



Toute ma reconnaissance à M<sup>r</sup> PARLOG, mon promoteur,  
pour son aide tout au long de ce travail.

Je remercie également tous les enseignants qui  
ont contribué à ma formation et toutes les  
personnes qui m'ont apporté leur aide de  
pres ou de loin.

# TABLE DES MATIERES

- I. Calcul du circuit magnétique et dimensionnement
  - I:1 Calcul préliminaire de dimensions principales
  - I:2 Calcul des enroulements
  - I:3 Calcul définitif du circuit magnétique
  - I:4 Calcul des pertes et du rendement
- II. Calcul thermique
- III. Calcul mécanique
- IV. Parties auxiliaires du transformateur



INTRODUCTION

Les besoins en alimentation électrique devenant de plus en plus importants, la production, le transport et la distribution de cette énergie exigent un développement accru des transformateurs. Ces derniers ont pour rôle la modification de la tension (ou l'intensité) d'un courant alternatif sans nécessiter d'organe en mouvement; d'où leurs noms "transfo-statiques". Par ailleurs signalons que leur réversibilité nous permet une utilisation en abaisseurs ou en éleveurs; aussi leur rôle est très important dans la répartition de l'énergie électrique.

L'objet de notre étude est la construction d'un transformateur triphasé avec l'enroulement BT en feuilles de cuivre.

Ce type de construction se veut une performance dans la stabilité mécanique et de la facilité de main d'œuvre.

Pour cela nous nous contenterons d'une étude détaillée de calculs mécanique et thermique avec des considérations limitées du point de vue technologique.



## CAHIER DE CHARGE.

SUJET : Construction d'un transformateur triphasé avec l'enroulement BT en feuille de Cuivre.

### DONNEES:

Puissance nominale : 150 kVA.

Tension de primaire : 10 kV.

Tension du secondaire : 0,4 kV

Connexion : D Y<sub>0</sub>

Fréquence nominale : 50 Hz.

Pertes à vide :  $P_0 = 460 \text{ W}$

Pertes en court-circuit :  $P_K = 2350 \text{ W}$

Courant à vide :  $I_0 = 2,3\%$

Refroidissement naturel avec l'huile.

Tension de court-circuit :  $U_K = 4\%$ .

# I/ Calcul du circuit magnétique et Dimensionnement.

Par le calcul du circuit magnétique, nous envisageons une approche à la détermination des caractéristiques du transformateur. Néanmoins ces calculs ne réalisent pas une condition suffisante pour une élaboration effective et finale. Aussi, si les résultats obtenus diffèrent des données imposées par le cahier de charge, nous sommes contraints de procéder à des variations de certains paramètres afin d'approcher les dites données.

Cette méthode consiste à :

- un calcul préliminaire déterminant les dimensions principales en référence au cahier de charge.
- un calcul définitif donnant les dimensions des enroulements et toutes les caractéristiques géométriques et électromagnétiques, puis d'établir une comparaison avec les valeurs figurant dans le cahier de charge.
- un calcul des pertes.

## I.1 CALCUL PRELIMINAIRE DES DIMENSIONS PRINCIPALES.

Ce calcul consiste en fixant les données du cahier des charges à déterminer les dimensions principales du transformateur qui sont:

- le diamètre du cercle dans lequel est inscrite la colonne noté  $D$ .
- la hauteur des enroulements  $h_B$ .
- la distance entre les colonnes  $h_F$ .
- la distance entre les enclaves.  $h_F$

on donne aussi les expressions de calcul de la puissance apparente, de la tension de court circuit.

### 1.1 Puissance apparente par colonne.

$$S_c = \frac{S_n}{m_c} \quad S_n: \text{puissance nominale du transformateur} = 150 \text{ kVA}$$

$$m_c: \text{le nombre de colonnes} = 3.$$

#### Application Numérique.

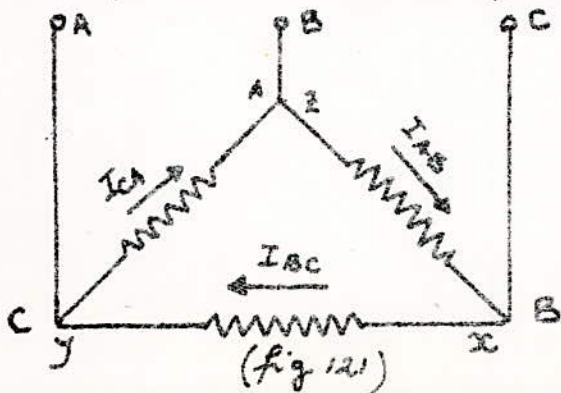
$$S_c = \frac{150}{3}$$

$$S_c = 50 \text{ kVA}$$

### 1.2 Calcul de la tension de phase.

La tension de phase est une tension entre deux phases ou a deux portes de connexion.

- connexion du type triangle.
- connexion du type étoile.
- Le primaire étant couplé en triangle (Fig 1.21).



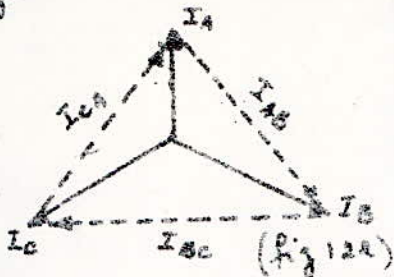
La tension de phase = tension de ligne.

$$U_{f2} = U_e$$

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



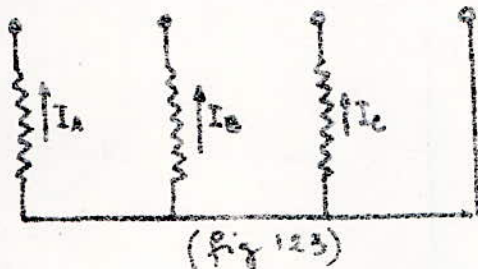
## Diagramme des courants (fig 122).



Le courant de ligne =  $\sqrt{3}$  courant de phase.

$$I_L = \sqrt{3} \cdot I_{f2}$$

Le second étant courté en étoile. (fig 123)



La tension de phase =  $\frac{\text{tension de ligne}}{\sqrt{3}}$

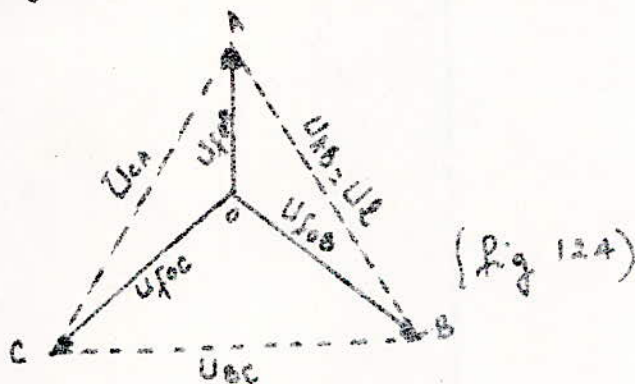
$$U_{f1} = \frac{U_L}{\sqrt{3}}$$

Application numérique :

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

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

## Diagramme des tensions. (fig 124)



$$I_L = I_{f1}$$

$$U_L = \sqrt{3} U_{f1}$$

### 1.3 Calcul des courants de phase.

Le courant de phase est le rapport de la puissance apparente par phase sur la tension de phase. Dans le cas d'un transformateur à trois phases et trois colonnes.

$$S_c = S_f = \frac{S_w}{3}$$

Soient :  $I_{f2}$  le courant de phase du primaire

$U_{f2}$  la tension de phase du primaire

$I_{f1}$  le courant de phase du secondaire

$U_{f1}$  la tension de phase du secondaire

on a les expressions suivantes :

$$I_{f2} = \frac{S_c}{U_{f2}}$$

$$I_{f1} = \frac{S_c}{U_{f1}}$$

$S_c$  : étant la puissance apparente par colonne.

### Application Numérique.

$$S_c = 50 \text{ KVA}$$

$$U_{f2} = 10 \text{ KV}$$

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

$$I_{f2} = \frac{50}{10} = 5 \text{ A}$$

$$I_{f1} = \frac{50 \cdot 10^3}{230,95} = 216,5 \text{ A}$$

$$I_{f2} = 5 \text{ A}$$

$$I_{f1} = 216,5 \text{ A}$$

#### 1.4 Détermination du diamètre de la Colonne.

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

$$D = 1,0674 \sqrt[4]{\frac{\alpha_r \beta k_A S_c}{k_U^2 B_c^2 U_{kr}}}$$

avec :

$a_r$  : Épaisseur rapportée du canal de fuite (en mètres).

$\beta$  : facteur de vitesse.

$K_R$  : facteur de Rogowski.

$S_c$  : Puissance apparente par colonne (en VA).

$K_u$  : facteur d'utilisation.

$B_c$  : Induction magnétique de crête (en Tesla).

$U_{kr}$  : tension réactive de court circuit rapportée.

#### 1.4.1 Épaisseur rapportée du Canal de fuite $a_r$

$$\text{on a : } a_r = a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3}$$

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

Le facteur  $K$  est fonction de la puissance du transformateur et de la tension la plus grande des enroulements.

Tableau (T<sub>1</sub>) donnant  $K$  en fonction de  $S_c$  et  $U_n$

$S_c$ KVA	< 100	100 ÷ 560	7500 ÷ 560	7500 ÷ 1500
$U_n$ KV	≤ 10	10 ÷ 35	10 ÷ 35	10 ÷ 35
$K$	0,6 ÷ 0,8	0,48 ÷ 0,6	0,4 ÷ 0,6	0,44 ÷ 0,46

Puissance par colonne  $S_c = 50$  KVA

Tension la plus grande  $U_n = 10$  KV

on tire  $K = 0,7$

$$K = 0,7$$



$a_{12}$  : étant la largeur du canal de fuite qui est fonction de la tension d'essai de l'enroulement avec la tension la plus grande.

Tableau T2 donnant  $a_{12}$  pour un transformateur immergé dans l'huile.

$U_n$ (KV)	3	6	10	15	20	35	60	110	220
$a_{12}$ (cm)	0,6 ÷ 1	0,6 ÷ 1	0,8 ÷ 1,2	1 ÷ 1,5	1,2 ÷ 1,8	2,1 ÷ 2,7		8 ÷ 6	22 ÷ 13

Pour  $U_n = 10$  KV on prendra  $a_{12} = 1$  cm

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

Application Numérique.

$$K = 0,7$$

$$S_c = 50 \text{ KVA}$$

$$\frac{a_1 + a_2}{3} = 0,7 \sqrt[4]{50} = 1,86 \text{ cm}$$

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

on a :

$$a_r = 2,86 \text{ cm}$$

### 1.4.2 Facteur de Sveltezza $\beta$ .

Généralement le facteur est définie par la relation :

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

- $D_{12}$  étant le diamètre moyen du canal de fuite.
- $h_B$  la hauteur des enroulements.

Il faut choisir  $\beta$  à ce niveau du canal parce que les grandeurs géométriques  $D_{12}$  et  $h_B$  sont inconnues.

Le choix de  $\beta$  dans le calcul préliminaire représente donc un problème délicat car l'influence de  $\beta$  se retrouve sur le prix général du transformateur par l'influence qu'il a sur la consommation spécifique de matériaux actifs.

Si  $\beta$  augmente le poids de la colonne diminue, de même pour le poids des enroulements; Mais le poids de la culasse augmente, les pertes dues à la charge augmente aussi ainsi que le courant de marche à vide et la tension de court-circuit.

L'augmentation de  $\beta$  attire aussi la diminution de la stabilité thermique vu que les enroulements seraient plus épais donc plus difficiles à refroidir: Ce choix donc est fonction de la puissance apparente par colonne et de la tension la plus grande des enroulements.

Tableau T3 donnant  $\beta$  pour un transformateur avec les enroulements en Cu.

$S_c$ KVA	3 ÷ 2000	3 ÷ 2000	2000 ÷ 20000	2000 ÷ 20000
$U_n$ KV	6 ÷ 10	35	35	110
$\beta_{Cu}$	3,4 ÷ 1,75	3 ÷ 1,8	1,8 ÷ 1,3	2 ÷ 1,5

Notre puissance apparente par colonne  $S_c = 50$  KVA

La tension la plus grande des enroulements  $U_n = 10$  kv

on prendra :

$$\beta = 2,5$$

#### 1.4.3 Facteur de Rogowski .K<sub>R</sub>

Ce facteur  $K_R$  se prend dans le calcul préliminaire égal 0,95.

Le calcul exact se fait après avoir défini les dimensions principales et les dimensions des enroulements.

$$K_R \approx 1 - \frac{1}{2\pi} \frac{2a_{12} + a_1 + a_2}{h_B}$$

tout calcul fait on trouve :

$$K_R = 0,95$$

#### 1.4.4 Induction magnétique dans la colonne B<sub>c</sub>

L'induction magnétique  $B_c$  est choisie en fonction de la puissance du transformateur et en fonction du type de tôle utilisée par référence à un transformateur à peu près semblable déjà construit



et qui a donné toutes les satisfactions dans la pratique industrielle.  
L'Induction  $\hat{B}_c$  représente, donc, un facteur de matériau des plus importants.

Des valeurs relativement petites de l'induction conduisent à des transformateurs plus volumineux, avec une consommation de matière première importante et donc un prix de revient assez élevé.

Le choix des valeurs trop élevées diminue la consommation de matériaux mais peut conduire à des transformateurs avec un circuit magnétique relativement saturé donc qui exigera un courant de marche à vide important et en même temps des pertes dans le circuit magnétique relativement élevées.

Le choix optimal ne pourrait être fait qu'après le calcul de plusieurs variantes.

Le tableau donne des indications sur des valeurs couramment rencontrées en pratiques.

Tableau T4 donnant  $\hat{B}_c$  en fonction de la puissance du Transformateur et du choix de Tôle utilisée.

S (KVA)	10 ÷ 50	75 ÷ 250	315 ÷ 600	630 ÷ 1000	> 1000
B[0] Tôle Laminée à Chaud	1,1 ÷ 1,35	1,41 ÷ 1,46	1,42 ÷ 1,47		1,43 ÷ 1,48
B[0] Tôle Laminée à Froid	1,25 ÷ 1,55	1,55 ÷ 1,65	1,62 ÷ 1,68	1,63 ÷ 1,69	1,69 ÷ 1,7

et pour puissance du transformateur  $S_n = 150$  KVA pour des tôles laminées à froid on prendra

$$\hat{B}_c = 1,6 \text{ T}$$

### 1.4.5 Facteur d'utilisation $K_U$ .

$K_U$  est donné par la relation suivante :

$$K_U = K_g \cdot K_r$$

$K_g$  : Facteur géométrique =  $\frac{\text{Section apparente de fer}}{\text{Section du cercle}}$

$K_r$  : Facteur de remplissage =  $\frac{\text{section réelle de fer}}{\text{Section apparente de fer}}$

#### a) Facteur géométrique $K_g$ .

La colonne ne peut pas être réalisée avec une section circulaire à cause de la main d'œuvre trop grande qui serait demandée et des problèmes qui se poseraient pour l'organisation d'une fabrication où il n'y a pas deux tôles de largeurs égales.

Du point de vue pratique c'est la réalisation des colonnes à gradins qui représente le compromis.

$K_g$  dépend donc du nombre de gradins dont est réalisé la colonne et de la puissance apparente par colonne du transformateur.

Tableau T5 donnant  $K_g$  en fonction du nombre  $n_g$  et de la puissance apparente par colonne.

$S_c$ KVA	< 5	5 ÷ 15	15 ÷ 45	45 ÷ 5000
mbre de gradins $n_g$	2	4	5	6
$K_g$	0,786	0,886	0,91	0,93

Pour la puissance apparente par colonne  $S_c = 50$  KVA correspond un nombre de gradins  $n_g = 6$  donc à  $K_g = 0,93$



## b/ Facteur de Remplissage $K_r$

Le facteur de remplissage  $K_r$  est fonction du type d'isolation de la tôle et de l'épaisseur de la tôle.

Les tôles utilisées actuellement sont des tôles laminées froid avec isolation au carlit.

Tableau T6 donnant les valeurs de  $K_r$

S tôle (mm)	isolation avec papier	isolation au Carlit.
0,5	0,875	0,97 ÷ 0,98
0,35	0,85	0,94 ÷ 0,95
0,28		0,93 ÷ 0,94

Pour la tôle d'épaisseur 0,35 mm on aura

$$K_r = 0,94$$

### Application Numérique

$$K_g = 0,93$$

$$K_r = 0,94$$

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

$$K_u = 0,874$$



La tension réactive de court-circuit est donnée par la relation :

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

$U_k$  : tension de court circuit donnée par le cahier de charge  $U_k = 4\%$

$U_{ka}$  : composante active qui est donnée par la relation :

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

### Application Numérique

$$P_k = 2,35$$

$$S_n = 150 \text{ KVA}$$

$$U_{ka} = \frac{2,35}{150} = 1,56\%$$

$$U_{kr} = \sqrt{4^2 - (1,56)^2}$$

$$U_{kr} = 3,58\%$$

Après avoir déterminé tous ces paramètres, on peut calculer le diamètre de la coque

$$D = 0,674 \sqrt{\frac{\alpha \cdot \beta \cdot K_R \cdot S_c}{K_D^2 \cdot B_c^2 \cdot U_{kr}}}$$

### Application Numérique

$$\alpha_r = 2,86 \text{ cm} = 0,0286 \text{ m}$$

$$\beta = 2,5$$

$$K_R = 0,95$$

$$S_c = 50 \text{ KVA} = 50 \cdot 10^3 \text{ VA}$$

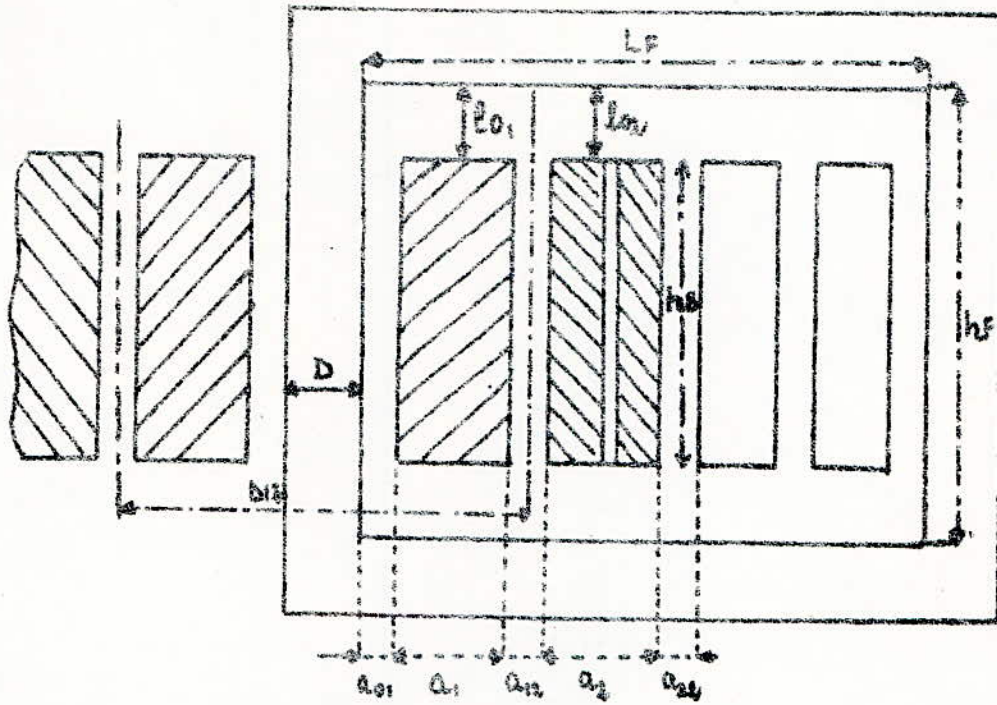


Fig. A Explicative pour les toles principales  
du transformateur.

$$K_u = 0,874$$

$$B_c = 1,6 T$$

$$U_{kr} = 3,68\% = 0,0368 V$$

$$D = 1,0674 \sqrt[4]{\frac{2,86 \cdot 10^3 \cdot 2,5 \cdot 0,95 \cdot 50 \cdot 10^3}{0,874^2 \cdot 1,6^2 \cdot 0,0368}}$$

tout calcul fait on trouve.

$$D = 15,73 \text{ cm}$$

### 1.5 calcul du diamètre du canal de fuite

Le diamètre du canal de fuite est donné par la relation.

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

$a_{01}$  est la distance entre la colonne et l'enroulement primaire.

A cette étape du calcul préliminaire, on doit choisir cette distance en fonction de la tension nominale de l'enroulement primaire  $U_{1n}$ .

Tableau T7 donnant  $a_{01}$  en fonction de  $U_{1n}$

$U_{1n}$ (KV)	$\leq 1$	3	6	10	15	20	35
$a_{01}$ (cm)	0,5	1,2	1,2 ÷ 1,5	1,8	1,8 ÷ 2	2,1 ÷ 2,3	3

pour la tension  $U_{1n} = 0,4 \text{ kV}$  nous conduit

à prendre :

$$a_{01} = 0,5 \text{ cm}$$



$a_1$  est l'épaisseur de l'encoulement primaire et elle doit être estimée  
Sa valeur exacte sera obtenue après le calcul définitif des enroulements

$$a_1 = K_{a1} \sqrt[4]{S_c}$$

avec :

$$K_{a1} = \begin{cases} 0,55 & U_{2n} \leq 35 \text{ kV} \\ 0,45 & U_{2n} \leq 110 \text{ kV} \end{cases}$$

La tension  $U_{2n} = 10 \text{ kV} \leq 35 \text{ kV}$

alors

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

Application Numérique

$$S_c = 50 \text{ kVA}$$

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

$$a_1 = 0,55 \sqrt[4]{50}$$

on trouve :

$$a_1 = 1,462 \text{ cm}$$

on peut déterminer le diamètre du canal de fuite  $D_{12}$

$$D = 15,73 \text{ cm}$$

$$a_{01} = 0,5 \text{ cm}$$

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

$$D_{12} = 15,73 + (2 \times 0,5) + (2 \times 1,462) + 1$$

$$D_{12} = 20,654 \text{ cm}$$

## I.2 CALCUL DES ENROULEMENTS.

Le calcul repose sur le calcul des nombres de spires, de la section des conducteurs qui constituent la spire, le choix du type d'enroulement et le calcul des dimensions géométriques des enroulements.

### 2.1. calcul de la section du fer.

La section du fer est donnée par la relation.

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

D : diamètre de la colonne :  $D = 15,73 \text{ cm}$ .

$K_u$  : facteur d'utilisation :  $K_u = 0,874$ .

### Application Numérique.

$$S_{\text{fer}} = 0,874 \frac{\pi (15,73)^2}{4}$$

$$S_{\text{fer}} = 169,8 \text{ cm}^2$$

### 2.2 Tension de spire par phase.

Avec l'induction magnétique choisie et la section de fer calculée ainsi que le calcul du diamètre on peut calculer la tension de spire par la relation.

$$U_{\text{sp}} = \sqrt{2} \pi f S_{\text{fer}} \cdot \hat{B}_c$$

$f$  : étant la fréquence égale à 50 Hz.

## Application Numérique

$$U_{sp} = \sqrt{2} \cdot 50 \cdot \pi^2 (15,73)^2 \times 0,874 \cdot 1,6 \cdot \frac{1}{4}$$

$$U_{sp} = 6,03 \text{ V}$$

Elle est donnée dans la littérature de spécialiste pour les transformateurs ayant des puissances nominales :

$$100 \text{ KVA} \leq S_n \leq 250 \text{ KVA}$$

$$4,3 \text{ V} \leq U_{sp} \leq 7 \text{ V}$$

Cette tension de spire est la même au primaire et au secondaire vu que le champ magnétique, traversant le fer est le même partout.

### 2.2.1 Nombre de spires de l'enroulement BT

Le nombre de spires dépend de la tension de spires par phase et de la tension nominale de l'enroulement BT.

$$w_1 = \frac{U_{f1}}{U_{sp}}$$

$w_1$  : étant le nombre de spires de l'enroulement BT

$U_{f1}$  : tension de phase de l'enroulement BT = 230,95V

$U_{sp}$  : tension de spire égale à 6,03V

## Application Numérique

$$w_1 = \frac{230,95}{6,03} = 38,3 \text{ spires}$$

on prend :

$$w_{100} = 38 \text{ sp}$$

$w_1$  n'est pas un nombre entier, on a fait l'arrondissement à une spire ou demi-spire :  $w_{100} = 38 \text{ sp}$ .



### 2.2.2 Tension de spire recalculée.

Après l'arrondissement du nombre de spires  $w_1$ , on peut recalculer la tension de spire ainsi que l'induction magnétique  $\hat{B}_c$ .

$$U_{sp} = \frac{U_{f1}}{w_1}$$

#### Application Numérique.

$$U_{f1} = 230,95$$

$$w_1 = 38$$

$$U_{sp} = \frac{230,95}{38}$$

$$U_{sp} = 6,08V$$

On voit bien que la tension de spire recalculée est à peu près égale à la tension de spire calculée précisément.

### 2.2.3 Induction magnétique $\hat{B}_c$ recalculée

$$\hat{B}_{cr} = \frac{U_{sp}}{4,44 \cdot f \cdot S_r}$$

#### Application Numérique.

$$\hat{B}_{cr} = \frac{6,08}{4,44 \times 50 \times 169,8 \cdot 10^{-4}}$$

$$\hat{B}_{cr} = 1,61T$$

L'induction magnétique est bien choisie dans le calcul préliminaire et elle est égale à l'induction recalculée.

## 2.2 Densité du courant.

La densité' du courant dépend de la puissance nominale du transformateur et de la tension de spire.

Une relation de calcul de la densité' moyenne peut être :

$$J_m = 7,34 \frac{1}{K_p K} \frac{P_k U_{sp}}{S_n D_{12}}$$

$P_k$ : des pertes dues à la charge et sont dues principalement aux pertes dans les enroulements par effet Joule et aux pertes supplémentaires.

$$P_k = P_j K_{pk}$$

$P_j$ : Pertes par effet Joule dans les enroulements.

$K_{pk}$ : facteur de pertes supplémentaires.

Tableau T8 donnant  $K_{pk}$  en fonction de la Puissance Nominale du Transformateur.

$S_n$ KVA	30	180	600	1000	1600	2000	2500	4000	6000	10.000
$K_{pk}$	1,02	1,025	1,05	1,06	1,07	1,075	1,08	1,09	1,11	1,125

Puissance nominale  $S_n = 150$  KVA

on aura  $K_{pk} = 1,025$

Application Numérique.

$P_k = 2,35$  kW donnée par le cahier de charge.

$U_{sp} = 6,08$  V

$S_n = 150$  KVA

$D_{12} = 20,654$  cm

$$J_{m}^w = 7,34 \frac{1}{1,023} \frac{2,35 \times 6,08}{150 \times 20,654 \cdot 10^{-2}}$$

tout calcul fait on trouve.

$$J_{m}^w = 3,30 \text{ A/mm}^2$$

La valeur de la densité trouvée se trouve bien dans la limite faite par le spécialiste pour les transformateurs immergés  $J_m^w \in [1,5 - 4,5] \text{ A/mm}^2$ .

## 2.4 Calcul des sections des Conducteurs.

le type de matériel choisi pour les enroulements est le cuivre.

### a) Section du conducteur de l'enroulement B.T

La section du conducteur  $S_{w_1}$  est donnée par la relation

$$S_{w_1} = \frac{I_{f_1}}{J_m}$$

$J_m$  : étant la densité du courant.

$I_{f_1}$  : étant le courant de phase de l'enroulement B.T.

### Application Numérique.

$$I_{f_1} = 216,5 \text{ A}$$

$$J_m = 3,30 \text{ A/mm}^2$$

$$S_{w_1} = \frac{216,5}{3,30} = 65,60 \text{ mm}^2$$

$$S_{w_{1,av}} = 66 \text{ mm}^2$$

On peut recalculer la densité du courant après avoir arrondi la section de l'enroulement basse tension.



Densité du courant recalculé.

$$J_{mr} = \frac{I_{f1}}{S_{w, err}}$$

$$= \frac{216,5}{66} = 3,28 \text{ A/mm}^2$$

La densité recalculée est très peu différente de celle choisie dans le calcul préliminaire, et cette densité on la considère comme étant la même dans les deux enroulements.

5/ Section des conducteurs de l'enroulement H.T.

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

$I_{f2}$ : courant de phase de l'enroulement HT

$J_m$ : densité du courant.

$S_{w2}$ : Section des conducteurs de l'enroulement HT

Application Numérique.

$$I_{f2} = 5 \text{ A}$$

$$J_m = 3,28 \text{ A/mm}^2$$

$$S_{w2} = \frac{5}{3,28} = 1,524 \text{ mm}^2$$

Les sections des conducteurs circulaires sont généralement normalisées (voir l'annexe) donnant les valeurs des diamètres et de la section dans la construction des machines électriques d'après NFC 31-423

$$S_{w2, err} = 1,539 \text{ mm}^2$$

Notre section  $S_{w2}$  est inférieure à  $6 \text{ mm}^2$  on choisira donc un conducteur de section circulaire.

Densité du courant recalculée.

$$J_{ma} = \frac{5}{1,539} = 3,25 \text{ A/mm}^2$$







## 2.5 Dimensions Géométriques des Enroulements.

### 2.5.1 Calcul de la hauteur de la bobine.

Elle est donnée par la relation :

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

$D_{12}$  : diamètre du canal de fuite = 20,654 cm  
 $\beta$  : facteur de surtension = 2,5

### Application Numérique.

$$h_B = \pi \frac{20,654}{2,5} = 25,94 \text{ cm.}$$

$$h_B = 25,94 \text{ cm}$$

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

### 2.5.2 Calcul des dimensions de l'enroulement BT.

L'enroulement BT est composé d'une feuille de cuivre enroulée en spirale et occupant toute la hauteur de la bobine. Ceci revient à avoir une seule spire par couche et l'enroulement se fera suivant le schéma de la figure 2.521.



Fig. 2.521.

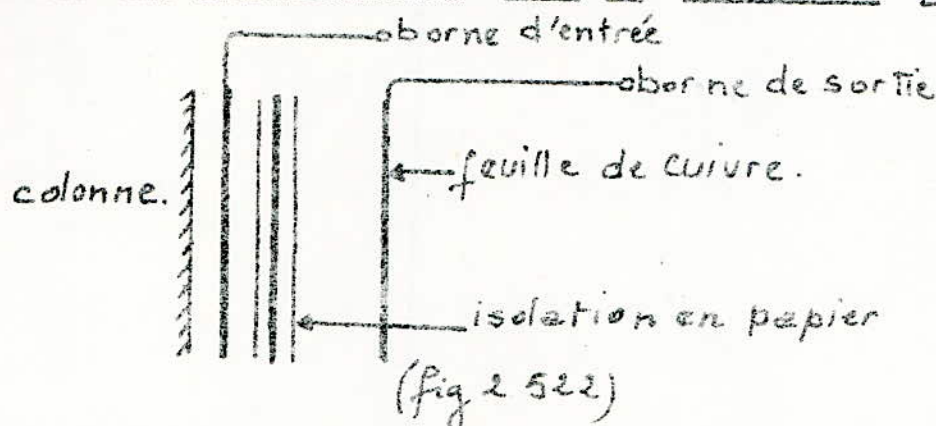
Les connexions sur l'enroulement seront aux bornes, l'une d'entrée et l'autre de sortie.



La borne d'entrée sera soudée sur la première spire du côté de la colonne.

La borne de sortie sera soudée sur la dernière spire du côté de l'espace laissé entre la bobine BT et la bobine HT.

schéma de l'enroulement avec les connexions fig. (2 522)



épaisseur du conducteur:  $a$ .

$$a = \frac{S_w}{h_B}$$

$h_B$ : hauteur de l'enroulement BT = 25,94 cm.

$S_w$ : Section de la spire de l'enroulement BT = 66 mm<sup>2</sup>.

Application Numérique

$$a = \frac{66}{25,94} = 0,25 \text{ mm.}$$

Comme épaisseur d'isolation de la tôle on prendra  $\delta_{is} = 0,12 \text{ mm}$ .

Donc l'épaisseur de l'enroulement BT sera:

$$a_1 = w_1(a + \delta_{is}).$$

$w_1$ : nombre de spires de l'enroulement BT = 38.

$a$ : épaisseur du conducteur. = 0,25 mm

$\delta_{is}$ : isolation de la tôle. = 0,12 mm

Application Numérique.

$$a_1 = 38(0,25 + 0,12) = 1,406 \text{ cm}$$

$$a_1 = 1,406 \text{ cm}$$

Après avoir déterminé  $a_1$ , on peut recalculer le diamètre du canal de fuite ainsi que le facteur de sveltesse.

Diamètre du canal de fuite recalculé :  $D_{12r}$

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

Application Numérique.

$$D = 15,73 \text{ cm}$$

$$a_{01} = 0,5 \text{ cm}$$

$$a_1 = 1,406 \text{ cm}$$

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

$$D_{12r} = 15,73 + (2 \times 0,5) + (2 \times 1,406) + 1$$

tout calcul fait on trouve :

$$D_{12r} = 20,542 \text{ cm}$$

Facteur de sveltesse recalculé  $\beta_r$ .

$$\beta_r = \pi \frac{D_{12r}}{h_B}$$

$D_{12r}$  : diamètre du canal de fuite recalculé = 20,542 cm

$h_B$  : hauteur de l'enroulement BT = 25,94 cm

$$\beta_r = \pi \frac{20,542}{25,94}$$

$$\beta_r = 2,49$$



### 25.3 Calcul des dimensions de l'enroulement HT

La section de la spire du côté HT  $S_{\text{spire}} = 1,539 \text{ mm}^2$ , à celle là correspond un diamètre  $d = 1,4 \text{ mm}$ .

#### Diamètre du conducteur avec isolation $d'$

L'isolation du conducteur se fera avec du papier sous forme de ruban, on en fait que le papier en feuille a une rigidité diélectrique que meilleure.

L'épaisseur totale de l'isolation est fonction de la section du conducteur et de la tension nominale par spire, donc la tension nominale des enroulements.

Tableau Tg donnant les valeurs d'isolation en fonction de la tension nominale de l'enroulement.

$U_n$ (kV)	<10	20	30	40	60	70	80	90	100	120	140	
$\delta_{is}$ (mm)	<20	0,64	0,84	0,84	0,94	1,24	1,44	1,44	1,54	1,64	1,84	2,04
	20-60	0,84	0,94	1,04	1,24	1,44	1,64	1,64	1,74	1,84	2,04	2,24

La tension nominale de l'enroulement  $U_n = 10 \text{ kV}$  correspond à:

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

Le diamètre du conducteur isolé sera donc:

$$d' = d + \delta_{is} \quad d: \text{diamètre du conducteur} = 1,4 \text{ mm}$$

$$\delta_{is}: \text{épaisseur d'isolation} = 0,64 \text{ mm}$$

$$d' = 1,4 + 0,64 = 2,04 \text{ mm}$$

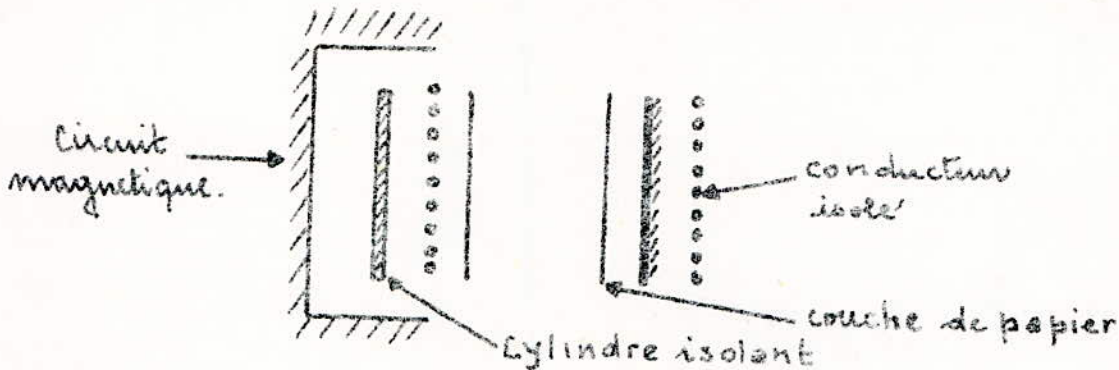
$$\boxed{d' = 2,04 \text{ mm}}$$



## Choix d'enroulement

Le choix de l'enroulement se fait en fonction de la puissance du transformateur et du courant qui passe.

On choisit l'enroulement stratifié qui est réalisé avec un fil rond avec un seul conducteur. Le conducteur isolé est enroulé sur un cylindre isolant en plusieurs couches. Entre deux couches successives, on dispose d'une feuille isolante avec une épaisseur variable qui est fonction de la tension entre les deux couches.



### 2.531 Calcul du nombre de spires de l'enroulement HT.

Le nombre de spires  $w_2$  de l'enroulement HT se calcule par la relation.

$$w_2 = w_1 \frac{U_{f2}}{U_{f1}}$$

$w_1$ : nombre de spires de l'enroulement BT = 38.

$U_{f2}$ : tension de phase de l'enroulement HT = 10KV

$U_{f1}$ : tension de phase de l'enroulement BT = 230,95V

### Application Numérique.

$$w_2 = 38 \frac{10 \cdot 10^3}{230,95} = 1645,3$$

$w_2$  n'est pas entier on fait l'arrondissement à une spire ou demi-spire; on prendra:

$$w_{2arr} = 1645 \text{ spires}$$

Les arrondissements sur  $w_1$  et  $w_2$  peuvent modifier le rapport de transformation  $n = \frac{w_1}{w_2}$  qui ne doit pas différer de  $\pm 0,5\%$  des rapports des tensions nominales de phase.

on peut le vérifier :

$$n = \frac{w_1}{w_2}$$

$$w_1 = 38 \text{ spires}$$

$$w_2 = 1645 \text{ spires}$$

$$n = \frac{38}{1645} = 0,0231$$

faisons le rapport des tensions nominales de phase.

$$n = \frac{U_{f1}}{U_{f2}}$$

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

$$U_{f2}$$

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

$$n = \frac{230,95}{10 \cdot 10^3} = 0,023095 \approx 0,0231$$

Ces rapports ne diffèrent pas de  $\pm 0,5\%$  donc les arrondissements sur  $w_1$  et  $w_2$  sont corrects.

L'enroulement HT porte des prises de réglage ; le nombre de spires qui correspond à la prise la plus grande sera :

$$w'_2 = 1,05 w_2 = 1,05 \times 1645$$

$$\underline{w'_2 = 1727 \text{ spires}}$$

La prise minimale aura un nombre de spires.

$$w''_2 = 0,05 w_2 = 0,05 \times 1645$$

$$\underline{w''_2 = 82 \text{ spires}}$$

a) Repartition des couches.

On aura 13 couches à 120 spires.

2 couches à 83,5 spires qui serviront comme spires de réglage.

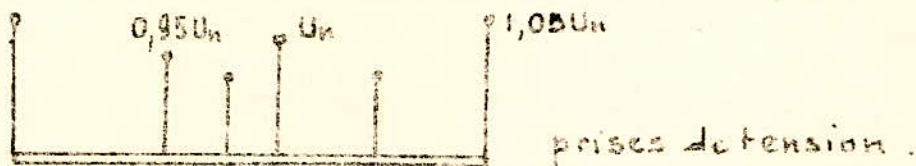
b) Réglage de la tension.

Le fonctionnement du transformateur peut se faire à des valeurs de la tension variable autour de la tension nominale, donc il s'agit de prévoir des prises de réglage.

Le passage d'une prise à une autre peut se faire en charge ou hors tension.

Les prises à changer hors tension sont échelonnées à 2,5% de la tension nominale dans l'intervalle de  $\pm 5\%$ .

La prise médiane est considérée comme principale.



mais le réglage en charge exige un appareil spécial capable de commuter d'une prise à l'autre en pleine charge; C'est le régulateur de prises qui exécute cette opération.



### 2.5.32 Calcul de la hauteur de l'enroulement HT.

Elle est donnée par la relation :

$$h_B = d'(w_p + 1) + d \quad d': \text{diamètre du conducteur isolé} = 2,04 \text{ mm}$$

$w_p$ : Nombre de spires par couches.

$d$ : défrassement nécessaire à la stabilisation de la bobine ( $d = 1 \text{ cm}$ ).

#### Application Numérique.

$$h_B = 2,04 (120 + 1) + 10 = 25,68 \text{ cm}$$

$$h_B = 25,68 \text{ cm}$$

Cette valeur est très près de la valeur de la hauteur BT.

### 2.5.33. Épaisseur de l'enroulement HT.

$$a_2 = d'n_p + \delta_p (n_p - 1) + \delta_r$$

$n_p$ : étant le nombre de couches:  $n_p = 15$

$d'$ : diamètre du conducteur isolé:  $d' = 2,04 \text{ mm}$

$\delta_p$ : isolation entre les couches:  $\delta_p = 0,3 \text{ mm}$

$\delta_r$ : largeur du canal de refroidissement:  $\delta_r = 0,5 \text{ cm}$

#### Application Numérique.

$$a_2 = 2,04 \times 15 + 0,3 (15 - 2) + 5$$

$$a_2 = 3,95 \text{ cm}$$

Le canal de refroidissement se trouve entre la 7<sup>e</sup> et la 8<sup>e</sup> couche

D <sub>21</sub>	7,204	5 cm	8,204
D <sub>22</sub>	1,42 cm		1,63 cm
D <sub>23</sub>			
D <sub>24</sub>			

$$D_{21} = D_{12} + a_{12} = 20,542 + 1 = 21,542 \text{ cm}$$

$$D_{22} = 21,542 + 2 \times 1,42 = 24,382 \text{ cm}$$

$$D_{23} = 24,382 + 1 = 25,382 \text{ cm}$$

$$D_{24} = 25,382 + 2 \times 1,63 = 28,642 \text{ cm}$$

Épaisseur reportée du canal de fuite recalculée.

On avait la relation :

$$a_r = a_{12} + \frac{a_{1r} + a_{2r}}{3}$$

$a_{12}$  : largeur du canal de fuite :  $a_{12} = 1 \text{ cm}$

$a_{1r}$  : épaisseur de l'enroulement BT :  $a_{1r} = 1,406 \text{ cm}$

$a_{2r}$  : épaisseur de l'enroulement HT :  $a_{2r} = 3,95 \text{ cm}$ .

Application Numérique.

$$a_r = 1 + \frac{1,406 + 3,95}{3}$$

$$\underline{a_r = 2,79 \text{ cm}}$$

2.6 Calcul de la tension de Court-Circuit  $U_K$

La tension de court-circuit  $U_K$  est donnée par la relation.

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

Elle a deux composantes.

- Une composante active  $U_{ka}$  donnée par la relation :

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

- Une composante réactive donnée par la relation suivante :

$$U_{kr} = 2\pi f \frac{N_0 w_1^2 a_r \cdot \beta \cdot K_r \cdot I_{f1}}{U_{f1}} 100\%$$

Facteur de Rogowski recalculé.

Il est donné dans le paragraphe 1.43 par la relation :

$$K_R = 1 - \frac{1}{2\pi} \frac{2a_{12} + a_{1r} + a_{2r}}{h_B}$$

$a_{12}$  : Largeur du canal de fuite :  $a_{12} = 1 \text{ cm}$ .

$a_1$  : épaisseur de l'enroulement BT recalculée :  $a_1 = 1,406 \text{ cm}$

$a_2$  : épaisseur de l'enroulement HT :  $a_2 = 3,95 \text{ cm}$

$h_B$  : hauteur des enroulements HT :  $h_B = 25,94 \text{ cm}$

Application Numérique.

$$K_R = 1 - \frac{1}{2\pi} \frac{2 + 1,406 + 3,95}{25,94}$$

$$K_R = 0,955$$

On calcule la tension de court-circuit réactive en fonction de toutes les valeurs recalculées.

$f$  : étant la fréquence 50 Hz

$w_1$  : le nombre de spires de l'enroulement BT :  $w_1 = 38 \text{ sp}$ .



$a_r$  : épaisseur du canal de fuite recalculée :  $a_r = 2,79 \text{ cm}$

$\beta$  : facteur de propreté recalculé :  $\beta = 2,49$

$K_R$  : facteur de Rogowski recalculé :  $K_R = 0,955$

$I_{\phi 1}$  : Courant de phase de l'enroulement BT :  $I_{\phi 1} = 216,5 \text{ A}$

$U_{\phi 1}$  : tension de phase de l'enroulement BT :  $U_{\phi 1} = 230,95 \text{ V}$

$\mu_0$  : étant la perméabilité du vide :  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$

### Application Numérique.

$$U_{K_r} = \frac{8\pi^2 \times 50 \cdot 10^{-7} \times 38^2 \times 2,79 \times 2,49 \times 0,955 \times 216,5 \cdot 10^{-2} \times 100}{230,95}$$

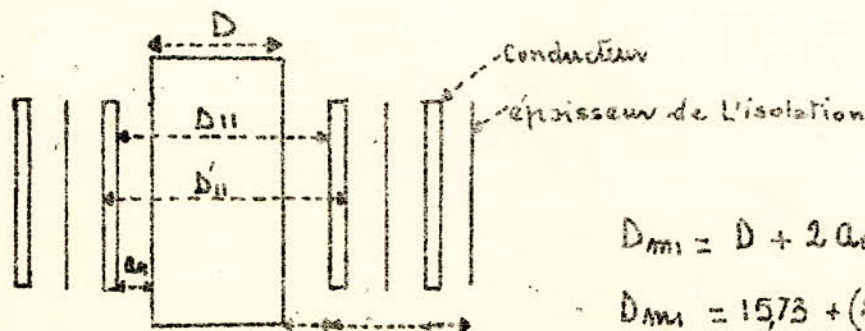
$$U_{K_r} = 3,55\%$$

## 2.7 Calcul des Paramètres de l'enroulement BT.

On a déjà établi les dimensions de la spire  $a_w$ , la hauteur de la bobine  $h_B$  et l'épaisseur de la bobine  $a_1$ .

### 2.7.1 Détermination du diamètre moyen de l'enroulement BT.

D'après le schéma de fig 2.7.1.1 on peut déterminer ce diamètre moyen.



$$D_{m1} = D + 2a_{01} + a_1$$

$$D_{m1} = 15,73 + (2 \times 0,5) + 1,406$$

$$D_{m1} = 18,14 \text{ cm}$$

### 2.7.2 Longueur moyenne de la spire.

Elle est donnée par la relation :

$$lw_1 = \pi D_{m1} \cdot 10^{-2} \text{ [m]}$$

Application Numérique.

$$lw_1 = \pi \cdot 18,14 \cdot 10^{-2}$$

$$\underline{lw_1 = 0,57 \text{ m}}$$

### 2.7.3 Longueur totale du conducteur.

$$L_1 = w_1 \times lw_1 \quad w_1: \text{nombre de spires de l'enroulement BT}$$

$$w_1 = 38.$$

Application Numérique.

$$L_1 = 38 \times 0,57$$

$$\boxed{L_1 = 21,66 \text{ m / phase}}$$

### 2.7.4 Résistance en courant continu.

La résistance de l'enroulement est mesurée en courant continu et sa relation est donnée par :

$$R_1 = \rho_1 \frac{L_1}{Aw_1}$$

$\rho_1$ : Résistivité du cuivre à 75°C :  $\rho_1 = 0,0215 \Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m}$ .

$L_1$ : Longueur Totale du conducteur :  $L_1 = 21,66 \text{ m}$ .

$Aw_1$ : Section de la spire de l'enroulement BT =  $66 \text{ mm}^2$

Application Numérique.

$$\underline{R_1 = 7 \cdot 10^{-3} \Omega}$$

## 2.8. Calcul des Paramètres de L'enroulement HT

38

Les dimensions de l'enroulement HT ont été calculées, la section de la spire  $s_{w2}$ , la hauteur de la bobine  $h_3$  et l'épaisseur de la bobine  $a_2$ .

### 2.8.1 Détermination du diamètre moyen.

$$D_{m2} = D + 2a_{01} + 2a_1 + 2a_{12} + a_2$$

$a_{01}$  : distance entre la colonne et l'enroulement :  $a_{01} = 0,5 \text{ cm}$ .

$a_1$  : épaisseur de l'enroulement BT :  $a_1 = 1,406 \text{ cm}$ .

$D$  : Diamètre de la colonne :  $D = 15,73 \text{ cm}$

$$D_{m2} = 15,73 + (2 \times 0,5) + 3,95 + 2 \times 1 + 2 \times 1,406$$

$$D_{m1} = 25,49 \text{ cm}$$

### 2.8.2 Longueur moyenne de la spire.

$$l_{w2} = \pi D_{m2} \cdot 10^{-2} [\text{m}]$$

$$= \pi \times 25,49 \cdot 10^{-2}$$

$$\underline{l_{w2} = 0,80 \text{ m}}$$

### 2.8.3 Longueur Total du Conducteur

$$L_2 = w_2' l_{w2}$$

$w_2'$  : Nombre de spires de l'enroulement HT :  $w_2' = 1645 \text{ sp.}$

$$L_2 = 1645 \times 0,80$$

$$\underline{L_2 = 1316 \text{ m/phase}} \quad \text{pour la prise nominale.}$$



#### 2.8.4 Résistance en courant continu.

Elle est donnée par la relation :

$$R_2 = \rho_2 \frac{L_2}{S_{w_2}}$$

$\rho_2$  : Résistivité du cuivre :  $\rho_2 = 0,0215 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ .

$L_2$  : Longueur totale du conducteur :  $L_2 = 1316 \text{ m}$

$S_{w_2}$  : section des conducteurs de l'enroulement HT :  $S_{w_2} = 1,539 \text{ mm}^2$

Application Numérique.

$$R_2 = 0,0215 \frac{1316}{1,539}$$

$$R_2 = 18,38 \Omega$$

dans ce calcul, on dimensionnera les fenêtres, les culasses et on déterminera le poids du matériel actif et le poids du circuit magnétique.

### 3.1 Dimensionnement des fenêtres.

Les fenêtres sont les parties vides qui seront occupées par les bobines haute et basse tension.

#### a) Largeur de la fenêtre.

Elle est donnée par la relation.

$$LF = 2 [a_{01} + a_{1r} + a_{12} + a_2] + a_{22}.$$

$a_{22}$ : est la distance séparant les deux enroulements HT et dépend de la tension nominale des enroulements de la HT.

$$\underline{a_{22} = 1,4 \text{ cm}}$$

#### Application Numérique.

$$LF = 2 [0,5 + 1,406 + 1 + 3,95] + 1,4.$$

$$\boxed{LF = 15,11 \text{ cm.}}$$

#### b) hauteur de la fenêtre.

La figure A permet de déterminer cette hauteur.

$$h_F = 2 l_{02} + h_B.$$

$l_{02}$ : distance entre les bobines et la surface intérieure des culasses et dépend de la tension nominale.

$$l_{02} = 4 \text{ cm.}$$

$$h_F = 2 \times 4 + 25,94 = 33,94 \text{ cm.}$$

$$\underline{h_F = 33,94 \text{ cm.}}$$

### 3.2 Dimensionnement de la culasse.

Afin de faciliter le calcul des pertes, nous partageons le circuit magnétique en trois parties comme l'indique la figure ci dessous : fig 3.2.1

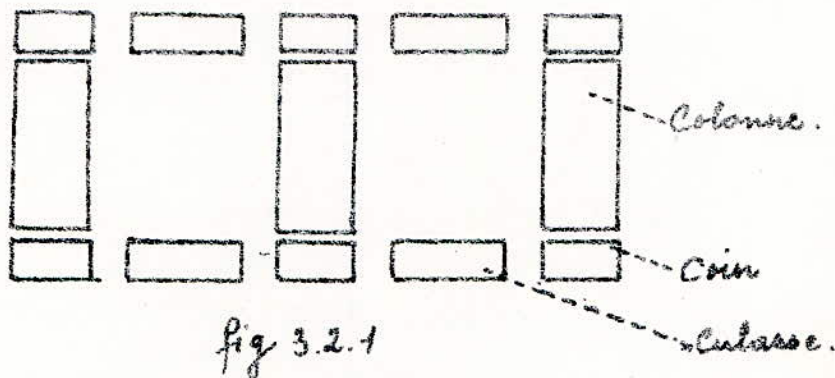


fig 3.2.1

On choisit une culasse rectangulaire, la section est un peu plus grande de 15 à 20% que la section du noyau afin de diminuer la réluctance et les pertes dans le fer.

#### a) section de la culasse.

$$\begin{aligned} S_{cul} &= 1,15 \times S_{noy} \\ &= 1,15 \times 169,8 \end{aligned}$$

$$\underline{S_{cul} = 195,27 \text{ cm}^2}$$

#### b) Longueur de la culasse sans coin

$$L_{cul} = L_F \quad \text{donc} \quad \underline{L_{cul} = 15,11 \text{ cm}}$$

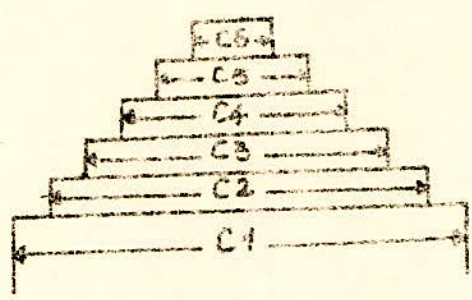


c) Largeur de la culasse.

La largeur de la culasse sera égale à la plus grande largeur des tôles utilisées pour former les 6 gradins du noyau.

Calcul des différents formats de tôles du noyau.

Pour 6 gradins, on aura 6 formats de tôles différents qui seront disposés suivant la figure ci-dessous.



Toutes ces longueurs de tôles C1 - C2 - ... - C6 dépendent du diamètre de la colonne :  $D = 15,73 \text{ cm}$

- $C1 = 0,95 \times D = 15,11 \text{ cm.}$
- $C2 = 0,885 \times D = 13,921 \text{ cm.}$
- $C3 = 0,775 \times D = 12,10 \text{ cm.}$
- $C4 = 0,631 \times D = 9,925 \text{ cm.}$
- $C5 = 0,465 \times D = 7,314 \text{ cm.}$
- $C6 = 0,28 \times D = 4,404 \text{ cm.}$

La largeur de la culasse  $l_{cul}$  sera donc égale à :

$$l_{cul} = 15,11 \text{ cm}$$

d) Hauteur de la culasse  $h_{cul}$ .

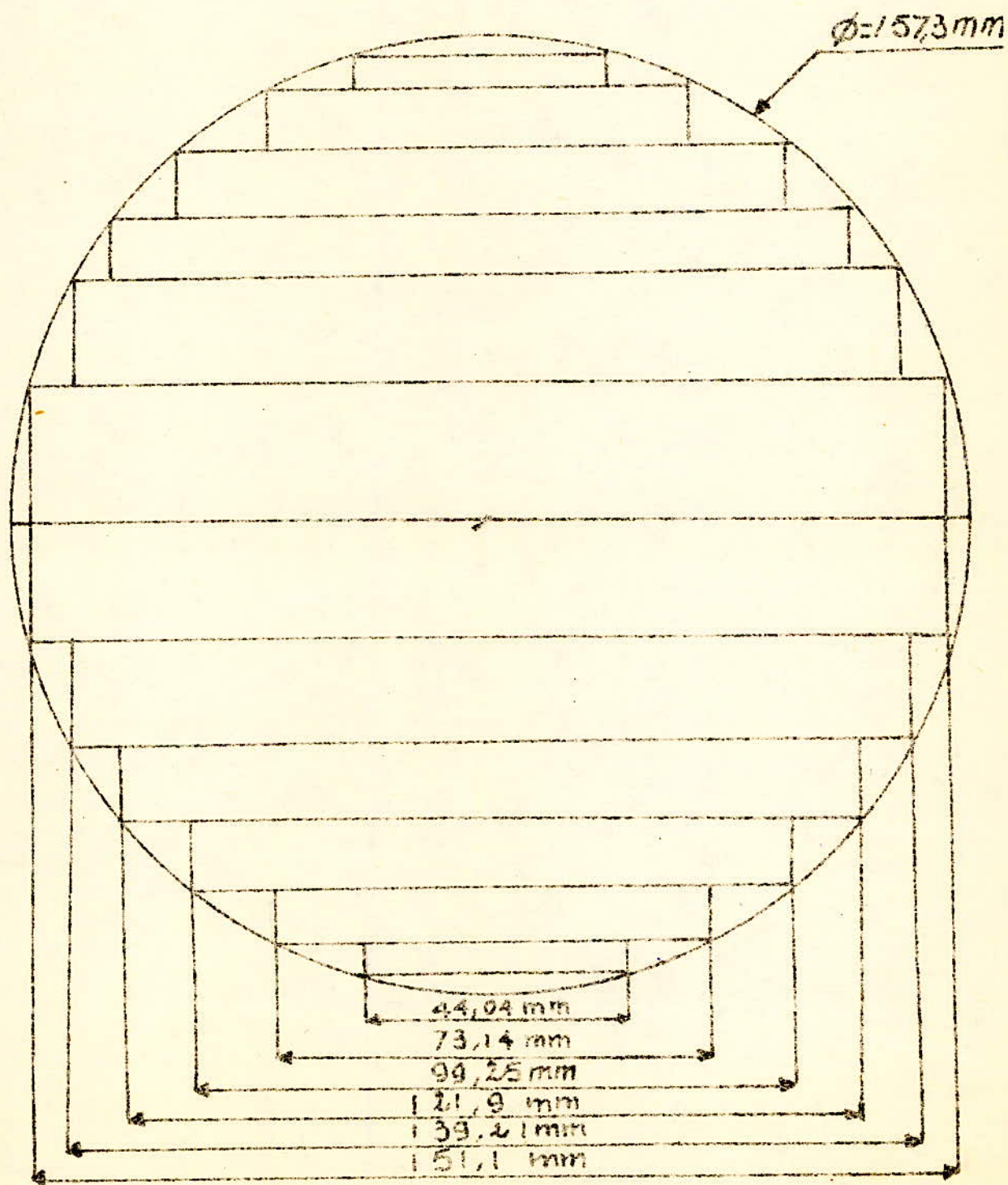
$$h_{cul} = \frac{S_{cul}}{l_{cul}}$$

Application Numérique.

$$h_{cul} = \frac{195,27}{15,11}$$

$$h_{cul} = 12,92 \text{ cm}$$

FORME DE LA SECTION DU NOYAU CÔTE HT.



### 3.3 Poids du matériel actif.

#### a/ Côté basse tension.

$$G_1 = \gamma_1 V_1 = \gamma_1 L_1 S_{w1} \cdot 10^{-3}$$

$\gamma_1$  : poids spécifique du cuivre :  $\gamma_1 = 8,9 \text{ kg/dm}^3$

$L_1$  : Longueur totale du conducteur :  $L_1 = 21,66 \text{ m}$ .

$S_{w1}$  : Section du conducteur de l'enroulement BT :  $S_{w1} = 66 \text{ mm}^2$

#### Application Numérique.

$$G_1 = 8,9 \times 21,66 \times 66 \times 10^{-3}$$

$$\underline{G_1 = 12,72 \text{ kg}}$$

#### b/ Côté haute tension.

$$G_2 = \gamma_2 V_2 = \gamma_2 L_2 S_{w2} \cdot 10^{-3}$$

$$\gamma_2 = \gamma_1$$

$L_2$  : Longueur totale du conducteur de l'enroulement HT = 1316 m

$S_{w2}$  : Section du conducteur de l'enroulement HT = 1,539 mm<sup>2</sup>.

#### Application Numérique.

$$G_2 = 8,9 \times 1316 \times 1,539 \times 10^{-3}$$

$$\underline{G_2 = 18 \text{ kg}}$$

#### c/ Poids total du cuivre utilisé.

Bous les calculs précédents ont été fait pour une seule colonne donc pour déterminer le poids total du cuivre utilisé, on tiendra compte des trois colonnes formant le circuit magnétique.

$$\begin{aligned} G_{\text{Cu}} &= 3 (G_1 + G_2) \\ &= 3 (12,72 + 18) \end{aligned}$$



$$G_{\text{cul}} = 92,16 \text{ kg}$$

### 3.4 Poids du circuit magnétique.

#### a/ Poids des culasses.

Des considérations géométriques sur la forme du circuit magnétique conduisent aux relations :

$$G_{\text{cul}} = 4 \cdot S_{\text{cul}} \cdot L_{\text{cul}} \cdot \gamma \cdot 10^{-3} \quad (\text{voir fig 3.2.1})$$

$\gamma$  : poids spécifique de l'acier =  $7,65 \text{ kg/dm}^3$

$S_{\text{cul}}$  : surface de la culasse =  $195,27 \text{ cm}^2$

$L_{\text{cul}}$  : Longueur de la culasse =  $15,11 \text{ cm}$ .

#### Application Numérique.

$$G_{\text{cul}} = 4 \times 195,27 \times 15,11 \times 7,65 \cdot 10^{-3}$$

$$\underline{G_{\text{cul}} = 92,29 \text{ kg}}$$

#### b/ Poids des colonnes.

$$G_{\text{col}} = 3 \cdot S_{\text{col}} \cdot h_{\text{col}} \cdot \gamma \cdot 10^{-3}$$

$S_{\text{col}}$  : section du noyau =  $169,8 \text{ cm}^2$

$h_{\text{col}}$  : hauteur de la fenêtre et de la colonne =  $33,94 \text{ cm}$ .

$\gamma$  : Poids spécifique de l'acier =  $7,65 \text{ kg/dm}^3$

#### Application Numérique.

$$G_{\text{col}} = 3 \times 169,8 \times 33,94 \times 7,65 \cdot 10^{-3} = 132,26 \text{ kg}$$

$$\underline{G_{\text{col}} = 132,26 \text{ kg}}$$

$$G_{\text{coins}} = 6 S_{\text{cul}} \times D = 8 \cdot 10^{-3}$$

$$= 6 \times 195,27 \times 15,73 \times 7,65 \cdot 10^{-3}$$

$$\underline{G_{\text{coin}} = 140,98 \text{ kg}}$$

d/ Poids Total du circuit magnétique.

$$G_{\text{t.c.m.}} = G_{\text{cul}} + G_{\text{col}} + G_{\text{coin}}$$

Application Numérique.

$$\boxed{G_{\text{t.c.m.}} = 363,53 \text{ Kg}}$$

Hauteur totale du circuit magnétique.

d'après la figure 3.2.1 la hauteur totale du circuit magnétique sera :

$$h_{\text{cm}} = h_{\text{col}} + 2 h_{\text{cul}}$$

$h_{\text{col}}$  : hauteur de la colonne qui est égale à la hauteur de la fenêtre  $h_f = 33,94 \text{ cm}$ .

$h_{\text{cul}}$  : hauteur de la culasse =  $12,92 \text{ cm}$ .

$$h_{\text{cm}} = 33,94 + (2 \times 12,92)$$

$$\underline{h_{\text{cm}} = 59,8 \text{ cm}}$$

## Induction magnétique dans la culasse.

47

On suppose que'il y a conservation du flux, c.à.d que le flux circulant dans la colonne est le même que le flux circulant dans la culasse.

Nous déduisons alors la relation suivante.

$$B_{col} \cdot S_{col} = B_{cul} \cdot S_{cul}$$

$$B_{cul} = \frac{B_{col} \cdot S_{col}}{S_{cul}}$$

Comme :

$$\frac{S_{cul}}{S_{col}} = 1,15 \quad (\text{paragraphe 3.2})$$

### Application Numérique :

$$B_{col} : \text{Induction dans la colonne} = 1,61 \text{ T}$$

$$S_{col} : \text{Section de la colonne} = 169,8 \text{ cm}^2$$

$$S_{cul} : \text{Section de la culasse} = 195,27 \text{ cm}^2$$

$$B_{cul} = \frac{1,61}{1,15}$$

$$\underline{B_{cul} = 1,4 \text{ T}}$$

## Induction magnétique dans les coins.

Nous prendrons dans le coin une induction magnétique de transition entre la colonne et la culasse et cette induction aura comme valeur.

$$B_{coin} = \frac{B_{col} + B_{cul}}{2}$$

### Application Numérique :

$$\underline{B_{coin} = 1,505 \text{ T}}$$



4.1 Pertes dans les enroulements.

Il existe plusieurs types de pertes.

- Pertes dans les enroulements dues à l'effet Joule.
- Pertes dans les connexions dues à l'effet Joule.
- Pertes supplémentaires dans les enroulements et connexions dues au champ de fuite (dans la plaque de serrage, dans la cuve, enroule et c...).

Pertes par effet Joule dans l'enroulement BT.

Elles sont données par la relation.

$$P_{J1} = m R_1 I_{f1}^2$$

$R_1$ : Résistance de l'enroulement BT =  $7 \cdot 10^{-3} \Omega$ .

$I_{f1}$ : courant de phase de l'enroulement BT = 216,5 A

$m$ : nombre de phases:  $m = 3$ .

Application Numérique:

$$P_{J1} = 3 \times 7 \cdot 10^{-3} \times 216,5^2$$

$$\underline{P_{J1} = 984,31 \text{ W}}$$

Pertes par effet Joule dans les connexions BT.

Les fils assurant la liaison entre les enroulements ont aussi une certaine résistance ceci rapporté des pertes par effet Joule dans les connexions.

Le côté basse tension étant couplé en étoile, la longueur de fil de connexion sera :

$$l_{c1} = 7,5 \text{ kg}$$

$h_B$  : hauteur de la bobine = 25,94 cm.

$$\underline{l_{c1} = 1,95 \text{ m.}}$$

La section du fil de connexion sera :

$$S_{wic} = s w_1$$

$$\underline{S_{w1} = 66 \text{ mm}^2}$$

La résistance de connexion sera donc :

$$R_{1c} = \rho \frac{l_{c1}}{S_{wic}}$$

Application numérique :

$$R_{1c} = 0,0215 \frac{1,95}{66}$$

$$\underline{R_{1c} = 6,35 \cdot 10^{-4} \Omega.}$$

Les pertes par effet Joule dues à cette résistance de connexion seront.

$$P_{Jc1} = R_{1c} \cdot I_{f1}^2$$

Application Numérique :

$$R_{1c} = 6,35 \cdot 10^{-4} \Omega$$

$$I_{f1} = 216,5 \text{ A}$$

$$\boxed{P_{Jc1} = 29,76 \text{ W}}$$

Pertes par effet Joule dans l'enroulement HT.

Elles sont données par la relation :

$$P_{J2} = m R_2 \cdot I_{f2}^2$$

$R_2$  : Résistance de l'enroulement HT = 18,38  $\Omega$

$I_{f2}$  : courant de phase de l'enroulement HT = 5 A

$m = \text{nombre de phases} = 3$

Application numérique :

$$P_{j2} = 1378,5 \text{ W}$$

Pertes par effet joule dans les connexions HT

Le cote haute tension étant couplé en triangle, la longueur du fil de connexion sera :

$$l_{ce} = 14 h_0 = 14 \cdot 25,94 = 3,63 \text{ m}$$

$$\boxed{l_{ce} = 3,63 \text{ m}}$$

- La section du fil de connexion :

$$S_{W_{econ}} = S_{W_e} \sqrt{3}$$

$$S_{W_{ec}} = 1,539 \sqrt{3} = 2,67 \text{ mm}^2$$

$$\underline{S_{W_{ec}} = 2,67 \text{ mm}^2}$$

- Résistances de connexion :

$$R_{ce} = \rho \frac{l_{ce}}{S_{W_{ec}}} = 0,0216 \frac{3,63}{2,67} = 29 \cdot 10^{-3} \Omega$$

$$\underline{R_{ce} = 29 \cdot 10^{-3} \Omega}$$

Les pertes par effet joule dans les connexions seront :

$$P_{jce} = R_{ce} I_{f2}^2 = 29 \cdot 10^{-3} \cdot 5^2 = 0,73 \text{ W}$$

$$\underline{P_{jce} = 0,73 \text{ W}}$$

Les pertes par effet joule dans les enroulements :

$$P_{jt} = P_{j1} + P_{j2}$$

$$\boxed{P_{jt} = 2368,81 \text{ W}}$$



Pertes par effet Joule Totales dans les connexions :

$$P_{Jtc} = P_{Jc1} + P_{Jc2}$$

$$P_{Jtc} = 29,76 + 0,73$$

$$P_{Jtc} = 30,49 \text{ W}$$

### Pertes Supplémentaires dans Les Enroulements.

Elles sont déterminées par le champ magnétique de fuite qui existe entre les enroulements et sont dus aux courants de circulation entre les conducteurs en parallèle et à l'effet pelliculaire qui se manifeste dans les conducteurs de section importante.

Dans notre étude on ne va pas étudier les pertes supplémentaires, on les estime à 2% des pertes par effet Joule.

$$P_{js} = P_{Jt} \times 0,02$$

$$P_{js} = 2362,81 \times 0,02 = 47,25 \text{ W}$$

$$P_{js} = 47,25 \text{ W}$$

Donc les Pertes par effet Joule totales seront :

$$P_{JT} = P_{Jt} + P_{Jtc} + P_{js}$$

$P_{Jt}$  : Pertes totales par effet Joule dans les enroulements = 2362,81 W

$P_{Jtc}$  : Pertes totales dans les connexions = 30,49 W.

$P_{js}$  : Pertes supplémentaires = 47,25 W

Application numérique :

$$P_{JT} = 2440,55 \text{ W.}$$

Nous remarquons que les pertes Totale ainsi calculées ne dépassent pas celles imposées par le cahier de charge.

4.1' Vérification de la tension de court-circuit.

La composante active de la tension de court-circuit est:

$$U_{Ka} = \frac{P_K}{S_u} = \frac{2440,55}{150} \times 100$$

$$U_{Ka} = 1,627\%$$

La tension de court-circuit sera:

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

$$U_K = \sqrt{1,627^2 + 3,55^2}$$

$$U_K = 3,9\%$$

L'erreur sur la tension de court-circuit est:

$$\Delta U_K = \frac{4 - 3,9}{4} = \frac{0,1}{4} \times 100$$

$$\Delta U_K = 2,5\%$$

Cette erreur  $\Delta U_K < 10\%$  elle est acceptée par la N.F.

4.2 Pertes dans le Fer.

On entend par pertes dans le fer, les pertes dues au courant de Foucault circulant dans les tôles et les pertes par hystérésis.

Les courants de Foucault sont dus aux f.e.m. créés lors de la variation du flux magnétique dans les masses métalliques car cette dernière forme de circuits fermés malgré leur feuillage.

L'hystérésis provoque dans les masses métalliques des pertes consécutives au basculement de domaines de "Ic/is" pour suivre

Le sens du champ appliqué; ce basculement s'accompagne de frottements donc de dégagement de chaleur.

Ces pertes ne peuvent pas être calculées directement, on utilisera les caractéristiques des pertes spécifiques de l'acier utilisé en fonction de l'induction.

### Pertes fer dans les colonnes.

Dans les colonnes circule une induction de 1,6 T qui correspond sur la figure ① à des pertes spécifiques de 1,4 W/kg donc:

$$P_{\text{fer}} = 1,4 \times G_{\text{col}}$$

$G_{\text{col}}$ : poids total des colonnes = 132,26 kg.

$$P_{\text{fer}} = 1,4 \times 132,26 = 185,17 \text{ W}$$

$$\underline{P_{\text{fer}} = 185,17 \text{ W}}$$

### Pertes dans les culasses.

Pour une induction de 1,4 T correspond sur la figure ① des pertes spécifiques de 0,9 W/kg

$$P_{\text{cul}} = 0,9 \times G_{\text{cul}}$$

$G_{\text{cul}}$ : Poids total des culasses.

$$P_{\text{cul}} = 0,9 \times 90,29$$

$$\underline{P_{\text{cul}} = 81,26 \text{ W}}$$



### Pertes dans les coins.

Dans les coins on a une induction de  $1,505 T$ , elle lui correspondent dans la figure 1 des pertes spécifiques de  $1,2 W/kg$ , ceci nous permet de déterminer les pertes dues aux coins.

$$P_{\text{coins}} = 1,2 G_{\text{coins}}$$

$G_{\text{coins}}$  : Poids total dans les coins =  $140,98 \text{ kg}$

$$P_{\text{c}} = 1,2 \times 140,98$$

$$\underline{P_{\text{c}} = 169,18 \text{ W}}$$

### Pertes fer totales.

$$P_{\text{Fe}} = P_{\text{Fcol}} + P_{\text{Fcul}} + P_{\text{Fcoins}}$$

$$= 185,17 + 81,26 + 169,18$$

$$\boxed{P_{\text{Fe}} = 435,61 \text{ W}}$$

Ainsi nous avons déterminé les pertes à vide tout en supposant que les pertes Joule à vide sont négligeables et l'on notera de même que pour les pertes Joule. Ces pertes à vide sont inférieures à celles imposées par le cahier de charge.

### 4.3 Calcul du courant de marche à vide.

Le courant de marche à vide se décompose en deux courants:

— Courant actif donnant naissance à une puissance active qui n'est rien d'autre à vide que les pertes dans le fer (Pertes par courant de Foucault et pertes par Hystérésis)

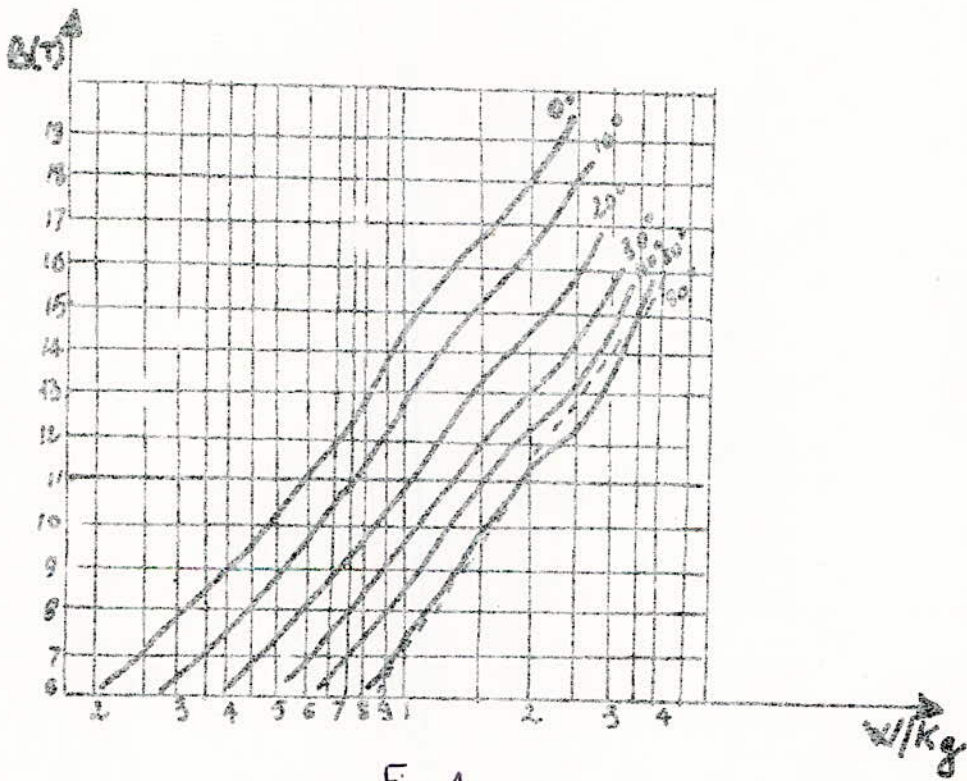


Fig 1

$$P_0 = P_{Fe} = 3 U_{1f} I_{0af}$$

$$I_{0af} = \frac{P_{Fe}}{3 U_{1f}}$$

$$I_{0af} = \frac{435,64}{3 \times 5774} = 0,025 A$$

Courant réactif : ou courant magnétisant déphasé en arrière de  $\pi/2$  par rapport à la tension primaire  $U_1$  nécessaire à la génération du flux dans le noyau.

$$Q_0 = U_{1f} I_{0mf} \quad (4-3.1).$$

### Détermination de la Puissance réactive $Q_0$ .

La figure 4 nous donne les pertes spécifiques magnétiques pour des tôles laminées à froid en fonction de l'induction et cela pour différentes directions du champ magnétique par rapport au laminage. Afin de diminuer ces pertes magnétiques, nous choisissons le même sens pour le flux et le laminage.

#### a) Pertes magnétiques dans les colonnes

Au niveau de la colonne circule une induction magnétique de 1,6 T ; pour cette valeur elle correspond une pertes réactive (fig. 4) de 2,3 VAR / kg.

$$Q_{col} = G_{col} \times q_{col}$$

$$G_{col} : \text{poids total des colonnes} = 132,26 \text{ kg}$$

$$q_{col} : \text{pertes spécifiques} = 2,3 \text{ VAR / kg}$$

$$Q_{col} = 132,26 \times 2,3$$

$$\underline{Q_{col} = 304,2 \text{ VAR}}$$



### b/ Puissance magnétisante dans les culasses.

Dans les culasses circule une induction de 1,4T, pour cette valeur correspond une puissance réactive de 1,3 VAR/kg (Fig 4).

$$Q_{cul} = G_{cul} \times q_{cul}$$

$$Q_{cul} = 90,29 \times 1,3$$

$$\underline{Q_{cul} = 117,37 \text{ VAR}}$$

### c/ Puissance magnétisante dans les coins.

L'Induction de transition dans les coins est de 1,505T, et cette valeur correspond une puissance réactive de 1,5 VAR/kg. voir fig 4.

$$Q_{coins} = G_{coins} \times q_{coins}$$

$$= 140,98 \times 1,5$$

$$\underline{Q_{coins} = 211,47 \text{ VAR}}$$

### d/ Puissance magnétisante dans les entrefer.

On choisira 6 entrefers, et l'induction circulant dans les colonnes est la même que celle dans les entrefers (flux de fuite négligeable). A cette induction correspondent des pertes spécifiques de 3,1 VAR/cm<sup>2</sup>.

$$Q_{ent} = n_s \cdot S_p \cdot q_{os}$$

$n_s$ : nombre d'entrefer = 6.

$S_p$ : section de l'entrefer = section colonne = 165,8 cm<sup>2</sup>

$q_{os}$ : pertes spécifiques dans l'entrefer = 3,1 VAR/cm<sup>2</sup>

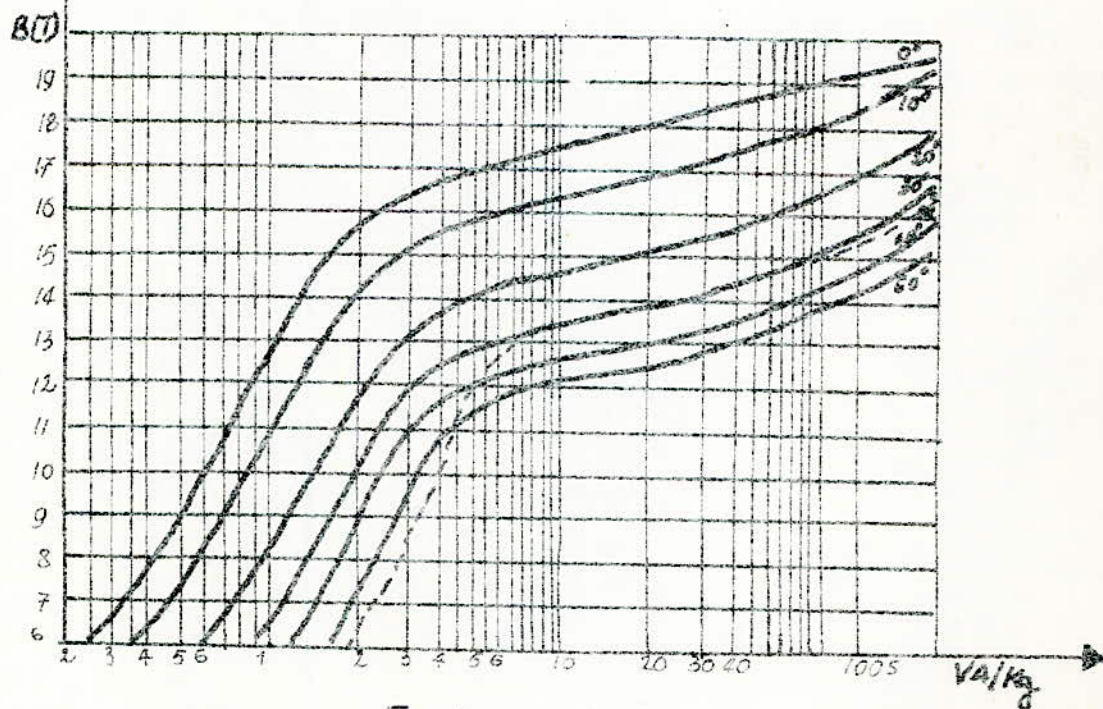
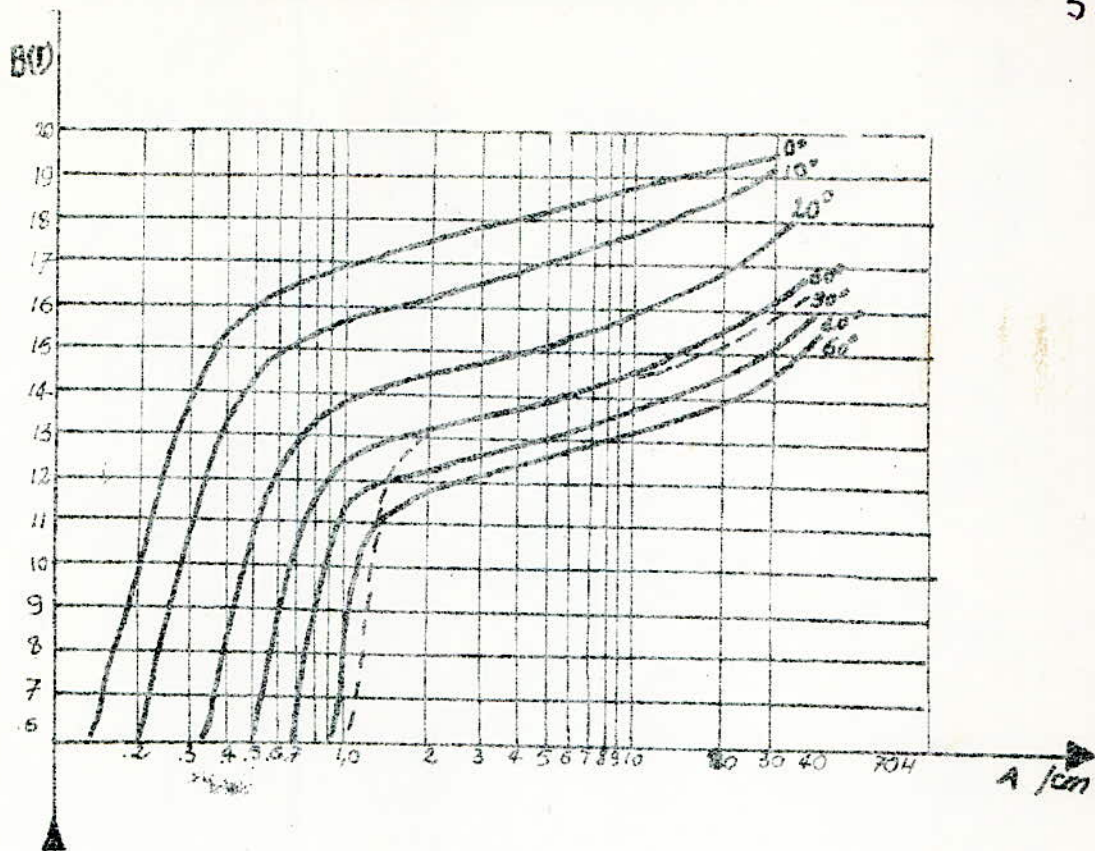


Fig 4

$$Q_{\text{ent}} = 3158,28 \text{ VAR}$$

Puissance magnétisante totale:

$$\begin{aligned} Q_0 &= Q_{\text{col}} + Q_{\text{cul}} + Q_{\text{coins}} + Q_{\text{ent}} \\ &= 304,2 + 117,37 + 211,47 + 3158,28 \end{aligned}$$

$$Q_0 = 3791,32 \text{ VAR.}$$

De la relation 4.31 on tire  $I_{0Mf}$ :

$$\begin{aligned} I_{0Mf} &= \frac{Q_0}{U_f} \\ &= \frac{3791,32}{5774 \times 3} \end{aligned}$$

$$I_{0Mf} = 0,219 \text{ A}$$

Le courant à vide  $I_0$  est donc :

$$\begin{aligned} I_0 &= \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0M}^2} \\ &= \sqrt{0,025^2 + 0,219^2} \end{aligned}$$

$$I_0 = 0,22 \text{ A}$$

La valeur obtenue représente le courant de ligne:

Le courant de marche à vide  $I_0$  en % est:

$$I_0 = \frac{0,22}{8,66} \times 100 = 2,54 \%$$



### 4.4 calcul du rendement.

C'est le rapport de la puissance active fournie à la puissance active absorbée. Pour le déterminer nous utilisons la méthode indirecte qui consiste en la détermination des pertes.

$$\eta = \frac{\text{Puissance du secondaire}}{\text{Puissance du secondaire} + \text{Pertes}}$$

Pertes : Pertes Joules + Pertes fer.

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_{Fe} + P_{cu}}$$

$$\eta = \frac{U_2 I_2 \cos \phi_2}{U_2 I_2 \cos \phi_2 + P_{Fe} + P_{cu}}$$

### a/ calcul du rendement maximum.

$$P_2 = U_2 I_2 \cos \phi_2 = U_2 \frac{I_2}{I_{2n}} \cdot I_{2n} \cos \phi_2$$

Posons  $d = \frac{I_2}{I_{2n}}$   $d$  : coefficient de charge.

$$P_2 = U_2 d I_{2n} \cos \phi_2 = S_n d \cos \phi_2$$

$$P_{cu} = R I_2^2 = R \left( \frac{I_2}{I_{2n}} \right)^2 I_{2n}^2$$

$$P_{cu} = R d^2 I_{2n}^2 = d^2 P_{dt}$$

Le rendement sera sous la forme :

$$\eta = \frac{d S_n \cos \phi_2}{d S_n \cos \phi_2 + d^2 P_{dt} + P_{Fe}}$$

Écrivons le rendement par rapport à  $d$ .

$$\eta' = \frac{(d \sin \cos \varphi_2 + d^2 P_{jt} + P_{Fe})(\sin \cos \varphi_2) - (d \sin \cos \varphi_2)(\sin \cos \varphi_2 + 2d P_{jt})}{(d \sin \cos \varphi_2 + d^2 P_{jt} + P_{Fe})^2}$$

$$\eta' = \frac{d^2 P_{jt} \sin \cos \varphi_2 + \sin \cos \varphi_2 P_{Fe} - 2d^2 \sin P_{jt} \cos \varphi_2}{(d \sin \cos \varphi_2 + d^2 P_{jt} + P_{Fe})^2}$$

$$\eta' = \frac{\sin \cos \varphi_2 (P_{Fe} - d^2 P_{jt})}{(d \sin \cos \varphi_2 + d^2 P_{jt} + P_{Fe})^2}$$

Le rendement est maximum pour la dérivée nulle.

$$P_{Fe} - d^2 P_{jt} = 0$$

$$d^2 = \frac{P_{Fe}}{P_{jt}} = \frac{435,61}{2440,55} = 0,18$$

$$d = \sqrt{0,18}$$

$$d = 0,42$$

1/ cas d'une charge résistive  $\cos \varphi_2 = 1$ .

$d$	$P_{Fe}$ (W)	$P_{jt}$ (W)	$d^2 P_{jt}$	$d \sin \cos \varphi_2$	$d \sin \cos \varphi_2 + d^2 P_{jt} + P_{Fe}$	$\eta\%$
1/4	435,61	2440,55	152,53	37500	38038,14	98,45
0,42	435,61	2440,55	433,3	63.000	63874,91	98,63
1/2	435,61	2440,55	610,13	75.000	76045,74	98,62
3/4	435,61	2440,55	1372,8	112.500	114308,41	98,42
1	435,61	2440,55	2440,55	150.000	152876,1	98,12

2/ Cas d'une charge  $\cos \varphi_2 = 0,8$

$\alpha$	$P_{FE} (W)$	$P_{JE} (W)$	$\alpha^2 P_{JE}$	$\alpha S_n \cos \varphi_2$	$\alpha S_n \cos \varphi_2 + \alpha^2 P_{JE} + P_{FE}$	$\eta \%$
1/4	435,61	2440,55	152,53	30.000	30588,14	98,07
0,42	435,61	2440,55	439,3	50400	51274,91	98,29
1/2	435,61	2440,55	610,13	60.000	61045,74	98,28
3/4	435,61	2440,55	1372,8	90.000	91808,41	98,03
1	435,61	2440,55	2440,55	120.000	122876,16	97,65

#### 4.5 Variation de la tension.

On se propose d'étudier la variation de la tension et de tracer la caractéristique externe pour différents facteurs de puissance.

La chute de tension est définie par la relation :

$$\Delta U \% = \frac{U_{2n} - U_2}{U_{2n}} \cdot 100 = \frac{U'_{2n} - U'_2}{U'_{2n}} \cdot 100$$

$$U'_{2n} = U_1$$

$$\Delta U \% = \frac{U_1 - U'_2}{U_1} \cdot 100 = \frac{\Delta U'}{U_1} \cdot 100$$

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

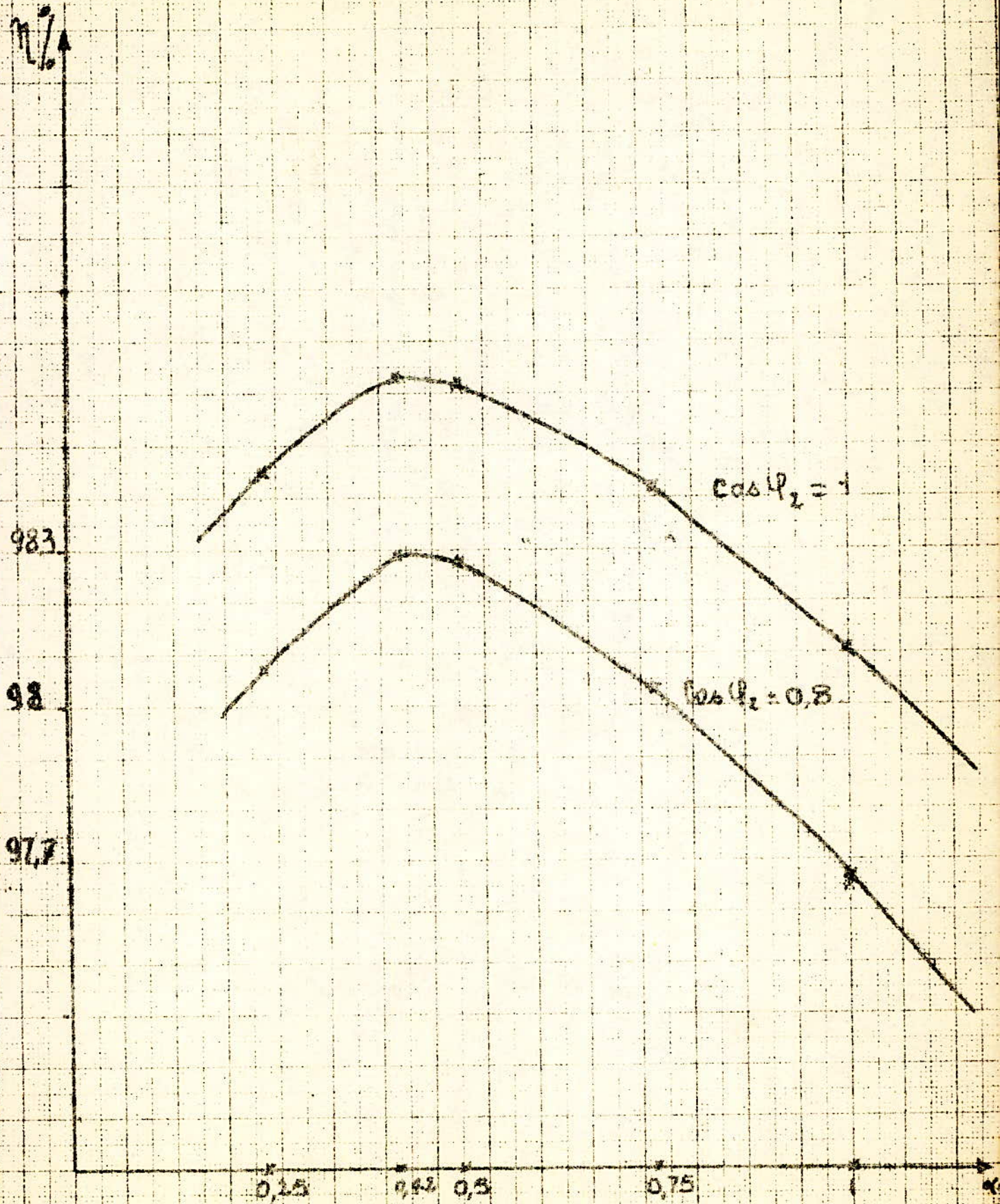
$U_{2n}$  : tension secondaire nominale.

$U'_2$  : tension secondaire ramené au primaire pour un facteur de puissance donné.

$U'_{2n}$  : tension secondaire nominale ramené au primaire.

$U_1$  : tension primaire.







$$\Delta U = U_1 - U_2$$

Par une approximation valable nous pouvons prendre  $\Delta U\%$  :

$$\Delta U\% = d (U_{Ka}\% \cos \varphi_2 + U_{Kr}\% \sin \varphi_2). \quad (4.5.1)$$

$d$  : coefficient de charge = 0,42

$U_{Ka}\%$  : chute de tension active = 1,627%.

$U_{Kr}\%$  : chute de tension réactive = 3,55%.

La tension du secondaire est :

$$U_2 = U_1' \left( 1 - \frac{\Delta U}{100} \right)$$

$$U_1' = \left( \frac{\omega_2 U_1}{\omega_1} \right) \sqrt{3} = \left( \frac{38}{16+5} \cdot 10.000 \right) \sqrt{3}$$

$$\underline{U_1' = 400 \text{ V}}$$

a/ cas d'une charge résistive  $\varphi_2 = 0$

$$\cos \varphi_2 = 1 \quad \text{et} \quad \sin \varphi_2 = 0$$

La relation (4.51) nous donne.

$$\underline{\Delta U\% = d \cdot 1,627}$$

$d$	$\Delta U\%$	$\Delta U = \frac{\Delta U\%}{100} U_1'$ (V)	$U_2 = U_1' \left( 1 - \frac{\Delta U}{100} \right)$
0	0	0	400
1/4	0,40	1,6	398,4
1/2	0,81	3,24	396,76
3/4	1,22	4,88	395,12
1	1,62	6,48	393,52

b/ cas d'une charge inductive.

$$\cos \varphi_2 = 0,8 \text{ et } \sin \varphi_2 = 0,6.$$

$$\Delta U\% = \alpha (1,627 \times 0,8 + 3,55 \times 0,6)$$

$$\Delta U\% = \alpha \cdot 3,43$$

$\alpha$	$\Delta U\%$	$\Delta U = \frac{\Delta U\%}{100} U_1$	$U_2 = U_1 \left(1 - \frac{\Delta U}{100}\right)$
0	0	0	400
1/4	0,85	3,4	396,6
1/2	1,71	6,84	393,16
3/4	2,57	10,28	389,72
1	3,43	13,72	386,28

c/ cas d'une charge capacitive.

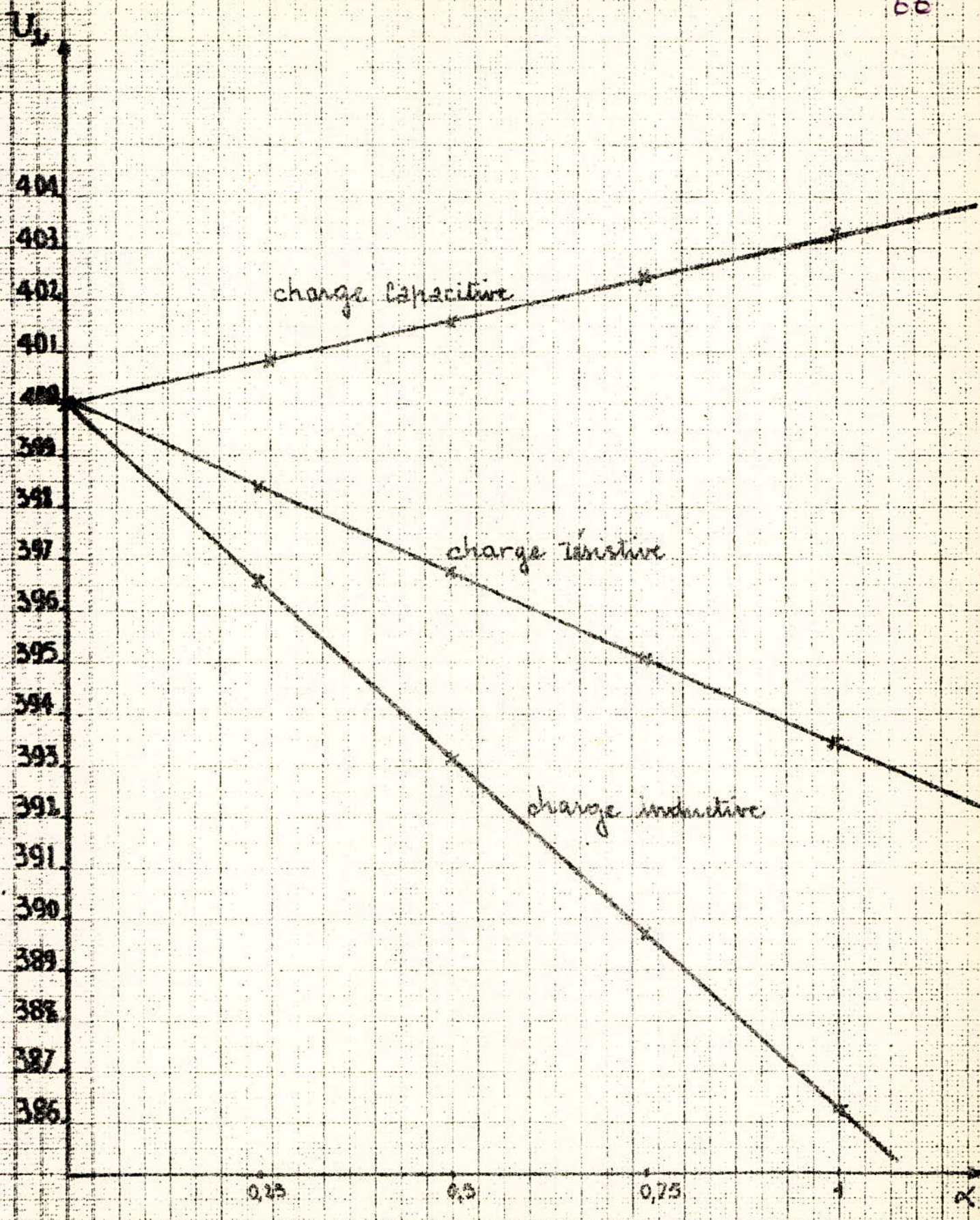
$$\cos(-\varphi_2) = 0,8 \text{ et } \sin(-\varphi_2) = -0,6$$

$$\Delta U\% = \alpha (1,627 \times 0,8 - 3,55 \times 0,6)$$

$$\Delta U\% = -\alpha \cdot 0,83.$$

$\alpha$	$\Delta U\%$	$\Delta U = \frac{\Delta U}{100} \cdot 100 U_1$	$U_2 = U_1 \left(1 - \frac{\Delta U}{100}\right)$
0	0	0	400
1/4	-0,20	-0,8	400,8
1/2	-0,41	-1,64	401,64
3/4	-0,62	-2,48	402,48
1	-0,83	-3,32	403,32





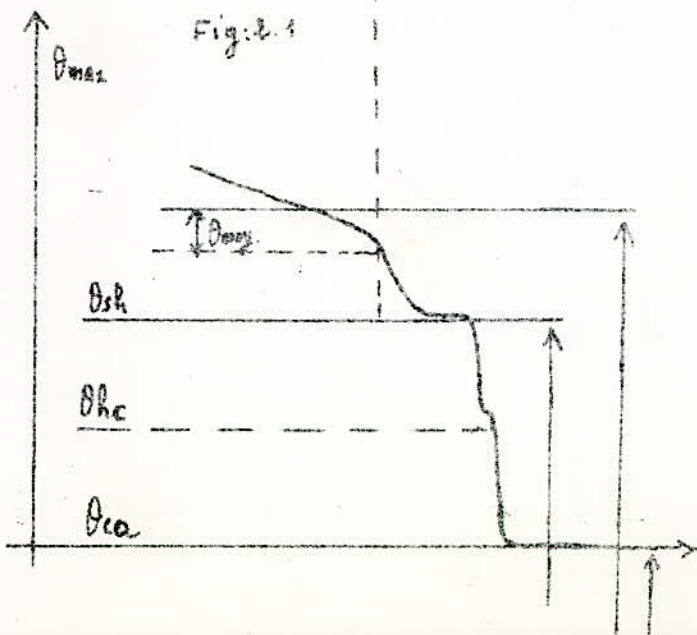
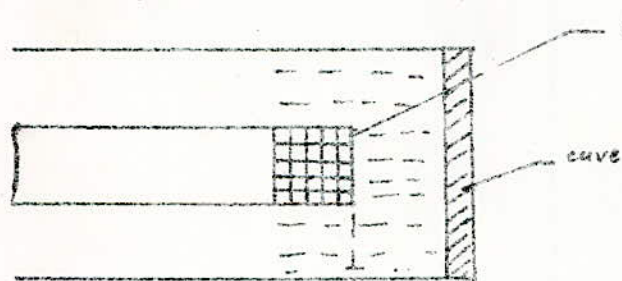


Les enroulements du transformateur étant parcourus par des courants qui sont le siège des pertes sous forme de chaleur qui doit être évacuée, la chaleur se transmet dans les parties actives à l'agent de refroidissement par conduction. Plus loin, cette chaleur est transmise par convection vers les parois de la cuve du transformateur et ensuite par convection et radiation vers le milieu ambiant.

On néglige l'échange de chaleur entre le circuit magnétique et les enroulements. L'agent de refroidissement est l'huile minérale. Le cahier des charges impose le type de refroidissement naturel.

Le calcul thermique du transformateur consiste en la vérification de l'échauffement moyen en charge, échauffement qui ne doit pas dépasser les prescriptions des normes.

La figure (2.1) indique le cas des enroulements bécqués par l'huile :



$\theta_{max}$  : échauffement maximum de l'enroulement par rapport à la surface du bobinage.

$\theta_{moy}$  : échauffement moyen du bobinage.

$\theta_{sh}$  : " de l'enroulement par rapport à l'huile

$\theta_{hc}$  : " de l'huile par rapport aux parois de la cuve

température moyenne du bobinage

température de l'huile

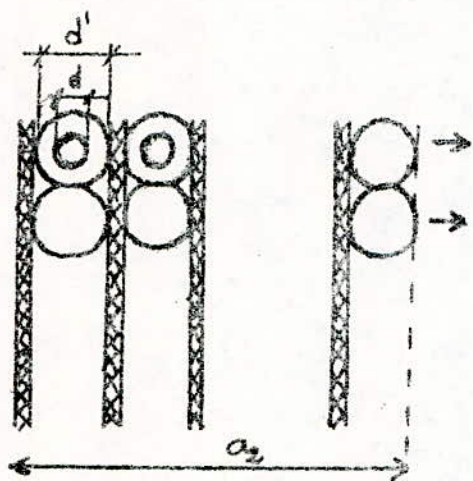
température de l'air ambiant.

$\theta_{ca}$  : échauffement de la cuve par rapport à l'air ambiant.

Il faut évidemment calculer ces échauffements pour la basse tension et la haute tension.

## 2.1 Calcul de l'échauffement de l'enroulement Haute-tension

L'enroulement haute tension est un enroulement stratifié avec 15 couches réalisées en conducteur circulaire isolé avec du papier. On peut imaginer le schéma du bobinage comme dans la figure.



Il y a un canal de refroidissement de 5 mm entre la 7<sup>e</sup> et la 8<sup>e</sup> couche.

- L'échauffement maximale dans le cas de l'enroulement stratifié est donné par la relation :

$$\theta_{max} = \frac{P_2 a^2}{8 d m_2} [^{\circ}C] \quad \text{le calcul doit se faire pour chaque demi-bobine}$$

-  $P_2$  étant les pertes spécifiques par unité de volume et sont données par la relation :

$$P_2 = 2,14 \frac{J_2^2 d^2 10^{-2}}{(d' + \delta_{\text{couche}}) d'} \quad W/cm^3$$

avec  $J_2$  : densité du courant = 3,28 A/mm<sup>2</sup>

$d$  : diamètre du conducteur = 1,4 mm

$d'$  : " " " isolé = 2,04 mm

$\delta_{\text{is}}$  : isolation entre couches = 0,5 mm



## Application numérique

$$P_2 = 1,68 \frac{3,25^2 \cdot 1,4^2 \cdot 10^{-2}}{(2,04 + 0,3) \cdot 2,04} = 0,0728 \text{ W/cm}^2$$

- $\delta_2$ : largeur du canal de refroidissement = 5 mm
- $a_2$ : épaisseur de la bobine = 3,95 cm.
- $\lambda_{m2}$ : étant la conductibilité thermique moyenne qui est donnée par la relation:

$$\lambda_{m2} = \frac{\lambda_{ce} \lambda_{iso} (d' + \delta_{iso})}{\lambda_{ce} \delta_{iso} + \lambda_{iso} \cdot d'} \left[ \text{W/}^\circ\text{C cm} \right]$$

$\lambda_{ce}$ : Conductibilité thermique équivalente donnée pour le cas des conducteurs circulaires par la relation:

$$\lambda_{ce} = \frac{\lambda_{iso}}{0,7 d^{0,55}} \left[ \text{W/}^\circ\text{C m} \right] \text{ avec}$$

$\lambda_{iso}$ : Conductibilité du papier = 0,14 [W/°C] donnée par le tableau T. 10

Tableau T.10

Matériau	$\lambda$ (W/°C.m)
Papier Impregné	0,14
huile	0,164
Cu	375
Coton Impregné	0,27
Presphan	0,17
bois	0,19

$$d = \frac{d' - d}{d}$$

### Application numérique

$$d = \frac{0,164}{1,4} = 0,457$$

$$\lambda_{ce} = \frac{0,14}{0,7 \cdot 0,457^{0,55}} = 0,307 \text{ W/}^\circ\text{C.m}$$

$$\lambda_{m2} = \frac{0,307 \cdot 0,14 (2,04 + 0,3)}{0,307 \cdot 0,3 + 0,14 \cdot 2,04} = 0,26 \text{ W/}^\circ\text{C}$$

Alors l'échauffement  $\theta_{2\max}$  sera pour la première demi-bobine.

$$\theta_{2\max} = \frac{0,0728 \cdot 1,42^2}{8 \cdot 0,26 \cdot 10^{-2}} = 7,05^\circ\text{C}$$

$$\theta_{2}'' \text{ max} = \frac{0,0728 \times 1,65^2}{8 \times 0,26 \cdot 10^6} = 9,3^\circ\text{C}$$

la valeur moyenne  $\theta_{2}'' \text{ moy} = \frac{2}{3} \theta_{2}'' \text{ max} = \frac{2}{3} \cdot 9,3 = 6,2^\circ\text{C}$

$$\theta_{2}'' \text{ moy} = 6,2^\circ\text{C}$$

## 2.2 Échauffement de la surface par rapport à l'huile :

$\theta_{sh}$  doit être calculé pour chaque demi-bobine de l'enroulement HT

Il est donné généralement par la relation :

$$\theta_{sh} = 0,285 Q^{0,6} \text{ (}^\circ\text{C)} \text{ ou}$$

$Q$  = le flux thermique qui traverse la section latérale de la bobine.

Ce flux thermique est donné par la relation :

$$Q = \frac{P}{S_{lat}} \text{ [W/m}^2\text{]}$$

$P$  = Pertes dans la bobine en question

$S_{lat}$  = surface latérale à travers laquelle passe la chaleur.

On peut considérer que les pertes se distribuent d'une manière égale entre les deux demi-bobines de l'enroulement HT.

$$P = \frac{P_{\text{HT}}}{2 \cdot 3} = \frac{1378,5}{6} = 229,75 \text{ W/demi-bobine.}$$

$$S_{lat} = 2 \pi D_{\text{moy}} h_b \xi$$

$D_{\text{moy}}$  = diamètre moyen de la demi-bobine.

$h_b$  = hauteur de la bobine.

$\xi$  = facteur qui tient compte de la présence des calés.

2 : parcequ'il y a une surface intérieure et une surface extérieure.



Application numérique:

$$D'_{\text{moy}} = \frac{D_{21} + D_{22}}{2} = \frac{24,542 + 24,382}{2} = 22,962 \text{ cm}$$

$$D''_{\text{moy}} = \frac{D_{23} + D_{24}}{2} = \frac{25,382 + 28,642}{2} = 27,012 \text{ cm}$$

$$\xi = 0,7 \text{ (généralement)}$$

$$h_B = 25,94 \text{ cm}$$

$$\begin{aligned} S'_{\text{lat}} &= 2\pi D'_{\text{moy}} h_B \xi \\ &= 2 \cdot \pi \cdot 22,962 \cdot 25,94 \cdot 0,7 = 2618 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

$$S'_{\text{lat}} = 2618 \text{ cm}^2$$

$$\begin{aligned} S''_{\text{lat}} &= 2\pi D''_{\text{moy}} h_B \xi \\ &= 2 \cdot \pi \cdot 27,012 \cdot 25,94 \cdot 0,7 = 3080 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

$$S''_{\text{lat}} = 3080 \text{ cm}^2$$

On a ensuite :

$$Q'_2 = \frac{229,75}{0,2618} = 878 \text{ W/m}^2$$

$$Q''_2 = \frac{229,75}{0,3080} = 746 \text{ W/m}^2$$

On peut calculer maintenant l'échauffement  $\theta_{sh}$

$$\theta'_{sh} = 0,285 \times 878^{0,6} = 16,6 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\theta''_{sh} = 0,285 \times 746^{0,6} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$$

On choisit comme valeur  $\theta_{sh}$  caractérisant la HT, la valeur la plus grande

$$\theta_{sh} = 16,6 \text{ }^\circ\text{C}$$

### 2.3 Calcul de l'échauffement de l'enroulement B.T

L'enroulement B.T est réalisé par l'enroulage de la feuille de cuivre.

On peut l'associer toujours à un enroulement stratifié; Nous allons donc



faire le calcul dans cette hypothèse: la valeur de l'échauffement obtenue sera plus grande que la valeur réelle à cause du fait que pour l'enroulement de B.T on ne peut plus négliger complètement les pertes, pour les parties frontales du bobinage (Vo que le cuivre a une bonne conductibilité thermique)

Le calcul de  $\theta_{max}$  se fera comme pour la HT à la seule différence que  $\lambda_{cu} = \lambda_{cuivre} = 375 \text{ W/m}^\circ\text{C}$

En utilisant les mêmes relations de calcul, on aura

$$\lambda_{m1} = \frac{\lambda_{cu} \cdot \lambda_{iso} (a + \delta_{iso})}{\lambda_{cu} \cdot \delta_{iso} + \lambda_{iso} \cdot a} \quad \text{avec } a = \text{épaisseur de la feuille de cuivre}$$

$$\lambda_{cu} = 375 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

$$\lambda_{iso} = \lambda_{papier} = 0,14 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

$$\delta_{iso} = 0,3 \text{ mm}$$

Application numérique:

$$\lambda_{m1} = \frac{375 \cdot 0,14 (0,3 + 0,25)}{375 \cdot 0,3 + 0,14 \cdot 0,25} = 0,256 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

Les pertes spécifiques seront:  $P_1 = 2,14 \frac{J_1^2 \Delta w_1 \cdot 10^{-2}}{(a + \delta_{iso}) h_B}$

Avec  $J_1 =$  densité du courant de l'enroulement B.T  $J_1 = 3,28 \text{ A/mm}^2$   
 $\Delta w_1 =$  section de l'enroulement B.T  $\Delta w_1 = 66 \text{ mm}^2$   
 $a =$  épaisseur de la feuille de cuivre  $a = 0,25 \text{ mm}$   
 $h_B =$  hauteur de la bobine B.T  $h_B = 259,4 \text{ mm}$   
 $\delta_{iso} =$  isolation entre couches.  $\delta_{iso} = 0,3 \text{ mm}$

$$P_1 = 2,14 \frac{3,28^2 \times 66 \cdot 10^{-2}}{0,55 \cdot 259,4} = 0,1065 \text{ W/cm}^3$$

la valeur de l'échauffement maximale  $\theta_{max}$  sera

$$\theta_{1\max} = \frac{P_1 a_1^2}{8 \lambda_{m1}} \text{ (}^\circ\text{C)}$$

$$P_1 = 0,1065 \text{ W/cm}^2$$

$$a_1 = 1,406 \text{ cm}$$

$$\lambda_{m1} = 0,256 \text{ W/m}^\circ\text{C} = 0,256 \cdot 10^2 \text{ W/}^\circ\text{C.cm}$$

$$\text{Donc } \theta_{1\max} = \frac{0,1065 \cdot 1,406^2}{8 \cdot 0,256 \cdot 10^2} = 10,28^\circ\text{C}$$

La valeur moyenne sera :

$$\theta_{\text{moy}} = \frac{2}{3} \theta_{1\max} = \frac{2}{3} \cdot 10,28$$

$$\theta_{\text{moy}} = 6,85^\circ\text{C}$$

#### 2.4 : Echauffement de la surface de l'enroulement par rapport à l'huile

On calcule  $Q = \frac{P_1}{S_{\text{lat1}}}$

Les pertes par bobine sont :  $P_1 = \frac{P_{T1}}{3} = \frac{384,34}{3} = 128,1 \text{ W}$

La surface latérale sera :

$$S_{\text{lat1}} = 2\pi D_{\text{moy}} h_B \cdot \tau$$

$$S_{\text{lat1}} = 2\pi \cdot 18,14 \cdot 25,34 \cdot 0,7 = 2068 \text{ cm}^2 = 0,2068 \text{ m}^2$$

$$Q_1 = \frac{128,1}{0,2068} = 1586 \text{ W/m}^2$$

L'échauffement  $\theta_2$  sera :

$$\theta_{sh2} = 0,285 \cdot 1586^{0,75} = 23,7^\circ\text{C}$$

$$\theta_{sh2} = 23,7^\circ\text{C}$$

#### 2.5 Dimensionnement de la cuve de transformateur

Le transformateur est immergé dans l'huile qui se trouve dans la cuve.

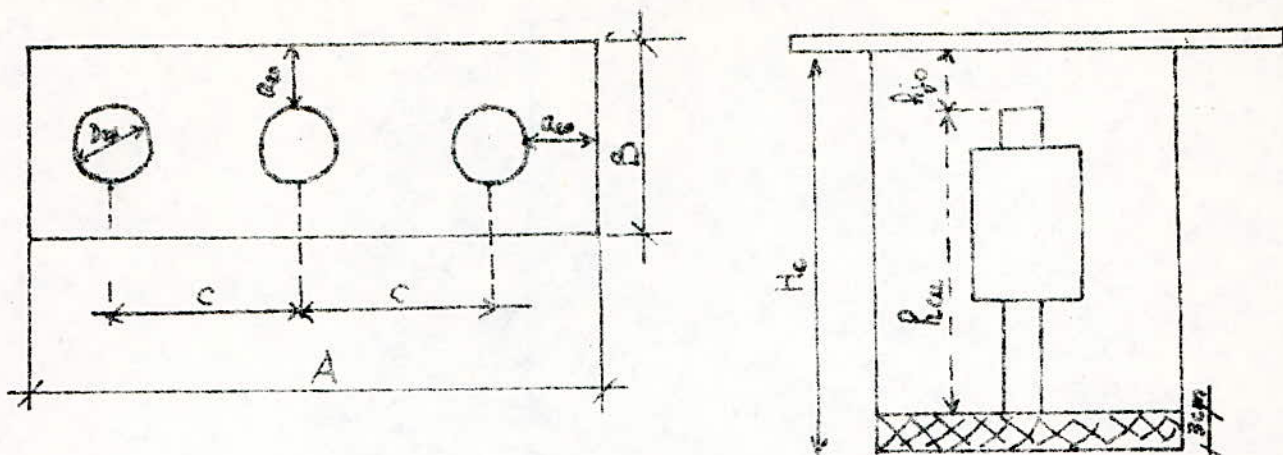
Les cuves des petits transformateurs peuvent être réalisées en toles ondulées

ou avec des tubulures. Nous choisissons la cuve réalisée avec les parois

en tole ondulée.



Les dimensions de la cuve peuvent être déterminées d'après les fig:



Les dimensions  $a_{20}$ ,  $h_{20}$  sont données par le tableau T II

Tableau T II

UKV	Puissance KVA	$a_{20}$ mm	$h_{20}$ mm
<20	20 ÷ 160	55	150 ÷ 250
	200 ÷ 1600	65	150 ÷ 300
	2000 ÷ 10 000	90	150 ÷ 300

notre puissance = 150 KVA

On prendra  $a_{20} = 55$  mm

$h_{20} = 250$  mm

$c$ : la distance entre les axes des colonnes.

$$c = 2 l_{cul} + D = 2 \times 15,11 + 15,73 = 45,95 \text{ cm}$$

$D_{ex}$  = Diamètre extérieur de la HT :  $D_{ex} = 28,642$  cm

$$l_{cul} = 59,8 \text{ cm}$$

$$l_{cul} = 15,11 \text{ cm}$$

$$D = 15,73 \text{ cm}$$

Les valeurs de A et B seront

$$A = 2c + 2a_{20} + D_{ex}$$

$$A = 2 \times 45,95 + (2 \times 5,5) + 28,642 = 131,54 \text{ cm}$$



$$A = 132 \text{ cm}$$

$$B = D_{ex} + 2 a_{20} = 28,642 + 11 = 39,61 \approx 40 \text{ cm.}$$

$$H_c = h_{au} + h_{jo} + 3 = 58,8 + 25 + 3 = 87,8 \approx 88 \text{ cm}$$

Nous avons dit que la cuve choisie est du type rectangulaire réalisée en tôle ondulée. Le tableau donne l'épaisseur usante des tôles utilisées dans les différentes parties de la cuve du transformateur.

Tableau T12 donnant ces valeurs :

Puissance du transformateur KVA		50 ÷ 100	125 ÷ 350	315 ÷ 630	630 ÷ 1600
épaisseurs en mm	fond $\Delta f$	3 ÷ 4	4 ÷ 5	5 ÷ 6	6 ÷ 8
	couvercle $\Delta c$	4 ÷ 5	5 ÷ 6	6 ÷ 8	10
	parois $\Delta p$	0,75 ÷ 1	1 ÷ 1,6	1,5	2,5

Valeurs choisies en fonction de notre puissance  $S_n = 150 \text{ KVA.}$

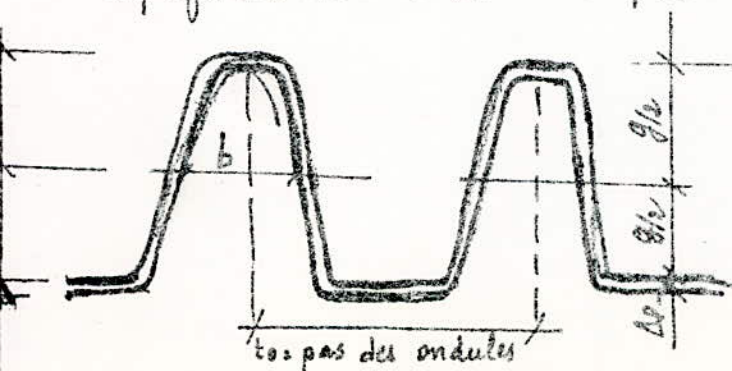
$$\Delta f = 5 \text{ mm}$$

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

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

Il faut maintenant dimensionner les ondules des parois afin que la surface de contact avec l'air soit suffisante pour évacuer toutes les pertes du transformateur sans aucune augmentation exagérée de l'échauffement.

Le profil des ondules est donné par la figure :



généralement, pour la puissance de notre transformateur on a

$$g = 15 \text{ cm}$$

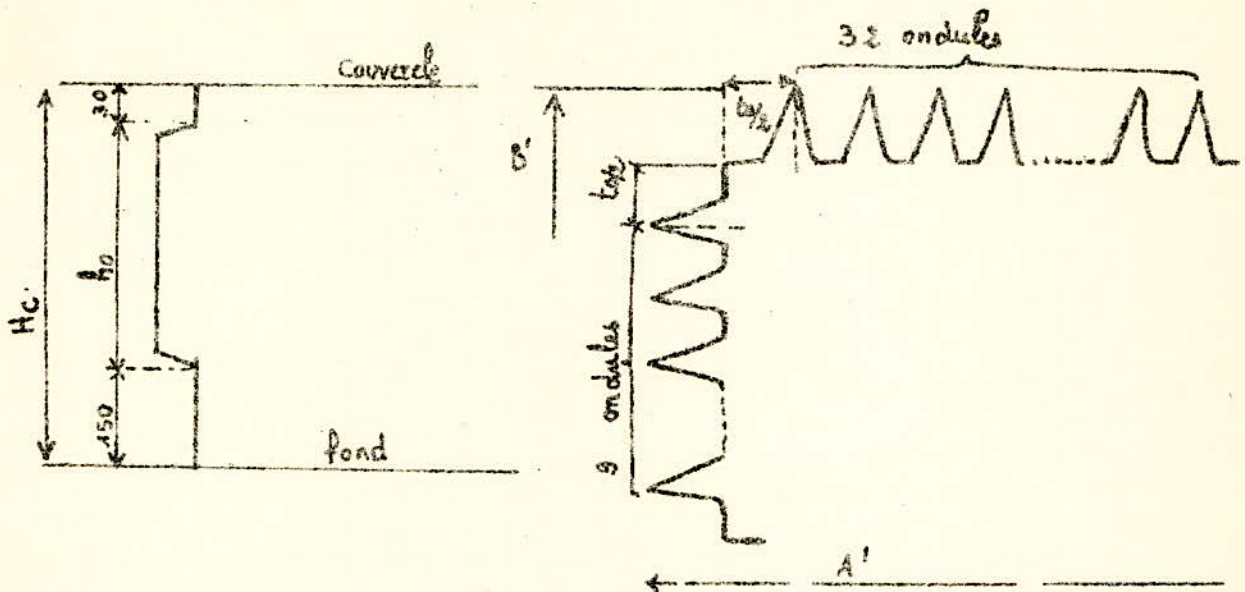
$$\Delta p = 1,5 \text{ mm}$$

$$t_0 = 4 \text{ cm}$$

$$b = 10 \text{ mm}$$

le périmètre d'une ondule sera :  $p_o = 2g + b = 30 + 1 = 31 \text{ cm}$ .

La hauteur des ondules peut être vue sur le schéma suivant :



$$h_o = H_c - 150 = 880 - 150 = 730 \text{ mm} = 73 \text{ cm}$$

La surface latérale d'une ondule est

$$s_b = p_o \cdot h_o = 31 \cdot 73 = 2273 \text{ cm}^2$$

Le nombre d'ondules sera

- en longueur  $A = (1 + n_A) t_o \Rightarrow n_A = \frac{A}{t_o} - 1 = \frac{132}{4} - 1 = 32$

$$n_A = 32 \text{ ondules}$$

- en largeur  $B = (1 + n_B) t_o \Rightarrow n_B = \frac{B}{t_o} - 1 = \frac{40}{4} - 1 = 9$

$$B = 9 \text{ ondules}$$

Le nombre total des ondules :

$$n_o = (n_A + n_B) \times 2 = (32 + 9) \times 2 = 82 \text{ ondules}$$

leur surface latérale (de contact avec l'air) de convection.

$$S_{\text{conv}} = s_b \cdot n_o = 2273 \times 82 = 186386 \text{ cm}^2 = 18,64 \text{ m}^2$$

Les côtes A' et B' qui sont les côtes de gabarit de la cuve peuvent être déterminées.

$$A' = A + 2g = 132 + 2 \times 15 = 132 + 30 = 162 \text{ cm}$$

$$B' = B + 2g = 40 + 2 \times 15 = 70 \text{ cm}$$



La surface latérale enveloppante de la cuve (qui représente la surface de radiation) sera approximativement.

$$S_{cs} = 2(A' + B') h_0 = 2(163 + 70) \cdot 70 = 32480 \text{ cm}^2 = 3,25 \text{ m}^2$$

### 2.6 Echauffement de l'huile par rapport à la cuve

La relation qui donne l'échauffement est :

$$\theta_{hc} = 0,165 \left[ \frac{1,05 (P_0 + P_k)}{S_{conts}} \right]^{0,6} \quad (^\circ\text{C})$$

avec  $P_0$ : pertes de marche à vide en W

$P_k$ : pertes chues à la charge en W

$S_{conts}$ : surface de contact de la cuve avec l'huile en  $\text{m}^2$ .

Application numérique:

$$P_0 = 435,64 \text{ W}$$

$$S_{conts} = 17,8 \text{ m}^2$$

$$P_k = 2440,55 \text{ W}$$

$$\Rightarrow \theta_{hc} = 0,165 \left[ \frac{1,05 \cdot 2876,16}{17,8} \right]^{0,6} = 3,59^\circ\text{C}$$

$$\theta_{hc} = 3,59^\circ\text{C}$$

### 2.8 Echauffement de la cuve par rapport à l'air ambiant:

Cet échauffement est donné par la relation:

$$\theta_{ca} = \left[ \frac{1,05 (P_0 + P_k)}{2,8 S_{co} + 2,5 S_{conts}} \right]^{0,8} = \left[ \frac{1,05 \cdot 2876,16}{2,8 \cdot 3,25 + 2,5 \cdot 17,8} \right]^{0,8} = 25,15^\circ\text{C}$$

$$\theta_{ca} = 25,15^\circ\text{C}$$

On peut maintenant trouver les températures des différentes parties du transformateur

$$\theta_{co} = 25,15^\circ\text{C}$$

$$\theta_{sh_i} = 23,7^\circ\text{C}$$

$$\theta_{moy_1} = 6,85^\circ\text{C}$$

$$t_{air} = 40^\circ\text{C}$$

$$\theta_{hc} = 3,6^\circ\text{C}$$

$$\theta_{sh_e} = 16,6^\circ\text{C}$$

$$\theta_{moy_2} = 5,2^\circ\text{C}$$

La température de l'huile sera

$$t_h = \theta_{hc} + \theta_{co} + t_{air} = 3,6 + 25,15 + 40 = 68,75^\circ\text{C}$$

La température de l'enroulement B.T sera

$$t_{en} = \theta_{moy_1} + \theta_{sh_i} + t_h = 6,85 + 23,7 + 68,75^\circ\text{C} = 99,3^\circ\text{C} < 105^\circ\text{C}$$



La température de l'enroulement HT

$$t_{li} = \theta_{moy} + \theta_{sh} + t_h = 6,2 + 16,6 + 68,75 = 91,55^\circ\text{C} < 105^\circ\text{C}$$

On constate que les valeurs moyennes sont inférieures à la température de  $105^\circ\text{C}$  qui correspond à la classe A de la température dans laquelle sont construits les transformateurs.

### III Calcul mécanique du transformateur :

Le calcul mécanique du transformateur se propose de vérifier la tenue mécanique des enroulements aux efforts électrodynamiques de court-circuit et des différentes parties constructives (cuve, couvercle, fond, patte de serrage, boulons et tirants).

#### 3.1 Efforts électrodynamiques

les efforts électrodynamiques de court-circuit qui peuvent apparaître dans les enroulements du transformateur sont dépendants du courant maximal de court-circuit. la valeur de ce courant est donnée par la relation :

$$I_{kmax} = \sqrt{2} K_m I_{kdyn} \text{ ou } K_m = \text{coefficient d'impulsion}$$

$$I_{kdyn} = \text{composante stabilisée du courant de court-circuit en A.}$$

Les valeurs sont données par :

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

$$K_m = 1 + e^{-\pi \frac{U_{k\sigma}}{U_{kR}}}$$

#### Application numérique :

$$U_{kR} = 3,55\%$$

$$U_{k\sigma} = 1,627 \quad K_m = 1 + e^{-\pi \frac{1,627}{3,55}} = 1 + 0,24 = 1,24$$

$$I_{n1} = 216,5 \text{ A}$$

$$I_{n2} = 5 \text{ A}$$

$$I_{kdyn1} = 216,5 \frac{100}{3,9} = 5551 \text{ A}$$

$$I_{kdyn2} = 5 \cdot \frac{100}{3,9} = 128 \text{ A}$$

On aura :  $i_{Kmax1} = 1,24 \times 5551 = 6883 \text{ A}$

$i_{Kmax2} = 1,24 \times 128 = 159 \text{ A}$

Les forces de court-circuit qui peuvent apparaître sont données dans la littérature de spécialité par les relations suivantes :

- Forces radiales :

$$F_{R1} = \frac{6,4 (W_1 i_{Kmax1})^2 l_{moy1} K_R 10^{-8}}{h_B} \quad [\text{kgf}]$$

$$F_{R2} = \frac{6,4 (W_2 i_{Kmax2})^2 l_{moy2} K_R 10^{-8}}{h_B} \quad [\text{kgf}]$$

ou  $l_{moy1}$  et  $l_{moy2}$  sont les longueurs moyennes des spires.

Application numérique :

$h_B = 25,94 \text{ cm}$

$l_{moy1} = 0,57 \text{ m} = 57 \text{ cm}$

$W_1 = 38$

$l_{moy2} = 0,80 \text{ m} = 80 \text{ cm}$

$W_2 = 1645$

$K_R = 0,955$

$$F_{R1} = \frac{6,4 (38 \cdot 6883)^2 \times 57 \times 0,955 \cdot 10^{-8}}{25,94} = 9,2 \cdot 10^3 \text{ kgf}$$

$$F_{R2} = \frac{6,4 (1645 \cdot 159)^2 \times 80 \cdot 0,955 \cdot 10^{-8}}{25,94} = 12,8 \cdot 10^3 \text{ kgf}$$

- Forces axiales :

Les forces axiales des bobinages cylindriques de hauteur égale sont données

par les relations suivantes :

$$F_{A1} = F_{R1} \frac{a_1}{2h_B} \quad ; \quad F_{A2} = F_{R2} \frac{a_2}{2h_B}$$



$a_r$  étant la largeur rapportée du canal de fuite.

$$a_r = 2,79 \text{ cm.}$$

80

Application numérique:

$$F_{a1} = 9,2 \cdot 10^3 \frac{2,79}{2 \times 25,94} = 4,94 \cdot 10^2 \text{ kgf.}$$

$$F_{a2} = 12,8 \cdot 10^3 \frac{2,79}{2 \times 25,94} = 6,88 \cdot 10^2 \text{ kgf.}$$

### 3.2 Efforts unitaires produits par les forces électrodynamiques de court-circuit

- Forces radiales:

L'enroulement de la B.T est soumis à un effort de compression par la force radiale  $F_{r1}$ ; la valeur unitaire de cet effort est donnée par:

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

$w_1$ : nombre de spires de l'enroulement B.T  $w_1 = 38$

$s w_1$ : section de la spire de l'enroulement B.T  $s w_1 = 66 \text{ mm}^2 = 0,66 \text{ cm}^2$ .

$$\sigma_{r1} = \frac{9,2 \cdot 10^3}{2\pi \cdot 38 \cdot 0,66} = 544 \text{ kgf/cm}^2.$$

la valeur admissible pour le cuivre est de  $\sigma_{ad} = 700 \text{ kgf/cm}^2$

$$\sigma_{r1} < \sigma_{ad}$$

L'enroulement H.T est soumis à un effort de traction par la force radiale  $F_{r2}$ , la valeur unitaire de cet effort est donnée par:

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

$w_2$ : nombre de spires de l'enroulement HT  $w_2 = 1645$

$s w_2$ : section de la spire de l'enroulement HT  $s w_2 = 1,539 \text{ mm}^2 = 0,01539 \text{ cm}^2$

$$\sigma_{a2} = \frac{12,8 \cdot 10^3}{27,1645 \cdot 0,01539} = 80,5 \text{ kgf/cm}^2$$

$$\sigma_a < \sigma_{ad}$$

- Forces axiales:

les forces axiales compriment les enroulements. Les charges spécifiques (efforts unitaires) produites sont:

$$\sigma_{a1} = \frac{F_{a1}}{S_1} \text{ kgf/cm}^2$$

$F_{a1}, F_{a2}$  les forces axiales.

$$\sigma_{a2} = \frac{F_{a2}}{S_2} \text{ kgf/cm}^2$$

$$S_1 = \pi D_{moy1} a_1$$

$$S_2 = \pi D_{moy2} a_2$$

surface sur laquelle s'exerce la force axiale

Application numérique:

$$D_{moy1} = 18,14 \text{ cm}$$

$$a_1 = 1,406$$

$$F_{a1} = 4,94 \cdot 10^2 \text{ kgf}$$

$$D_{moy2} = 25,49 \text{ cm}$$

$$a_2 = 3,95 \text{ cm}$$

$$F_{a2} = 6,88 \cdot 10^2 \text{ kgf}$$

$$S_1 = \pi \cdot 18,14 \cdot 1,406 = 80 \text{ cm}^2$$

$$S_2 = \pi \cdot 25,49 \cdot 3,95 = 316 \text{ cm}^2$$

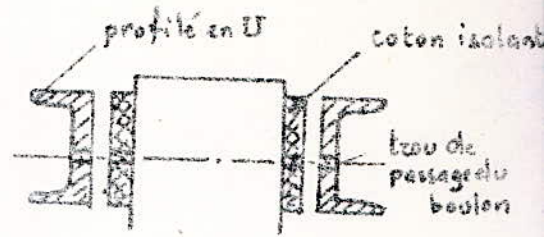
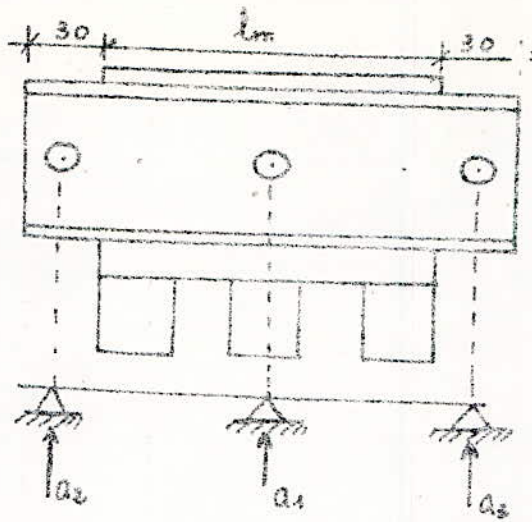
$$\sigma_{a1} = \frac{4,94 \cdot 10^2}{80} = 62 \text{ kgf/cm}^2 \ll \sigma_{ad}$$

$$\sigma_{a2} = \frac{6,88 \cdot 10^2}{316} = 22 \text{ kgf/cm}^2 \ll \sigma_{ad}$$

### 3.3 Dimensionnement des parties mécaniques du transformateur:

- Poutre de serrage des culasses:

Le paquet de toles de la culasse est serré par deux profils en U à l'aide de trois boulons de serrage disposés comme dans la figure ci-dessous.



Ce système de serrage permet la réalisation du serrage avec un nombre minimal de trous dans le circuit magnétique ; pratiquement, seule la colonne centrale aura un trou. Les trous de serrage des boulons doivent exécuter une face qui assure une pression suffisante de paquet de tôles de la culasse. La force totale de serrage à réaliser est donnée par la relation :

$$P = p \cdot l_m \cdot h_{cu} \quad [\text{kgf}]$$

$p$  : pression à réaliser  $\text{kgf/cm}^2$

$l_m$  : gabarit du circuit magnétique en cm

$h_{cu}$  : hauteur de la culasse en cm.

Généralement, la pression  $p$  est entre 2 à 6  $\text{kgf/cm}^2$  et elle doit être suffisante afin de bien serrer le paquet de tôles et diminuer ainsi que le bruit du transformateur due aux vibrations des tôles.

On choisit  $p = 3 \text{ kgf/cm}^2$  vu que le transformateur est petit.

$$h_{cu} = 12,92 \text{ cm}$$

$$l_m = 2C + D = 2 \times 45,95 + 15,73 = 107,67 \text{ cm}$$

$$P = 3 \cdot 12,92 \cdot 107,63 = 4172 \text{ kgf.}$$

Cette force se répartit sur les 3 boulons de serrage :

$$a_1 = \frac{5}{8} P = \frac{5}{8} 4172 = 2607,5 \text{ kgf.}$$

$$a_2 = a_3 = \frac{3}{16} P = \frac{3}{16} 4172 = 782 \text{ kgf.}$$



on constate que le boulon central est le plus sollicité. "En choisissant les 3 boulons d'après l'effort du plus sollicité, on augmente la sécurité". Le diamètre du boulon est donné par la relation:

$$d_b = \sqrt{\frac{4a_1}{\pi \sigma_a}}$$

le boulon est sollicité à la traction.

$\sigma_a$ : charge admissible de l'acier. cette charge est égale à  $1200 \text{ kgf/cm}^2$  pour l'acier A 33 (dont la charge de rupture est  $3300 \text{ kgf/cm}^2$ ).

$$d_b = \sqrt{\frac{4 \cdot 26075}{\pi \cdot 1200}} = 1,66 \text{ cm.}$$

Le tableau T13 donne les valeurs normalisées des boulons filetés avec filet métrique normal.

Diamètre du filet:

extérieure mm	10	12	14	16	18	20	8
intérieure mm	8,052	9,726	11,02	13,402	14,75	16,752	6,376

La poutre doit être dimensionnée de telle sorte que le moment de flexion dû à la pression de rouage ne produise pas un effort unitaire supérieur à la valeur admissible pour l'acier dont est réalisée la poutre. la valeur maximale du moment de flexion est donnée par la relation:

$$M_{\max} = \frac{P_{\text{rouage}} \left(\frac{P_m}{2}\right)^2}{8} = \frac{3 \cdot 12,92 \cdot 107,67^2}{32} = 14 \cdot 10^3 \text{ kgf/cm}$$

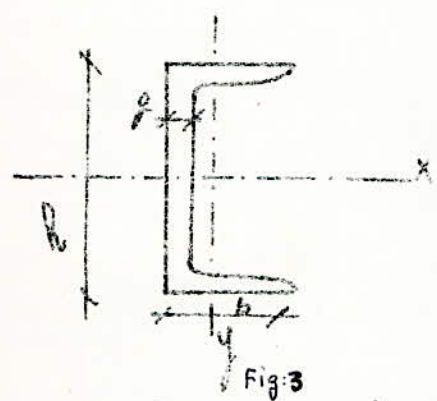
le profilé en U doit avoir un module de résistance par rapport à l'axe y. (fig.)

$$W_y \geq \frac{M_{\max}}{\sigma_{af}} \text{ [cm}^3\text{]} \quad \sigma_{af}: \text{effort unitaire admissible pour l'acier A33, à la flexion } \sigma_{af} = 1200 \text{ kg/cm}^2$$

$$W_y = \frac{14 \cdot 10^3}{1200} = 11,7 \text{ cm}^3$$

Il faut choisir un profilé d'après les normes. le tableau donne les caractéristique des profilés P.N.U (profilé normalisé en U) par rapport à l'axe.

U	h mm	b mm	g mm	A cm <sup>2</sup>	P/A kg	I <sub>x</sub> cm <sup>4</sup>	W <sub>x</sub> cm <sup>3</sup>	I <sub>y</sub> cm <sup>4</sup>	W <sub>y</sub> cm <sup>3</sup>
12	120	55	7	17	13,4	364	60,7	43,2	11,1
14	140	60	7	20,4	16	605	86,4	62,7	14,8
16	160	65	7,5	24	18,8	925	116	85,3	18,3
18	180	70	8	28	22	1350	150	114	22,4
20	200	75	8,5	32,2	25,3	1910	191	148	27



on choisit le PNU 14

$h = 140 \text{ mm}$   
 $b = 60 \text{ mm}$   
 $g = 7 \text{ mm}$

On dispose entre la poutre et la culasse une feuille de puschpan d'épaisseur 2mm. Le boulon est introduit dans une foreuse en baguette afin d'éviter le court-circuit des boles.

Il faut (pente) vérifier que la feuille d'isolant entre la poutre et la culasse n'est pas écrasée dans la zone de contact avec le boulon.

L'effort unitaire qui apparaît dans l'isolation du boulon lors du passage par le trou de la poutre sera :

$$P_{is} = \frac{G}{2g \cdot d_b}$$

$G$  poids de la poutre démontable  
 $g$  et  $d_b$  les dimensions du boulon et de la poutre (cm).

$d_b = 1,66 \text{ cm}$  ,  $g = 0,7 \text{ cm}$

$G = G_{cuiss} + G_{on}$

$$G_{\text{cuivre}} = 92,16 \text{ kg}$$

$$G_{\text{cm}} = 363,53$$

$$G = 92,16 + 363,53 = 456 \text{ kg}$$

$$\sigma_{\text{is}} = \frac{456}{2 \cdot 0,7 \cdot 1,66} = 196 \text{ kgf/cm}^2$$

L'effort admissible dans l'isolation est  $\sigma_{\text{is}} = 200 \text{ kgf/cm}^2$ , donc l'isolation ne s'écroulera pas car  $\sigma_{\text{is}} < \sigma_{\text{ais}}$ .

### 3.4 Dimensionnement des tirants :

Le circuit magnétique des petits transformateurs est suspendu au couvercle à l'aide de 4 tirants. Ces tirants doivent supporter tout le poids de la partie découvrable donc  $G = 456 \text{ kg}$

Le diamètre du tirant sera déterminé par la relation déjà présentée.

$$d_t = \sqrt{\frac{4G}{\pi \sigma_a}} = \sqrt{\frac{4 \times 456}{\pi \times 1200}} = \sqrt{0,48} = 0,7 \text{ cm}$$

On peut choisir :

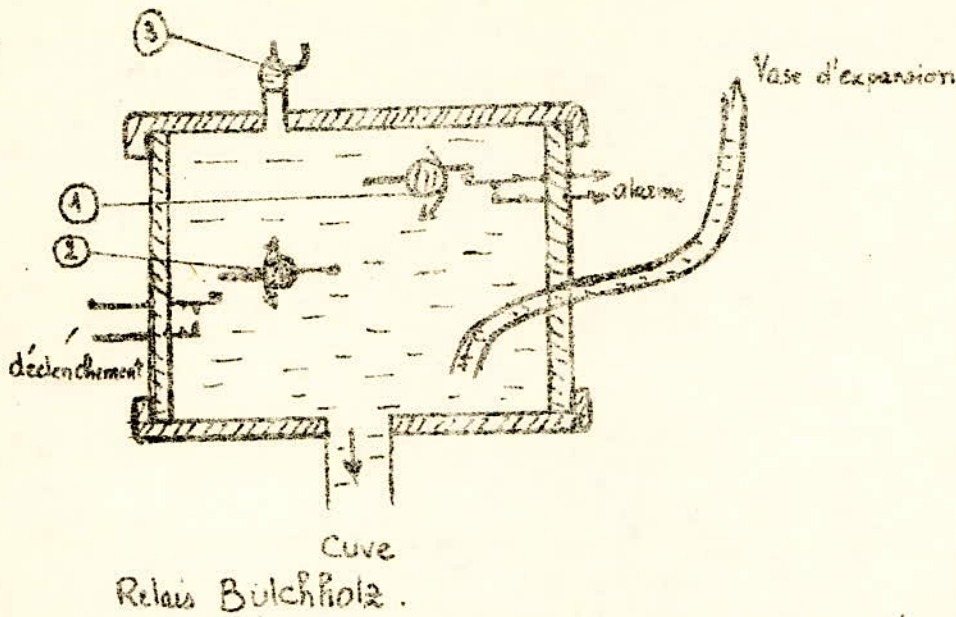
$$\boxed{d_t = 10 \text{ mm}}$$

$$d_{\text{int}} = 8,052 > 7$$



## IV Parties auxiliaires du transformateur:

les enroulements sont protégés contre tout accident interne avec le relais Buchholz représenté sur la figure ci-dessous.



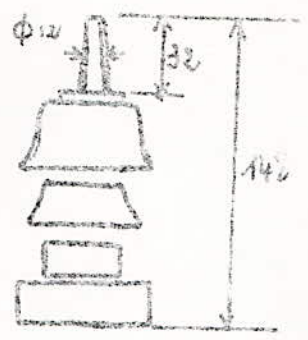
Si il y a un défaut à l'intérieur du transformateur (court-circuit entre les spires, fuite à la masse etc...) le courant augmente, donc la quantité de chaleur qui se produit à l'intérieur des enroulements et surtout à l'endroit du défaut conduit à l'augmentation i.e l'échauffement de l'huile.

L'échauffement local détermine un dégagement de gaz qui s'accumule en haut du relais; le niveau de l'huile baisse et le flotteur (4) descend pour fermer le contact d'alarme. Ensuite le flotteur (2) s'abaisse afin de provoquer un déclenchement.

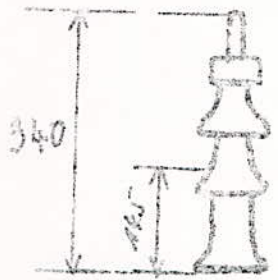
La vanne (3) sert pour la détection de l'inflammabilité des gaz.  
Le transformateur comporte les accessoires suivants:

- bouchon de remplissage.
- bouchon de vidange.
- Anneaux de levage
- galets de roulement
- traversée HT en porcelaine
- traversée BT en porcelaine.

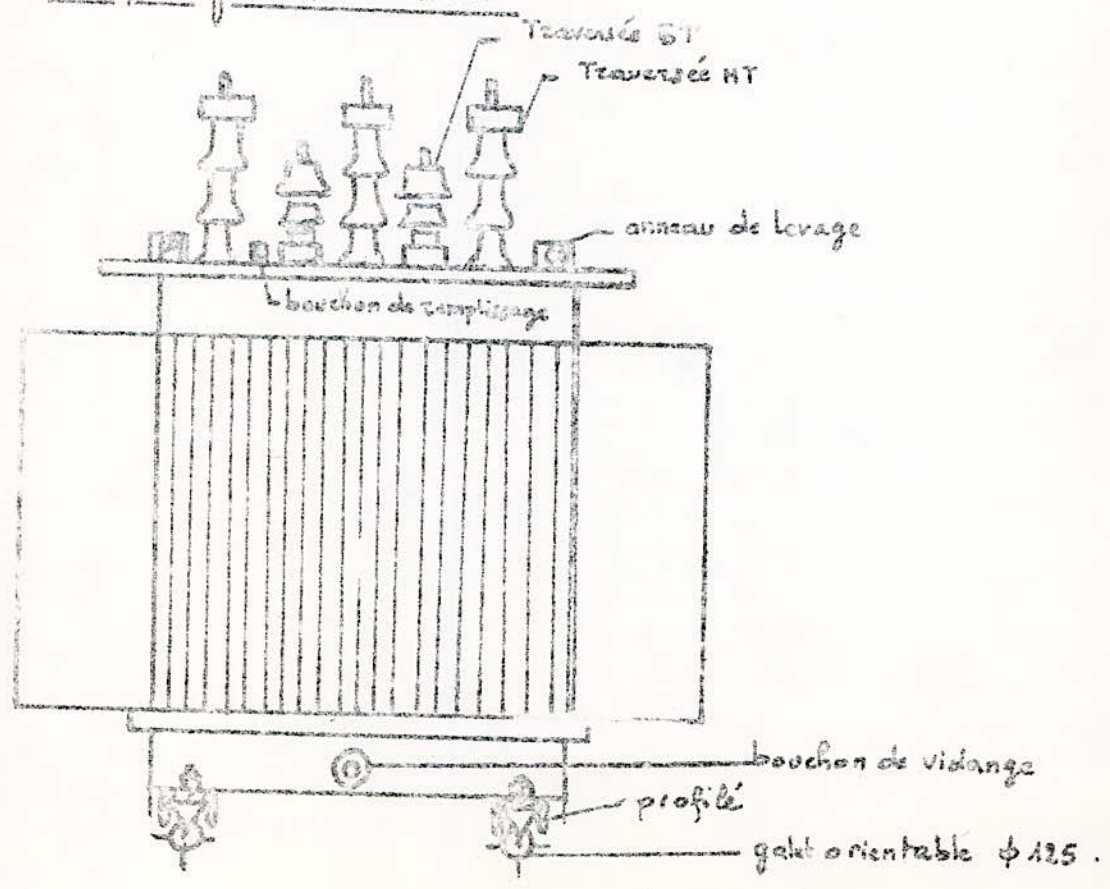
Traversée BT en porcelaine



Traversée HT en porcelaine



Dispositif de manutention :



## CONCLUSION

Les résultats obtenus sont comparés à ceux des calculs de charge et l'évaluation des écarts de différence ne dépasse pas 4% et ce, tout au long du calcul.

Dans la détermination des caractéristiques mécaniques, nous remarquons que les composantes des forces radiales et axiales de l'enroulement à feuilles de cuivre sont inférieures à celles de l'enroulement H.T. De ce fait, nous pouvons énoncer une plus grande stabilité mécanique pour le procédé utilisé à l'enroulement B.T.

Du calcul Thermique, nous constatons que l'échauffement moyen  $\theta_{moy}$  est plus important dans le cas de l'enroulement B.T.

Aussi des problèmes de refroidissement y seraient engendrés par ce procédé, néanmoins dans la moyenne et grande puissance.



## Bibliographie

- Calcul des machines electriques  
TOME I  
TOME II      par LIWCHITZ M.
- Cours de M<sup>r</sup> PARLOG .