakélite.

Vérification de la tenue de l'isolant des boulons au cisaillement (voir figures I.7.2)

La zone de l'isolant la plus sollicitée à l'effort de compression est celle qui traverse la poutre. Examinons si l'isolant résiste à cette compression:

Effort maximal supporté par le papier bakélinisé  $\sigma_{ais} = 250 \text{ Kgf/cm}^2$

L'effort auquel est soumis effectivement l'isolant:

$$\sigma_{is} = \frac{G_{dec}}{2 \cdot \frac{A_{is}}{2}} \quad \left( \frac{G_{dec}}{2} \text{ car le poids repose sur les deux boulons centraux } 2 \text{ et } 2' \text{ voir fig I.7.3} \right)$$

Calcul de  $A_{is}$ :

$A_{is}/2$ : on considère que seule la moitié de la surface fait le contact.

longueur du tube isolant:  $l_t = l_j + 2e + 0,2$ . (voir fig I.7.3)

$$l_t = 20,59 + 2 \cdot 0,8 + 0,2 = 22,39$$

$$l_t = 22,39 \text{ cm}$$

diamètre du tube:  $d_t = 2,4 \text{ cm}$

d'où la surface latérale du tube soumise à la compression

$$A_{is} = \pi d_t \cdot l_t = \pi \cdot 2,4 \cdot 22,39$$

$$A_{is} = 168,7 \text{ cm}^2$$

$$\text{et } \sigma_{is} = \frac{1410,7}{168,7}$$

$$\sigma_{is} = 8,4 \text{ Kgf/cm}^2$$

On a bien  $\sigma_{is} < \sigma_{ais}$

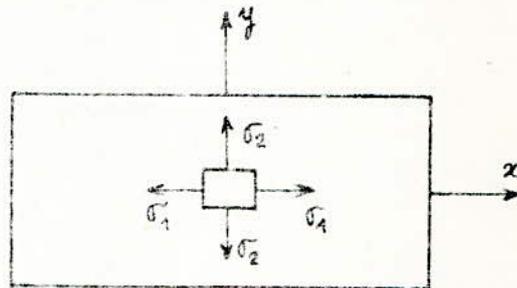
Calcul mécanique de la cuve.

L'épaisseur choisie pour la paroi est en général suffisante. Les parois de la cuve sont renforcées par des barres formant une croix pour augmenter leur rigidité car la tôle ondulée a en général une résistance mécanique plus faible que la tôle lisse de même épaisseur.

-- flexion subie par le fond de la cuve.

Le fond de la cuve est la partie la plus sollicitée aux efforts pour le calcul de la flèche considérons le modèle suivant :

On suppose la pression sur la plaque uniforme. Cette pression est due à la somme des poids de l'huile, du poids de la partie découvrable, du poids de la partie latérale de la cuve et du poids propre de la plaque.



Cette plaque est réalisée en acier A33 elle a pour dimensions :

$$A = 132 \text{ cm}$$

$$B = 52 \text{ cm}$$

$$\text{épaisseur } \delta_f = 0,6 \text{ cm}$$

$$\text{Surface de la cuve : } S = A \cdot B = 132 \cdot 52$$

$$S = 6864 \text{ cm}^2$$

$$\text{Poids de la plaque : } G_f = \gamma_A \cdot S \cdot \delta_f$$

$$\gamma_A : \text{masse volumique de l'acier}$$

$$\gamma_A = 7,9 \text{ kg/dm}^3$$

$$G_f = 7,9 \cdot 6864 \cdot 0,06$$

$$G_f = 32,5 \text{ kg}$$

Force exercée sur le fond de la cuve

$$G_f = G_{\text{décou}} + G_R + G_f + G_{co} + G_{pa}$$

$G_{co}$  : poids du couvercle déposé du matériel auxiliaire (isolateurs, réservoir d'huile...)

$$\text{Surface du couvercle } S'_{cc} : S'_{cc} = A' \cdot B' = 164,5 \cdot 84,5$$

$$S'_{cc} = 13900 \text{ cm}^2$$

$$\text{d'où } G_{co} = \gamma_A \cdot S'_{cc} \cdot \Delta_c = 7,9 \cdot 13900 \cdot 1 \cdot 10^{-3}$$

$$G_{co} = 109,8 \text{ kgf}$$

$G_{pa}$  : poids de la surface latérale du transformateur.

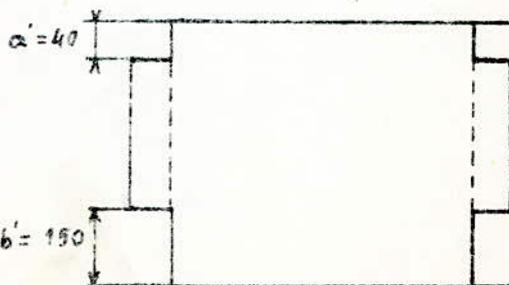
$$\text{Surface des ondules : } S_{co} = 27,8 \text{ m}^2 = 278000 \text{ cm}^2$$

Surface des parois non ondulées  $S_{pn}$

$$S_{pn} = 2(A+B)(a'+b')$$

$$S_{pn} = 2(132+52)(4+15)$$

$$S_{pn} = 6992 \text{ cm}^2$$



Surface totale de la paroi latérale :  $S_{pt}$

$$S_{pt} = S_{co} + S_{pn} = 278000 + 6992$$

$$S_{pt} = 284992 \text{ cm}^2$$

et  $G_{pa} = \gamma_A \cdot S_{pt} \cdot \Delta p$   $\Delta p = \text{épaisseur de la paroi}$

$$G_{pa} = 7,9 \cdot 284992 \cdot 0,25 \cdot 10^{-3}$$

$$G_{pa} = 562,86 \text{ kgf}$$

$$G_t = 1410,7 + 32,5 + 109,8 + 562,86 + 619,7$$

$$G_t = 2735 \text{ kgf}$$

Pression sur le fond de la cuve :

$$P_f = \frac{G_t}{S} = \frac{2735}{6864}$$

$$P_f = 0,398$$

La flèche au milieu de la plaque est donnée par :

$$f_1 = \alpha \frac{P_f B^4}{E (\Delta p)^3}$$

$$\begin{aligned} B &: [\text{cm}] \\ \Delta p &: [\text{cm}] \\ P_f &: [\text{kgf/cm}^2] \\ f_1 &: [\text{cm}] \end{aligned}$$

$\alpha$  : fonction du rapport  $A/B$  donné par le tableau ci-dessous  
 $E$  : module de Young

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

A/B	$\alpha$	$\beta_1$	$\beta_2$
1	0,0138	0,0229	0,0229
1,5	0,0241	0,0206	0,0368
2	0,0276	0,0140	0,0399
3	0,0279	0,0130	0,0405
4	0,0282	0,0127	0,0409

$$\text{or } A/B = \frac{1320}{520} = 2,538$$

Par interpolation on déduit les différents coefficients :  $\alpha = 0,02776$   
 $\beta_1 = 0,01354$   
 $\beta_2 = 0,04022$

$$\text{Valeur de la flèche : } 0,02776 \frac{0,398 \cdot 52^4}{2,1 \cdot 10^6 \cdot 0,6^3}$$

$$f_1 = 0,178 \text{ cm}$$

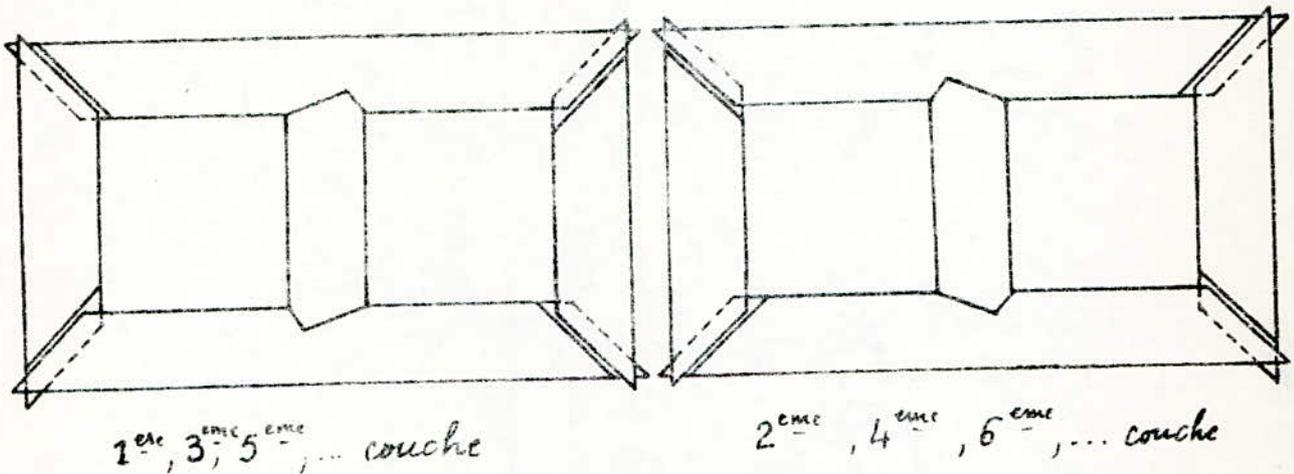
$f_1$  est en fait légèrement supérieur à cause du poids du matériel auxiliaire dont on n'a pas tenu compte donc  $f_1 \approx 0,18 \text{ cm}$

# CHAPII Etude de la technologie

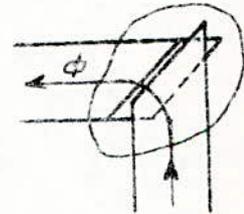
## II.1. Technologie du montage

### 1.1 Le circuit magnétique

La disposition la plus répandue pour les transformateur triphasé est celle qui est donnée par la figure ci-dessus. Les tôles sont assemblées avec joints enchevêtrés coupés à  $45^\circ$ . On adopte ce découpage pour réduire au maximum les pertes supplémentaires; en effet, les performances des tôles laminées à froid diminuent très vite à mesure que la direction du champ s'écarte de la direction du laminage des tôles.



zone des pertes supplémentaires dues au passage du flux  $\Phi$  transversalement à la direction du laminage.



### 1.2. Montage proprement dit.

- Premier assemblage des tôles à plat en alternant la disposition des tôles comme l'indique la figure ci-dessus.
- Serrage des tôles entre les profilés en U avec des boulons. Une couche de papier presspahn isole chaque profilé des tôles.
- Fixation des tirants sur les poutres, la partie des tirants comprise entre les profilés est enfoncée dans un tube isolant.
- Démontage des tôles de la culasse supérieure une à une.
- Introduction des cylindres en bachelite dans les moyeux.
- Places des cales de réparation entre moyeu et cylindre en bachelite pour serrer les tôles et éviter de déchirer les gradins.
- Introduction d'un cylindre isolant de longueur  $l_0_1 = l_0_2 = 4$  cm et d'épaisseur  $a_1 = 2,18$  cm servant en même temps de pièce de serrage et d'isolation de la bobine des tôles de la culasse.

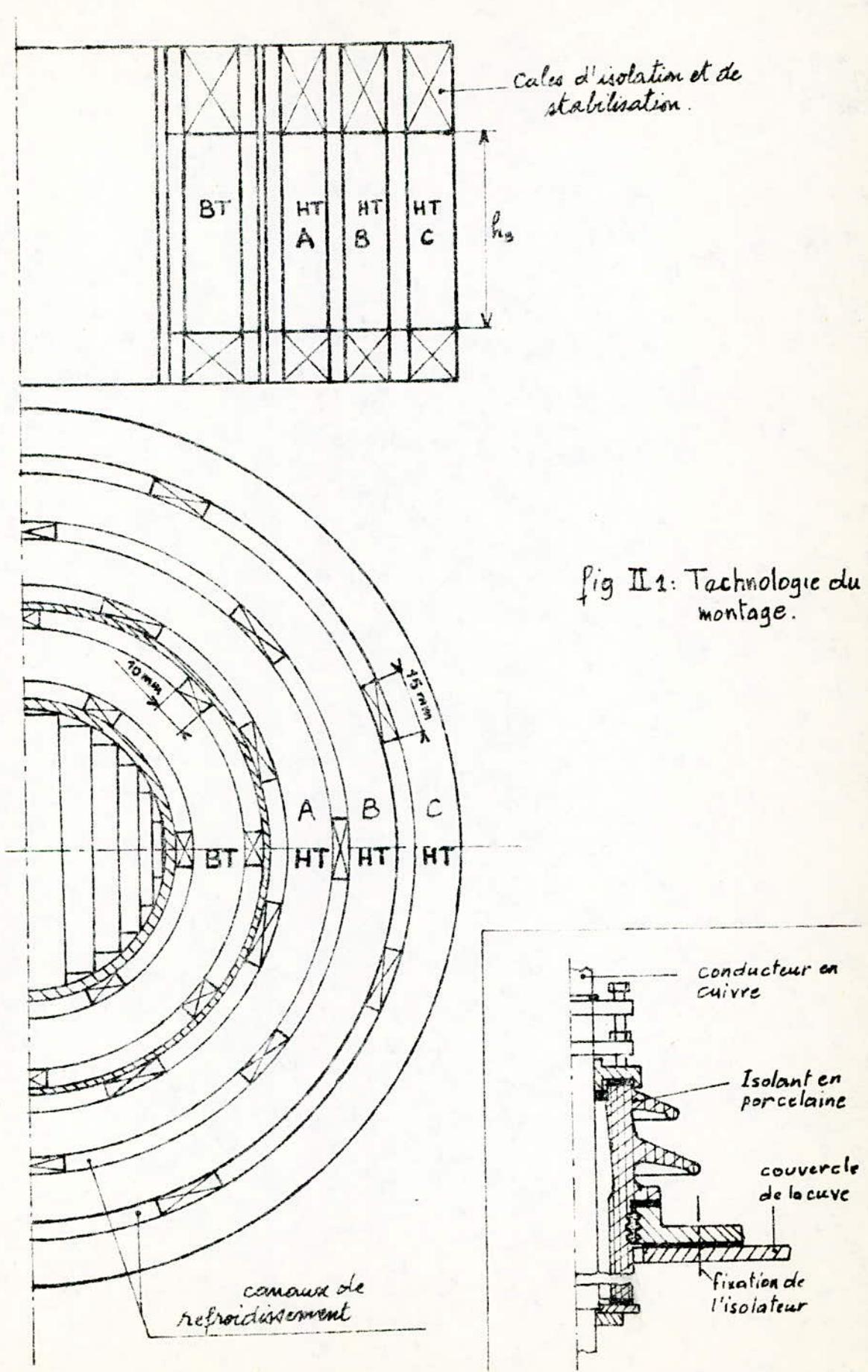


fig II.1: Technologie du montage.

fig. II.2.4. Isolateur

- Introduction de cales (6 cales) de largeurs 1 cm et de hauteur  $H_b = 44,25$  cm

- Mise en place de l'enroulement BT en laissant des sorties

suffisamment longues pour les branchements.

- Introduction de nouveau, de 8 cales de mêmes dimensions que les précédentes.

- Introduction d'un cylindre isolant de 0,4 cm d'épaisseur

- Introduction de 8 cales de largeur 1,5 cm et de hauteur  $H_b$

- Introduction d'un cylindre de longueur  $l_{o1} = 4$  cm et d'épaisseur

$a_2 = 4,72$  cm

- Introduction de l'enroulement HT avec les sorties suffisamment longues pour permettre le branchement.

- De la même façon que pour la partie inférieure, les enroulements sont isolés de la culasse supérieure par des cylindres identiques.

- Monter les tôles de la culasse supérieure une à une

- Placer les poutres en U isolées de la culasse

- Serrer le circuit magnétique

- Liaison de la partie décuvable avec le couvercle à l'aide de tirants et de pièces de liaison (voir fig I.7.3)

## II 2. APPAREILLAGE AUXILIAIRE

Ce sont les appareils qui servent à la protection, à la régulation et à la manutention.

### 2.1 Conservateur d'huile. (fig II.2.1)

Au contact de l'air l'huile chaude s'oxyde et s'humidifie, d'où une perte des propriétés diélectriques de l'huile. La température de l'huile étant variable, les coefficients de dilatation de l'huile et de la cuve étant différents, il en résulte une variation du niveau d'huile. L'huile se dilate. Il faut donc de une ouverture à la cuve.

Le conservateur sert donc de réservoir d'expansion. Il a un volume d'environ 10% du volume de la cuve. Seule la surface d'huile du réservoir est en contact avec l'air d'où une oxydation réduite.

### 2.2 Protection contre tous les défauts internes: relais Buchholz (fig II.2.2)

Tout accident interne se traduit par un dégagement de gaz; le relais Buchholz détecte ces dégagements et agit soit sur une alarme en cas de faible dégagement, soit sur le déclenchement du disjoncteur en cas de dégagement important.

### 2.3 Régulation

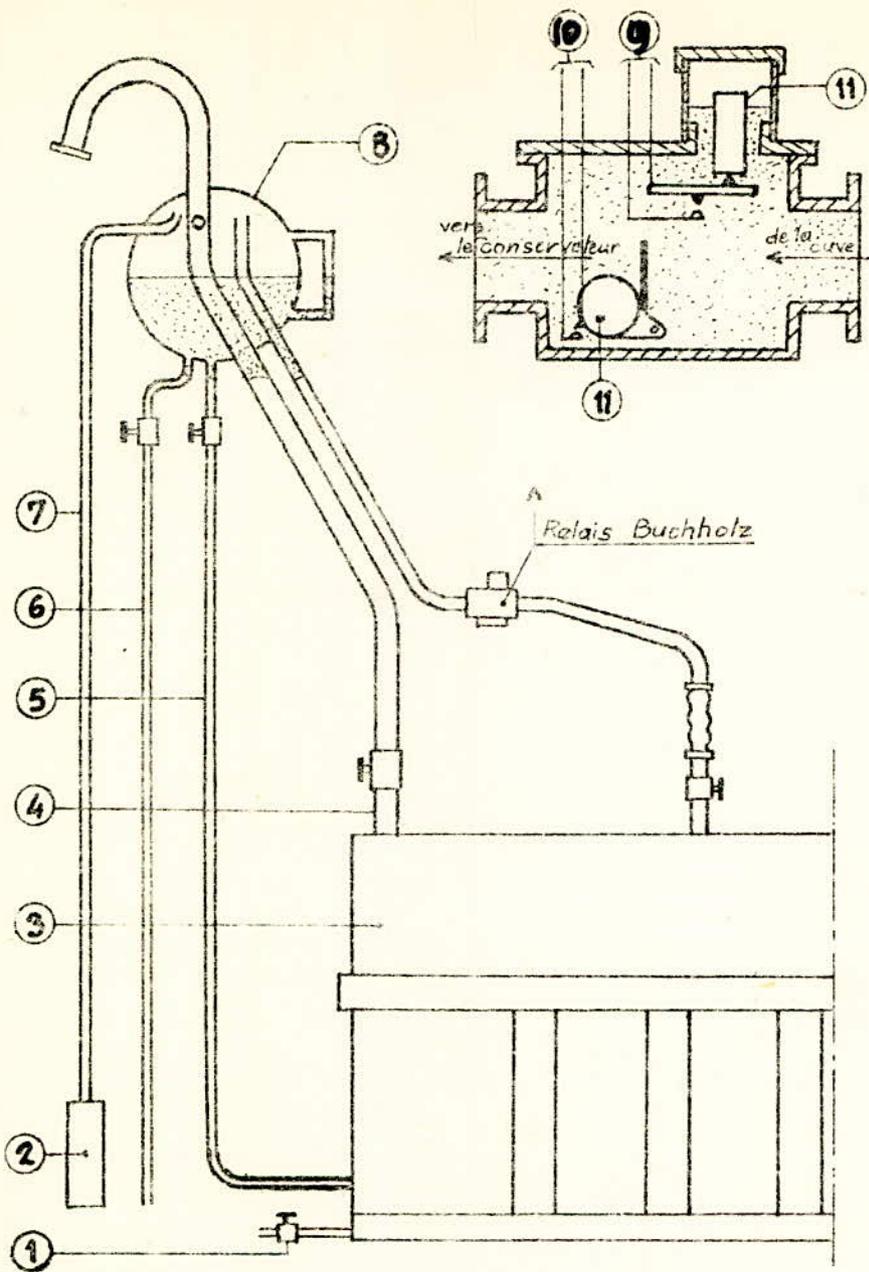


fig: II.22.

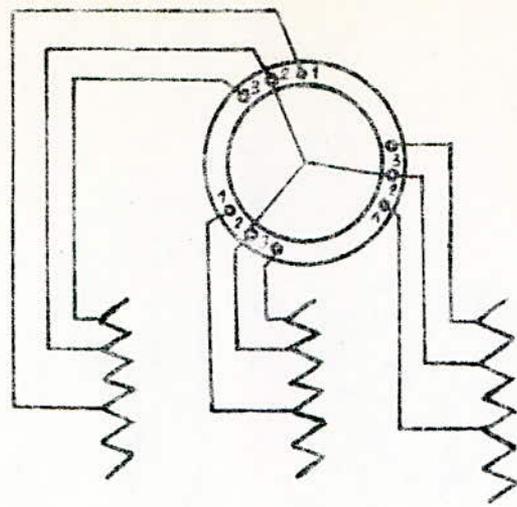
D'après Savoisienné

fig: II.21.

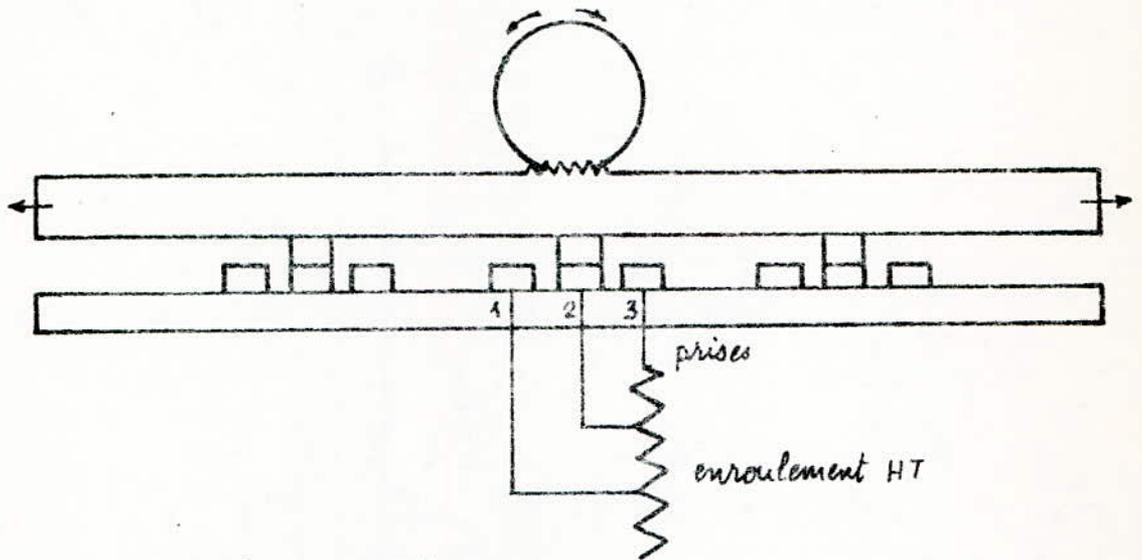
- ① Robinet de vidange de la cuve
- ② Dessicateur
- ③ cuve
- ④ Grosse tubulure de securite avec joint à l'extremité
- ⑤ Tubulure de retour
- ⑥ Vidange du conservateur
- ⑦ Tubulure de communication avec l'air
- ⑧ Conservateur d'huile
- ⑨ Vers la sonnerie d'alarme
- ⑩ Vers le disjoncteur
- ⑪ Flotteurs

Elle consiste à compenser les variations de la tension du réseau.  
Le réglage de la tension se fait en général sur l'enroulement HT car  
il comporte beaucoup de spires et il peut s'effectuer de deux façon:

- a) Réglage à vide au moyen d'un ajusteur de tension
- b) Réglage en charge au moyen d'un regleur. voir figures ci-dessous.



Ajusteur de tension  
à vide.



régleur en charge.

## 2.4 Traversées isolantes

Les traversées isolantes ont pour but d'assurer la liaison électrique entre les extrémités des enroulements primaires et secondaires d'une part, et les lignes d'arrivée et de départ d'autre part (voir exemple d'isolateur de 30kV fig II.2.4)

## 2.5 Manutention

Le couvercle porte des anneaux de levage.  
La cuve repose sur un châssis formé de poutres en U et munis de galets.

## CONCLUSION

Au stade actuel du développement industriel de l'Algérie le projet de construction d'un transformateur ne pourra être réalisé. Notre pays ne possède pas encore d'usines de construction de machines électriques. Quelle est donc l'utilité d'un tel projet? le projet reste quand même un document pour les étudiants et ingénieurs qui veulent étudier un transformateur. Cet ouvrage constitue, avec d'autres, une bibliothèque pour une future industrie de construction de machines électriques dans notre pays. Mais, c'est avant tout, l'étudiant qui fait le projet qui retire le maximum de connaissances. En effet, en plus de l'étude détaillée qu'il a effectuée sur la construction du transformateur, l'étudiant revoit aussi toute sa théorie et étudie son comportement dans un réseau interconnecté. Ces connaissances lui seront d'une grande utilité pour l'entretien et l'utilisation d'un transformateur et partant, du réseau de distribution en général.

## BIBLIOGRAPHIE

1. Notes de cours de construction des machines électriques.
2. LIWSCHITZ : Calcul des machines électriques tome I et II
3. M. KOSTENKO et L. PIOTROVSKI : machines électriques tome I
4. H. BOYER; M. NORBERT et R. PHILIPPE : construction du matériel électrique tome III
5. C. GUILBERT : Calcul et réalisation des transformateurs
6. Revue générale de l'électricité (R G E), revue B.B.C