

5/79

UNIVERSITÉ D'ALGER

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DÉPARTEMENT ÉLECTRICITÉ

2er

PROJET DE FIN D'ETUDES

المدرسة الوطنية للعلوم الهندسية
 المكتبة

 ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
 BIBLIOTHÈQUE

CALCUL
D'UN TRANSFORMATEUR
 $S_m = 2500 \text{ KVA}$

PROPOSE PAR :

VASILE STIRBU

المدرسة لوطنية للعلوم الهندسية
 المكتبة

 ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
 BIBLIOTHÈQUE

ETUDIE PAR :

BRAHMIA Mostefa Kamel

UNIVERSITÉ D'ALGER

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DÉPARTEMENT ÉLECTRICITÉ

PROJET DE FIN D'ETUDES

**CALCUL
D'UN TRANSFORMATEUR**

$S_m = 2500$ KVA

PROPOSE PAR :

VASILE STIRBU

ETUDE PAR :

BRAHMIA Mostefa Kamel

A MES PARENTS,

A TOUS MES PROFESSEURS,

A TOUS MES AMIS.

A handwritten infinity symbol (∞) in blue ink, positioned to the right of the text.



Je remercie tous les Professeurs de l'École Nationale Polytechnique qui ont contribué à ma formation Universitaire, et en particulier Monsieur Vasile STIRBU pour avoir dirigé et orienté cette étude.

Je remercie également tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce polycopé.

- - - - -

T A B L E D E S M A T I E R E S

- INTRODUCTION
- CAHIER DES CHARGES
- PUISSANCES, TENSIONS ET COURANTS PAR ELEMENTS.
- PREMIERE PARTIE : ETUDE THEORIQUE

CHAPITRE 1 :

- 1 - PRINCIPALES DEFINITIONS
- 2 - GRANDEURS NOMINALES
- 3 - PRINCIPAUX TYPES DE TRANSFORMATEURS
- 4 - PRINCIPAUX ELEMENTS DES TRANSFORMATEURS

CHAPITRE 2 : CONDITIONS PHYSIQUES DE FONCTIONNEMENT DU TRANSFORMATEUR

- 1 - PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT
- 2 - EQUATIONS DES FMM ET FEM
- 3 - TRANSFORMATEUR REDUIT
- 4 - EQUATIONS DES FMM ET FEM D'UN TRANSFORMATEUR
REDUIT.
- 5 - SCHEMA EQUIVALENT D'UN TRANSFORMATEUR REDUIT.

DEUXIEME PARTIE : CALCUL DU TRANSFORMATEUR

- A - CALCUL APPROCHE
- 1 - DIAMETRE DE LA COLONNE

- 1 - TENSION REACTIVE DE COURT-CIRCUIT
- 2 - FACTEUR DE SYLTESSE
- 3 - CANAL DE FUITE RAPPORTEE
- 4 - FACTEUR DE ROGOWSKI
- 5 - FACTEUR D'UTILISATION
- 6 - INDUCTION MAGNETIQUE DE CRETE
- 7 - VALEURS NUMERIQUES DU DIAMETRE

II - CALCUL DES ENROULEMENTS

1° - HAUTEURS DES ENROULEMENTS

1.1. - DIAMETRE MOYEN

1.2. - HAUTEURS DES ENROULEMENTS

2° - TENSION PAR SPIRE

2.1. - SECTION UTILE DE LA COLONNE

2.2. - TENSION PAR SPIRE

3° - NOMBRE DE SPIRES DES ENROULEMENTS

3.1. - ENROULEMENTS BASSE-TENSION

3.2. - ENROULEMENTS HAUTE-TENSION

4° - SECTION ET CHOIX DES CONDUCTEURS

4.1. - DENSITE MOYENNE DU COURANT

4.2. - SECTION DES CONDUCTEURS

4.3. - FORMES DE LA SECTION DES CONDUCTEURS

4.4. - ISOLATION

5° - CHOIX DU TYPE D'ENROULEMENT

.../

6° - ESPACE OCCUPE PAR LES ENROULEMENTS

6.1. - NOMBRE DE GALETTES ET DE SPIRES PAR GALETTE

6.2. - LARGEURS DES BOBINES

B - DETERMINATION DEFINITIVE

I - GRANDEURS DES ENROULEMENTS

1 - ENROULEMENT BASSE-TENSION

2 - ENROULEMENT HAUTE-TENSION

II - CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES ET MECANIKES DES ENROULEMENTS

1 - ENROULEMENT BASSE-TENSION

2 - ENROULEMENT HAUTE-TENSION

3 - PERTES JOULES DUES A LA CHARGE

III - GEOMETRIE ET CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES DU CIRCUIT MAGNETIQUE.

1 - LONGUEUR DE LA FENETRE

2 - HAUTEUR DE LA FENETRE

3 - LONGUEUR ENTRE AXES DE DEUX COLONNES SUCCESSIVES

4 - SECTION DE LA CULASSE

5 - INDUCTION MAGNETIQUE DANS LA CULASSE

6 - GEOMETRIE DE LA SECTION DE LA COLONNE

7 - GEOMETRIE DE LA SECTION DE LA CULASSE

8 - HAUTEUR DU CIRCUIT MAGNETIQUE

9 - LARGEUR DU CIRCUIT MAGNETIQUE

.../

- TROISIEME PARTIE : CALCUL MECANIQUE

I - EFFORTS ELECTRODYNAMIQUES SUR LES ENROULEMENTS

- 1 - COURANT DE COURT-CIRCUIT
- 2 - FORCES ELECTRODYNAMIQUES
- 3 - EFFORTS UNITAIRES

II - VOLUME ET POIDS DU TRANSFORMATEUR

- 1 - VOLUME OCCUPE PAR LES ENROULEMENTS
- 2 - VOLUME OCCUPE PAR LE CIRCUIT MAGNETIQUE
- 3 - VOLUME DE LA MASSE DECUVABLE
- 4 - DIMENSIONS ET VOLUME DE LA CUVE
- 5 - VOLUME DE L'HUILE
- 6 - POIDS DU TRANSFORMATEUR

- QUATRIEME PARTIE : CALCUL THERMIQUE

- 1 - ECHAUFFEMENT DU NOYAU
- 2 - ECHAUFFEMENTS DES ENROULEMENTS
- 3 - ECHAUFFEMENT DE L'HUILE PAR RAPPORT A LA CUVE
- 4 - ECHAUFFEMENT DE LA CUVE PAR RAPPORT A L'AIR
- 5 - GRAPHIQUE DES ECHAUFFEMENTS
- 6 - TEMPERATURES

- CINQUIEME PARTIE : RENDEMENT DU TRANSFORMATEUR

- 1 - EXPRESSION DE RENDEMENT
- 2 - COEFFICIENT DE CHARGE OPTIMAL
- 3 - TABLEAU DE VALEURS.

- C O N C L U S I O N -

A N N E X E .

- 1 - M O D E D E C O N N E X I O N
- 2 - A P P A R E I L L A G E A U X I L I A I R E
- 3 - R E L A I S B U C H H O L T Z .

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

Les centrales de production d'énergie électriques n'étant pas toujours installées sur les lieux de consommation, il est par conséquent nécessaire de la transporter du lieu de production au lieu de consommation.

Pour des raisons d'économie, et pour réduire les pertes, le transport se fait généralement en haute-tension ; mais comme la centrale fournit la puissance sous une tension de l'ordre de 15 KV, il faut placer à la sortie de l'alternateur un transformateur élévateur (15/220 KV ; 15/60 KV ; 15/30 KV ; etc...).

Arrivée sur les lieux de consommation, la puissance transportée-peut être absorbée sous différentes tensions selon la nature des clients, (clients haute-tension, clients moyenne-tension, et enfin clients basse-tension).

Pour alimenter les clients B.T. et M.T., il faut placer des transformateurs abaisseurs (H.T./M.T. ; H.T./B.T.). Ceci montre l'importance d'un transformateur dans tout réseau de transport, de répartition ou de distribution de l'énergie électrique.

L'objet de notre étude est le dimensionnement de toutes les parties qui composent un transformateur (partie mécanique, partie électrique, partie magnétique), en tenant compte du Cahier des Charges.

L'étude se divise en cinq (5) parties :

- une première partie pour l'étude théorique du transformateur,
- une deuxième partie pour l'étude et la détermination de toutes les dimensions principales, (grandeurs géométriques, magnétiques et électriques),
- une troisième partie comprendra la détermination des différents efforts auxquels le transformateur est soumis.

Elle comprendra également le calcul du volume et du poids du transformateur.

- Une quatrième partie pour le calcul thermique.

On déterminera les échauffements des différentes zones du transformateur.

- La dernière partie fera l'objet de l'étude des caractéristiques électriques : rendement du transformateur.

CAHIER DE CHARGES

1 - SUJET :

- Calcul et Construction d'un transformateur pour services internes.

2 - DONNEES :

Puissance nominale apparente $S_n = 2.300 \text{ KVA}$

Tensions nominales :

- enroulement basse-tension $U_{1n} = 5,5 \text{ KV}$
- enroulement haute-tension $U_{2n} = 15 \text{ KV}$
- tension de réglage sur enroulement haute-tension
+ 2 x 2,5 %
- nombre de phase : 3 phases
- fréquence d'utilisation : $f = 50 \text{ HZ}$
- connexions : Dyn - 11
- refroidissement naturel dans l'huile
- tension de court-circuit : $U_k = 6,5 \%$
- pertes dues à la charge : $P_k = 23 \text{ KW}$
- pertes à vide : $P_0 = 4,5 \text{ KW}$
- courant à vide : $I_0 = 1,5 \%$

Puissances, courants et tensions par éléments :

1 - Puissance nominale apparente par colonne S_c

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

m_c = nombre de colonnes

$$m_c = 3$$

S_n = puissance nominale apparente (KVA)

S_c = puissance apparente par colonne
(KVA)

$$S_c = \frac{2.300}{3} = 766,666 \text{ KVA}$$

2 - Tensions nominales des enroulements :

2.1.- Enroulements basse-tension :

Ces enroulements sont connectés en triangle.
La tension par phase est donnée par la relation :

$$U_{f1} = U_{1n} = 5,5 \text{ KV}$$

U_{1n} : tension nominale entre phases

U_{f1} : tension nominale par phase.

2.2.- Enroulements haute-tension :

Ces enroulements sont connectés en étoile,
la tension par phase est donnée par la relation
suivante :

$$U_{f2} = \frac{U_{1n}}{K_f}$$

U_{2n} = tension nominale entre phases

U_{f2} = tension nominale par phases

K_f = facteur de phases - $K_f \sqrt{3}$

$$U_{f2} = \frac{15}{\sqrt{3}} = 8,66 \text{ KV}$$

3 - Courant nominal de l'enroulement basse-tension :

$$I_{f1} = \frac{S_c}{U_{f1}} = \frac{766,66}{5,5} = 139,392 \text{ K}$$

S_c : puissance par donnée (KVA)

U_{f1} : tension par phase (KV)

I_{f1} : courant nominal dans la basse-tension par phase.

PREMIERE PARTIE

ETUDE THEORIQUE

CHAPITRE I

1 - PRINCIPALES DEFINITIONS :

Un transformateur est un appareil électromagnétique statique, destiné à transformer un réseau alternatif donné en un autre, de même fréquence, avec en général des caractéristiques différentes, en particulier, un autre courant et une autre tension.

Le transformateur se compose essentiellement :

a - d'un circuit magnétique réalisé par empilage et enchevêtrement de tôles magnétiques isolées entre-elles (noyau),

b - d'un enroulement dit primaire qui reçoit de l'énergie du réseau d'alimentation,

c - d'un enroulement dit secondaire qui restitue l'énergie électrique au réseau qu'il alimente.

Pour prévenir les effets de l'air sur l'isolement et améliorer le refroidissement du transformateur, on place son noyau avec les enroulements dans une cuve remplie d'huile. Ce sont des transformateurs dans l'huile.

Si la tension primaire est supérieure à la tension secondaire, le transformateur est dit abaisseur ou réducteur. Si au contraire, la tension primaire est inférieure à celle du secondaire, le transformateur est dit élévateur.

2 - GRANDEURS NOMINALES :

Elles caractérisent le régime de fonctionnement du transformateur.

Ce sont en général des grandeurs indiquées sur la plaque signalétique.

On appelle puissance nominale la puissance obtenue au secondaire.

La tension secondaire nominale est celle obtenue au secondaire quand le transformateur fonctionne à vide.

3 - PRINCIPAUX TYPES DE TRANSFORMATEURS :

Les types de transformateurs les plus importants sont :

a - transformateur de puissance (transport et distribution),

b - les autotransformateurs,

c - les transformateurs pour l'alimentation des groupes convertisseurs statiques,

d - les transformateurs d'essai (essai HT),

- e - les transformateurs de puissance spéciaux (alimentation des fours ...),
- f - les transformateurs de mesure,
- g - les transformateurs utilisés en radiotechnique.

4 - PRINCIPAUX ELEMENTS DES TRANSFORMATEURS :

Tout transformateur se compose essentiellement du noyau des enroulements, de la cuve d'huile et des isolateurs de sortie.

A - Noyau :

C'est l'ensemble formant le circuit magnétique avec tous les éléments faisant partie de cet ensemble. Suivant le type de noyau, on a deux types de transformateurs :

- transformateurs à colonnes
- et - transformateurs cuirassés.

B - Enroulements :

Selon la disposition de la H.T. par rapport à la B.T., on distingue :

- a - les enroulements concentriques,
- b - les enroulements alternés.

Dans " a ", on distingue :

- enroulements cylindriques en couches,
- enroulements en hélices et variantes,
- enroulements continus. ^{des}

C - Cuve d'huile :

Pour les transformateurs à l'huile, la partie active (noyau-enroulement) est plongée dans une cuve remplie d'huile.

En s'échauffant, l'huile circule à l'intérieur de la cuve et assure le refroidissement naturel du transformateur.

On distingue trois (3) sortes de cuves :

- cuve lisse pour transformateur de faible puissance (_ 30 KVA),
- cuve à tubes pour transformateur de puissance élevée (jusqu'à 3.000 KVA),
- cuve en tôle ondulée.

Pour les transformateurs jusqu'à 10.000 KVA, on a des réfrigérants radiateurs à refroidissement naturel adaptés aux parois de la cuve.

Pour $S > 10.000$ KVA, les radiateurs sont soufflés.

D - Couvercle de cuve et isolateurs de sortie :

Sur le couvercle sont placés :

- les isolateurs de sortie H.T. et B.T.
- le conservateur d'huile,
- le tube d'évacuation des gaz (pour transformateur à S > 10.000 KVA).

Entre le conservateur et la cuve, on installe un relai BUCHHOLZ qui signale tout accident dans le transformateur ou sépare le transformateur du réseau en cas d'avarie.

Le tube d'échappement est destiné à protéger la cuve contre les dégâts possibles en cas de court-circuit, et par suite de la formation des gaz dans la cuve et de l'accroissement brusque de la pression.

E - Huile du transformateur :

Afin d'améliorer l'isolement et le refroidissement de la partie active du transformateur, cette dernière est placée dans la cuve.

Cette huile a plusieurs propriétés :

- rigidité diélectrique 20 à 35 KV/mm
- coefficient de dilatation volumique, 0,069 % par 4° C,
- capacité calorifique 1790 à 1870 W/Kg°.

Malgré ces propriétés utiles, l'huile a deux (2) défauts principaux :

- 1) température d'inflammation 135°C minimum,
- 2) sa vapeur forme avec l'air un mélange explosif dans certaines conditions.

On utilise en RUSSIE le SUVTOL, et aux U.S.A., le PYRANOL en remplacement de l'huile, quand on n'utilise pas les transformateurs à sec.

Mêmes propriétés-pratiquement et chimiquement plus stables (coûtent cher).

CHAPITRE II

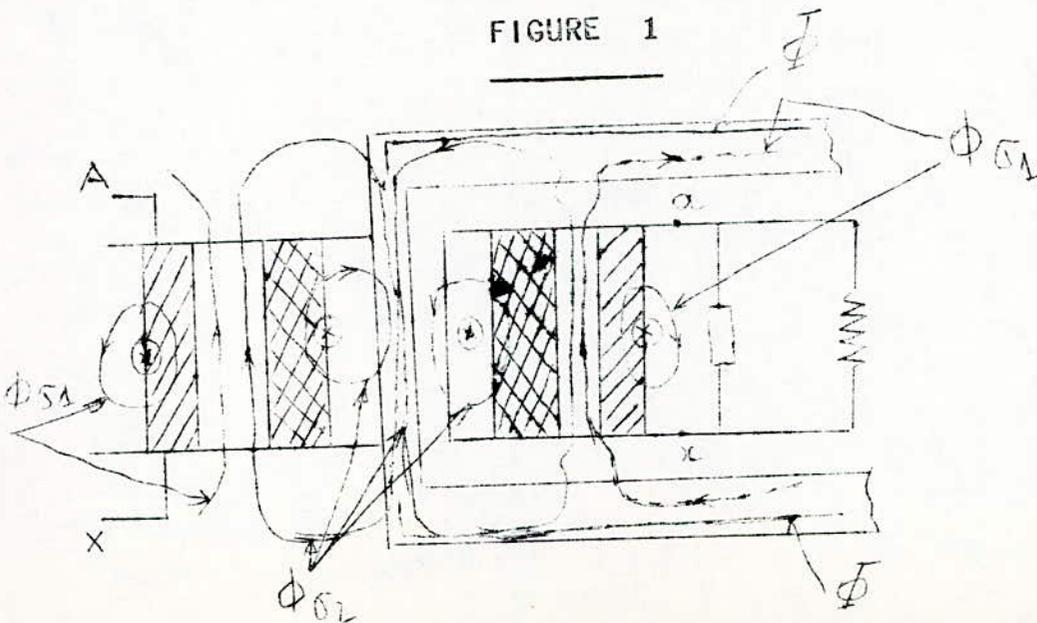
Conditions physiques de fonctionnement Des transformateurs

1 - PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT :

Il est basé sur l'interaction électromagnétique de deux ou plusieurs circuits immobiles l'un par rapport à l'autre.

Considérons la figure 1 qui représente le schéma de principe d'un transformateur monophasé (le principe est le même pour un triphasé).

FIGURE 1



Si aux bornes A,X de l'enroulement primaire on applique une tension sinusoïdale provenant d'un réseau de courant alternatif, sous l'action du flux reliant les deux enroulements, il apparaît dans le secondaire un courant qui alimente les récepteurs branchés aux bornes a,x.

C'est ainsi que se réalise le transfert d'énergie du primaire au secondaire.

2 - EQUATIONS DES FMM et FEM :

Soit U_1 la valeur instantanée de la tension appliqué aux bornes A,X.

Dans les enroulements, il apparaît deux courants de valeurs instantanées i_1 et i_2 , ces courants engendrent deux (2) FMM, $i_1 N_1$ et $i_2 N_2$.

La deuxième loi de KIRCHOFF appliquée aux circuits magnétiques est :

$$N_1 i_1 + N_2 i_2 = N_1 i_0$$

$$N_1 i_1 = -N_2 i_2 + N_1 i_0$$

N_1 : nombre de spires de l'enroulement primaire

N_2 : nombre de spires de l'enroulement secondaire

- $N_1 i_0$ composante magnétisante nécessaire pour créer dans le noyau un flux de valeur instantanée ϕ_t .

C'est le flux principal embrassé par toutes les spires primaires et secondaires.

Ce flux crée dans le primaire une force électromotrice (FEM) e_1 , et dans le secondaire

e_2 .

$$e_1 = \frac{N_1 d\phi_t}{dt} = - \frac{d\psi_{10}}{dt}$$

$$e_2 = - N_2 \frac{d\phi_t}{dt} = - \frac{d\psi_{20}}{dt}$$

En outre, les forces magnétomotrices (FMM) $N_1 i_1$ et $N_2 i_2$ créent respectivement les flux de dispersion ϕ_{G1} et ϕ_{G2} . Ces flux sont produits par i_1 et i_2 et embrassent seulement les spires correspondantes. Vu que ces flux se répartissent dans un milieu non magnétique et à perméabilité magnétique constante, on peut admettre que les inductances de dispersion L_{G1} et L_{G2} sont constantes.

Comme le flux principal créé des FEM e_1 et e_2 , les flux de dispersion créent aussi des FEM $e_{\phi 1}$ et $e_{\phi 2}$ avec :

$$e_{\phi 1} = - \frac{L_{\phi 1} di_1}{dt}$$
$$e_{\phi 2} = - \frac{L_{\phi 2} di_2}{dt}$$

La deuxième loi de KIRCHOFF appliquée au primaire donne :

$$U_1 + e_1 + e_{\phi 1} = i_1 r_1$$

Avec r_1 résistance de l'enroulement primaire.

On peut écrire l'équation sous forme :

$$U_1 = - e_1 + e_{\phi 1} + (- i_1 r_1)$$

En remplaçant e_1 et $e_{\phi 1}$ on trouve :

$$U_1 = \frac{d\psi_{10}}{dt} + L_{\phi 1} \frac{di_1}{dt} + i_1 r_1 = \frac{d\psi_1}{dt} + i_1 r_1$$

ψ_1 représente l'encerclement de flux total de l'enroulement primaire créé par ϕ_t et $\phi_{\phi 1}$.

Dans le secondaire, on a :

$$e_2 + e_{G2} + (-i_2 r_2) = U_2$$

$$0 = \frac{d}{dt} \Psi_{20} + L_{G2} \frac{di_2}{dt} + i_2 r_2 + U_2$$

$$U_2 = \frac{d\Psi_2}{dt} + i_2 r_2 + U_2$$

Ψ_2 représente l'encerclement de flux total du secondaire créé par ϕ_t et ϕ_{p2} .

En complexe :

$$\dot{i}_1 N_1 + \dot{i}_2 N_2 = \dot{i}_0 N_1$$

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_1 + \dot{E}_{G1} - (\dot{i}_1 r_1)$$

$$\dot{E}_2 + \dot{E}_{G2} + (-\dot{i}_2 r_2) = \dot{U}_2$$

$$\dot{E}_{G1} = -j \dot{i}_1 X_1 \quad X_1 = L_{G1} \omega$$

$$\dot{E}_{G2} = -j \dot{i}_2 X_2 \quad X_2 = L_{G2} \omega$$

$$\dot{U}_1 = - \dot{E}_1 - \dot{i}_1 (Z_1 + j X_1) =$$

$$- \dot{E}_1 + \dot{i}_1 Z_1 \quad \text{avec } Z_1 = r_1 + j X_1$$

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{i}_2 Z_2 \quad \text{avec } Z_2 = r_2 + j X_2$$

.../

3 - TRANSFORMATEUR RÉDUIT :

Dans le cas général, l'enroulement primaire est différent de l'enroulement secondaire, et ceci complique l'étude des phénomènes ayant lieu dans un transformateur. Pour parer à ces difficultés, on réduit les deux enroulements à un nombre de spires, et généralement c'est l'enroulement secondaire qu'on réduit au primaire.

Pour cela, on remplace l'enroulement à N_2 spires par un enroulement réduit équivalent, ayant même nombre de spires que le primaire N_1 .

Toutes les grandeurs caractérisant le secondaire et rapportées au primaire sont dites réduites et sont désignées par des lettres primées des valeurs réelles :

$$E'_2 = I'_2 = r'_2$$

3.1.- FEM réduite E'_2

$$E'_2 = K E_2 = E_1$$

$$K = \frac{N_1}{N_2}$$

3.2.- Courant I'_2

$$I'_2 = \frac{E_2}{E'_2} I_2 = \frac{I_2}{K}$$

3.3.- Résistance r'_2

$$I'_2 r'_2 = I_2^2 r_2 \text{ donc } r'_2 = K^2 r_2$$

3.4.- Réactance inductive de dispersion X'_2

$$X'_2 = K^2 X_2$$

3.5.- Impédance de l'enroulement secondaire Z'_2 et
du circuit secondaire Z'_r

$$Z'_2 = K^2 Z_2$$

$$Z'_r = K^2 Z_r$$

4 - EQUATIONS DES FMM ET DES FEM D'UN TRANSFORMATEUR REDUIT

L'équation des FMM est :

$$I_1 N_1 + I'_2 N_1 = I_0 N_1$$

ou

$$I_1 N_1 = - I'_2 N_1 + I_0 N_1$$

Divisons par N_1 :

$$i_1 = -i'_2 + i_0 \quad (1)$$

Equation des FEM :

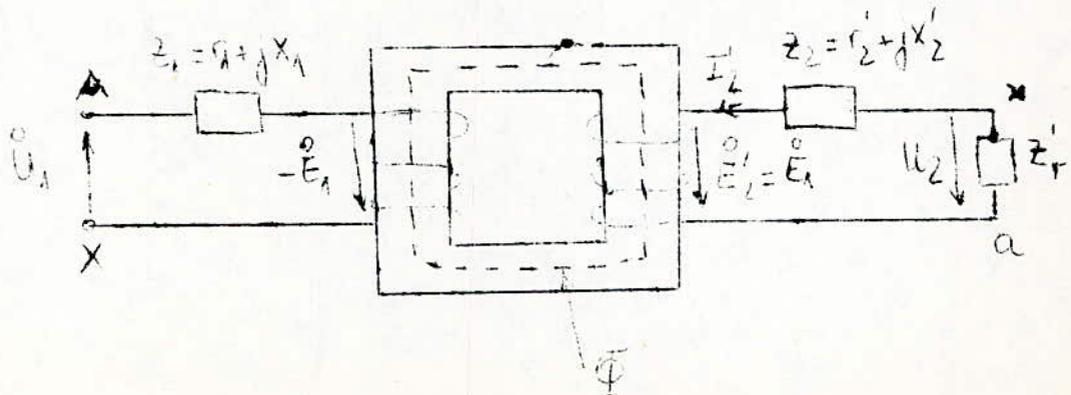
$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + I_1 \dot{Z}_1 = \dot{E}'_2 - I'_2 \dot{Z}'_2 = \dot{U}'_2 \\ \dot{E}'_2 &= \dot{E}_1 = i'_2 \dot{Z}'_2 + U'_2 \quad (2) \end{aligned}$$

5 - SCHEMA EQUIVALENT D'UN TRANSFORMATEUR REDUIT :

Il existe différents schémas vérifiant (1) et (2). Le plus utilisé dans les calculs est le schéma en T.

Conformément aux équations ci-dessus le schéma équivalent est le suivant :

Figure 2

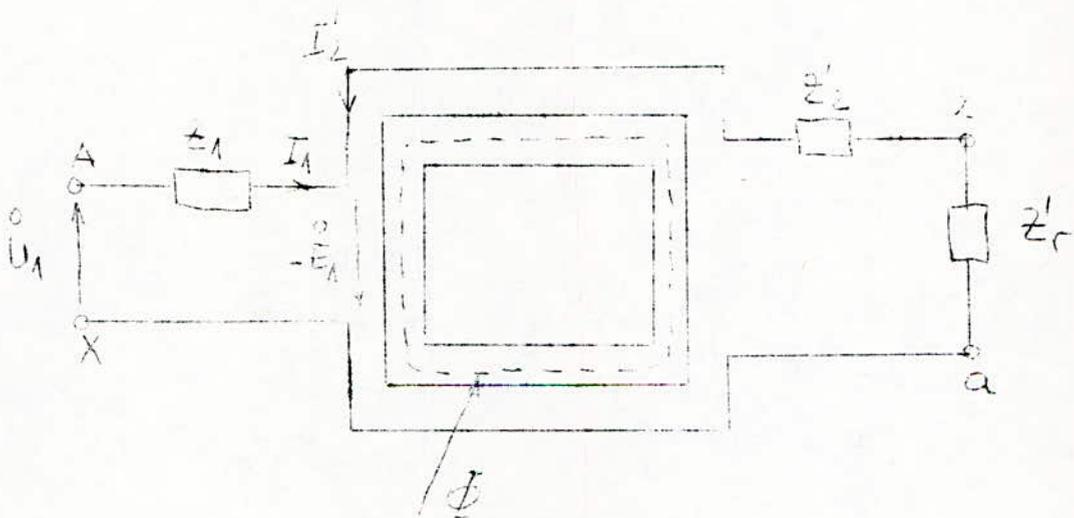


.../

Comme dans un transformateur réduit $N_2 = N_1$ on peut faire coïncider les deux (2) enroulements en un seul parcouru par :

$$i_0 = i_1 + i_2'$$

Figure 3



on a :

$$z_1 = r_1 + jX_1$$

et

$$z_2' = r_2' + jX_2'$$

Dans ce cas la relation entre $-E_1$ et I_0 peut s'exprimer sous forme :

$$\begin{aligned} -E_1 &= I_0 Z_m = I_0 (r_m + j X_m) \\ \frac{-E_1}{Z_m} &= I_0 \end{aligned}$$

Au secondaire on a :

$$U_2' = I_2' Z_r'$$

Or,

$$\begin{aligned} E_2' &= E_1 = I_2' Z_2' + U_2' \\ E_2' &= I_2' Z_2' + I_2' Z_r' = I_2' [Z_2' + Z_r'] \\ I_2' &= \frac{E_2'}{Z_2' + Z_r'} = \frac{-E_1}{Z_2' + Z_r'} \end{aligned}$$

Comme :

$$I_1 = -I_2' + I_0 = I_0 = \frac{-E_1}{Z_2' + Z_r'} + \frac{-E_1}{Z_m}$$

$$-E_1 = I_1 \frac{1}{\frac{1}{Z_m} + \frac{1}{Z_r' + Z_2'}}$$

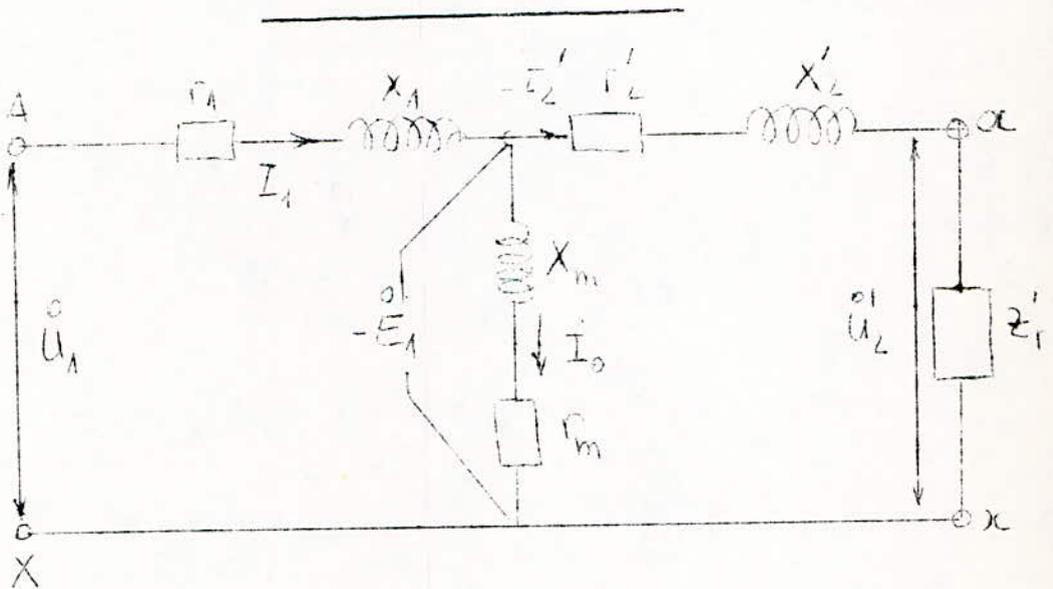
Comme :

$$U_1 = -E_1 + I_1 Z_1 \quad \text{équation des FMM}$$

En remplaçant E_1 on obtient :

$$I_1 = U_1 \frac{1}{Z_1 + \frac{1}{\frac{1}{Z_2'} + Z_r'}} = \frac{U_1}{Z_{\text{eq}}}$$

On aura le schéma équivalent en T suivant :



DEUXIEME PARTIE

CALCUL DU TRANSFORMATEUR

A - B

A - Calcul approché :

I - DIAMETRE DE LA COLONNE

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

$$D = 1,0674 \sqrt[4]{\frac{a_r \cdot \hat{B}_c \cdot S_c}{k_u^2 \cdot B_c^2 \cdot U_{kr}}}$$

B : facteur de sveltesse (sans unité)

a_r : canal de fuite rapporté, s'exprime en mètres

k_r : facteur de ROGOWSKI de construction (sans unité)

k_u : facteur d'utilisation (sans unité)

\hat{B}_c : induction magnétique de crête par colonne, s'exprime en-Tesla

D : diamètre de la colonne, s'exprime en mètres.

Démonstration de la formule :

Soit U_k la tension de court-circuit,

U_{f1} la tension par phase de l'enroulement basse-tension ;

La valeur rapportée de la tension de court-circuit est :

$$u_k = \frac{U_k}{U_{f1}} \quad \text{avec } U_k = (U_{ka}^2 + U_{kr}^2)^{\frac{1}{2}}$$

$$U_{ka} = R_1 I_{f1} \quad \text{avec } R_1 = r_1 + r_2'$$

r_1 : résistance de l'enroulement primaire,

r_2' : résistance de l'enroulement secondaire rapportée au primaire

U_{kr} : tension de court-circuit réactive.

$$U_{kr} = X_{G1} I_{f1} \quad \text{avec } X_{G1} = X_1 + X_2'$$

X_1 : réactance de l'enroulement primaire

X_2' : réactance de l'enroulement secondaire rapportée au primaire.

$$\text{Alors, } u_k = \frac{[(R_1 I_{f1})^2 + (X_{G1} I_{f1})^2]^{\frac{1}{2}}}{U_{f1}}$$

- Composante réactive rapportée de la tension de court-circuit :

$$u_{kr} = (U_k^2 - U_{ka}^2)^{\frac{1}{2}}$$

$$\frac{u_{kr}}{u_{f1}} = \frac{X_{G1} I_{f1}}{U_{f1}}$$

Pour les transformateurs à enroulement concentriques, la réactance de fuite est donnée par :

$$X_{c1} = 2 \pi f \mu_0 N_1^2 B_{ar} K_r$$

$$U_{kr} = \frac{2 \pi f \mu_0 N_1^2 B_{ar} K_r}{U_{f1}} I_{f1}$$

ou,

$$U_{sp} = \frac{U_{f1}}{N_1} = \sqrt{2} \pi f \hat{B}_c S_{col}$$

avec :

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

S_{col} : section de la colonne

f : fréquence en Hertz

U_{sp} : tension par spire

N_1 : nombre de spires de l'enroulement primaire.

Alors,

$$U_{kr} = \frac{2 \pi f \mu_0 r_1^2 \ar \beta K_r I_{f1}^2}{\sqrt{2} \pi \hat{B}_c K_u D^2}$$

$$U_{kr} = \frac{8 \mu_0 N_1^2 \ar \beta K_r}{\sqrt{2} \pi K_u \hat{B}_c D^2} I_{f1} \quad (1)$$

on sait d'autre part que :

$$S_c = U_{f1} I_{f1} \quad (2) \text{ puissance par colonne}$$

$$U_{f1} = N_1 U_{sp} = N_1 \frac{\sqrt{2}}{4} \pi^2 f \hat{B}_c K_u D^2$$

De l'expression (1) on obtient :

$$I_{f1} = \frac{\sqrt{2} \pi K_u \hat{B}_c D^2}{8 \mu_0 N_1 \ar \beta K_r} U_{kr}$$

Et l'expression (2) devient :

$$S_c = \frac{\pi^3 f}{16} \frac{K_u^2 \hat{B}_c^2 D^4}{\mu_0 \ar \beta K_r} U_{kr} \quad (3)$$

De l'expression (3) on tire le diamètre D de la colonne

$$D = \sqrt[4]{\frac{16 \mu_0 \ar \beta K_r S_c}{\pi^3 f K_u^2 \hat{B}_c^2 U_{kr}}} \quad (4)$$

Pour une fréquence industrielle $f = 50$ HZ
Le diamètre de la colonne devient :

$$D = 1,0674 \sqrt[4]{\frac{a_r \beta K_r S_c}{K_u^2 \hat{B}_c^2 U_{kr}}}$$

- D : cm
- a_r : cm
- \hat{B}_c : T
- S_c : VA

1 - Tension réactive de court-circuit U_{kr} :

$$U_k = (U_{ka}^2 + U_{kr}^2)^{\frac{1}{2}}$$

U_{ka} : composante active de U_k

U_{kr} : composante réactive de U_k

On a :

$$U_{ka} = \frac{P_k}{S_n} 100 \quad \text{où } P_k \text{ pertes dues à la charge}$$

S_n puissance apparente nominale

$$U_{ka} = \frac{23}{2.300} 100 \quad U_{ka} = 1 \%$$

La composante réactive est égale à :

$$U_{kr} = (U_k^2 - U_{ka}^2)^{\frac{1}{2}}$$

$$U_{kr} = \left[(6,5)^2 - 1 \right]^{\frac{1}{2}} = 6,422 \%$$

2 - Facteur de sveltesse β :

Ce facteur a une influence directe sur la réalisation et le rendement du transformateur.

Si β est petit, la hauteur de la colonne serait très grande par rapport au diamètre, et on aura un transformateur assez svelte et inversement, si β est grand, la hauteur de la colonne serait petite par rapport au diamètre.

Le tableau T1 de la page - donne des indications sur le choix de β en fonction de la puissance par colonne, de la tension de l'enroulement haute-tension et de la nature du matériau utilisé pour le bobinage.

On a :

$$S_c = 766,66 \text{ KVA}$$

$$U_{2n} = 15 \text{ KV}$$

Bobinage en cuivre.

$$\text{On a } \beta : 3 \underline{\text{---}} 1,8 \text{ . on prend } \beta = 2,2$$

3 - Canal de fuite rapportée :

Ce paramètre dépend de la nature des enroulements. On choisit des enroulements concentriques, on a donc :

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

a_{12} : largeur du canal de fuite

a_1 : épaisseur de l'enroulement B.T.

a_2 : épaisseur de l'enroulement H.T.

a_{12} : est fonction de la tension d'essai de l'enroulement H.T.

On estime a_{12} du tableau T2 de la page

Pour les transformateurs immergés dans l'huile

$$a_{12} = 15 \text{ mm}$$

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

La valeur de K est donnée par le tableau T3 de la page

$$K = 0,5$$

$$\frac{a_1 + a_2}{3} = 0,5 \sqrt[4]{766,66} = 0,5 \times 5,261 = 2,630 \text{ cm.}$$

on aura donc :

$$a_r = 1,5 + 2,63 = 4,13 \text{ cm.}$$

4 - Facteur de ROGOWSKI

On choisit une valeur pour le calcul approché :

$$K = 0,95$$

5 Facteur d'utilisation K_u

Ce facteur met en évidence la section du fer fictive qui participe à la circulation du flux magnétique dans la colonne

$$K_u = K_r K_g$$

K_r : coefficient de remplissage fonction du type de l'isolation et de l'épaisseur des tôles.

Pour $S > 100$ KVA, on utilise des tôles de 0,5 mm d'épaisseur.

On choisit une isolation à la carlite, ce qui donne pour K_r , d'après le tableau T4 de la page

$$K_r = 0,97$$

K_g : coefficient géométrique, fonction du nombre de gradins formant la colonne et de la puissance par colonne.

Le nombre de gradins N_g est fonction du diamètre D , pour $D \leq 100$ mm, $N_g = 4$; pour D compris entre 100 et 500 mm, il est de 5 à 6, pour D allant jusqu'à 1.000 mm, il est de 9 ou 10.

On choisit $N_g = 6$ gradins, alors le tableau T5 de la page donne $K_g = 0,93$.

$$K_u = K_r K_g = 0,97 \times 0,93 = 0,902.$$

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

Son choix est fonction de la puissance par colonne, du type de tôles utilisées.

On doit tenir compte de son influence sur les pertes à vide, le courant de marche à vide, les phénomènes de saturation.

En choisissant des tôles laminées à froid, on aura pour \hat{B}_c , d'après le tableau T6 de la page

$$\hat{B}_c = 1,67 \text{ T}$$

7 - Valeur numérique du diamètre D de la colonne :

$$D = 1,0674 \sqrt[4]{\frac{a_r B K_r S_c}{K_u \hat{B}_c^2 U_{kr}}}$$

$$a_r : 4,13 \text{ cm}$$

$$B : 2,2$$

$$K_r : 0,95$$

$$S_c : 766,66 \text{ KVA}$$

$$K_u : 0,902$$

$$U_{kr} : 6,422 \%$$

$$D = 1,0674 \sqrt[4]{\frac{4,13 \times 2,2 \times 0,95 \times 766,66 \times 10^3}{(0,902)^2 \times (1,67)^2 \times 6,422}}$$

$$\hat{B}_c: 1,67 \text{ T}$$

$$D = 1,0674 \times 25,959 = 27,709 \text{ cm.}$$

II - CALCUL DES ENROULEMENTS :

1.- Hauteur des enroulements

Pour faciliter le travail de montage, tout en assurant un bon serrage des bobines, et surtout pour diminuer les forces axiales créées par le flux de fuite qui est important et dangereux lors d'un court-circuit, on donne la même hauteur aux deux bobinages (H.T. et B.T.).

La hauteur notée h_b de la bobine est donnée par la relation suivante :

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

h_b : hauteur de la bobine

D_{12} : diamètre moyen du canal de fuite.

π : 3,14

β : 2,2

1.1.- Détermination du diamètre moyen D_{12} :

D'après la figure 2, on a :

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

a_{10} : distance entre la colonne et l'enroulement basse-tension.

Le tableau T7 de la page nous donne a_{10}

$$a_{10} = 1,3 \text{ cm}$$

$$a_{12} = 15 \text{ mm (calculé précédemment)}$$

a_1 largeur de la bobine basse-tension

$$a_1 = K_{a1} \frac{4}{V - S_c}$$

a_1 : cm

S_c : KVA

K_{a1} coefficient qui prend les valeurs suivantes :

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

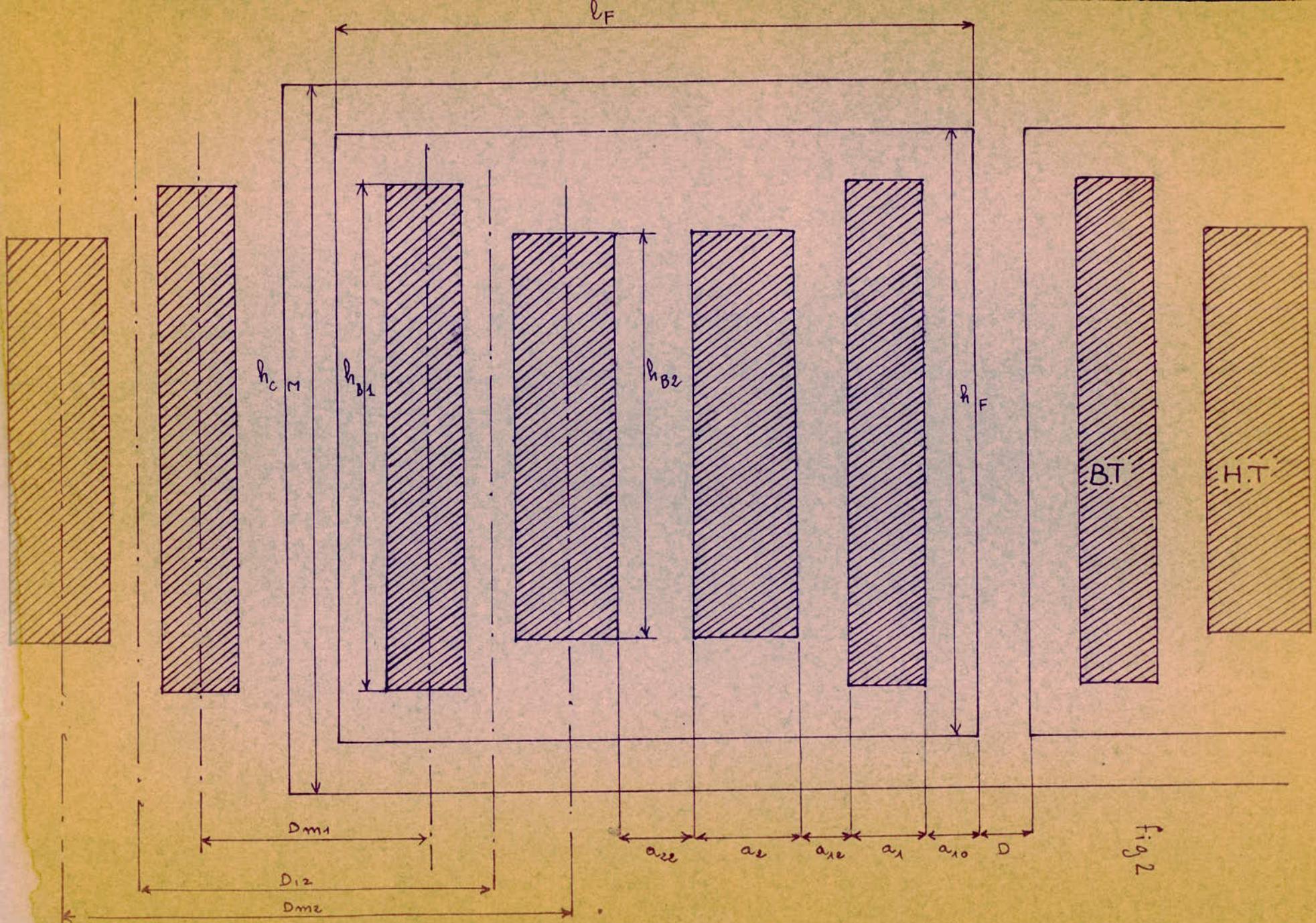


fig 2

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

$$a_1 = 0,55 \sqrt[4]{766,66}$$

$$a_1 = 2,894 \text{ cm}$$

on aura donc :

$$D_{12} = 27,709 + 2 \times 1,3 + 2 \times 2,894 + 1,5 = 37,603 \text{ cm}$$

1.2.- Détermination de la hauteur des enroulements

$$h_b = \frac{\pi D_{12}}{\beta} \implies h_b = \frac{3,14 \times 37,603}{2,2} = 53,669 \text{ cm}$$

2.- Tension par spire

Le flux utile est commun aux deux enroulements
On suppose alors qu'ils ont la même tension par spire.

$$U_{sp} = \sqrt{2} \pi f \hat{B}_c S_{cl}$$

f : fréquence (50Hz)

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

S_{cl} : section utile de la colonne

U_{sp} : tension par spire.

2.1.- Section utile de la colonne :

$$S_{col} = S K_u$$

S : section brut de la colonne

K_u : coefficient d'utilisation.

$$S = \frac{\pi D^2}{4} \quad \text{avec } D = 27,709 \text{ cm.}$$

$$S_{col} = \frac{\pi D^2}{4} K_u = \frac{3,14 (27,709)^2}{4} \times 0,902 =$$

$$543,648 \text{ cm}^2$$

2.2.- Tension par spire :

$$U_{sp} = \sqrt{2} \pi f \hat{B}_c S_{col}$$

2

$$U_{sp} = \sqrt{2} \times 3,14 \times 50 \times 1,67 \times 543,648 \cdot 10^{-4}$$

$$U_{sp} = 20,158 \text{ V/spire}$$

3.- Nombre de spires des enroulements :

3.1.- Enroulement basse-tension N_1 :

$$N_1 = \frac{U_{f1}}{U_{sp}} \quad - \quad N_1 = \frac{5,5 \cdot 10^3}{20,158} \quad N_1 = 272,84 \text{ spires}$$

3.2.- Enroulement haute-tension N₂ :

$$N_2 = \frac{U_{f2}}{U_{sp}} = \frac{U_{f1}}{U_{f1}} \times \frac{U_{f2}}{U_{op}} = N_1 \times \frac{U_{f2}}{U_{f1}}$$

$$N_2 = 272,84 \times \frac{8,66}{5,5} = 429,59 \text{ spires}$$

4.- Section et choix des conducteurs :

La géométrie de la section du conducteur (circulaire ou méplat) est imposée par les normes. Elle dépend de la grandeur de la section.

Les conducteurs sont choisis de la sorte :

- circulaire si la section calculée est inférieure à 6 mm² (1 conducteur élémentaire) ;
- méplat si la section est supérieure à 6 mm², (1 conducteur élémentaire) ;
- plusieurs conducteurs méplats en parallèle ; chaque conducteur d'une section inférieure à 50 mm² si la section calculée est comprise entre 50 et 60 mm².

4.1.- Densité moyenne du courant j_m :

La densité moyenne du courant est définie par la relation suivante :

$$j_m = 8,16 \frac{1}{K_{pk}} \frac{U_{sp}}{S_n} \frac{P_k}{D_{12}}$$

Démonstration :

Pertes joules P_k :

$$P_k = K_{pk} P_j \text{ avec } P_j = P_{j1} + P_{j2}$$

où

$$P_{j1} = m r_1 J_f^2 \quad P_{j2} = m r_2 J_{f2}^2$$

$$P_{j1} = m f_1 \frac{l_1}{S_{n1}} (J_1 S_{n1})^2 = m f_1 J_1^2 V_1$$

$$P_{j2} = m f_2 \frac{l_2}{S_{n2}} (J_2 S_{n2})^2 = m f_2 J_2^2 V_2$$

V_1 et V_2 (m^3) volumes du matériel actif des enroulements basse-tension et haute-tension.

J_1 et J_2 densités de courant de l'enroulement basse et haute-tension.

f_1 et f_2 résistivités de l'enroulement basse et haute-tension.

l_1 et l_2 longueurs des enroulements basse et haute tension.

S_{n1} et S_{n2} sections des conducteurs.

m : nombre de phases.

$$J_1 = \frac{J f_1}{S_{n1}} \quad J_2 = \frac{J f_2}{S_{n2}}$$

$$V_1 = N_1 S_{n1} l_{n1} \text{ avec } l_{n1} = \pi D_{m1}$$

$$V_2 = N_2 S_{n2} l_{n2} \quad l_{n2} = \pi D_{m2}$$

D_{m1} et D_{m2} diamètres moyens des spires de l'enroulement B.T. et H.T.

l_{n1} et l_{n2} longueurs des spires B.T. et H.T.

$$P_j = m (f_1 J_1^2 S_{n1} \pi D_{m1} + f_2 J_2^2 S_{n2} \pi D_{m2} N_2)$$

Les enroulements sont réalisés avec le même matériau, cuivre.

$$f_1 = f_2 = f$$

La densité de courant est considérée la même dans les deux enroulements B.T. et H.T.

$$J_1 = J_2 = J_m$$

TABLEAU T1 Coefficient de sveltesse β

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

TABLEAU T2 a_{12} pour transformateur immergé dans l'huile

U_n KV	3	6	10	15	20	35	110	220	220
U_{cei} KV	3,6	7,2	12	17,5	24	36	123	245	245
a_{12} cm	0,6 ÷ 1	0,8 ÷ 1,2	1 ÷ 1,5	1,2 ÷ 1,8	2,1 ÷ 2,7	6 ÷ 8	13 ÷ 22	13 ÷ 22	

TABLEAU T3 Coefficient K

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

TABLEAU T4 Coefficient de remplissage K_r

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

TABLEAU T5 K_g coefficient de géométrie

S_c KVA	5	4 ÷ 15	15 ÷ 45	45 ÷ 5000
n_{gradins}	2	4	5	6
D cm approchée	8	8 ÷ 12	12 ÷ 16	16 ÷ 51
K_g	0,786	0,866	0,910	0,930

TABLEAU T6 Induction magnétique de crête \hat{B}_c dans la colonne

S_c (KVA)	10 ÷ 50	75 ÷ 250	315 à 600	630 ÷ 1000	1000
$\hat{B}_c(T)$ Tôles laminées à froid	1,25 ÷ 1,55	1,55 ÷ 1,65	1,62 ÷ 1,68	1,63 ÷ 1,69	1,64 ÷ 1,70
$\hat{B}_c(T)$ Tôles laminées à chaud	1,1 ÷ 1,35	1,41 ÷ 1,46	1,42 ÷ 1,47	—	1,43 ÷ 1,48

TABLEAU T7 a_{10} distance entre colonne et enroulement basse-tension

U_{1n} kV	1	3	6	10	15	20	35
a_{10} cm	0,5	1,2	1,2 ÷ 1,5	1,8	1,8 ÷ 2	2,1 ÷ 2,3	3

TABLEAU T8 K_{PK} Coefficient des pertes supplémentaires

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

43 bis

TABLEAU T10

U_n KV		10	20	30	40	60	70	80	90	100	120	140
	S_N mm ²											
	20	0,64	0,84	0,84	0,94	1,24	1,44	1,44	1,54	1,64	1,84	2,04
Bis normal	20 - 60	0,84	0,94	1,04	1,24	1,44	1,64	1,64	1,74	1,83	2,04	2,24
II Bobine S ₁₅	20	0,84	0,94	1,04	1,24	1,84	2,24	2,64	3,04	3,64	4,84	6,24
	20 - 60	1,04	1,14	1,24	1,44	2,04	2,44	2,84	3,24	3,84	5,04	6,44
I Bobine S ₁₅	20	0,84	1,14	1,54	1,94	2,94	3,54	4,24	4,84	5,54	7,04	8,64
	20 - 60	1,04	1,34	1,74	2,04	3,14	3,74	4,44	5,04	5,74	7,24	8,84

TABLEAU T11 l_{02} ; a_{22}

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

$$I_{f1} = S_{n1} \bar{U}_1 \quad \text{et} \quad I_{f2} = S_{n2} \bar{U}_2$$
$$N_1 = \frac{U_{f1}}{U_{sp1}} \quad \text{et} \quad N_2 = \frac{U_{f2}}{U_{sp2}}$$

$$U_{sp1} = U_{sp2} = U_{sp}$$

L'expression précédente devient :

$$P_j = m \left(\int J_m^2 S_{n1} \frac{U_{f1}}{U_{sp}} D_{m1} + \int J_m^2 S_{n2} \frac{U_{f2}}{U_{sp}} D_{m2} \right)$$

$$P_j = \frac{m_c J_m}{U_{sp}} \left(J_{f1} U_{f1} D_{m1} + U_{f2} I_{f2} D_{m2} \right)$$

Comme :

$$S_c = U_{f1} I_{f1} \quad \text{et en négligeant les pertes, on a :}$$

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

$$S_n = m_c S_c$$

$$m_c = m = 3$$

$$D_{12} = \frac{D_{m1} + D_{m2}}{2}$$

Il en résulte :

$$P_j = \frac{2\pi J_m D_{12} S_n}{U_{sp}} = \frac{P_k}{K_{pk}}$$

D_{12} : diamètre moyen du canal de fuite.

On tire :

$$J_m = \frac{1}{2\pi f K_{pk}} \frac{P_k}{S_n} \frac{U_{sp}}{D_{12}}$$

$$J_m = 8,16 \frac{1}{K_{pk}} \frac{P_k}{D_{12}} \frac{U_{sp}}{S_n}$$

Avec J_m : A/mm²

P_k : KW

U_{sp} : V

D_{12} : m

S_n : KVA

f : Ω mm²/m

Pour une résistivité à 75°C

$$f_{75^\circ c} = 0,0195 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$$

$$P_k = 23 \text{ KW}$$

$$U_{sp} = 20,158 \text{ V/spire}$$

$$S_n = 2300 \text{ KVA}$$

$$D_{12} = 0,37603 \text{ m}$$

D'après le tableau T8 de la page
on a $K_{pk} = 1,08$

Ce terme met en évidence les pertes supplémentaires :

$$J_m = 8,16 \times \frac{1}{1,08} \times \frac{23}{0,37603} \times \frac{20,158}{2300} = 4,050 \text{ A/mm}^2$$

4.2.1-Section du conducteur de l'enroulement BT

$$S_{n1} = \frac{I_{f1}}{J_m} \quad I_{f1} = 139,392 \text{ A}$$

$$S_{n1} = \frac{139,392}{4,050} = 34,417 \text{ mm}^2$$

4.2.2.-Section du conducteur de l'enroulement HT.

$$S_{n2} = \frac{I_{f2}}{J_m} \quad I_{f2} = 88,529 \text{ A}$$

$$S_{n2} = \frac{88,529}{4,050} = 21,859 \text{ mm}^2$$

4.3.- Formes de la section des conducteurs

En fonction de la grandeur de la-section calculée, on choisit des conducteurs normalisés qui répondent aux exigences des normes. La section normalisée est choisie dans le tableau T9 de la page

4.3.1.- Enroulement basse-tension.

On a $S_{n1} = 34,417 \text{ mm}^2$, ce qui est supérieur à 6 mm^2 .

On utilise un conducteur méplat normalisé $34,80 \text{ mm}^2$ avec les côtés $a \times b = 3,80 \times 9,30 \text{ mm}^2$

4.3.2.- Enroulement haute-tension

On a $S_{n2} = 21,859$, ce qui est supérieur à 6 mm^2 .

On utilise un conducteur méplat normalisé $21,90 \text{ mm}^2$ avec les côtés $a \times b = 3,80 \times 5,90 \text{ mm}^2$

4.4.- Isolation des conducteurs

Les conducteurs méplats sont isolés avec, soit du vernis, soit avec des rubans d'épaisseur $0,05 \text{ mm}$ ou $0,12 \text{ mm}$.

On choisit le papier car il présente une meilleure rigidité électrique.

L'épaisseur de l'isolation dépend de la section du conducteur et de la tension par spire.

- Le tableau T10 de la page nous donne l'isolation.

4.4.1. Enroulement basse-tension :

$$S_{n1} = 34,80 \text{ mm}^2 \implies \delta_{is1} = 0,84 \text{ mm}$$

Le conducteur élémentaire isolé aura pour dimensions :

$$a'_1 = a + \delta_{is1} = 3,80 + 0,84 = 4,64 \text{ mm}$$

$$b'_1 = b + \delta_{is1} = 9,30 + 0,84 = 10,14 \text{ mm}$$

4.4.2. Enroulement haute-tension δ_{is2} :

$$S_{n2} = 21,90 \text{ mm}^2 \implies \delta_{is2} = 0,84 \text{ mm}$$

Le conducteur isolé aura pour dimensions :

$$a'_2 = a + \delta_{is2} = 3,80 + 0,84 = 4,64 \text{ mm}$$

$$b'_2 = b + \delta_{is2} = 5,90 + 0,84 = 6,74 \text{ mm}$$

5.- Choix du type d'enroulement :

On choisit des enroulements en galettes pour les deux bobines BT et HT

6. - Espace occupé par les enroulements :

6.1. Nombre de galettes et de spires par galette

6.1.1. Enroulement BT.

Le nombre de galettes est calculé à partir de l'expression suivante :

$$h_g = n_{g1} \times h_{sp1} + (n_{g1} - 1) h_{c1} + (0,5 \overset{\cdot}{\underset{\cdot}{\text{---}}} 1,5 \text{cm})$$

h_g : hauteur des enroulements

h_{sp1} : hauteur de la spire (donc de la galette)

h_{c1} : représente le vide entre deux galettes successives

n_{g1} : nombre de galettes

$0,5 \overset{\cdot}{\underset{\cdot}{\text{---}}} 1,5 \text{ cm}$: tolérance

$$n_{g1} = \frac{h_g + h_{c1} - (0,5 \frac{\cdot}{\cdot} 1,5)}{h_{sp1} + h_{c1}}$$

$$n_{g1} = \frac{536,69 + 5,85 - 10}{10,14 + 5,85}$$

$$n_{g1} = \frac{532,54}{15,99} = 34 \text{ galettes}$$

on prend :

$$h_{c1} : 5,85 \text{ mm}$$

$$h_{sp1} : b'_1 = 10,14 \text{ mm}$$

$$h_g : 536,69 \text{ mm}$$

une tolérance de 10 mm

Nombre de spires par galette W_{g1}

$$W_{g1} = \frac{N_1}{n_{g1}} = \frac{272,84}{34} = 8,02 \text{ spires/gal.}$$

on prend 9 sp/gal.

6.1.2.-Enroulement HT :

$$n_{g2} = \frac{h_g + h_{c2} - (0,5 \frac{\cdot}{\cdot} 1,5)}{h_{sp2} + h_{c2}}$$

$$h_{c2} : 5,63 \text{ mm}$$

$$h_{sp2} : b'_2 = 6,74 \text{ mm}$$

$$h_g : 536,69 \text{ mm}$$

$$n_{g2} = \frac{536,69 + 5,63 - 10}{6,74 + 5,63} = \frac{532,32}{12,37}$$

$n_{g2} = 43,03$ galettes.

on prend $n_{g2} = 44$ galettes.

Le nombre de spires par galette: W_{g2} :

$$W_{g2} = \frac{N'_2}{n_{g2}}$$

On doit tenir compte des spires de réglages donnant 2,5 %.

Le nombre de spires maximum est :

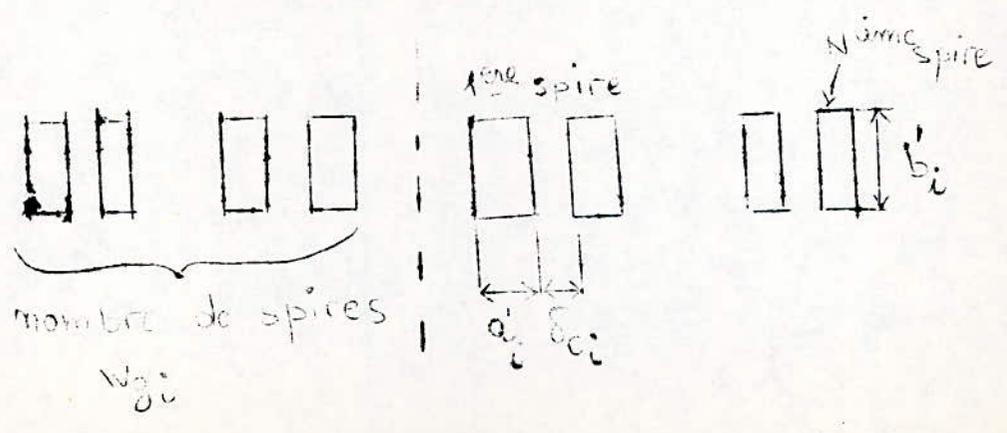
$$N'_2 = 1,025 N_2 = 1,025 \times 429,59 = 440,32 \text{ spires.}$$

on obtient :

$$W_{g2} = \frac{440,32}{44} = 10,00$$

on prend 10 spires/galette.

6.2.- Largeur des bobines :



$$a_i = a'_i W_{gi} + (W_{gi} - 1) \delta_{ci}$$

a'_i : largeur du conducteur avec isolation

W_{gi} = nombre de spires par galette de l'enroulement

δ_{ci} : canal axial de refroidissement

6.2.1.- Largeur de la bobine BT : a_1

$$\delta_{c1} = 3 \text{ mm} \quad \text{et} \quad a'_1 = 4,64 \text{ mm}$$

$$a_1 = a'_1 W_{g1} = (W_{g1} - 1) \delta_{c1}$$

$$a_1 = 4,64 \times 9 + (9-1) \cdot 3 = 41,76 + 24 = 65,76 \text{ mm}$$

6.2.2.- Largeur de la bobine HT :

On prend $\delta_{c2} = 0$, cet enroulement est bien immergé dans l'huile..

$$a_2 = a'_2 W_{g2} = 10 \times 4,64 = 46,4 \text{ mm.}$$

3 - DETERMINATION DEFINITIVE :

I - GRANDEURS DES ENROULEMENTS :

1.- Enroulement basse-tension :

- Hauteur des enroulements :

$$h_{B1} = n_{g1} h_{sp1} + (n_{g1} - 1) h_{c1} + 10$$

$$h_{B1} = 34 \times 10,14 + 33 \times 5,85 + 10 = 547,81 \text{ mm.}$$

.../

- Nombre de galettes :

$$n_{g1} = 34 \text{ galettes}$$

- Nombre de spires par galette :

$$W_{g1} = 9 \text{ spires par galette}$$

- Nombre de spires :

$$N_1 = n_{g1} \times W_{g1} = 34 \times 9 = 306 \text{ spires}$$

- Tension par spires :

$$U_{sp1} = \frac{U_{f1}}{N_1} = \frac{5500}{306} = 17,97 \text{ V/spires}$$

- Induction magnétique de crête par colonne \hat{B}_c :

$$\hat{B}_c = \frac{U_{sp1}}{\sqrt{2} \pi f S_{c01}} = \frac{17,97 \times 10^4}{\sqrt{2} \cdot 50.543,648} = 1,48 \text{ T}$$

- Largeur de la bobine a_1 :

$$a_1 = 65,76 \text{ mm}$$

- Canal de refroidissement h_{c1} :

$$h_{c1} = 5,85 \text{ mm}$$

- Distances entre spires successives :

$$s_{c1} = 3 \text{ mm}$$

- Hauteur de la spire h_{sp1} :

$$h_{sp1} = b'_1 = 10,14 \text{ mm}$$

- Dimensions du conducteur méplat élémentaire :

$$a = 3,80 \text{ mm}$$

$$b = 9,30 \text{ mm}$$

- Epaisseur de l'isolation δ_{is1} :

$$\delta_{is1} = 0,84 \text{ mm}$$

- Section normalisée du conducteur :

$$S_{n1} = 34,80 \text{ mm}^2$$

- Courant nominal I_{f1} :

$$I_{f1} = 139,392 \text{ A}$$

- Densité de courant J_1 :

$$J_1 = \frac{I_{f1}}{S_{n1}} \Rightarrow J_1 = \frac{139,392}{34,80} \Rightarrow J_1 = 4 \text{ A/mm}^2$$

2. - Enroulement haute-tension :

- Hauteur de la bobine h_{g2} :

$$h_{g2} = 44 \times 6,74 + 43 \times 5,63 + 10$$

$$h_{g2} = 548,65 \text{ mm}$$

- Nombre total de galettes n_{g2} :

$$n_{g2} = 44 \text{ galettes}$$

- Nombre de spires par galette :

$$W_{g2} = 10 \text{ spires par galette.}$$

- Le nombre total de galettes est réparti comme suit :

- pour 2,5% $n_{g2} (+2,5\%) = 44$ galettes

- pour 0 % $n_{g2} (0\%) = \frac{N_2}{W_{g2}}$

$$n_{g2} (0\%) = \frac{429,59}{10} = 42,959 \text{ galettes}$$

- pour - 2,5% $n_{g2} (-2,5\%) = \frac{N_2'}{10}$

$$N_2' = 0,975 N_2 = 0,975 \times 429,59 = 418,85 \text{ spires.}$$

$$n_{g2} (-2,5\%) = \frac{418,85}{10} = 41,885 \text{ galettes}$$

En définitive, on a :

- pour 2,5 % $n_{g2} = 44$ galettes de 10 spires chacune ;

$$N_2' = 10 \times 44 = 440 \text{ spires}$$

- pour 0 % $n_{g2} = 43$ galettes

$$N_2 = 43 \times 10 = 430 \text{ spires}$$

- pour - 2,5 % $n_{g2} = 42$ galettes

$$N_2'' = 42 \times 10 = 420 \text{ galettes.}$$

Le nombre de spires de réglage est N_r :

$$N_r = N_2' - N_2'' = 440 - 420 = 20 \text{ spires}$$

Le nombre de galettes de réglage :

$$n_{gr} = \frac{N_r}{W_{g2}} = \frac{20}{10} = 2 \text{ galettes de 10 spires chacune}$$

Tension par spire U_{sp2} :

$$U_{sp2} = \frac{U_{f2}}{N_2} = \frac{866}{430} = 20,13 \text{ V/spire}$$

Tension par galette U_{gal} :

$$U_{gal} = U_{sp2} \times W_{g2} = 20,13 \times 10 = 201,3 \text{ volts}$$

Largeur de la bobine :

$$a_2 = 46,4 \text{ mm}$$

Canal de refroidissement

$$h_{c2} = 5,63 \text{ mm}$$

Hauteur de la spire h_{sp2} :

$$h_{sp2} = b_2' = 6,74 \text{ mm}$$

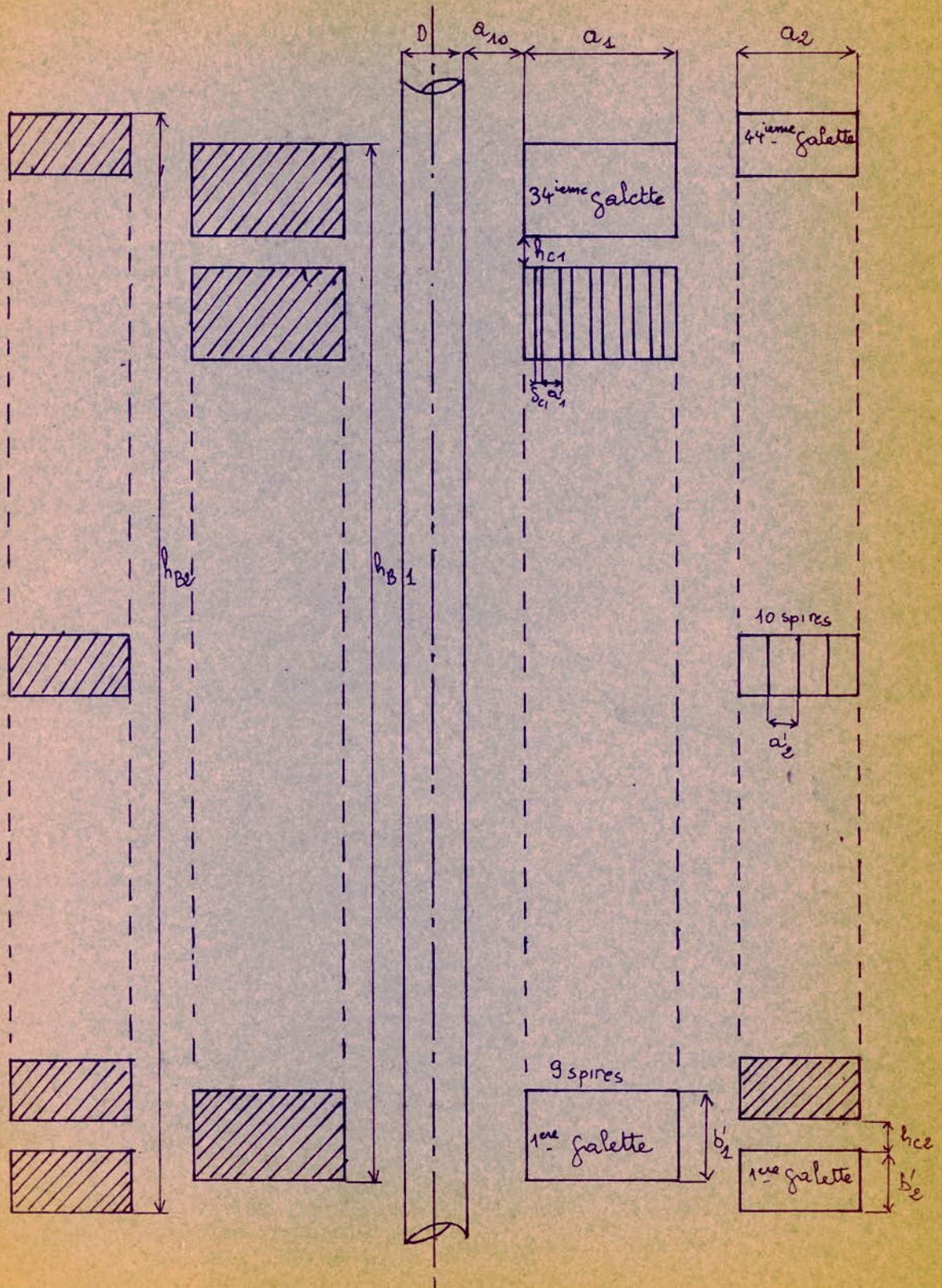
Dimension du conducteur méplat non isolé :

$$a = 3,80 \text{ mm}$$

$$b = 5,90 \text{ mm}$$

56 bis

Representation des enroulements sur une colonne



Section normalisée du conducteur :

$$S_{ng} = 21,90 \text{ mm}^2$$

Epaisseur de l'isolation :

$$S_{is2} = 0,84 \text{ mm}$$

Dimensions du conducteur néplat isolé :

$$a'_2 = 4,64 \text{ mm}$$

$$b'_2 = 6,74 \text{ mm}$$

Courant nominal I_{f2} :

$$I_{f2} = 88,523 \text{ A}$$

Densité de courant J_2 :

$$J_2 = \frac{I_{f2}}{S_{n2}} = \frac{88,529}{21,90} = 4,04 \text{ A/mm}^2$$

II - CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES ET MECANQUES DES ENROULEMENTS :

1°) Enroulements basse-tension :

1.1. Résistance électrique de l'enroulement 3_{r1} :

ρ résistivité du cuivre à 75°C.

$$\rho_{75^\circ\text{C}} = 0,0195 \text{ } \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$$

l_1 : longueur moyenne de l'enroulement BT.

$$r_1 = \rho \frac{l_1}{S_{n1}}$$

.../

$$D_{m1} = D + 2a_{10} + a_1$$

$$D_{m1} = 277,09 + 2 \times 13 + 65,76 = 368,85 \text{ mm}$$

$$l_{n1} = \pi D_{m1} = 3,14 \times 368,85 = 1158,18 \text{ mm}$$

l_{n1} : longueur d'une spire.

$$l_1 = N_1 l_{n1} = 306 \times 1158,18$$

$$l_1 = 354,405 \text{ m}$$

La résistance de l'enroulement BT est :

$$r_1 = 0,0195 \times \frac{354,405}{34,80} = 0,198$$

$$3_{r1} = 0,595$$

1.2.- Poids du matériel :

Le poids du cuivre noté par G_1 est le suivant :

$$G_1 = \delta_1 l_1 S_{n1} 10^{-3}$$

δ_1 = densité volumique du cuivre

$$(\text{Kg/dm}^3) = 8,9$$

l_1 (m) S_{n1} en mm^3

G_1 en Kg

$$G_1 = 8,9 \times 354,405 \times 34,80 \times 10^{-3} = 109,766 \text{ Kg}$$

.../

Le poids du cuivre

Le poids du cuivre total est égal à $3G_1$

$$3G_1 = 3 \times 109,766 = 329,298 \text{ Kg}$$

1.3. - Pertes actives dans les bobines basse-tension P_{cu1} :

On détermine ces pertes en faisant la somme des pertes joules des enroulements (3 enroulements), des fils de connexions et des pertes supplémentaires.

Ces dernières sont dues à l'effet péliculaire (effet de peau) du courant alternatif.

On peut écrire :

$$P_{cu1} = P_{j1} + P'_{j1} + P_{sp1}$$

P_{cu1} : pertes actives totales

P_{j1} : pertes actives des enroulements

P_{sp1} : pertes actives supplémentaires.

1.3.1. - Pertes joules des enroulements

$$P_{j1} = 3r_1 I_{f1}^2 = 0,595 \times (139,392)^2 = 11.560,92 \text{ W}$$

1.3.2. - Pertes joules des conducteurs de connexion P'_{j1} :

$$P'_{j1} = R_{conx} I_{f1}^2$$

R_{conx} représente la résistance électrique totale des conducteurs de connexion (pour les trois enroulements).

$I_{conx} = 14 I_{g1}$ pour un branchement en triangle et une section égale à la section du conducteur des enroulements (S_{n1}).

$$I_{conx} = 14 \times 0,5478 = 7,669 \text{ A}$$

$$R_{\text{conx}} = \int \frac{l_{\text{conx}}}{S_{n1}} = 0,0195 \times \frac{7,669}{34,80} = 4,29 \cdot 10^{-3}$$

$$P'_{j1} = 4,29 \cdot 10^{-3} (139,392)^2 = 83,35 \text{ W}$$

1.3.3. Pertes supplémentaires

Ces pertes sont traduites par une majoration de la résistance des conducteurs en courant alternatif (effet de peau).

$$P_{\text{sp1}} = (K_m r_1 - 1) P_{j12}$$

où

P_{j12} représente les pertes joules des conducteurs (enroulements plus connexion)

$$P_{j12} = P_{j1} + P'_{j1} = 11\,560,92 + 83,35 = 11\,644,27 \text{ W}$$

Pour des enroulements concentriques, K_{mr1} est défini par la relation suivante :

$$K_{mr1} = 1 + \frac{W_{g1}^2 - 0,2}{9} (\alpha_1 a)^4$$

a : largeur du conducteur nu.

$$\alpha_1 = \left(\frac{h_{f1} \cdot b \cdot W_{f10}}{h_f \cdot 2g} \right)^{\frac{1}{2}} \text{ en m}^{-1}$$

h_F : hauteur de la fenêtre

n_{g1} : nombre de galette

$$\omega = 2 \pi f \text{ pulsation pour } f = 50 \text{ Hz} \implies \omega = 314$$

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

$$r = 0,0195 \cdot 10^{-6} \text{ m}$$

$$h_F = h_{g2} + 2 l_{02}$$

l_{02} est donné par le tableau T11 de la page

$$l_{02} = 50 \text{ mm}$$

$$h_F = 548,65 + 100 = 648,65 \text{ mm}$$

$$\alpha_1 = \left(\frac{34 \times 9,30 \cdot 314 \times 3,14 \times 4 \cdot 10^{-7}}{648,65 \cdot 2 \times 0,0195 \cdot 10^{-6}} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\alpha_1 = 70,17 \text{ m}^{-1}$$

$$K_{mR1} = 1 + \frac{9^2 - 0,2}{9} \left[70,17 \times (3,8 \cdot 10^{-3}) \right]^4$$

$$K_{mR1} = 1,045$$

$$P_{sp1} = 0,045 \times 11\,644,27 = 523,99 \text{ W}$$

$$P_{cu1} = 11\,644,27 + 523,99 = 12\,168,26 \text{ W}$$

.../

2. - Enroulement haute-tension :

2.1.- Résistance des enroulements $3r_2$

$$r_2 = \int \frac{l_2}{S_{n2}} \quad l_2 = N'_2 l_{n2} \quad l_{n2} = \overline{\pi} D_{m2}$$

$$D_{m2} = D + 2a_{10} + 2a_{12} + 2a_{11} + a_2$$

D_{m2} = diamètre moyen d'une spire HT

$$D_{m2} = 277,09 + 2 \times 13 + 2 \times 15 + 2 \times 65,76 + 46,4$$

$$D_{m2} = 511,01 \text{ mm} = 0,511 \text{ m}$$

$$l_{n2} = \overline{\pi} D_{m2} = 1,6045 \text{ m}$$

l_{n2} : longueur moyenne d'une spire HT

l_2 : longueur de l'enroulement HT.

$$l_2 = N'_2 l_{n2} = 1,6045 \times 440 = 705,98 \text{ m}$$

d'où :

$$r_2 = 0,0195 \times \frac{705,98}{21,90} = 0,628 \Omega$$

$$3r_2 = 3 \times 0,628 \Omega = 1,885 \Omega$$

.../

2.2.- Poids du matériel :

$$G_2 = \gamma_1 l_2 S_{n2} \cdot 10^{-3}$$

$$G_2 = 8,9 \times 705,98 \times 21,90 \cdot 10^{-3} = 137,602 \text{ Kg}$$

Le poids des trois (3) enroulements :

$$3G_2 = 137,602 \times 3 = 412,806 \text{ Kg}$$

2.3.- Pertes actives P_{cu2} :

2.3.1.- Pertes joules dans les enroulements P_{j2} :

$$P_{j2} = 3r_2 I_{f2}^2 = 3 \times 0,628 (88,529)^2 = 14\,765,63 \text{ W}$$

2.3.2.- Pertes joules dans les conducteurs de connexion

$$P'_{j2}$$

$$P'_{j2} = R_{conx} I_{f2}^2$$

La longueur de connexion pour un branchement en étoile est estimé à $7,5 h_{32}$

$$l_{conx} = 7,5 \times 0,548 = 4,11 \text{ m}$$

$$R_{conx} = 0,0195 \times \frac{4,11}{21,90} = 0,0036 \Omega$$

$$P'_{j2} = 0,0036 \times (88,529)^2 = 28,68 \text{ W}$$

2.3.3.-Pertes supplémentaires P_{sp2} :

$$P_{j22} = P_{j2} + P'_{j2} = 28,68 + 14765,63 = 14\ 794,3\ W$$

$$P_{sp2} = (K_{mR2} - 1) P_{j22}$$

$$K_{mR2} = 1 + \frac{W_{s2}^2 - 0,2}{9} = (\alpha_2 a)^4$$

$$\alpha_2 = \left(\frac{\eta_{s2} b}{h_F} \cdot \frac{W / 10}{2 \beta} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\alpha_2 = \left(\frac{44 \times 5,80}{648,65} \times \frac{314 \times 4 \times 3,14 \cdot 10^{-7}}{2 \times 0,0195 \cdot 10^{-6}} \right)^{\frac{1}{2}} =$$

$$62,79\ m^{-1}$$

$$K_{mR2} = 1 + \frac{100 - 0,2}{9} (62,79 \cdot 3,80 \cdot 10^{-3})^4 = 1,03548$$

$$P_{sp2} = 0,0354 \times 14\ 794,3 = 523,71\ W$$

Les pertes actives dans les enroulements HT sont :

$$P_{cu2} = P_{j2} + P'_{j2} + P_{sp2} = 14.794,3 + 523,71 = 15.318,01 \text{ W}$$

3. - Pertes joules dues à la charge :

Ces pertes sont données par la relation suivante :

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

K_{pk} est un coefficient de majoration qui met en évidence les pertes supplémentaires dans le circuit magnétique et dans les parties mécaniques.

$$K_{pk} = 1,08 \text{ (estimé auparavant)}.$$

$$P_K = 1,08 (12\,168,26 + 15.318,01) = 29.685,171$$

$$\text{Soit : } P_K = 29,68 \text{ Kw.}$$

III - GEOMETRIE ET CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES DU CIRCUIT MAGNETIQUE :

Le circuit magnétique est réalisé à l'aide de tôles d'acier isolées d'épaisseur 0,5 mm.

1°) Longueur de la fenêtre L_F :

De la figure a) on tire la relation donnant L_F

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

$$L_F = 2 (1,3 + 6,576 + 1,5 + 4,64) + 1,4$$

.../

a_{22} est estimé d'après le tableau T11 de la page

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

$$L_F = 29,43 \text{ cm}$$

h_F

2°) Hauteur de la fenêtre :

$$h_F = h_{B2} + 2102 = 548,65 + 100 = 648,65 \text{ mm} = 64,865 \text{ cm.}$$

3°) Longueur entre axes de deux colonnes successives l_{CC} :

$$l_{CC} = l_F + D$$

$$l_{CC} = 29,43 + 27,709 = 57,139 \text{ cm}$$

4°) Section de la culasse :

La section de la culasse est 1,15 fois plus grande que la section utile de la colonne.

$$S_j = 1,15 S_{col}$$

$$S_{col} = 543,648 \text{ cm}^2$$

$$S_j = 1,15 \times 543,648 = 625,195 \text{ cm}^2$$

5°) Induction magnétique dans la culasse \hat{B}_j :

Le flux étant le même dans le circuit magnétique, on a alors :

$$\hat{B}_c S_{col} = \hat{B}_j S_j \implies B_j = \frac{\hat{B}_c S_{col}}{S_j}$$

$$\hat{B}_j = \frac{\hat{B}_c}{1,15} = \frac{1,48}{1,15} = 1,28 \text{ T}$$

6°) Géométrie de la colonne :

La colonne est formée de 6 gradins, qu'on *calculera*

La section de la colonne est définie par l'assemblage des paquets de tôles formant ces gradins.

6.1.- Largeurs des gradins l_{gi} (1,2,3,4,5,6)

$$D = 277,09 \text{ mm}$$

Les formules employées sont empiriques

$l_{g1} = 0,960 D$	$l_{g1} = 266,00 \text{ mm}$
$l_{g2} = 0,885 D$	$l_{g2} = 245,22 \text{ mm}$
$l_{g3} = 0,775 D$	$l_{g3} = 214,74 \text{ mm}$
$l_{g4} = 0,631 D$	$l_{g4} = 174,84 \text{ mm}$
$l_{g5} = 0,466 D$	$l_{g5} = 129,12 \text{ mm}$
$l_{g6} = 0,280 D$	$l_{g6} = 77,58 \text{ mm}$

6.2.- Hauteur des gradins :

Le Théorème de PYTHAGORE nous permet de calculer les hauteurs des gradins. En effet, on a :

$$\left(\frac{D}{2}\right)^2 = \left(\frac{l_{gi}}{2}\right)^2 + \left(\frac{h_{gj}}{2}\right)^2$$

$$h_{gj} = \sqrt{D^2 - l_{gi}^2} \quad i = j = 1, 2, 3, 4, 5, 6$$

$$h_{g1} = \sqrt{D^2 - l_{g1}^2} \quad h_{g1} = 77,60 \text{ mm}$$

$$h_{g2} = \sqrt{D^2 - l_{g2}^2} \quad h_{g2} = 129,01 \text{ mm}$$

$$h_{g3} = \sqrt{D^2 - l_{g3}^2} \quad h_{g3} = 175,11 \text{ mm}$$

$$h_{g4} = \sqrt{D^2 - l_{g4}^2} \quad h_{g4} = 215,45 \text{ mm}$$

$$h_{g5} = \sqrt{D^2 - l_{g5}^2} \quad h_{g5} = 245,16 \text{ mm}$$

$$h_{g6} = \sqrt{D^2 - l_{g6}^2} \quad h_{g6} = 266,00 \text{ mm}$$

7°) Géométrie de la culasse fig. c :

La section de la culasse est quadrilatère de côtés h_j et l_j respectivement, la hauteur et la largeur.

7.1.- Largeur de la culasse l_j :

La largeur de la culasse est égale à la largeur de la tôle la plus large du noyau l_{g1} (ou h_{g6}).

$$l_j = l_{g1} = 266,00 \text{ mm}$$

7.2.- Hauteur de la culasse :

$$S_j = h_j \times l_j \quad \text{avec} \quad S_j = 625,03 \text{ mm}$$

$$h_j = \frac{62519,5}{266,00} = 235,03 \text{ mm}$$

8°) Hauteur du circuit magnétique :

D'après la figure a), on a :

$$h_{cm} = l_f + 2 h_j = 648,65 + 2 \times 235,03 = 1.118,71 \text{ mm}$$

$$h_{cm} = 1.118,71 \text{ mm}$$

9°) Largeur du circuit magnétique l_{cm} :

$$l_{cm} = D + 2 l_{cc} = 27,709 + 2 \times 57,139 = 1.419,87 \text{ mm}$$

$$l_{cm} = 1,419 \text{ m}$$

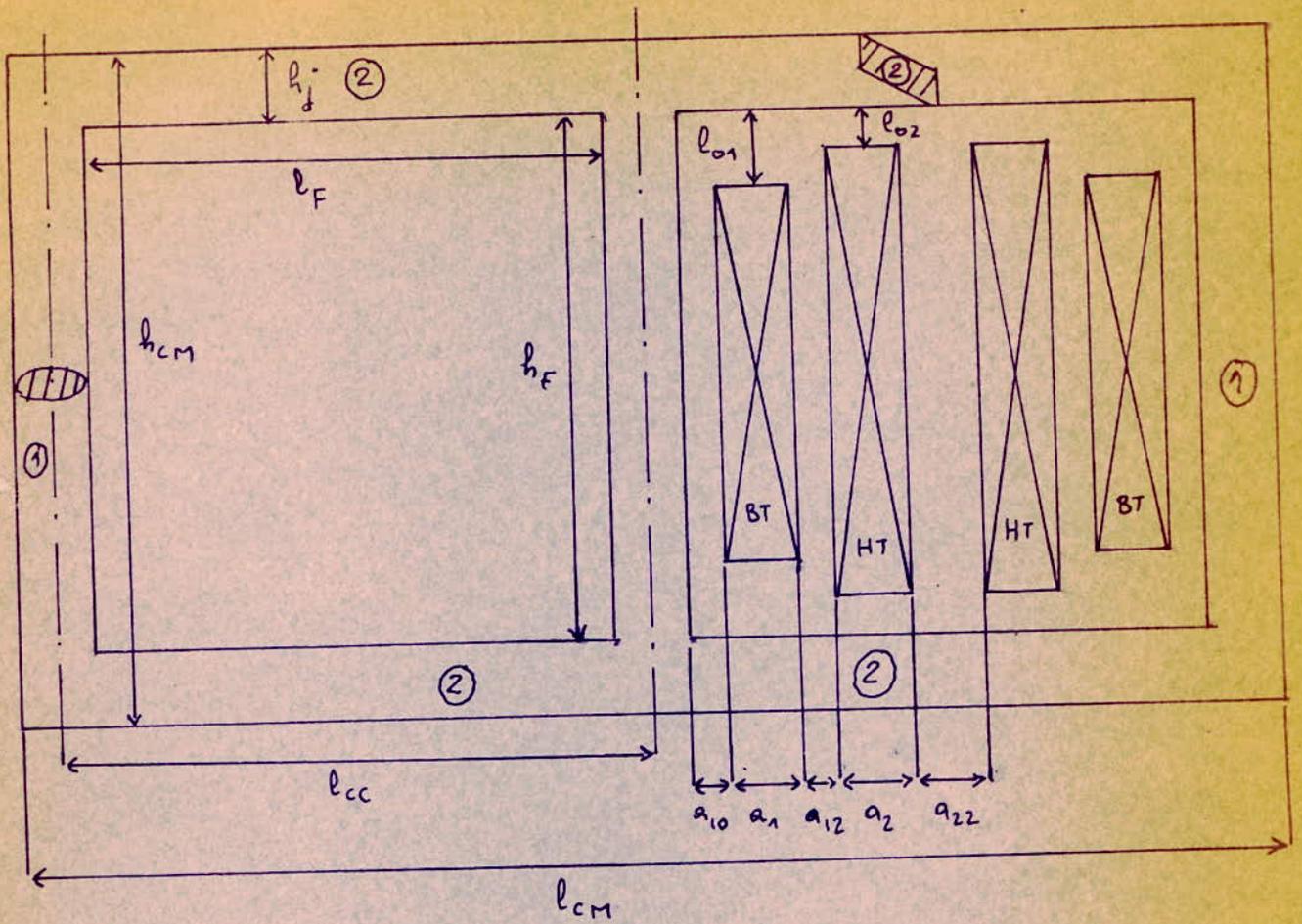
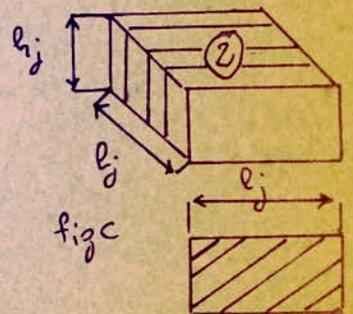
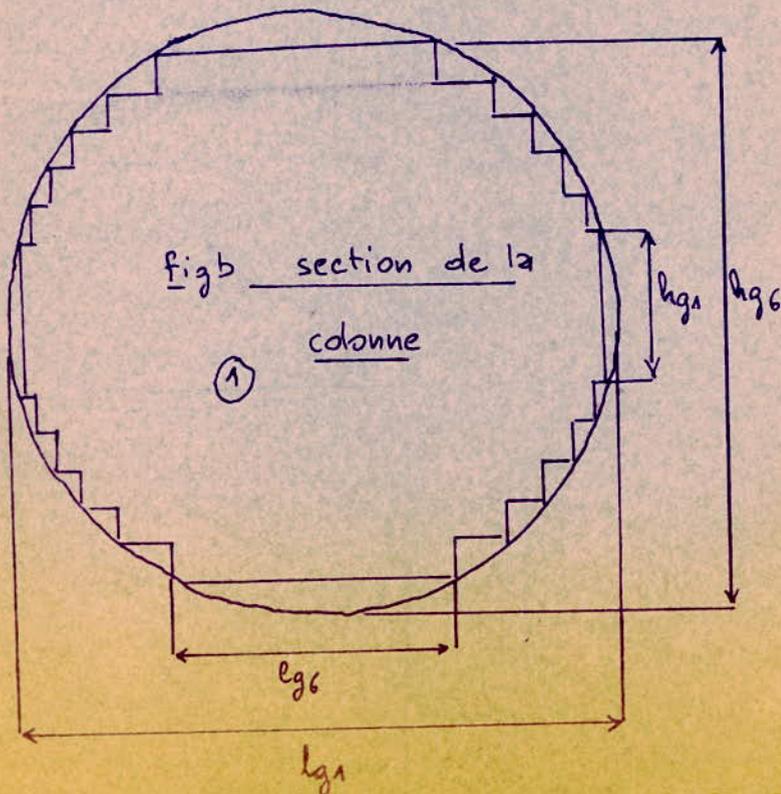


fig a : circuit magnétique



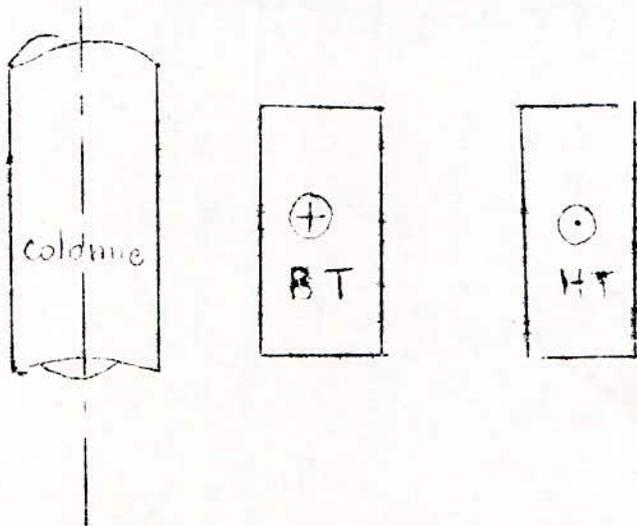
section de la culasse partie ② de la fig a

TROISIEME PARTIE

CALCUL MECANIQUE

I - EFFORTS ELECTRODYNAMIQUES SUR LES ENROULEMENTS :

En vertu de la Loi de LENZ, nous avons des efforts électrodynamiques suivants, sur les enroulements BT et HT.



- HK = Force électrodynamique
- HK_a = Force électrodynamique axiale
- HK_r = Force électrodynamique radiale.

I.1. - Courant de court-circuit :

Le courant de court-circuit est donné par la relation :

$\frac{1}{4}$

$$i_{kmax} = \sqrt{2} K_m I_{kdim}$$

K_m : coefficient de crête $K_m = 1 + C \cdot \pi \left(\frac{U_{ka}}{U_{kr}} \right)$

I_{kdm} : courant stationnaire de court-circuit.

En supposant que le **réseau** est de puissance infinie, le courant stationnaire est calculé par la relation :

$$I_{kdim} = \frac{I_{ni}}{U_k} \quad i = 1, 2 \quad \left\{ \begin{array}{l} 1 - \text{Basse-tension} \\ 2 - \text{Haute-tension} \end{array} \right.$$

I.1.1.- Courant de court-circuit dans la basse-tension :

$$K_m = 1 + \sigma \cdot \frac{I_1}{6,422} = 1,6138$$

$$i_{kdim} = \frac{139,392}{6,5} \times 100 = 2.144,49 \text{ A}$$

$$i_{kmax1} = \sqrt{2} \times 1,6138 \times 2.144,49 = 4.893,54 \text{ A}$$

I.1.2.- Courant de court-circuit dans la haute-tension :

$$K_m = 1,6138$$

$$i_{kdim} = \frac{88,529}{6,5} \times 100 = 1.361,98 \text{ A}$$

$$i_{kmax2} = \sqrt{2} \times 1,6138 \times 1361,98 = 3.107,93 \text{ A}$$

I.2.- Forces électrodynamiques

a) Forces radiales :

$$F_{ri} = \frac{6,4 (N_i i_{kmaxi})^2 l_{ni} K_r}{h_{Bi}} \cdot 10^{-8} (\text{KgF})$$

$$K_r = \text{coefficient de ROGOWSKI} \quad K_r = 0,95$$

b) Forces axiales :

$$F_{ai} = F_{ri} \frac{a_r}{2 h_{Bi}}$$

a_r = largeur du canal de fuite $a_r = 0,0413$ m

h_{Bi} = hauteur des enroulements $i = 1,2$

I.2.1.- Forces radiales

I.2.1.1.- F_{r1} sur l'enroulement BT

$$F_{r1} = \frac{6,4 (306 \times 4893,54)^2 \times 1,15818 \times 0,95 \cdot 10^{-8}}{0,54781} = 2,882 \cdot 10^5 \text{ Kgf}$$

I.2.1.2.- F_{r2} sur l'enroulement haute-tension $\frac{1}{4}$

$$F_{r2} = \frac{6,4 (440 \times 3107,93)^2 \times 1,6045 \times 0,95 \cdot 10^{-8}}{0,54865} = 3,324 \cdot 10^5 \text{ Kgf}$$

I.2.2.- Forces axiales

I.2.2.1. F_{a1} sur l'enroulement basse-tension

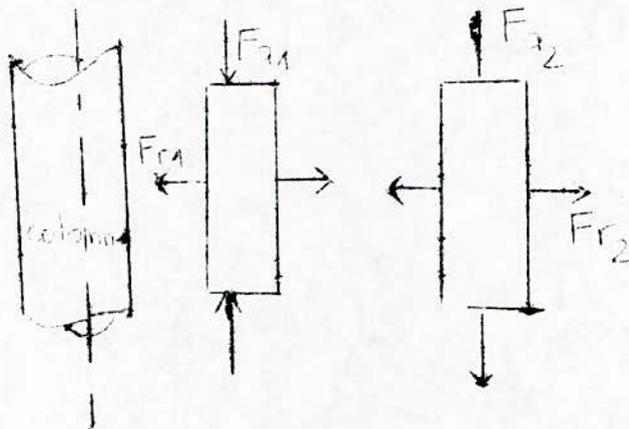
$$F_{a1} = F_{r1} \times \frac{0,0413}{2 \times 0,547} = \frac{2,882 \times 0,0413}{2 \times 0,547} \cdot 10^5 = 10,87 \cdot 10^3 \text{ Kgf}$$

I.2.2.2. F_{a2} sur l'enroulement haute-tension

$$F_{a2} = 3,324 \times \frac{0,0413}{2 \times 0,548} 10^5 = 12,52 \cdot 10^3 \text{ Kgf}$$

I.3.- Efforts Unitaires

On connaît maintenant les forces axiales et radiales. L'effort unitaire est le rapport de la force sur la surface où elle est appliquée.



Les bobines basse-tension sont soumises à une compression, et les bobines haute-tension à une extension.

I.3.1.1.- Efforts Unitaires radiaux :

$$G_{ri} = \frac{F_{ri}}{S_i} \quad i = 1,2$$

F_{ri} en Kgf

S_i en cm^2

G_{ri} en Kgf/cm^2

I.3.1.1.- Enroulement BT

$$\sigma_{r1} = \frac{F_{r1}}{S_1}$$

$$S_1 = 2 \pi N_1 S_{n1}$$

$$S_1 = 2 \pi \times 306 \times 0,348 = 668,74 \text{ cm}^2$$

$$\sigma_{r1} = \frac{2,882}{668,74} \cdot 10^5 = 4,3 \cdot 10^2 \text{ Kgf/cm}^2$$

I.3.1.2.- Enroulement HT :

$$\sigma_{r2} = \frac{F_{r2}}{S_2}$$

$$S_2 = 2 \pi N_2' S_{n2} \cdot 10^{-2} \text{ cm}^2$$

$$S_2 = 2 \pi \times 440 \times 21,90 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^2$$

$$S_2 = 605,14 \text{ cm}^2$$

$$\sigma_{r2} = \frac{3,324}{605,14} \cdot 10^2 = 5,49 \cdot 10^2 \text{ Kgf/cm}^2$$

1.3.2.- Efforts unitaires axiaux :

$$\sigma_{ai} = \frac{F_{ai}}{S_i}$$

$$S_i = D_{mi} a_i$$

I.3.2.1.- Enroulement basse-tension :

$$S_1 = D_{m1} a_1$$

$$S_1 = 36,885 \times 6,576 = 242,55 \text{ cm}^2$$

$$G_{a1} = \frac{10,87}{242,55} \cdot 10^3 = 44,65 \text{ Kgf/cm}^2$$

I.3.2.2.- Enroulement haute-tension :

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

$$S_2 = D_{m2} a_2 = 51,10 \times 4,64 = 237,1 \text{ cm}^2$$

$$G_{a2} = \frac{12,52}{237,1} \cdot 10^3 = 52,8 \text{ Kgf/cm}^2$$

Vérification des efforts :

Le cuivre admet un effort $G_{ad} = 700 \text{ Kgf/cm}^2$, et on voit que les efforts calculés G_{r1} , G_{r2} , G_{a1} , G_{a2} , restent inférieurs à G_{ad} .

Les bobines résistent donc aux forces électrodynamiques.

II - VOLUME ET POIDS DU TRANSFORMATEUR :

$$V_i = 3 l_i S_{ni} \cdot 10^{-3} \text{ (dm}^3 \text{)}$$

l_i : longueur totale de l'enroulement

S_{ni} : section de l'enroulement.

II.1.1.- Volume des enroulements BT ;

$$V_1 = 3 l_1 S_{n1} \cdot 10^{-3}$$

$$V_1 = 3 \times 354,405 \times 34,80 \cdot 10^{-3} = 36,40 \text{ dm}^3$$

II.1.2.- Volume des enroulements HT :

$$V_2 = 3 l_2 S_{n2} \cdot 10^{-3}$$

$$V_2 = 3 \times 705,98 \times 21,90 \cdot 10^{-3} = 46,38 \text{ dm}^3$$

Le volume occupé par le cuivre est égal à :

$$V_{\text{cu}} = V_1 + V_2 = 36,40 + 46,38 = 82,78 \text{ dm}^3$$

II.2.- Volume occupé par les colonnes et les culasses

II.2.1.- Volume occupé par les colonnes :

$$V_{\text{col}} = 3 S_{\text{col}} h_{\text{col}}$$

S_{col} : section de la colonne

h_{col} : hauteur de la colonne

$h_{\text{col}} \hat{=} h_f$ (hauteur de la fenêtre).

$$V_{\text{col}} = 3 \times 543,648 \times 64,865 = 105,79 \text{ dm}^3$$

II.2.2.- Volume occupé par les culasses (coins compris) :

$$V_j = 25 j (3 D + 2 l_f)$$

$$V_j = 2 \times 625,195 (3 \times 27,709 + 2 \times 29,43) = 177,54 \text{ dm}^3$$

Le volume du circuit magnétique est donc :

$$V = V_{\text{col}} + V_j = 105,79 + 177,54 = 283,33 \text{ dm}^3$$

II.3.- Volume de la masse décuvable :

Le volume représente approximativement le volume minimum de l'intérieur de la cuve. On estime une majoration de 20 % de $(V + V_{\text{cu}})$ réservée aux autres accessoires, (exemple : accessoires de serrage).

$$V_{\text{decu}} = 1,20 (V + V_{\text{cu}})$$

$$V_{\text{decu}} = 1,20 (283,33 + 82,78) = 439,33 \text{ dm}^3$$

$$V_{\text{decu}} = 439,33 \text{ dm}^3$$

II.4.- Dimensions et volume de la cuve :

II.4.1.- Dimensions de la cuve :

Des **figures** 1 et 2, on tire les relations donnant la longueur A, la largeur B et la hauteur h_c de la cuve.

On ne tient pas compte des ondules ; on les étudiera par la suite.

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

80

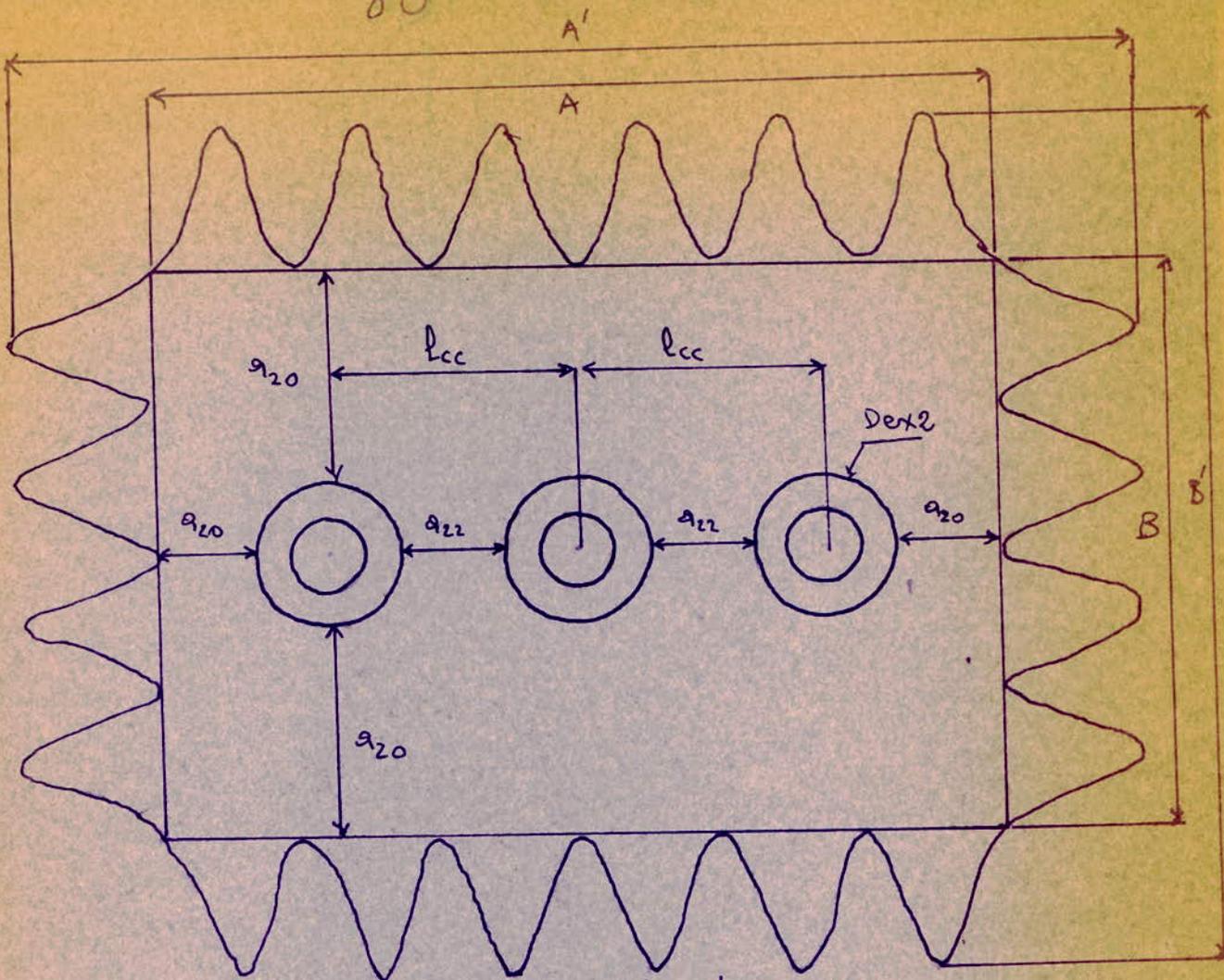


fig 1 vue de dessus

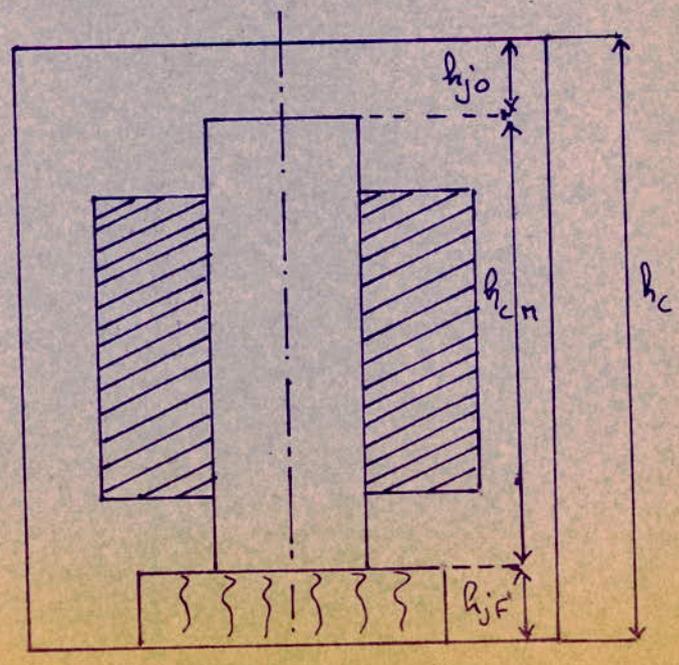


fig 2 hauteur de la cuve

$$h_c = h_{cm} + h_{jo} + h_{jf}$$

où

D_{ex2} est le diamètre extérieur de l'enroulement HT ;
 a_{20} la distance entre la surface extérieure de l'enroulement HT
et la face intérieure de la cuve.

Les valeurs numériques des termes a_{20} , h_{jo} , h_{jf} sont estimées
d'après le tableau T12 de la page

On choisit :

$$a_{20} = 90 \text{ mm}$$

$$h_{jo} = 300 \text{ mm}$$

$$h_{jf} = 40 \text{ mm}$$

Déterminons le diamètre extérieur D_{ex2} de la bobine HT.

$$D_{ex2} = D_{i2} + 2a_2 \quad \text{où } D_{i2} \text{ est le diamètre intérieur}$$

$$D_{i2} = D + 2a_{1U} + 2a_1 + 2a_{12}$$

$$D_{i2} = 27,709 + 2 \times 1,3 + 2 \times 6,576 + 2 \times 1,5 = 46,461 \text{ cm}$$

$$D_{ex2} = 46,461 + 2 \times 4,64 = 55,741 \text{ cm}$$

a) Longueur de la cuve A :

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

$$A = 2 \times 57,139 + 55,741 + 2 \times 9 = 188,019 \text{ cm}$$

b) Largeur de la bobine B :

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

$$B = 55,741 + 2 \times 9 = 73,741 \text{ cm}$$

c) Hauteur h_c :

$$h_c = h_{cm} + h_{jo} + h_{jf}$$

$$h_c = 111,87 + 30 + 4 = 145,87 \text{ cm}$$

Volume de la cuve sans ondules

$$V_{\text{cuve}} = A \cdot B \cdot h_c$$

$$V_{\text{cuve}} = 18,80 \times 7,37 \times 14,58 = 2020,14 \text{ dm}^3$$

II.4.2.- Epaisseur des parois :

Les parois de la cuve doivent résister à la déformation qui peut être causée par l'augmentation de la pression lors d'un court-circuit.

On estime les épaisseurs des différentes parois d'après le tableau T13 de la page

On choisit les épaisseurs suivantes :

pour le fond, $D_f = 10 \text{ mm}$

pour le couvercle, $D_c = 12 \text{ mm}$

pour les parois latérales $D_p = 3,5 \text{ mm}$

II.4.3.- Dimensions et nombre d'ondules :

Pour améliorer le refroidissement, on donne une forme ondulaire pour la surface latérale de la cuve.

TABLEAU T12

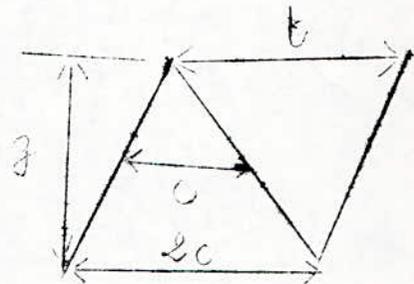
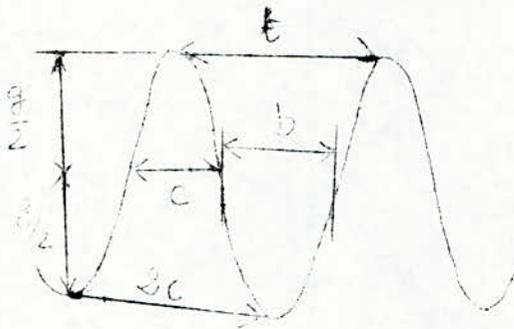
U_n KV	S_n KVA	a_{20} (mm)	h_{j0} mm	h_{jF} mm
<20	20 ÷ 160	55	150 ÷ 250	3 ÷ 40
	200 ÷ 1600	65	150 ÷ 300	//
	2000 ÷ 10000	80	150 ÷ 350	//
>20	20 ÷ 160	65	150 ÷ 300	//
<30	200 ÷ 1600	75	150 ÷ 300	//
	2000 ÷ 10000	120	150 ÷ 350	//

TABLEAU T13

S_n KVA	100	125 ÷ 250	315 ÷ 630	630 ÷ 1600	1600 ÷ 3200
Epaisseur du fond mm	3 ÷ 4	4 ÷ 5	5 ÷ 6	6 ÷ 8	8 ÷ 10
Epaisseur du couvercle	4 ÷ 5	5 ÷ 6	6 ÷ 8	10	10 ÷ 12
Epaisseur des parois latérales	0,75 ÷ 1	1 ÷ 1,5	1,5	2,5	3,5

Les ondules

fig 3



Les ondules sont des ailettes. Pour ces ailettes, les indications générales sont les suivantes :

$$t_{\text{minimum}} = 40 \text{ mm}$$

$$g_{\text{minimum}} = 300 \text{ mm}$$

$$b_{\text{minimum}} = 30 \text{ mm}$$

$$c_{\text{minimum}} = 10 \text{ mm}$$

On choisit :

$$t = b + c \quad r = 6 \text{ mm}$$

a) Le périmètre approximatif d'une ondule est :

$$P_{\text{ond}} = b + 2g + \pi r$$

$$P_{\text{ond}} = 30 + 2 \times 300 + 3,14 \times 6 = 649 \text{ mm}$$

b) Les ondules n'occupent pas toute la surface des parois ; on harmonise leur hauteur par rapport à la cuve :

$$h_o = h_c - (200 + 50)$$

$$h_c = h_{cm} + h_{jf} + h_{jo} = 1118,7 + 340 = 1458,7 \text{ mm}$$

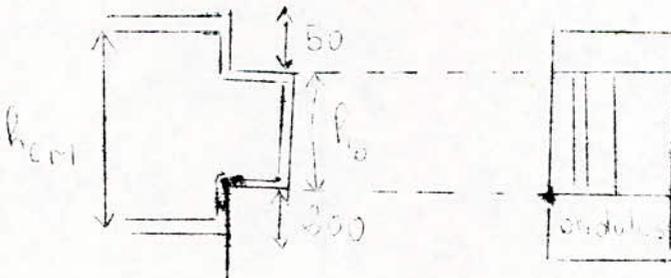
h_o = hauteur des ondules

$$h_o = 1.458,7 - 250 = 1,208 \text{ m}$$

c) Nombre des ondules :

Soit n_1 le nombre d'ondules de la longueur

Soit n_2 le nombre d'ondules de la largeur.



$$n_1 + 1 = \frac{1860,19}{40} = 47 \quad n_1 = 46 \text{ ondules}$$

$$n_2 + 1 = \frac{B}{t} = \frac{737,41}{40} = 18,43 \quad n_2 = 18 \text{ ondules}$$

II.4.4.- Volume des ondules : V_{ond}

Pour simplifier les calculs, on assimile la surface de l'ondule à un triangle (voir figure 3).

$$S_{\text{ond}} = \frac{2 \text{ c. g}}{2} = \text{cg}$$

$$S_{\text{ond}} = 300 \times 10 = 3.000 \text{ mm}^2 = 0,30 \text{ dm}^2$$

Le volume de l'ondule

$$V_{\text{ond1}} = S_{\text{ond}} \times h_0 = 0,30 \times 12,08 = 3,624 \text{ dm}^3$$

Le volume total est V_{ond} :

$$V_{\text{ond}} = 2 (n_1 + n_2) V_{\text{ond1}} = 2 (46 + 18) \times 3,624$$

$$V_{\text{ond}} = 463,87 \text{ dm}^3$$

II.4.5.- Volume de la cuve (ondules comprises) V_{cut} :

$$V_{\text{cut}} = V_{\text{cuve}} + V_{\text{ond}}$$

V_{cuve} : volume de la cuve sans ondules

V_{ond} : volume des ondules.

$$V_{\text{cut}} = 2020,14 + 463,87 = 2484,01 \text{ dm}^3$$

II.5.- Volume de l'huile V_h

$$V_h = V_{cut} - V_{décu}$$

$$V_h = 2484,01 - 439,33 = 2044,68 \text{ dm}^3$$

II.6.- Poids du cuivre :

II.6.1.- Poids du cuivre :

$$G_{cu} = \gamma_{cu} \times V_{cu}$$

γ_{cu} : densité volumique du cuivre

$$\gamma_{cu} = 8,9 \text{ kg/dm}^3$$

$$G_{cu} = 8,9 \times 82,78$$

$$G_{cu} = 736,742 \text{ Kg}$$

II.6.2.- Poids du circuit magnétique G_{cm} :

$$G_{cm} = \gamma_{cm} \times V_{cm}$$

γ_{cm} : densité volumique des tôles du circuit magnétique

V_{cm} : volume du circuit magnétique

$$\gamma_{cm} = 7,65 \text{ Kg/dm}^3$$

$$G_{cm} = 7,65 \times 283,33 = 2.167,47 \text{ Kg.}$$

II.6.3.- Poids de l'huile :

$$G_h = \gamma_h \times V_h$$

γ_h : densité volumique de l'huile
(0,9 Kg/dm³)

$$G_h = 0,9 \times 2044,68 = 1840,21 \text{ Kg}$$

D'où finalement, le poids total du transformateur sans la cuve, couvercle, isolateurs, etc... (poids contenu à l'intérieur)

$$G_{ti} = G_{cu} + G_{cm} + G_h$$

$$G_{ti} = 736,742 + 2167,47 + 1840,21 = 4.744,42 \text{ Kg}$$

II.6.4.- Poids des parois :

Volume des parois latérales

- Volume des parois de la surface occupée par les ondules :

$$V_{pond} = P_{ond} \cdot 2 (n_1 + n_2) h_o D_p$$

P_{ond} : périmètre d'une ondule (dm)

h_o : hauteur d'une ondule (dm)

D_p : épaisseur de la paroi (dm)

$2 (n_1 + n_2)$: nombre d'ondules

$$V_{pond} = 6,49 \times 2 \times (46 + 18) \times 12,08 \times 0,035$$

$$V_{pond} = 351,22 \text{ dm}^3$$

- Volume des parois latérales lisses :

$$V_{pl} = \left[50 \times 2 (A + B) + 200 \times 2 (A + B) \right] D_p$$

$$V_{pl} = \left[50 \times 2 (1880,19 + 737,41) + 200 \times 2 (1880,19 + 737,41) \right] \times 3,5$$

$$V_{pl} = (261760 + 1047040) \times 3,5 = 4,58 \text{ dm}^3$$

$$V_{pl} = 4,58 \text{ dm}^3$$

- Volume de la paroi du fond V_{pf} :

$$V_{pf} = A \cdot B \cdot D_f \quad (\text{dm}^3) \quad D_f = 10 \text{ mm}$$

$$V_{pf} = 18,8 \times 7,37 \times 0,1 = 13,85 \text{ dm}^3$$

- Volume des parois du couvercle :

$$V_{pc} = A \cdot B \cdot D_c \quad D_c = 12 \text{ mm}$$

$$V_{pc} = 18,8 \times 7,37 \times 0,12 = 16,62 \text{ dm}^3$$

Et finalement le volume total des parois du transformateur :

$$V_{tpr} = V_{pond} + V_{pl} + V_{pf} + V_{pc}$$

$$V_{tpr} = 351,22 + 4,58 + 13,85 + 16,62 = 386,37 \text{ dm}^3$$

En utilisant de l'acier de densité volumique /

$$\gamma_{ac} = 7,8 \text{ Kg/dm}^3$$

le poids des parois G_{pr} est égal.

$$G_{pr} = \gamma_{ac} \times V_{tpr} = 7,8 \times 386,37 = 3.013,68 \text{ Kg}$$

II.6.5.- Poids total du transformateur G_{tr} :

En estimant le poids des traversées, du réservoir d'huile et d'autres petits accessoires électriques (relais ...), à 300 Kg,

Le poids du transformateur est égal à :

$$G_{tr} = G_{ti} + G_{pr} + 300$$

$$G_{tr} = 4.744,42 + 3.013,68 + 300 = 8.058,1 \text{ Kg}$$

Soit :

$$G_{tr} = 8,58 \text{ Tonnes.}$$

QUATRIEME PARTIE

CALCUL THERMIQUE

I - CIRCUIT DE TRANSMISSION DE LA CHALEUR ET ECHAUFFEMENT

La chaleur produite dans les matériaux actifs du transformateur par les pertes dans le fer et dans le cuivre doit franchir des chemins plus ou moins longs avant d'atteindre la surface refroidie.

Notre transformateur est à refroidissement à l'huile, la chaleur doit être emportée essentiellement par le courant d'huile et cédée aux parois de la cuve (voir fig. 1)

D'une manière générale, la chaleur est transmise de la surface émissive à l'air ambiant par rayonnement, conduction et convection.

Dans notre cas, seule une partie minime de la chaleur arrive directement, par conduction aux parois de la cuve.

Par l'effet de l'échauffement de l'huile dû aux matériaux actifs et de son refroidissement le long de la cuve, s'établit une circulation d'huile. La chaleur est emportée par cette huile grâce à l'élévation de température de la source de chaleur par rapport à l'huile et d'autre part par une chute de température entre l'huile et les parois de la cuve. La résistance thermique de ces parois est très petite, et donne pratiquement la transmission de chaleur par la surface de la cuve à l'ambiance au lieu par convection et dans une moindre mesure par rayonnement.

La figure (2) montre l'allure de la répartition de la température aux surfaces de la source thermique dans l'huile et le long des parois de la cuve. Les températures croissent de bas en haut et diminuent de nouveau au voisinage des surfaces horizontales supérieures limites qui dissipent également de la chaleur.

On voit qu'à partir de l'angle inférieur de l'enroulement l'élévation de température de l'huile et des parois diminue rapidement vers le fond de la cuve. La cause de cette chute de température réside dans le fait que la production de chaleur dans la culasse inférieure est minime et qu'aucune circulation d'huile n'est possible au dessous de cette culasse.

La température moyenne de l'huile dans les canaux verticaux (qui séparent le noyau de fer et l'enroulement ainsi que chacune des parties de l'enroulement) n'est que légèrement supérieure à celle de l'huile située entre l'enroulement et les parois de la cuve.

- a - paroi de la cuve
- b - surface de l'enroulement
- c - surface du noyau
- d - huile extérieur à l'enroulement
- e - huile dans le canal de refroidissement

La répartition des flux thermiques et des températures dans les différentes parties du transformateur dans l'huile est complexe et difficile à étudier.

Pour faciliter les calculs du point de vue échauffement on divise le parcours du flux thermique, depuis la partie chauffée jusqu'au milieu réfrigérant en une série de zones naturelles

1/ depuis les points intérieurs les plus chauds de la partie active donnée du noyau ou de l'enroulement jusqu'à leurs surfaces extérieures baignées par l'huile.

2/ depuis la surface extérieure de la partie donnée du transformateur jusqu'à l'huile qui le baigne.

3/ Depuis l'huile jusqu'à la paroi du réfrigérant, par exemple la cuve.

4/ Depuis la paroi de la cuve jusqu'au réfrigérant (l'air).

.../

Dans la zone 1, le transfert de la chaleur a lieu par conductibilité, dans les zones 2 et 3 par convection de l'huile et dans la zone 4 par rayonnement et convection.

Pour simplifier les choses, on admet qu'il n'y a pas d'échange de chaleur entre le noyau et les enroulements ainsi qu'entre les enroulements mêmes. Ceci résulte du fait qu'ils sont séparés l'un de l'autre par des canaux d'huile. En partant du noyau vers l'extérieur (air ambiant) on parcourt les couches comme suit :

noyau - huile - bobine basse-tension - huile - bobine HT -
huile paroi de la cuve - air ambiant.

I.1 - Echauffement du noyau

La chaleur qui se dégage dans le noyau peut être transférée dans trois directions (fig. 3a, b et c)

- 1 - Suivant l'axe y du noyau le long de la tôle d'acier (fig. a)
- 2 - Suivant l'axe x à travers le paquet de tôles (fig. 3 b)
- 3 - Suivant l'axe z (fig. 3c)

Les différences de températures des flux du premier et troisième genre (suivant les axes y et z) ne sont généralement pas prises en considération à cause de la grande conductibilité thermique de l'acier. Par contre le flux du deuxième genre dont la conductibilité thermique est des dizaines de fois plus petite que celle de l'acier est pris en considération.

On prend en considération la transmission longitudinale et transversale. Et pour simplifier on considère que la section de la colonne est un rectangle inscrit dans le cercle de la colonne.

Fig 4 Circulation naturelle de l'huile

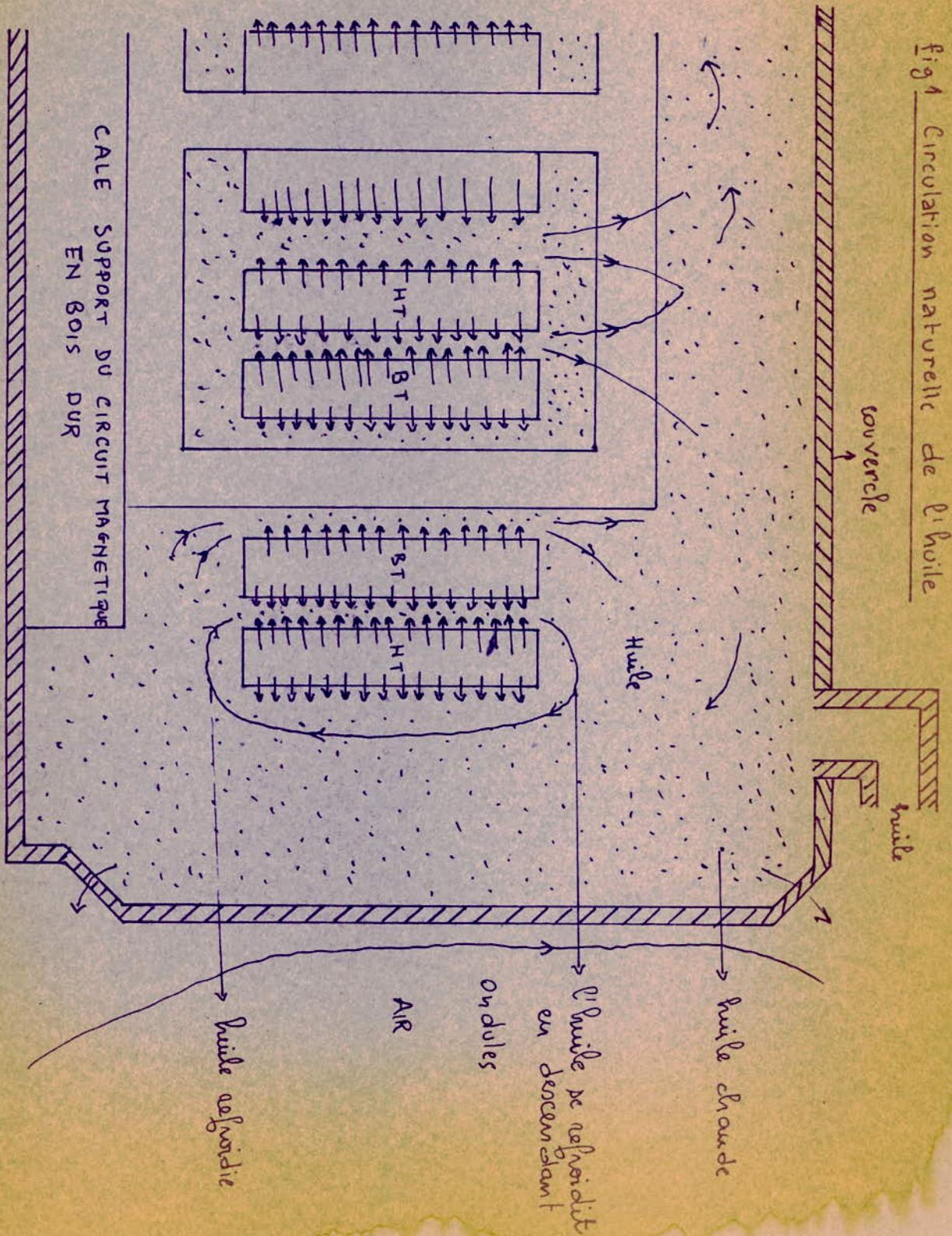
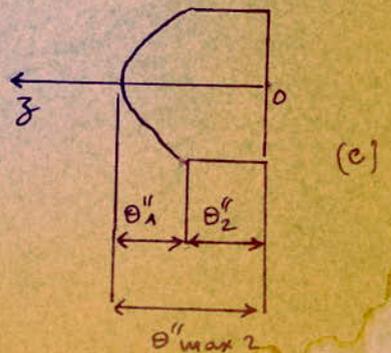
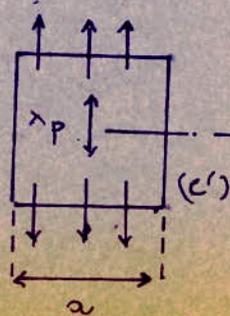
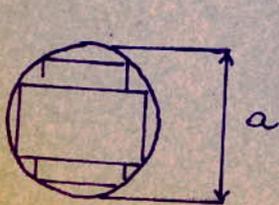
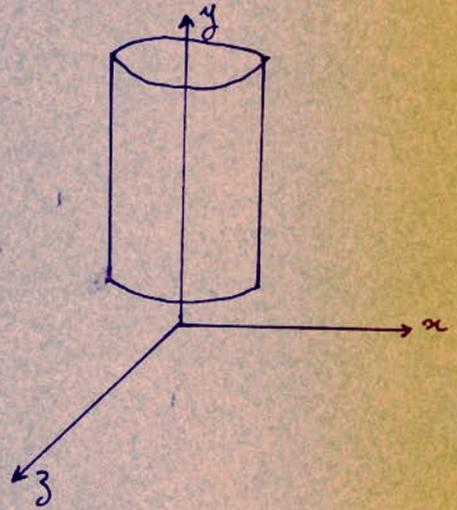
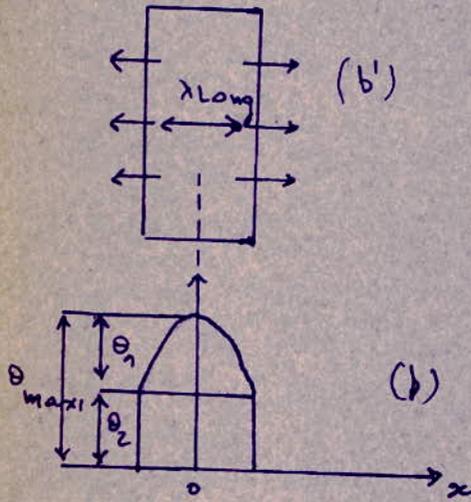
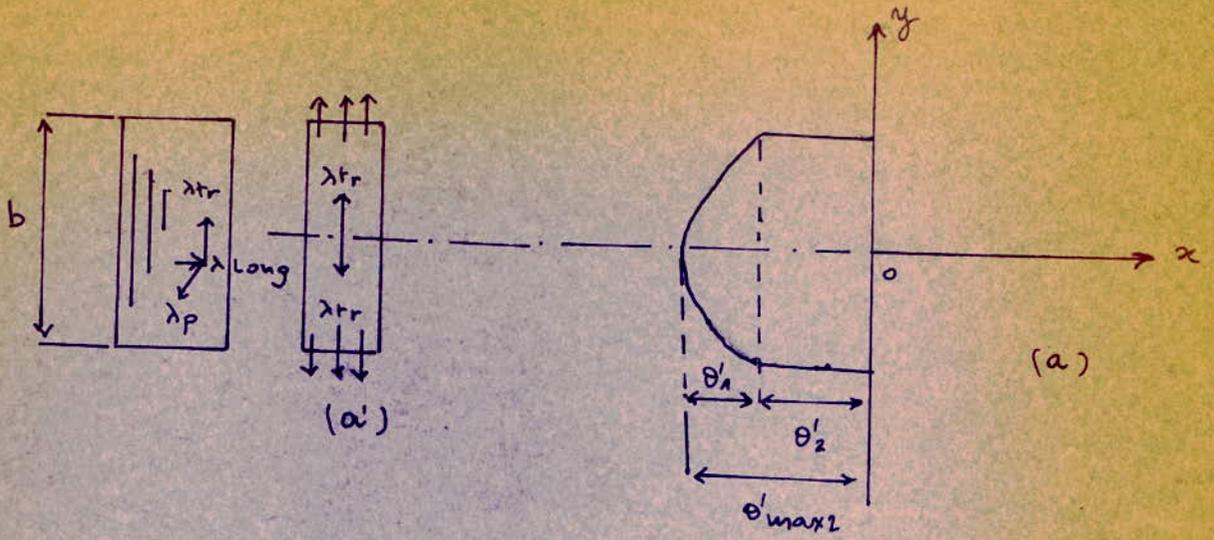


Fig 3



On suppose que les pertes sont uniformément réparties .
Les températures sont données par les relations :

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

ou P pertes spécifiques des tôles
par unité de volume (W/m³)
 λ , λ (W/m°C) coefficient de
transmission longitudinale et
transversale.

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

$$\theta_{max1} = \theta_1 + \theta_2$$

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

$$\lambda : t = 3 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

$$\theta_1' = P \frac{b^2}{8 \lambda t}$$

α_{con} coefficient de convection

$$\theta_2' = P \frac{b}{2 \alpha_{con}}$$

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

$$\theta_{max2} = \theta_1' + \theta_2'$$

$$\text{On a } P = P_{sp} \rho$$

ou P_{sp} pertes spécifiques par unité
de masse des tôles

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

ρ densité volumique

$$P = 11,50 \cdot 10^3 \text{ W/m}^3$$

P_{sp} est choisi égal à 1,5 W/kg

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

Les côtés a et b du rectangle inscrit dans la circonférence
du noyau sont :

$$a = 0,9 D$$

$$a = 0,9 \times 27,709 = 24,93 \text{ cm}$$

$$b = \frac{S_{cal}}{a}$$

$$b = \frac{543,648}{24,93} = 21,80 \text{ cm}$$

$$\theta_1 = \frac{11,5 \cdot 10^3 \times 0,2493^2}{8 \times 20} \longrightarrow \theta_1 = 4,46^\circ\text{C}$$

$$\theta_2 = \frac{11,5 \cdot 10^3 \times 0,2493}{2 \times 110} \longrightarrow \theta_2 = 3,24^\circ\text{C}$$

$$O_{\max 1} = 4,46 + 3,24 = 7,7^{\circ}\text{C}$$

$$O'_1 = \frac{11,5 \cdot 10^3 \cdot 0,218^2}{8 \cdot 3} \text{ ----- } O'_1 = 22,7^{\circ}\text{C}$$

$$O'_2 = \frac{11,5 \cdot 10^3 \cdot 0,218^2}{2 \cdot 110} \text{ ----- } O'_2 = 2,48^{\circ}\text{C}$$

$$O'_{\max 2} = 22,7 + 2,48 = 25,18^{\circ}\text{C}.$$

L'échauffement du circuit magnétique par rapport à l'huile $O_{\max \text{CM-h}}$ est donné par la formule suivante :

$$O_{\max \text{CM-h}} = O'_{\max 2} \frac{O'_2 + 1,5 O'_1}{O'_{\max 2} + O'_2 + 1,5 O'_1}$$

$$O_{\max \text{CM-h}} = 25,18 \frac{2,48 + 1,5 \cdot 22,7}{25,18 + 2,48 + 1,5 \cdot 22,7} = 14,90^{\circ}\text{C}$$

$O_{\max \text{CM-h}} = 14,90^{\circ}\text{C}$. Cette valeur montre que le circuit magnétique n'est pas excessivement chauffé.

I.2 - Echauffement des enroulements (BT et HT)

a - La température n'est pas uniforme dans les enroulements des conditions de répartition de la chaleur sont beaucoup plus complexes que celle du noyau et dépendent de plusieurs facteurs (le type d'enroulement, le nombre, les dimensions et l'aménagement des canaux de refroidissement et le mode de refroidissement). Dans l'ensemble la différence de température (échauffement) suivant la largeur de l'enroulement a la même loi quadratique que le noyau (fig. 41).

Vu que la répartition de la température suivant la largeur et la hauteur n'est pas uniforme on introduit dans le calcul une surélévation moyenne de la température de l'enroulement par rapport à celle de l'huile (fig. 42).

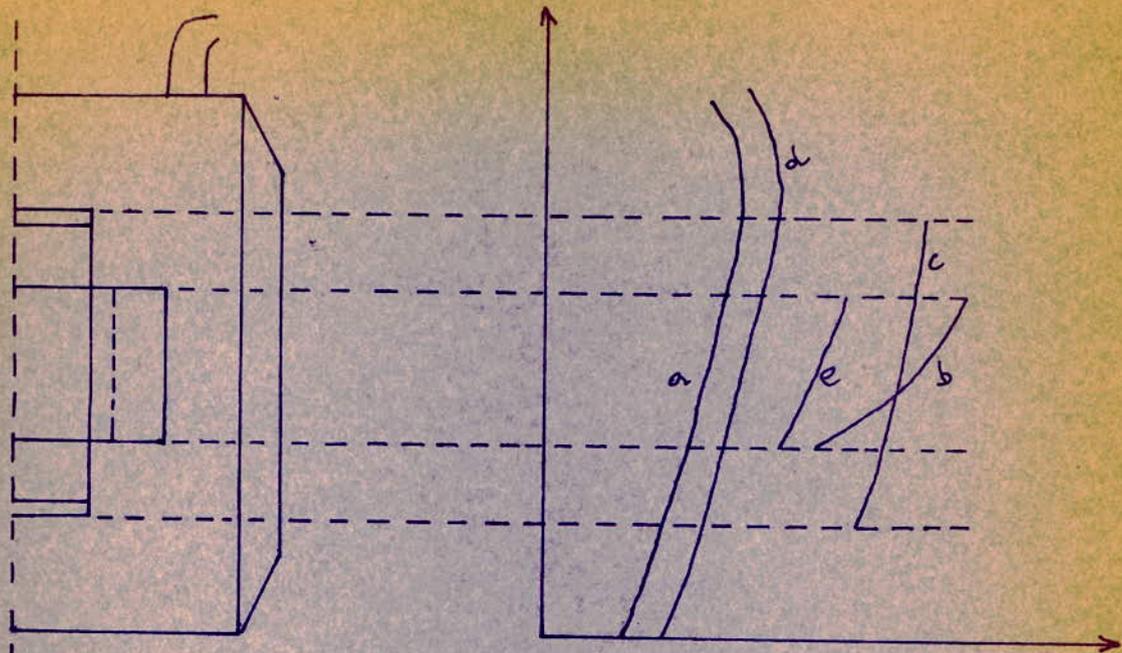


fig 2

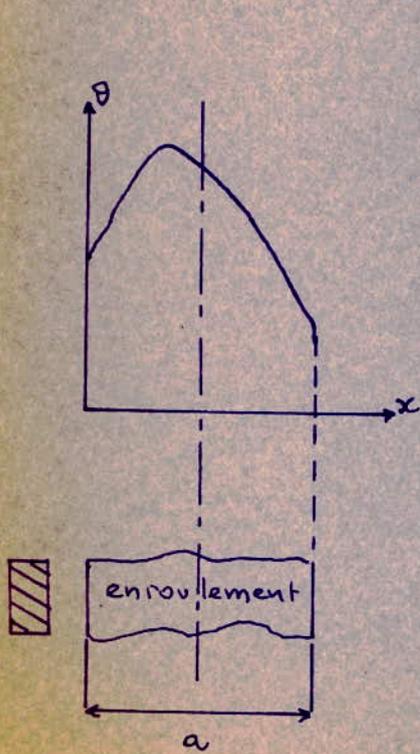


fig 4.1

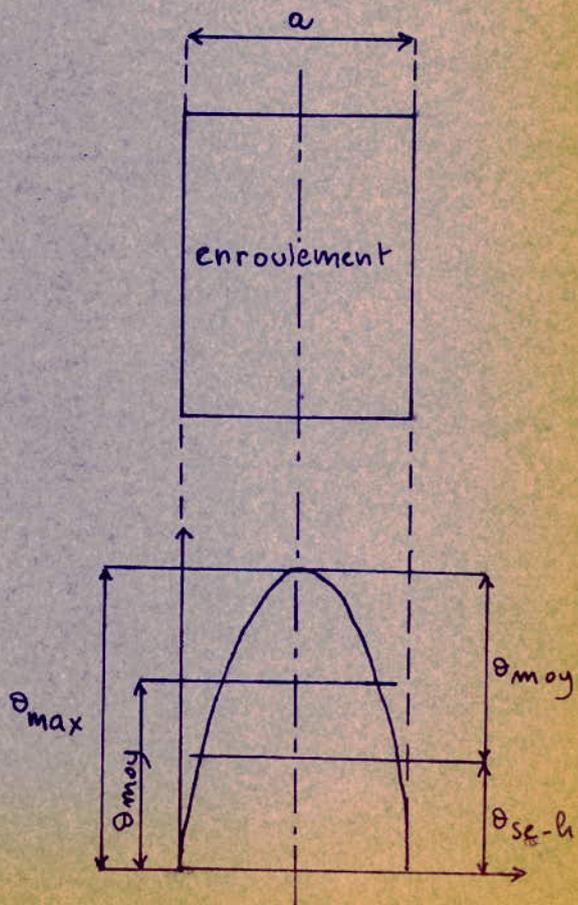


fig 4.2

Dans ces conditions, la température de l'enroulement par rapport à l'huile est donnée par la relation :

$$T_{moy-h_{1,2}} = T_{h_{1,2}} \left(\frac{S_{is1,2}}{k_{is1,2}} + \frac{1}{\lambda_{con1,2}} \right) \quad (1)$$

L'indice 1 correspond à l'enroulement BT et l'indice 2 à la bobine HT.

$\delta_{is1,2}$ épaisseur de l'isolation de papier d'un seul côté

$k_{is1,2}$ conductivité thermique du papier ($k_{is1,2} = 0,77 \text{ W/m}^\circ\text{C}$)

$q_{1,2}$ flux thermique spécifique qui traverse l'isolation vers l'huile baignant la galette.

$q_{1,2}$ est donné par relation :

$$q_{1,2} = \frac{500 \text{ km} R_{1,2} U_{1,2}^2 S_{N_{1,2}} W_{g_{1,2}}}{\xi_{1,2} (b'_{1,2} + W_{g_{1,2}} \times a'_{1,2})} \quad (2)$$

ou :

ξ : coefficient qui tient compte d'une partie de la section du contact avec l'huile occupée par les cales axiales et radiales. Ce coefficient est donné par la relation

$$\xi_{1,2} = \frac{\xi_{v_{1,2}}^2 b'_{1,2} + \xi_{n_{1,2}} (W_{g_{1,2}}) a'_{1,2}}{b'_{1,2} + W_{g_{1,2}} a'_{1,2}} \quad (3)$$

$\xi_{v_{1,2}}$ et $\xi_{n_{1,2}}$ coefficient qui dépendent respectivement des nombres de cales radiales et axiales, ils sont donnés par les relations :

$$\xi_{n_{1,2}} = \frac{\sqrt{4} (De_{1,2}^2 - Di_{1,2}^2) - N_{cal_{1,2}} \cdot S_{cal_{radial1,2}}}{4 (De_{1,2}^2 - Di_{1,2}^2)} \quad (4)$$

$$\xi_{v_{1,2}} = \frac{\overline{II} (De^{2,12} b'_{1,2} - N_{cal_{1,2}} Sc_{al} a_{x_{1,2}})}{\overline{II} De_{1,2} b'_{1,2}} \quad (5)$$

Le nombre de cales est en fonction du diamètre des bobines, on l'estime d'après le tableau suivant :

Tableau T I 1

Dext mm	50 250	250 350	350 500	500 650	650 800	800 1200
nombre de cales	6	8	10	12	14 16	14 18

Le coefficient de la relation (1) est donné par

$$\alpha_{con_{1,2}} = 1 + \frac{(\alpha_{con h} / (\alpha_{con v} W_g \frac{a' \xi_n}{b' \xi_v}))_{1,2} X \alpha_{con x_{1,2}}}{1 + (W_g \frac{a' \xi_n}{b' \xi_v})_{1/2}} \quad (6)$$

ou :

$\alpha_{con v_{1,2}}$ coefficient de transmission par convection par les surfaces verticales (pris entre 100 et 110 V/m²°C).

$\alpha_{con h_{1,2}}$ coefficient de transmission par convection par les surfaces radiales (environ 0,50 $\alpha_{con v_{1,2}}$)

I.2.1. - Echauffement moyen de l'enroulement BT par rapport à l'huile (indice 1 dans les relations 1 à 6)

a - nombre de cales

$$D_{exn} = D + 2 (a_1 = a_{10})$$

$$D_{exn} = 277,09 + 2(65,76 \times 13) \quad D_{exn} = 434,61 \text{ mm}$$

Du tableau T I 1 on tire $N_{cal} = 10$ cales

Diamètre intérieur

$$Di1 = D + 2a_{10}$$

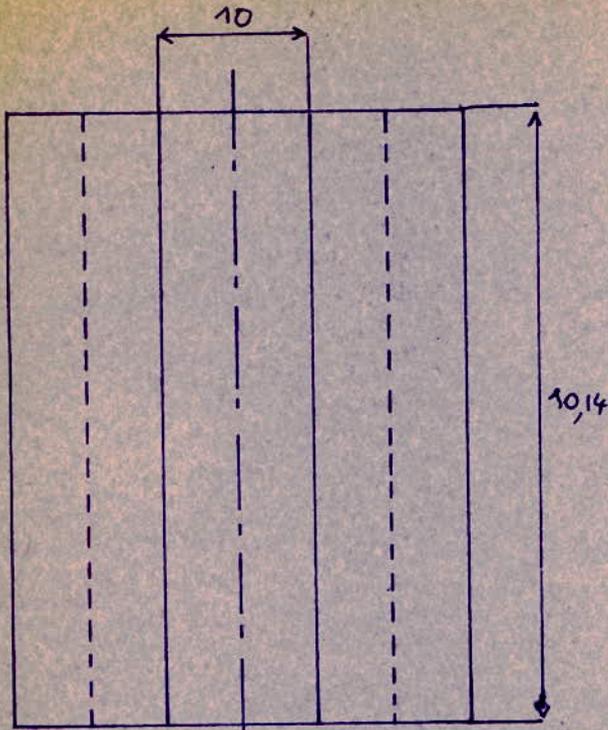
$$Di1 = 277,09 + 2 \times 13 \quad Di1 = 303,09 \text{ mm}$$

$$\xi_{na} = \frac{M/4 (434,61^2 - 303,09^2) - 10 \times 25 \times 65,76}{M/4 (434,61^2 - 303,09^2)}$$

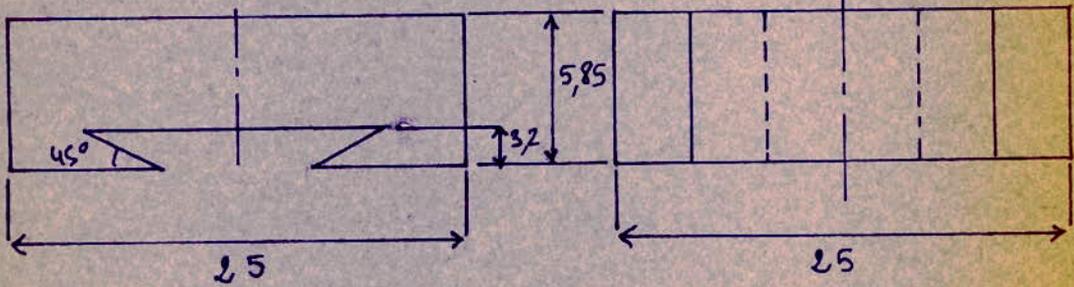
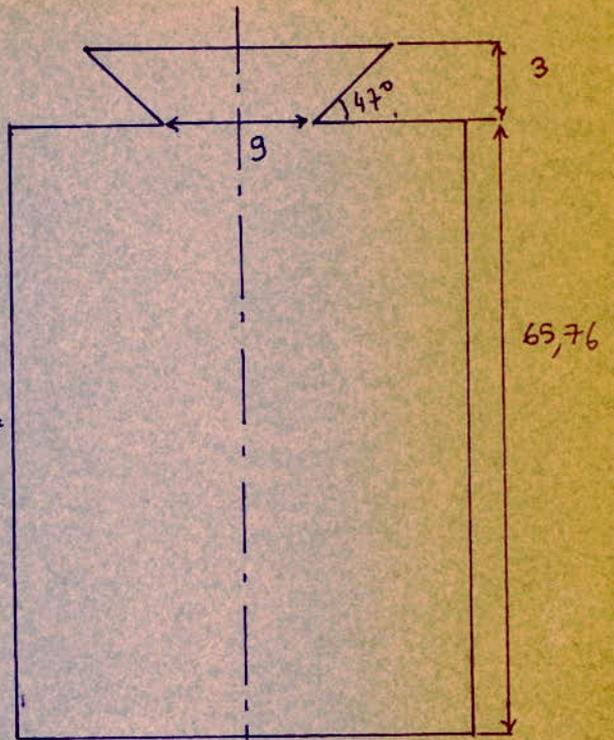
$$\xi_{na} = 0,784$$

Formes des cales

a. cales axiales



b. cales radiales



$$v_1 = \frac{M \cdot 434,61 \times 10,14 - 10 \times 10,14 \times 25}{M \times 434,61 \times 10,14} = 0,816$$

$$1 = \frac{0,816 \times 10,14 + 0,784 \times 9 \times 4,64}{10,14 + 9 \times 4,64} = 0,79$$

$$q_1 = \frac{500 \times 1,045 \times 0,0195 \times 4^2 \times 34,80 \times 9}{0,79 (10,14 + 9 \times 4,64)}$$

$$q_a = 1245,31 \text{ W/m}^2$$

con $h_1 = 0,5$ con x_1

Con $x_a = 100 \text{ W/m}^2\text{°C}$ ----- con $h_1 = 50 \text{ W/m}^2\text{°C}$

$$\text{con}1 = 1 + \frac{50}{100} \cdot 9 \times \frac{4,64}{10,14} \cdot \frac{0,784}{0,816} \times 100$$

$$1 + 9 \times \frac{4,64}{10,14} \times \frac{0,784}{0,816}$$

$$\text{con}1 = 60,08 \text{ W/m}^2\text{°C.}$$

et finalement

$$S_{is} = 0,42 \cdot 10^3 \text{ m (d'un seul côté).}$$

$$\text{Omoy-h1} = 1245,31 \times \left(\frac{0,42 \cdot 10^3}{0,17} + \frac{1}{0,03} \right)$$

$$\text{Omoy-h1} = 23,79\text{°C.}$$

I.2.2. - Echauffement de l'enroulement HT (l'indice 2 dans les relations de 1 à 6).

a - nombre de cales

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

$$a_{12} = 15 \text{ mm}$$

$$D_{i2} = D_{12} + a_{12}$$

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

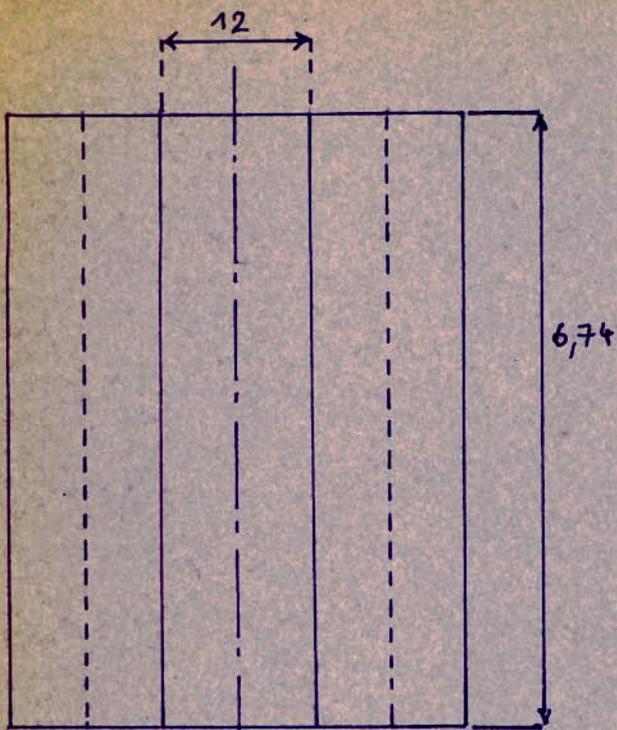
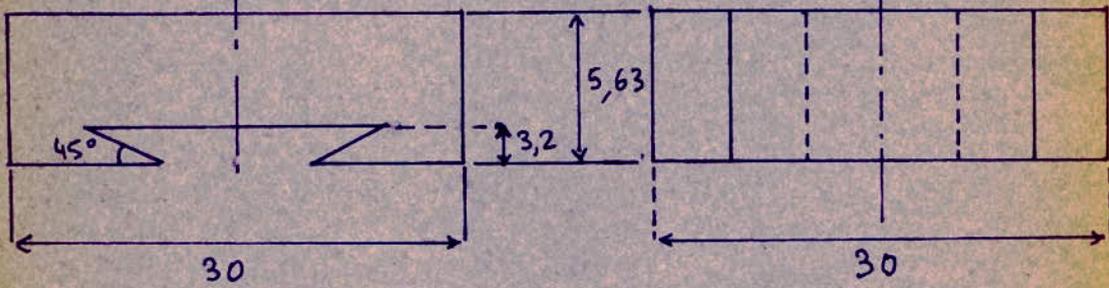
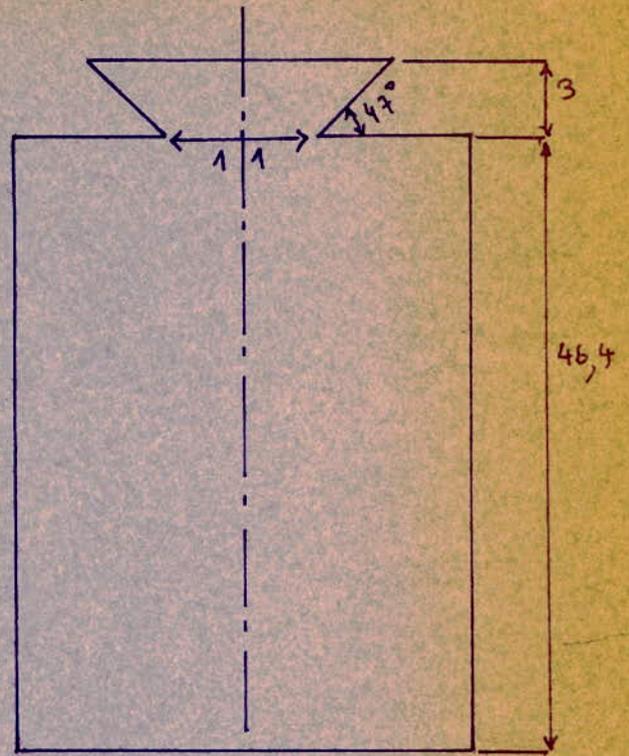
$$D_{12} = 27,709 + 2 \times 1,3 + 2 \times 6,5 \times 76 + 1,5$$

$$D_{12} = 449,61 \text{ mm}$$

$$D_{i2} = 449,61 + 15 = 464,61 \text{ mm}$$

$$D_{ex2} = 464,61 + 2 \times 46,4 = 557,41 \text{ mm}$$

.../

Formes des calesa - cales axialesb - cales radiales

D'après le tableau T I 1 on tire $N_{cal} = 12 \text{ cales}$.

$$n_2 = \frac{M/4 (557,49^2 - 464,61^2) - 12 \times 46,4 \times 30}{\frac{M}{4} (557,49^2 - 464,61^2)} \quad \text{---} \quad n_2 = 0,775$$

$$v_2 = \frac{M 557,41 \times 6,74 - 12 \times 6,74 \times 30}{M \times 557,49 \times 6,74} = 0,794$$

$$z = \frac{0,794 \times 6,74 + 0,775 \times 10 \times 4,64}{6,74 + 10 \times 4,64} = z = 0,777$$

$$q_2 = \frac{400 \times 1,03548 \times 0,0195 \times 4,04^2 \times 21,90 \times 10}{0,777 (6,74 + 10 \times 4,64)} = q_2 = 873,99 \text{ W/m}^2$$

$$\text{conx}_2 = 110 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

$$\text{conh}_2 = 0,5 \quad \text{conx}_2 = 55 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

$$\text{con}_2 = 110 \frac{1 + \frac{55}{110} \cdot \frac{4,64}{6,74} \cdot \frac{0,775}{0,794} \cdot 10}{1 + 10 \frac{4,64}{6,74} \cdot \frac{0,775}{0,794}} = \text{con}_2 = 62,12 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

d'où l'échauffement moyen de la bobine HT par rapport à l'huile est :

$$\text{Omoy-h}_2 = 873,99 \left(\frac{0,42 \cdot 10^3}{0,17} = \frac{1}{62,12} \right)$$

$$\text{Omoy-h}_2 = 16,22 \text{ °C}$$

I.3. - Echauffement de l'huile par rapport à la cuve Oh-c.

La chaleur est transmise par convection naturelle aux parois de la cuve.

L'échauffement est donné par la relation suivante :

$$O_{h-c} = 0,165 \left(\frac{1,05 \times (P_a + P_k)}{Sc} \right)^{0,6}$$

P_o - pertes à vide

P_k - pertes dues à la charge.

Sc : surface de contact avec l'air ambiant

$$Sc = S_{co} + S_{cc}$$

S_{co} : surfaces des ondules

S_{cc} : surface du couvercle

a - surface du couvercle

$$S_{cc} = A \times B$$

$$S_{cc} = 1,88 \times 0,73$$

$$S_{cc} = 1,37 \text{ m}^2$$

.../

b - surface des ondules

$$S_{co} = N_o \text{ Pond } h_o$$

$$N_o = \text{nombre d'ondules } N_o = 2 \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \right) = 2 (46+18) = 127$$

$$\text{Pond : périmètre d'une ondule } \text{Pond} = 649 \cdot 10^3 \text{ m}$$

$$h_o : \text{hauteur de l'ondule } h_o = 1,208 \text{ m}$$

$$S_{co} = 128 \times 649 \cdot 10^3 \times 1,208 \text{ --- } S_{co} = 100,35 \text{ m}^2$$

$$S_c = S_{cc} + S_{co} \text{ --- } S_c = 100,35 + 1,37 = 101,7209 \text{ m}^2$$

$$O_{a-c} = 0,165 \left(\frac{1,05 (4500+23000)}{101,7209} \right)^{0,6} \quad \begin{matrix} P_o = 4500 \text{ W} \\ P_w = 23000 \text{ W} \end{matrix}$$

$$O_{h-c} = 4,89^\circ\text{C}.$$

I.4. - Echauffement de la cuve par rapport à l'air O_{c-a} :

Dans cette zone la chaleur est transmise par convection.

La relation suivante nous donne l'échauffement :

$$O_{c-a} = \left(\frac{1,05 (P_o+P_k)}{2,08 \times S_r + 2,5 \times S_c} \right)^{0,8}$$

ou

$S_r = 2 (A'+B') h_o + S_{cc}$ ou $2 (A'+B') h_o$ est la surface enveloppante de la cuve.

$$A' = A + 2 g = 1,88 + 2,03 = 2,48 \text{ m}$$

$$B' = B + 2 g = 0,73 + 2 \times 0,3 = 1,33 \text{ m}$$

$$g = \text{profondeur des ondules } g = 300 \text{ mm}$$

$$S_r = 2 (2,48 + 1,33) \times 1,208 + 1,37$$

$$S_r = 10,57 \text{ m}^2$$

$$O_{c-a} = \left(\frac{1,05 (4500 + 23000)}{(2,8 \times 10,57 + 2,5 \times 101,72)} \right)^{0,8}$$

$$O_{c-a} = 40,35^\circ\text{C}$$

I.5. - Graphique des échauffements

$O_a = 35^\circ\text{C}$ température de l'air ambiant

O_{c-a} = échauffement cuve-air

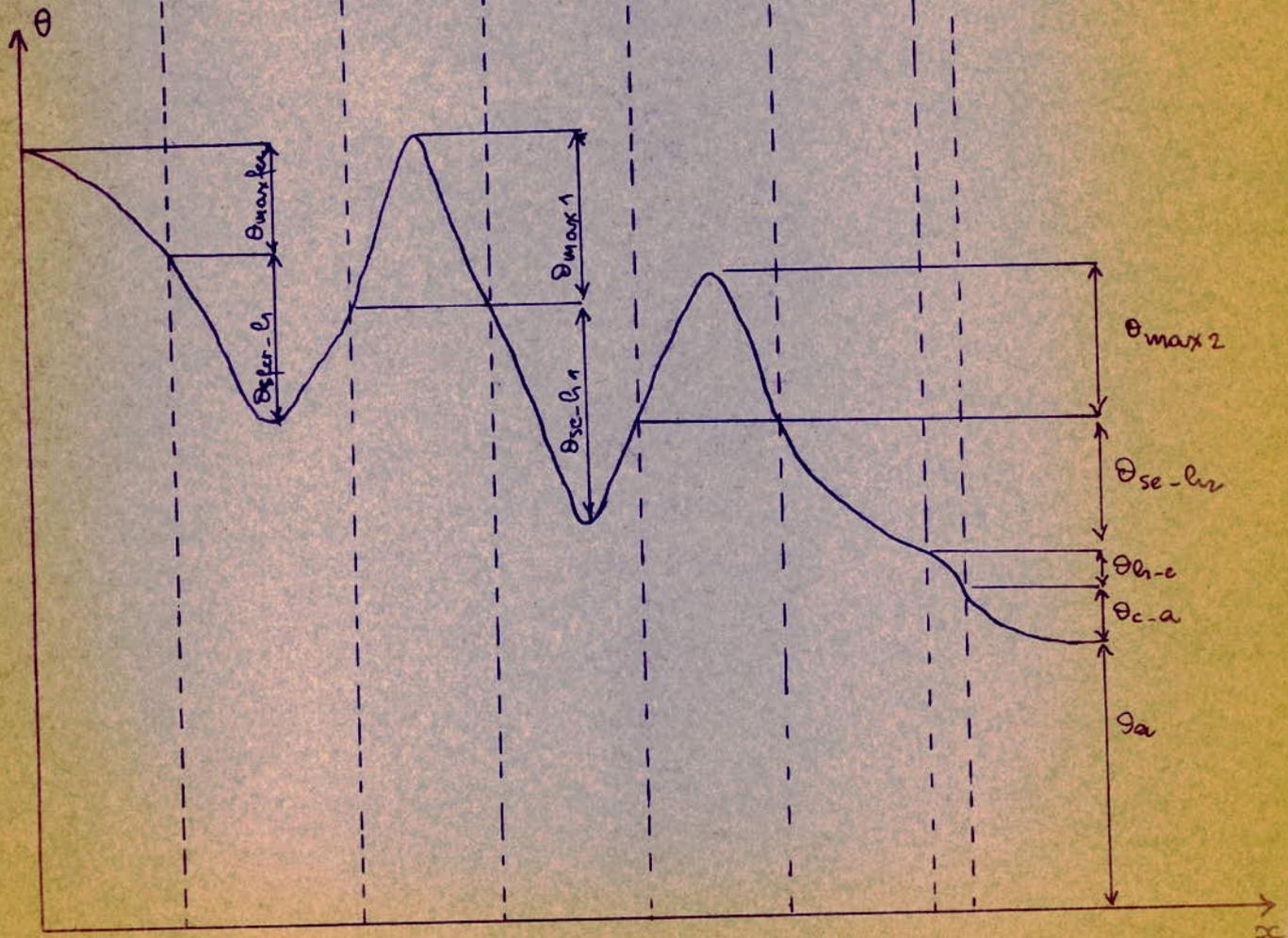
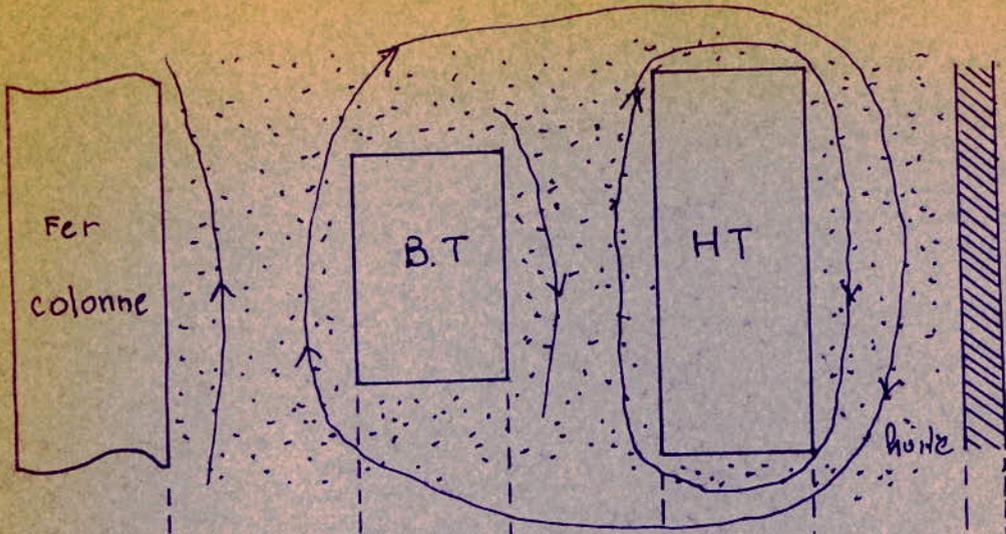
O_{h-c} = échauffement huile-cuve

O_{se-h2} = échauffement surface de l'enroulement haute tension - huile.

O_{max2} = échauffement enroulement haute-tention-surface

.../

I.5. Graphique des échauffements



$\theta_a = 35^\circ\text{C}$ température de l'air ambiant

$O_{\text{sfer-h}}$ = échauffement surface-fer-huile

$O_{\text{max-fer}}$ = échauffement fer-surface

$O_{\text{se-ha}}$ = échauffement BT - huile

O_{max1} = échauffement BT - surface

A l'aide des échauffements calculés on détermine les températures des parties essentielles du transformateur.

I.6. - Températures

On calcule les températures des bobines (basse et haute tension) et du circuit magnétique.

I.6.1. - Température de l'enroulement BT : t_{e1}

$$t_{e1} = O_{\text{moy-h1}} + O_{\text{g-c}} + O_{\text{c-a}} + O_a$$

$$t_{e1} = 23,79^\circ\text{C} + 4,89^\circ\text{C} + 40,35^\circ\text{C} + 35 \text{ ---- } t_{e1} = 104,03^\circ\text{C}.$$

I.6.2. - Température de l'enroulement haute-tension : t_{e2}

$$t_{e2} = O_{\text{moy-h2}} + O_{\text{h-c}} + O_{\text{c-a}} + O_a$$

$$t_{e2} = 16,22 + 4,89 + 40,35 + 35 \text{ ----- } t_{e2} = 96,46^\circ\text{C}$$

I.6.3. - Température du circuit magnétique : t_{em}

$$t_{em} = O_{\text{cm-h}} + O_{\text{h-c}} + O_{\text{c-a}} + O_a$$

$$t_{em} = 14,9 + 4,89 + 40,35 + 35 \text{ ---- } t_{em} = 95,14^\circ\text{C}$$

Conclusion :

Les températures trouvées restent inférieures à la température limite admissible par les normes surélévation de température admissible.

.../

- 108 -

CINQUIEME PARTIE

RENDEMENT DU TRANSFORMATEUR

1. - Expression du rendement

Le rendement est le rapport de la puissance fournie (puissance utile) et de la puissance absorbée.

P_2 : puissance fournie

$$= \frac{P_2}{P_1}$$

P_1 : puissance absorbée

$$P_1 = P_2 + P_o + P_{cu} \quad (\%) = \frac{P_2}{P_2 + P_o + P_{cu}} \cdot 100 = \left(1 - \frac{P_o + P_{cu}}{P_2 + P_o + P_{cu}} \right) \cdot 100$$

$$P_{cu} = R_1 I^2 \frac{I_{cc}^2}{I_{cc}^2} = R_1 I_{cc}^2 \left(\frac{I}{I_{cc}} \right)^2$$

En posant

$$= \frac{I}{I_{cc}} \quad \text{Coefficient de charge et } R_1 I_{cc}^2 = P_k$$

On obtient

$$P_{cu} = 2 P_k$$

Le coefficient de charge est le rapport de la puissance fournie à la puissance nominale.

$$= \frac{P_2}{P_1} \quad P_1 = S_n \cos$$

On peut écrire

$$P_{cu} = P_k \quad \text{et } P_2 = S_n \cos$$

$$\% = \left(1 - \frac{P_o + 2 P_k}{(S_n \cos) + P_o + 2 P_k} \right) \cdot 100$$

2. - Coefficient de charge optimal

Le rendement est maximum lorsque les pertes joules sont égales aux pertes à vide (pertes fer)

On déduit le coefficient de charge optimal

$$\text{opt} = \left(\frac{P_o}{P_k} \right)^{1/2}$$

$$P_o = 4500 \text{ W} \quad P_k = 23000 \text{ W d'ou } \text{opt} = 0,195$$

$$\text{opt} = 0,442$$

3 tableaux de valeurs

On détermine le rendement pour une charge résistive

($\cos = 1$) et pour une charge inductive ou capacitive

($\cos = 0,8$)

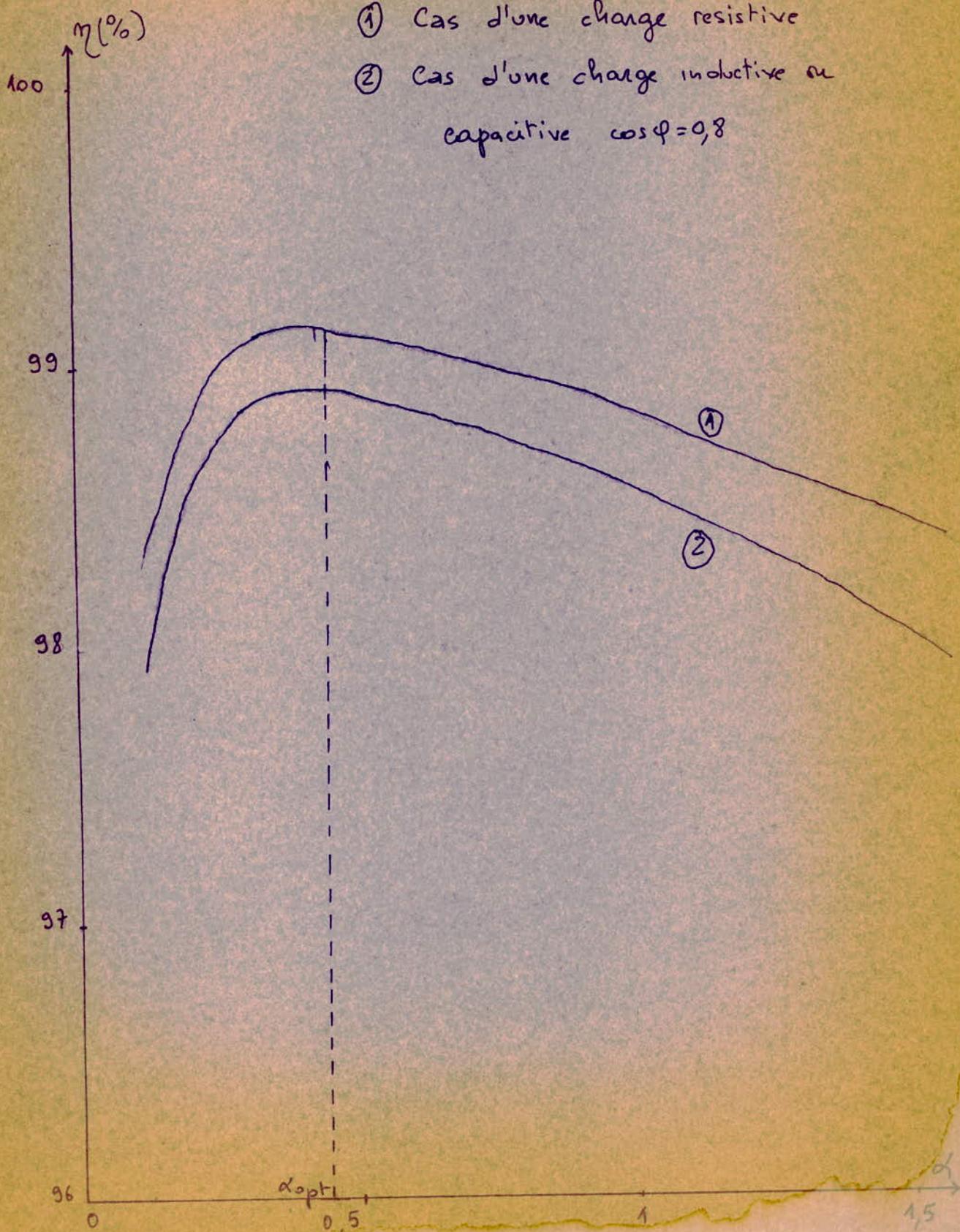
.../

TABLEAU T1 Cas d'une charge résistive

α	$P_0 + \alpha^2 P_K$ KW	$\alpha S_n \cos \phi$ KVA	$\alpha S_n \cos \phi + P_0$ $+ \alpha^2 P_K$ KW	$\alpha^2 P_K$ KW	$\eta\%$
0,125	4,859	287,5	292,359	0,359	98,34
0,25	5,937	575	580,937	1,437	98,98
0,442	8,993	1016,6	1025,593	4,493	99,124
0,5	10,25	1150	1160,25	5,75	99,117
0,75	17,437	1725	1742,437	12,937	99
1,25	40,437	2875	2915,437	35,937	98,62
1,5	56,25	3450	3506,25	51,75	99,4

TABLEAU T2 Cas d'une charge inductive ou capacitive $\cos \phi = 0,8$

α	$\alpha^2 P_K$ KW	$P_0 + \alpha^2 P_K$ KW	$\alpha S_n \cos \phi$ KVA	$\alpha S_n \cos \phi + P_0$ $+ \alpha^2 P_K$ KW	$\eta\%$
1/8	0,359	4,859	230	234,859	97,94
1/4	1,437	5,937	460	465,937	98,73
0,442	4,493	8,993	813,28	822,273	98,91
1/2	5,75	10,25	920	930,25	98,90
3/4	12,937	17,437	1380	1397,437	98,76
1	23	27,5	1840	1867,500	98,53
5/4	35,937	40,437	2300	2340,437	98,25
6/4	51,75	56,25	2760	2816,25	98,01



III CONCLUSION

Une bonne étude de construction de transformateur ne peut être faite qu'avec la connaissance des conditions réelles de fabrication et d'exploitation de la machine en question ainsi que du développement des techniques, de l'accroissement de la puissance transportée et de l'élaboration de nouveaux matériaux, car ceux-ci modifient constamment la construction des machines, bien que les méthodes de faisabilité utilisés restent pratiquement les mêmes.

Pour ce qui est de cette étude, les résultats théoriques obtenus restent comparables à ceux donnés par le cahier de charges.

Le fait d'avoir obtenu un rendement élevé, me permet d'affirmer que la machine est économiquement assez bien dimensionnée.

Enfin, faute de documentation et en particulier des courbes de pertes spécifiques, les pertes à vide ainsi que le courant à vide n'ont pas pu être calculés.

-114-

U- ANNEXE

I - Mode de connexion

La connexion usuelle choisie est $D_{yn} - 11$ codifiée par l'UTE qui signifie : Transformateur en connexion triangle - étoile avec neutre sorti, le chiffre 11 est appelé indice horaire.

L'indice horaire ou numéro de groupe détermine l'angle de déphasage entre les tensions composées primaires et secondaires.

Le rapport des tensions composées primaire et secondaire dépend du :

- 1/ Sens du bobinage
- 2/ Mode de désignation des bornes
- 3/ Mode de couplage

Dans notre cas l'angle de déphasage entre la tension composée (HT) et la tension composée basse-tension est égal à l'indice horaire multiplié par 30°

$$11 \times 30^\circ = 330^\circ$$

Les lettres majuscules repèrent l'enroulement HT et les lettres minuscules repèrent l'enroulement BT.

A	B	C	N	$U_I = U_{ab}$	12	
a	b	c		$U_{II} = U_{ab}$	11	VI
					10	VII

II - Appareillage auxiliaire à prévoir

- Commutateur de réglage : manoeuvrable à vide, raccordement réalisé à l'aide d'une barette
- Un doigt de gant : installé sur le couvercle et permettant la mise en place d'un thermomètre pour le contrôle de température
- Une vanne : permettant la vidange de la cuve
- Une borne de terre : à la partie inférieure de la cuve sur laquelle sont reliés tous les points à potentiel nul.

- Un conservateur d'huile : permettant de ne pas avoir une surface de l'huile trop grande en contact avec l'air
- Une tubulaire : fermée par une membrane pouvant en cas de dilatation excessive, se déchirer et permettre aux gaz de s'échapper librement, ce qui évitera les déformations de la cuve.
- Un dessiccateur : évitant l'humidification de l'huile, contenant du gel de silice absorbant l'humidité de l'air
- Relais Bucholz : pour la protection
- Isolateurs pour le raccordement
- Dispositif de manutention : pour le levage

III - Relais Bucholz

La protection thermique est réalisée à l'aide de relais thermiques pour les petites puissances et de relais à gaz (relais Buchholz) pour les moyennes et grandes puissances. Le relais à gaz le plus employé est basé sur le fait que toute surchauffe dans le transformateur détruit l'isolation de la partie où elle a lieu ; il en résulte l'apparition de produits de décomposition gazeiformes qui se dégagent plus ou moins vite.

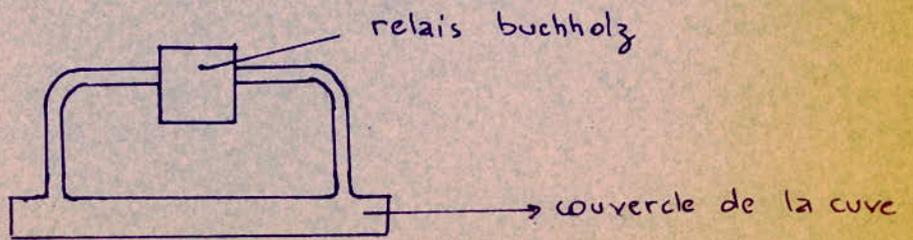
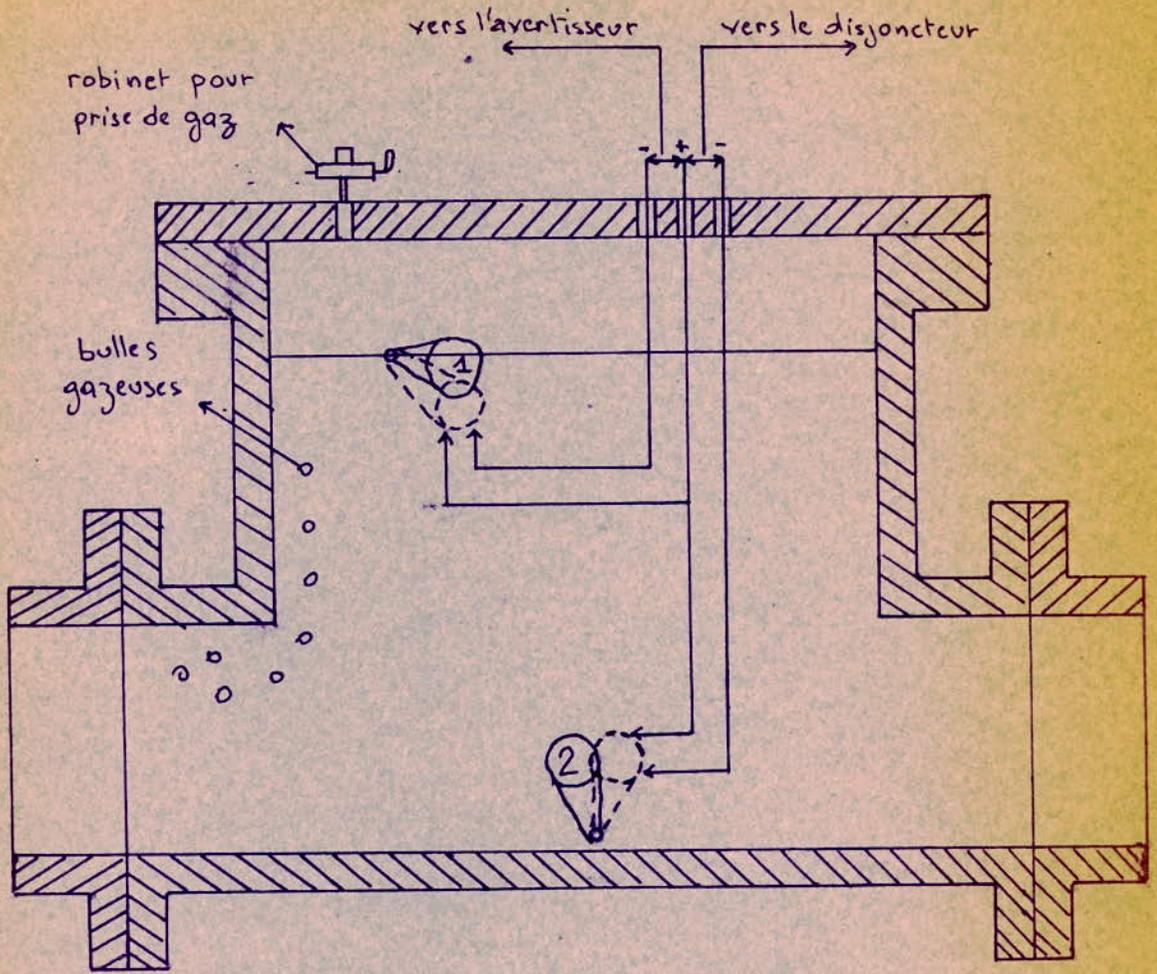
Le gaz dégagé est évacué dans l'air par le réservoir d'huile. Le relais est installé sur le trajet du gaz entre le couvercle de la cuve et le réservoir d'huile.

Dans l'état normal, il est rempli d'huile.

Quand le gaz se dégage, il s'accumule dans la partie supérieure du réservoir et fait baisser le niveau d'huile. Ce qui fait baisser un flotteur (1) qui a un certain moment ferme le circuit avec dispositif de signalisation.

La couleur du gaz a une grande importance, elle donne l'idée de la détérioration. Au cas où le dégagement du gaz est intense, le flux du gaz atteint avec une certaine force le flotteur (2) qui incliné, ferme le circuit de commande du disjoncteur dans l'huile. Ainsi le relais signale l'avarie imminente et met le transformateur hors circuit si cette avarie a lieu de façon brusque.

RELAIS BUCHHOLZ



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

- | | |
|---|-----------------------------|
| 1 - Technologie d'électricité | HEINY-NAUDY - MARTEL |
| 2 - Calcul des machines électriques
Tome I et II | M. LIWSCHITZ & L. MARET |
| 3 - Machines électriques | M. KOSTENKO & L. PIOTROUSKI |
| 4 - Projet de fin d'études | Salah BELKHIR. |