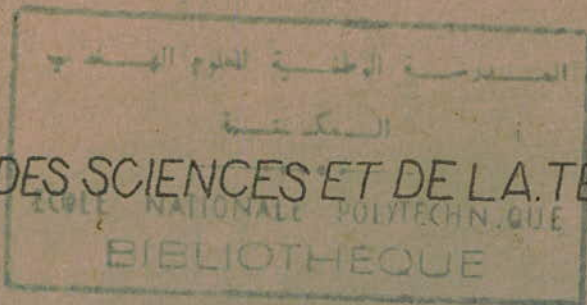


20/79



UNIVERSITÉ DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE D'ALGER

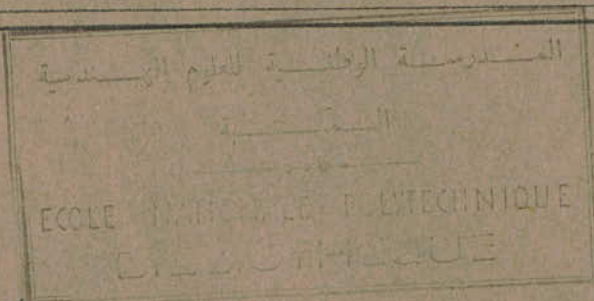
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

red

DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE ET D'ELECTROTECHNIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

CONSTRUCTION DE 2
TRANSFORMATEURS
TRIPHASE, HEXAPHASE. 1250KVA



Proposé par:

M^r V. STIRBU

Professeur à l'ENPA

Etudié par:

S. ZIOUCHE

Promotion Juin 1979

المدرسة الوطنية للعلوم الهندسية
الحكومية

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
BIBLIOTHEQUE

UNIVERSITÉ DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE D'ALGER

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE ET D'ELECTROTECHNIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

**CONSTRUCTION DE 2
TRANSFORMATEURS
TRIPHASE , HEXAPHASE. 1250KVA**

Proposé par:

M^r V. STIRBU

Professeur à l'ENPA

Etudié par:

S. ZIOUCHE

Promotion Juin 1979

A mon père et à ma mère

A mes frères et sœurs

A mes amis

Je dédie cet humble ouvrage

Ziouche Saïffi (dit Brahim)

Je tiens à remercier M. V. STIRBU, le promoteur, pour toute l'aide qu'il m'a apportée dans l'élaboration de ce projet
Je tiens également à remercier M. G. DEBUISNE qui m'a aidé à la réalisation de cet ouvrage

Mes remerciements vont aussi à tous ceux qui ont contribué à ma formation et à tous mes amis.

Ziouché.

— CAHIER DE CHARGE —

Sujet: Construction d'un transformateur de 1250KVA pour la distribution avec 2 variantes au secondaire

- A) Secondaire triphasé connexion γ
- B) Secondaire hexaphasé connexion $\gamma.\gamma$ (inversées)

Puissance nominale $P_n = 1250 \text{ KVA}$

Tension nominale primaire $U_{2n} = 10 \text{ KV}$

Tension nominale secondaire: triphasé $U_{1n} = 0,4 \text{ KV}$
: hexaphasé $U_{1n} = 0,8 \text{ K}$

Réglage $\pm 5\%$

Connexion: - triphasé: $\Delta\gamma 5$
- hexaphasé $\Delta.\gamma\gamma$

Tension de court circuit $U_k = 6\%$

Pertes dues à la charge $P_k = 12 \text{ KW}$

Pertes à vide $P_0 = 1,90 \text{ KW}$

Courant à vide $I_0(\%) = 1,4\%$

Fréquence $f = 50 \text{ Hz}$

Matériel des enroulements en Cuivre

- Noyau à 3 colonnes disposées en ligne
- Enroulements concentriques
- Acier utilisé pour le circuit magnétique M6.ARMCO avec
 - épaisseur des tôles $0,35 \text{ mm}$
 - Laminés à froid (sens du laminage $\alpha = 0^\circ$)

Type intérieur avec refroidissement naturel

_ PLAN D'ÉTUDE _

I) CALCUL DU CIRCUIT MAGNÉTIQUE ET DIMENSIONNEMENT

A. Transformateur triphasé connexion $\Delta y 5$; 10KV/0,4KV

- A1. Calcul préliminaire des dimensions principales
- A2. Calcul des enroulements
- A3. Calcul définitif du circuit magnétique
- A4. Calcul des pertes et du rendement

B. Transformateur hexaphasé connexion $\Delta y. y$ 10KV/0,8KV

- Calcul des enroulements
- Calcul des pertes et du rendement

II) CALCUL THERMIQUE DU TRANSFORMATEUR TRIPHASÉ

III) CALCUL MÉCANIQUE DU TRANSFORMATEUR TRIPHASÉ

IV) PARTIES AUXILIAIRES

== INTRODUCTION ==

L'énergie électrique est de plus en plus utilisée pour ses nombreux avantages en particulier, depuis le début de la dernière décennie, dans les programmes de lutte contre la pollution.

L'énergie électrique est produite dans des centrales thermiques, hydrauliques ou nucléaires situées dans des endroits bien précis, souvent, fort éloignés des lieux d'utilisation. Il faut donc transporter cette énergie des centres de production aux centres d'utilisation avec le moins de pertes possible. Pour réduire les pertes en ligne, l'énergie électrique est transportée sous une haute tension (jusqu'à 220KV en Algérie). Or les générateurs produisent l'énergie sous une tension qui ne dépasse pas 15KV en général, à cause des problèmes d'isolement. Les récepteurs la consomment sous faible tension (220/380V à cause des problèmes d'isolement et du danger pour les utilisateurs)

D'où la nécessité d'avoir des transformateurs élévateurs près des centrales et abaisseurs près des centres d'utilisation. La qualité des transformateurs ne cesse de s'améliorer du point de vue rendement, encombrement, refroidissement et surtout une isolation adéquate qui lui permet une grande tenue pour les surcharges brusques d'où une durée de vie plus élevée. En effet l'utilisation des matériaux de plus en plus adaptés tel que l'acier électrotechnique laminé à froid à grains orientés avec de très faibles épaisseurs et un refroidissement à l'huile adéquat lui donne de meilleures performances.

Mon projet consiste à l'étude d'un transformateur de puissance.

avec des enroulements concentriques qui présente le plus grand intérêt vu le développement de l'interconnexion des réseaux et aussi de l'étude du circuit magnétique d'un transformateur hexaphasé de même puissance servant à alimenter un pont de redressement de grande puissance

V) CALCUL DU CIRCUIT MAGNÉTIQUE ET DIMENSIONNEMENT

— Cette 1^{ère} étape de calcul, qui est la principale, consiste à déterminer les grandeurs fondamentales du transformateur à partir du cahier de charge

La connaissance de la théorie de fonctionnement ne suffit pas à un calcul effectif final car la technologie adoptée fait intervenir des paramètres et souvent il faut épuiser plusieurs variantes pour aboutir à des valeurs cohérentes situées dans des intervalles de tolérance exigés par le constructeur

Ce procédé de dimensionnement comporte 2 étapes

- Un calcul préliminaire permettant de déterminer à partir du cahier de charge les dimensions principales
- Un calcul définitif qui à partir des résultats précédents, permet de dimensionner les enroulements, d'établir toutes les caractéristiques géométriques et électromagnétiques et de les comparer à celles du cahier de charge avec un dépassement de 10% toléré

A) Transformateur triphasé connexion Δ-y-5

10KV/0,4KV

A.1) Calcul préliminaire des dimensions principales

Les dimensions principales d'un transformateur sont le diamètre de la colonne et la hauteur des bobines que l'on va déterminer progressivement par le calcul

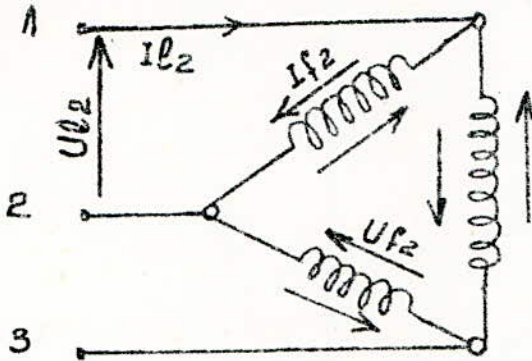
A.1.1) Puissance apparente par colonne: S_c

$$S_c = \frac{S_n}{m_c} \quad \text{ou} \quad \left\{ \begin{array}{l} S_n: \text{puissance nominale} = 1250 \text{ KVA} \\ m_c: \text{Nbre de colonne} = 3 \end{array} \right.$$

$$S_c = \frac{1250}{3} = 416,667 \text{ KVA}$$

A12) Calcul des tensions de phase et des courants de phase

Le primaire étant couplé en Δ (enroulement H.T)



D'après le schéma on voit que :

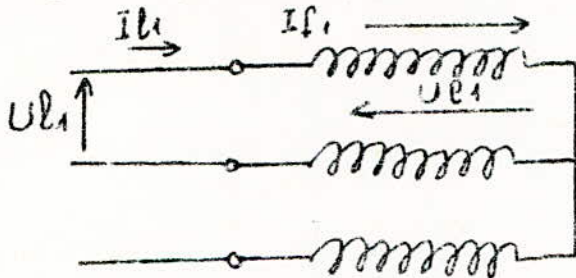
tension de phase = tension de ligne

$$U_{f2} = U_{l2} = 10 \text{KV}$$

Courant de phase = courant de ligne

$$\Rightarrow I_{f2} = \frac{I_{l2}}{\sqrt{3}} = \frac{S_c}{U_{f2}} = \frac{416,667}{10} = 41,667 \text{A}$$

Le secondaire (B.T) étant couplé en étoile (y)



D'après la figure :

La tension de phase = tension de ligne

$$U_{f1} = \frac{U_{l1}}{\sqrt{3}} = \frac{400}{\sqrt{3}} = 230,95 \text{V}$$

Le courant de ligne = courant de phase

$$I_{f1} = I_{l1} = \frac{S_c}{U_{f1}} = \frac{416,667}{0,2309} = 1804,14 \text{A}$$

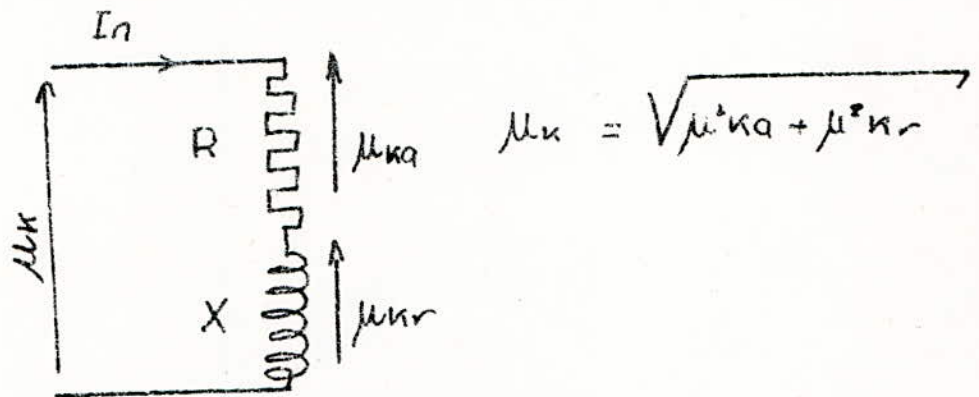
A13) Tension de court circuit: μ_k

C'est la tension qu'il faut appliquer aux bornes d'un enroulement pour faire circuler dans l'autre enroulement qui est en court circuit, un courant égal au courant nominal

Cette tension de court circuit μ_k a 2 composantes

- Une composante active μ_{ka} due à la résistance
- Une composante réactive μ_{kr} due à l'inductivité des enroulements

Dans les calculs il est préférable que ces grandeurs de court circuit soient en valeurs réduites.



D'où la composante $\mu_{kr} = \sqrt{\mu_k^2 - \mu_{ka}^2}$

La composante active est imposée par le cahier de charge

$$\mu_{ka} = \frac{P_{kx}}{S_n} \cdot 100 \quad \text{ou} \quad \begin{cases} P_k: \text{pertes dues à la charge [kW]} \\ S_n: [\text{kVA}] \\ \mu_{ka}: [\%] \end{cases}$$

$$\Rightarrow \mu_{ka} = \frac{12}{1250} \cdot 100 = 0,96\%$$

d'où la valeur de la composante réactive en valeur réduite

$$\mu_{kr} = \sqrt{6^2 - 0,96^2} \cdot 10^{-4} = 5,92\%$$

A14) Diamètre de la colonne: D

Le diamètre du cercle dans lequel est inscrit la section de la colonne est donné par la formule suivante

$$D = 1,0674 \sqrt[4]{\frac{a_r \cdot \beta \cdot K_R \cdot S_c}{K_{\mu}^2 \cdot \hat{B}_c^2 \cdot \mu_{kr}}}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} a_r: [m] \\ S_c: [VA] \\ \hat{B}_c: [T] \\ \mu_{kr}: [\%] \\ D: [m] \end{array} \right.$$

Les valeurs de S_c et μ_{kr} sont déjà calculées d'après le cahier de charge, tandis que les autres paramètres feront l'objet d'un choix d'après ceux des transformateurs déjà réalisés

A141) Coefficient de sveltesse β

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

$$\left\{ \begin{array}{l} D_{12}: \text{diamètre du canal de fuite } [m] \\ h_B: \text{hauteur des bobines } [m] \end{array} \right.$$

Le diamètre D_{12} et la hauteur h_B n'étant pas connus ceci nous oblige à faire un choix judicieux du facteur de sveltesse β , en effet son influence est assez importante sur la consommation spécifique des matériaux actifs.

Si β est proche de la limite supérieure le poids des colonnes, des enroulements et le prix de réalisation diminuent, par contre le poids des culasses, les pertes dues à la charge, le courant de marche à vide et la tension de court circuit ainsi que le prix d'exploitation augmentent.

La valeur de β est fonction de la puissance par colonne et de la tension la plus grande et du type de matériau utilisé pour les bobinages

S_c KVA	3 à 2000		2000 à 3000	
U KV	6 - 10	35		110
β cu	3,4 - 1,75	3 - 1,6	1,8 - 1,3	2 - 1,5

Nous choisissons $\beta = 1,88$

A15) Calcul de l'épaisseur rapportée (ou équivalente) du canal de fuite: a_r

Pour les enroulements concentriques elle est donnée par:

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

a_{12} : est la largeur du canal de fuite, elle est fonction de la tension la plus grande

Le tableau ci-dessous donne les différentes valeurs pour les transformateurs immergés dans l'huile

U_n KV	3	6	10	15	20	35	110	220
$U_{C.E.I}$ KV	3,6	7,2	12	17,5	24	36	123	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	

Nous choisissons $a_{12} = 1,2$ cm

a_1 : épaisseur de l'enroulement B.T

a_2 : épaisseur de l'enroulement H.T

Remarquons que l'on peut calculer le terme $\frac{a_1 + a_2}{3}$ qui dépend de la puissance du transformateur

$$\frac{a_1 + a_2}{3} = K \sqrt[4]{S_c} \quad \begin{cases} \frac{a_1 + a_2}{3} & [\text{cm}] \\ S_c & [\text{KVA}] \end{cases}$$

Le facteur K dépend de la puissance par colonne et de la tension la plus élevée

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 - 0,5	0,44 - 0,46

Nous choisissons $K = 0,57$

$$\frac{a_1 + a_2}{3} = 0,57 \sqrt[4]{416,667} = 2,574 \text{ cm}$$

valeur de l'épaisseur rapportée du canal de fuite

$$a_r = 1,2 + 2,574 = 3,774 \text{ cm}$$

A16) Coefficient de Rogowski: K_R

Ce coefficient tient compte du fait que les lignes du champ dans le canal de fuite ne sont pas parallèles mais incurvées. À ce niveau de calcul, on le prend égal à: $\Rightarrow K_R = 0,95$

A17) Facteur d'utilisation de la section de fer: K_u

$$K_u = K_r \cdot K_g \quad \text{ou}$$

K_r : coefficient de remplissage dépendant de l'isolation et de l'épaisseur de la tôle

Notre circuit magnétique est constitué par des tôles d'épaisseur 0,35 mm isolées à la carlite qui correspond à $K_r = 0,94$

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

S_c KVA	< 5	4 - 15	15 - 45	45 - 5000
n gradins	2	4	5	6
D approché	< 8	8 - 12	12 - 16	16 - 51
K_g	0,786	0,866	0,91	0,93

Nous choisissons $K_g = 0,93$ $n_g = 6$

Finalement la valeur de K_u

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

A18) Induction magnétique de crête: \hat{B}_c

Son choix se fait à partir de la puissance du transformateur et du type de tôles utilisées

Sa valeur est d'une importance fondamentale. Elle influe directement sur les pertes à vide. Pour une valeur importante

les pertes sont grandes, la saturation du fer est rapide et donc un courant de marche à vide important

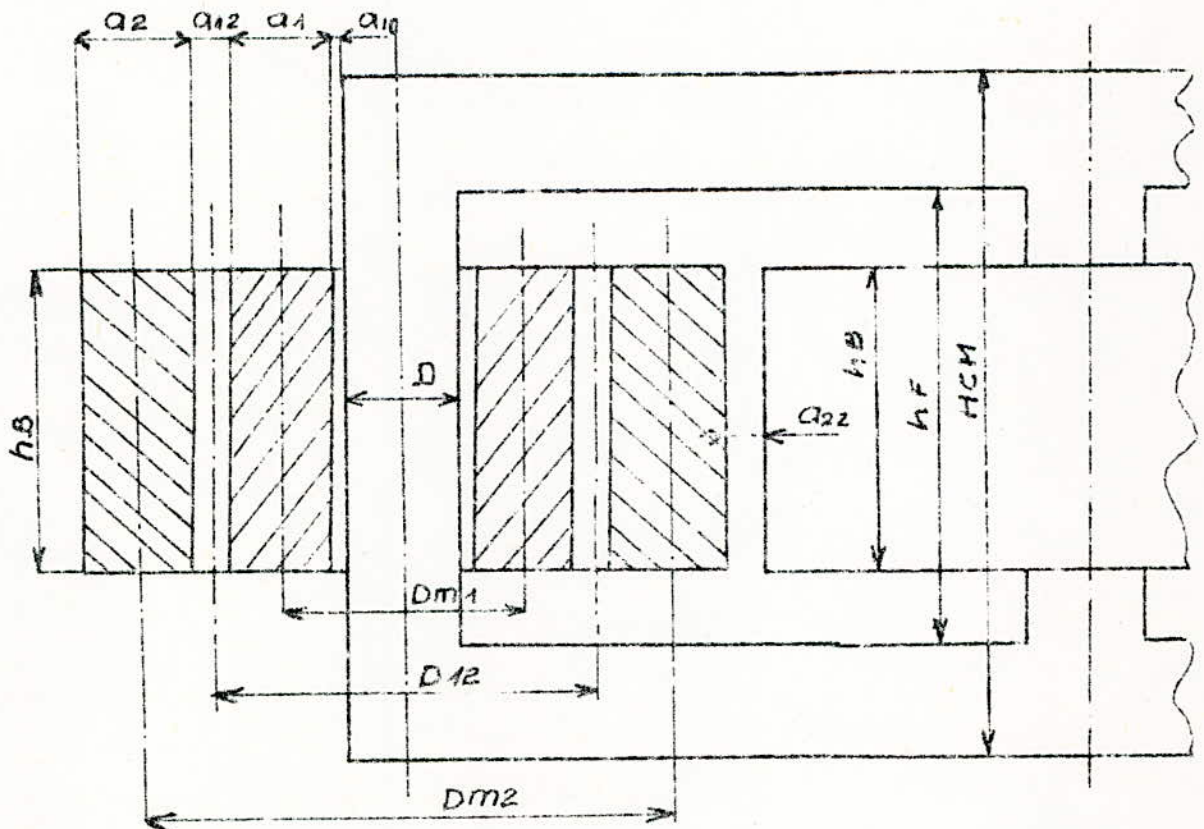
Sc kVA	10-50	75-250	315-600	630-1000	>1000
\hat{B}_c laminées à froid	1,25-1,55	1,55-1,65	1,62-1,68	1,63-1,69	1,64-1,7
\hat{B}_c laminées à chaud	1,1-1,35	1,41-1,46	1,42-1,47	\	1,48-1,48

Notre circuit magnétique étant constitué par des tôles laminées à froid : Nous choisissons $\hat{B}_c = 1,635 \text{ T}$

Maintenant que tous les paramètres sont fixés, on peut calculer le diamètre de la colonne.

$$D = 1,0674 \sqrt[4]{\frac{3,774 \cdot 10^{-2} \cdot 1,58 \cdot 0,95 \cdot 416,857 \cdot 10^3}{0,764 \cdot (1,635)^2 \cdot 5,92 \cdot 10^{-2}}} = 23,43 \text{ cm}$$

A19) Diamètre du canal de fuite D_{12}



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

ou a_{10} est la distance entre la colonne et l'enroulement B.T. Sa valeur est donnée en fonction de la tension nominale de l'enroulement primaire

U_n KV	≤ 1	3	6	10	15	20	25
a_{10} cm	0,5	1,2	1,2-1,5	1,8	1,8-2	2,1-2,3	3

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

La valeur a_1 de l'épaisseur de l'enroulement BT est donnée par la relation suivante

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

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

\Rightarrow Dans notre cas $K_{a1} = 0,55$

La valeur de a_1 serait donc $a_1 = 0,55 \sqrt[4]{416,667} = 2,484 \text{ cm}$
 ces différents paramètres étant calculer nous pouvons déduire le diamètre moyen du canal de suite

$$D_{12} = 23,43 + 2 \cdot 0,5 + 2 \cdot 2,484 + 1,2 = 30,6 \text{ cm}$$

A20) Hauteur des enroulements

On doit avoir les mêmes hauteurs pour les 2 enroulements

$$h_B = \frac{\pi D_{12}}{\beta} = \frac{\pi \cdot 30,6}{1,88} = 51,14 \text{ cm}$$

A2) Calcul des enroulements

Un enroulement est complètement déterminé si on connaît

- Le nombre de spires
- La section du conducteur
- La hauteur et l'épaisseur de l'enroulement

- Le type d'isolation utilisée

AR1) Section du fer de la colonne

$$S_{\text{Fer.col}} = \frac{\pi D^2}{4} K_u \quad \left\{ \begin{array}{l} D: [\text{cm}] \\ S_{\text{Fer.col}}: [\text{cm}]^2 \end{array} \right.$$

Le coefficient K_u (coefficient de foisonnement) tient compte de l'isolation entre couches et du nombre de gradins

$$S_{\text{Fer.col}} = \frac{\pi (23,43)^2}{4} = 377 \text{ cm}^2$$

AR2) Tension de spire

$$U_{\text{sp}} = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot \Phi = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot \hat{B}_c \cdot S_{\text{Fer.col}} \quad \left\{ \begin{array}{l} U_{\text{sp}}: [\text{V}] \\ \hat{B}_c: [\text{T}] \\ S_{\text{Fer.col}} [\text{m}]^2 \end{array} \right.$$

$$U_{\text{sp}} = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot 50 \cdot 1,635 \cdot 377 \cdot 10^{-4} = 13,69 \text{ V}$$

Vu le fait que le flux magnétique utile passe par la colonne.
Donc la tension par spire du primaire sera égale à la tension par spire du secondaire

Nbre de spires de l'enroulement B.T

$$Z_1 = \frac{U_1 f}{U_{\text{sp}}} = \frac{230,95}{13,69} = 16,87 \approx 17 \text{ spires}$$

Nbre de spires de l'enroulement H.T

$$Z_2 = Z_1 \frac{U_2}{U_1} = 17 \frac{10^4}{230,95} \approx 736 \text{ spires}$$

Valeurs définitives de l'induction magnétique de crête et de la tension de spire recalculées

Tension de spire

$$U_{\text{sp}} = \frac{230,95}{17} = 13,585 \text{ V}$$

Pour les transformateurs déjà étudiés de puissance 12,50 kVA

$$U_{\text{sp}} = [13 \div 16] \quad \text{donc notre valeur est acceptable}$$

La modification de la tension de spire nous oblige à recalculer la valeur de l'induction magnétique de crête

Valeur définitive de l'induction \hat{B}_c

$$\hat{B}_c = \frac{U_{sp}}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot S_{fer}} = \frac{13,585 \cdot 10^4}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot 377} = 1,623 T$$

A23) Calcul des sections des conducteurs

d'abord il faut calculer la densité moyenne de courant

$$J_m = 7,34 \frac{1}{K_{pk}} \frac{P_k \cdot U_{sp}}{D_{12} \cdot S_m} \quad \left\{ \begin{array}{l} P_k: [Kw] \\ S_m: [KVA] \\ U_{sp}: [V] \\ D_{12}: [m] \end{array} \right.$$

Le facteur K_{pk} tient compte des pertes supplémentaires et il est fonction de la puissance du transformateur

S_m [KVA]	30	180	600	1000	2000	2500	4000	6000
K_{pk}	1,02	1,025	1,05	1,06	1,07	1,075	1,08	1,09

$$K_{pk} = 1,06$$

La valeur de J_m sera: $J_m = 7,34 \cdot \frac{1}{1,06} \cdot \frac{12 \cdot 13,585}{30,6 \cdot 1250 \cdot 10^{-2}} = 2,95 A/mm^2$

Si J_m est assez important, la consommation en cuivre est moindre mais les pertes Joule seront importantes dans l'enroulement

A24) Choix des conducteurs et du type d'enroulements

A241) Enroulement B.T

$$S_{z1} = \frac{I_{p1}^2}{J_m} = \frac{1804,44}{2,95} = 612 mm^2$$

Vu que $S_{z1} > 50 mm^2$. On utilise donc plusieurs conducteurs méplat en parallèle ayant chacun une section inférieure à $50 mm^2$

Prenons 14 conducteurs élémentaires en parallèle, chacun de

$$\text{section } S_{z1 \text{ elem}} = \frac{612}{14} = 43,71 mm^2$$

Pour assurer une répartition plus uniforme du courant entre les branches parallèles on a recours à la transposition des fils
 Nous faisons donc une transposition des conducteurs après chaque spire

Le nombre de transposition sera donc

$$\text{Nbre de transp} = Z_1 - 1 = 17 - 1 = 16$$

Les conducteurs étant normalisés, nous choisissons d'après le tableau des sections normalisées la section la plus proche de $43,74 \text{ mm}^2$

$$\Rightarrow S_{21} \text{ élém normalisée} = 43,6 \text{ mm}^2$$

Les dimensions de S_{21} $\left\{ \begin{array}{l} a = 3,53 \text{ mm} \\ b = 12,50 \text{ mm} \end{array} \right.$

La nouvelle valeur de la densité de courant

$$J'_m = \frac{1804,14}{16 \times 43,6} = 2,955 \text{ A/mm}^2 \approx 2,95 \text{ A/mm}^2$$

Pratiquement la valeur de la densité reste inchangée

D'après le tableau suivant, l'enroulement approprié à notre transformateur est du type spirale (en hélice) avec 2 entrées afin de réduire les canaux de refroidissement

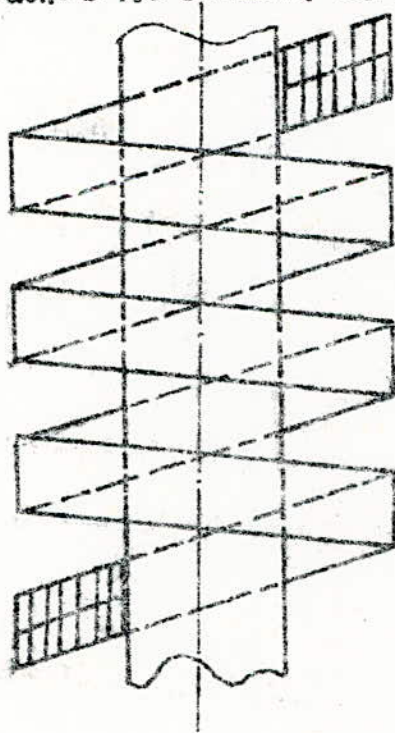
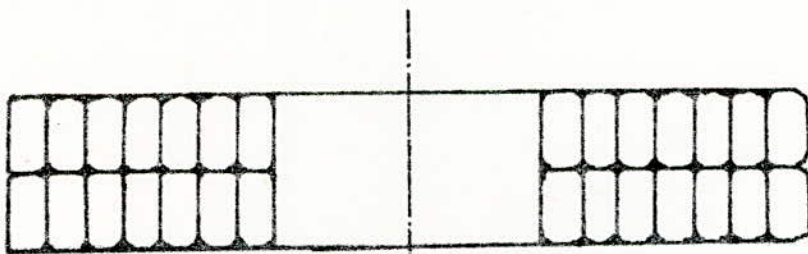


Schéma d'un enroulement spirale avec 2 entrées

I_f (A)	U_n (KV)	S_z (mm ²)	$Z_{\text{élé max}}$	Type d'enroulement
30-50	<35	10	1-2	Stratifié
<250	≤0,525	50	1	cylindrique une seule couche
250-800	≤0,525	300	5	cylindrique une seule couche
800 à 1600	≤1	600	2r 5	-cylindrique avec 2 fils de commencement -plusieurs couches (3)
1600-3000	0,525	1200	20	Spiralé
3000-4500	0,525	2400	2r 20	Hobart
4500 à 20000		14000	8r 30	avec conducteur Roebel cylindrique
>50	>3,6	400	6	Galettes continues

Dimensions géométriques de la bobine BT

Si on adopte la disposition sur plat (comme l'indique la figure) parcequ'elle facilite le travail du bobinage, réduit les pertes supplémentaires au prix d'une diminution de la stabilité mécanique par rapport à la disposition sur champ



spire comportant 14 conducteurs élémentaires disposés à plat

Hauteur de la bobine :

$$h_B = (Z_1 + 1) h_{sp} + (Z_{\text{élé}} - 1) h_c + 1 \text{ cm}$$

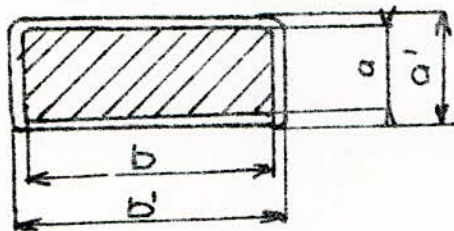
h_c : hauteur du canal de refroidissement utilisée aussi pour la transposition des conducteurs
 $h_c = 5 \text{ mm}$

h_{sp} : hauteur de la spire (dans notre cas $h_{sp} = 2b'$)

Un dépassement de 1cm prévu pour la stabilisation de la bobine

L'isolation des conducteurs élémentaires est réalisée avec un ruban d'épaisseur = 0,32 mm

L'ep. dimensions du conducteurs élémentaire sont



section d'un conducteur élémentaire

$$a' = a + S_{isol} = 3,53 + 0,64 = 4,17 \text{ mm}$$

$$b' = b + S_{isol} = 12,50 + 0,64 = 13,14 \text{ mm}$$

Valeur de la hauteur de la spire

$$h_{sp} = 2b' = 2 \cdot 13,14 = 26,28 \text{ mm}$$

valeur numérique de la hauteur de la bobine h_B

$$h_B = (17+1) \cdot 2,628 + (14-1) \cdot 0,5 + 1 = 54,804 \text{ cm}$$

Épaisseur de la bobine B.T a_1

$$a_1 = P a' = 7 \cdot 4,17 = 29,19 \text{ mm}$$

Valeur recalculée du diamètre du canal de fuite

$$D_{12r} = 23,43 + 1 + 2 \cdot 2,919 + 1,2 = 31,468 \text{ cm}$$

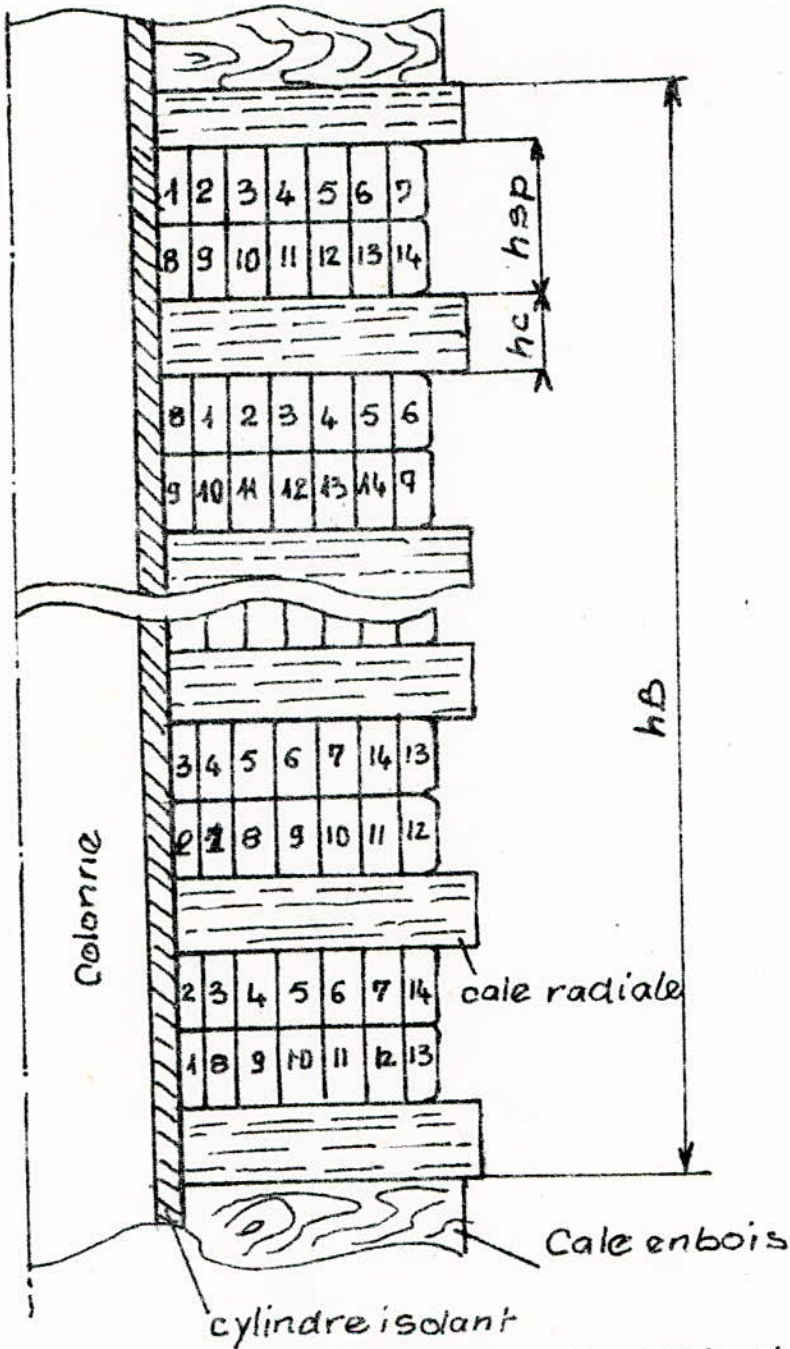
Coefficient de sveltesse recalculé

$$\beta_r = \frac{\pi D_{12r}}{h_B} = \frac{\pi \cdot 31,47}{54,8} = 1,80$$

L'erreur relative sur β

$$\frac{\Delta \beta}{\beta_r} = \frac{1,88 - 1,8}{1,8} \cdot 100 = 4\% < 20\% \Rightarrow$$

Cette nouvelle valeur définitive de β_r est acceptable



schémas représentant la section (1/2) d'une colonne comportant uniquement l'enroulement base tension

A2.42) Enroulement Haute tension

Section du conducteur

$$S_{z2} = \frac{I f_2}{J_m} = \frac{41,667}{2,95} = 14,12 \text{ mm}^2$$

$S_{z2} = 14,12 \text{ mm}^2$ valeur qui est supérieur à 6 mm^2 donc on peut prendre un conducteur élémentaire de section rectangulaire

La section normalisée correspondante à $14,12 \text{ mm}^2$ est :

$$S_{\text{norm}} = 14,20 \text{ mm}^2$$

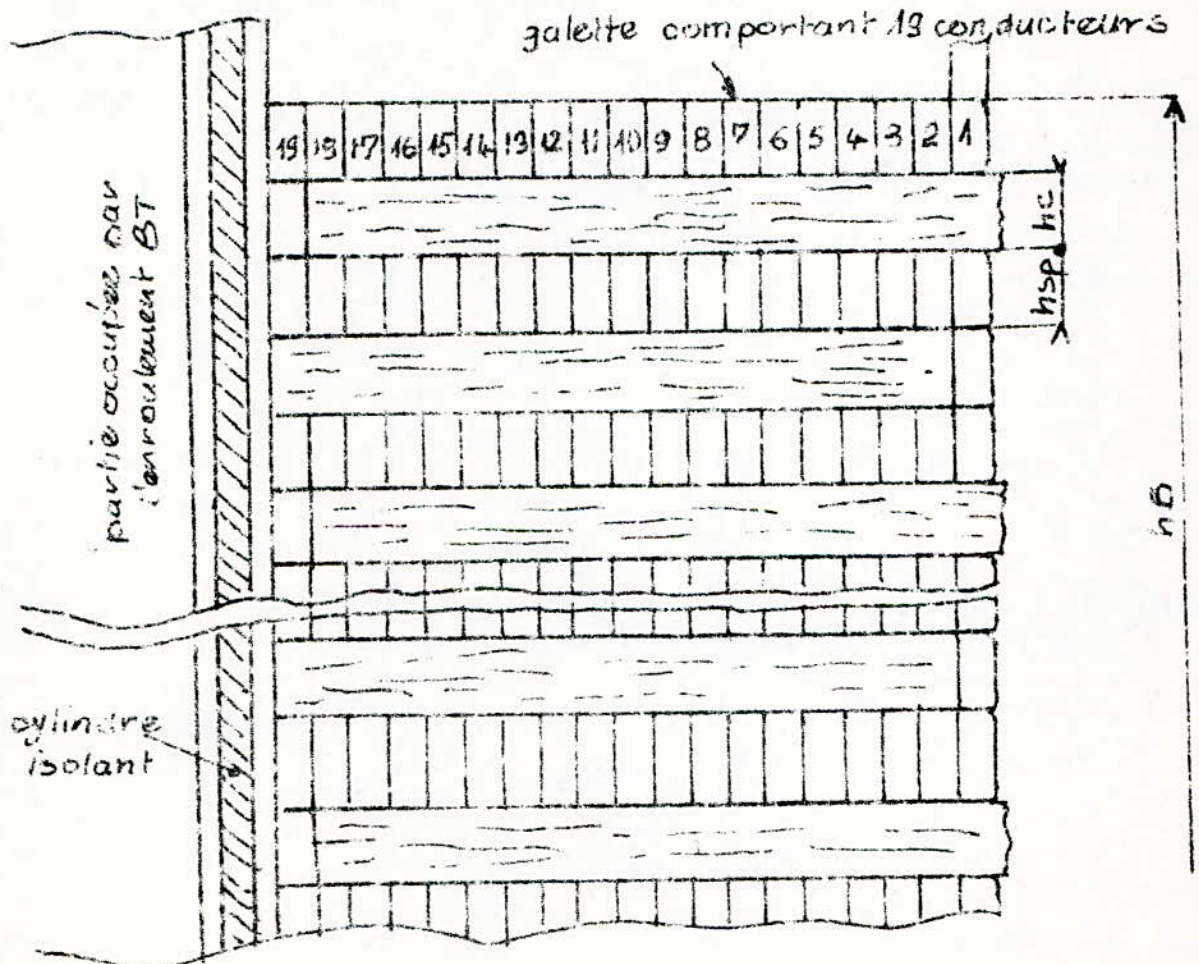
$$\text{avec } \begin{cases} a = 1,95 \text{ mm} \\ b = 7,40 \text{ mm} \end{cases}$$

Vue que on a changer la section donc on doit recalculer la nouvelle valeur de la densité de courant

$$J_2 = \frac{41,667}{14,20} = 2,93 \text{ A/mm}^2$$

Cette valeur ne diffère pas beaucoup de la valeur prise au départ $\frac{\Delta J}{J} < 5\%$

La tension nominale de l'enroulement HT est de 10 kV et le courant nominal est égal à $41,667 \text{ A}$ valeur assez proche de 50 A , on peut donc choisir l'enroulement en galettes continues afin d'améliorer le refroidissement



Le réglage de la tension étant exigé par le constructeur à $\pm 5\%$, pour cela nous déterminons le nombre total de spire

$$Z'_2 = 1,05 Z_2 = 1,05 \cdot 736 = 773 \text{ spires}$$

Le nombre de spire permettant le réglage minimum

$$Z''_2 = 0,95 Z_2 = 0,95 \cdot 736 = 699 \text{ spires}$$

Le nombre de spires de réglage

$$Z_{\text{réglage}} = Z'_2 - Z''_2 = 773 - 699 = 74 \text{ spires}$$

Les prises de réglage étant placées dans une galette pour faciliter l'emplacement des prises

Pour cela nous déterminons le nombre de spires par galette

$$Z_{\text{sp/gal}} = 0,025 Z_2 = 0,025 \cdot 736 = 18,4 \approx 19 \text{ spires}$$

et enfin nous déduisons le nombre de galettes

$$Z_g = \frac{1,05 Z_2}{0,025 Z_2} = 42 \text{ galettes}$$

- Dimensions géométrique de la bobine H.T

Sa hauteur est déterminée par la relation suivante

$$h_B = h_g \cdot Z_g + (Z_g - 1) h_c + 1 \text{ cm} \quad \text{ou}$$

h_g : représente la hauteur de la galette

$$h_g = b' = b + \delta_{\text{isol}} = 7,40 + 0,64 = 8,04 \text{ mm}$$

h_c : hauteur du canal = 0,47 cm

$$\text{Finalement } h_B = 0,804 \cdot 42 + (42 - 1) \cdot 0,47 + 1 = 54,038 \text{ cm}$$

Epaisseur de la bobine haute tension

$$a_2 = Z_{\text{sp/gal}} \times a' = 19 \cdot [1,95 + 0,64] = 49 \text{ mm}$$

A2.5) Vérification de la tension de court circuit μ_k

A2.51) Valeur définitive de la largeur rapportée du canal de fuite:

$$a_r = 1,2 + \frac{2,92 + 4,9}{3} = 3,8 \text{ cm}$$

A2.52) Valeur définitive du coefficient de Rogowski K_R

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

$$K_R = 1 - \frac{1}{2\pi} \frac{2,4 + 2,92 + 4,9}{54,8} = 0,97$$

Les différents paramètres étant fixés définitivement, nous pouvons vérifier la valeur de la tension de court circuit μ_k :

$$\mu_{kr} = \frac{2\pi f \cdot \mu_0 \cdot Z_1^2 \cdot a_r \cdot \beta \cdot K_R \cdot I_{f1} \cdot 100}{U_{f1}} \left\{ \begin{array}{l} a_r : [m] \\ I_{f1} : [A] \\ U_{f1} : [V] \\ \mu_{kr} [\%] \\ \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m} \end{array} \right.$$

$$\mu_{kr} = \frac{2\pi f \cdot (4\pi \cdot 10^{-7}) \cdot 17^2 \cdot 3,8 \cdot 10^{-2} \cdot 1,8 \cdot 0,97 \cdot 1804,14 \cdot 100}{230,95} = 5,91\%$$

nous déduisons $U_{kr} = \sqrt{\mu_{kr}^2 + \mu_{ka}^2}$

$$U_k = \sqrt{(5,31^2 + 0,96^2) \cdot 10^{-6}} = 5,99\%$$

Cette valeur définitive est acceptable parce qu'elle diffère de très peu à celle fixée par le cahier de charge

A26) Caractéristiques des enroulements:

Pour cela on doit déterminer - La résistance d'enroulement

- Le poids d'enroulement

A261) Enroulement B.T

- Calcul de la résistance: $R_1 = \rho \frac{l_{t1}}{S_{z1}} : \rho_{100^\circ\text{C}} = 0,021 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$

Diamètre moyen de la spire D_{m1}

$$D_{m1} = D + 2a_{10} + a_1 = 23,43 + 1 + 2,92 = 27,35 \text{ cm}$$

Longueur moyenne de la spire

$$l_{z1} = \pi D_{m1} = \pi \cdot 27,35 = 85,88 \text{ cm}$$

Longueur totale du conducteur

$$l_{t1} = z_1 \cdot l_{z1} = 17 \cdot 85,88 = 1459 \text{ cm} = 14,6 \text{ m}$$

Valeur de la résistance $R_1 = \frac{0,021 \cdot 14,6}{14 \cdot 43,6} = 5,02 \cdot 10^{-4} \Omega$

- Calcul du poids du matériau actif G_1

$$G_1 = \gamma_1 \cdot l_{t1} \cdot S_{z1} \cdot 10^{-3} \quad \left\{ \begin{array}{l} \gamma_1: \text{poids spécifique} = 8,9 \text{ kg/dm}^3 \\ l_{t1}: [\text{m}] \\ S_{z1}: [\text{mm}]^2 \end{array} \right.$$

$$G_1 = 8,9 \cdot 14,6 \cdot (14 \cdot 43,6) \cdot 10^{-3} = 79,3 \text{ Kg}$$

A262) Enroulement haute tension

- Calcul de la résistance $R_2 = \rho \frac{l_{t2}}{S_{z2}}$

Diamètre moyen de la spire

$$D_{m2} = D + 2a_{10} + 2a_{12} + 2a_{11} + a_2 \\ = 23,43 + 2 \cdot 0,5 + 2 \cdot 1,2 + 5,838 + 4,9 = 37,57 \text{ cm}$$

Longueur moyenne de la spire

$$l_{z2} = \pi D_{m2} = \pi \cdot 37,57 = 118 \text{ cm}$$

Longueur totale du conducteur

$$l_{t2} = Z_2 \cdot l_{z2} = 773 \cdot 118 = 91190 \text{ cm} = 911,9 \text{ m}$$

$$R_2 = 0,021 \cdot \frac{911,9}{14,2} = 1348 \Omega$$

- Calcul du poids du matériel actif G_2

$$G_2 = \gamma_1 \cdot l_{t2} \cdot S_{z2} \cdot 10^{-3} = 8,9 \cdot 911,9 \cdot 14,2 \cdot 10^{-3} = 115,2 \text{ Kg}$$

Poids total du matériel actif G

$$G = 3(G_1 + G_2) = 3(79,3 + 115,2) = 583,5 \text{ Kg}$$

A3) Calcul définitif du circuit magnétique

Il consiste à dimensionner définitivement le circuit magnétique

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

A31) Longueur de la fenêtre

$$l_F = 2(a_{10} + a_1 + a_{12} + a_2) + a_{22} \quad \text{ou}$$

a_{22} c'est la distance séparant les 2 bobines de HT elle est fonction de la tension nominale

Pour U_n (KV) = 10 correspond $a_{22} = 1,4$ cm et $l_{02} = 4$ cm

$$l_F = 2(0,5 + 2,92 + 1,2 + 4,9) + 1,4 = 20,44 \text{ cm}$$

A32) Hauteur de la fenêtre

$$h_F = h_B + 2 l_{02} = 54,8 + 2 \cdot 4 = 62,8 \text{ cm}$$

A33) Longueur entre axes des colonnes

$$l_{cc} = l_F + D = 20,44 + 23,43 = 43,87 \text{ cm}$$

A34) Section de la culasse

Afin de diminuer la dissymétrie magnétique due à la distribution linéaire des colonnes, la culasse doit avoir une section supérieure de 15 à 20% à celle de la colonne

$$S_j = 1,15 S_{\text{Fer.col}} = 1,15 \cdot 378 = 433 \text{ cm}^2$$

A35) Induction magnétique dans la culasse

$$\hat{B}_j \cdot S_j = \hat{B}_c \cdot S_{\text{Fer.col}} \Rightarrow \hat{B}_j = \frac{S_{\text{Fer.col}}}{S_j} \hat{B}_c$$

$$\hat{B}_j = \frac{\hat{B}_c}{1,15} = \frac{1,623}{1,15} = 1,41 \text{ T}$$

A36) Dimensions des gradins formant la colonne

Pour un noyau à 6 gradins les normes donnent les relations suivantes pour calculer les dimensions

$$l_{g1} = 0,96 \cdot D = 0,96 \cdot 23,43 = 22,49 \text{ cm}$$

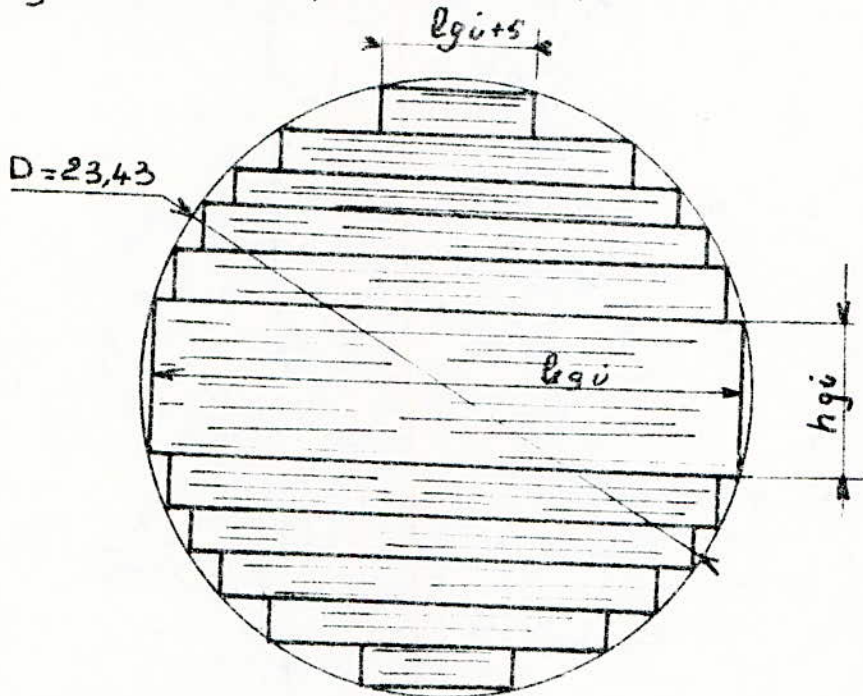
$$l_{g2} = 0,885 \cdot D = 0,885 \cdot 23,43 = 20,73 \text{ cm}$$

$$l_{g3} = 0,775 \cdot D = 0,775 \cdot 23,43 = 18,16 \text{ cm}$$

$$l_{g4} = 0,631 \cdot D = 0,631 \cdot 23,43 = 14,78 \text{ cm}$$

$$l_{g5} = 0,465 \cdot D = 0,465 \cdot 23,43 = 10,89 \text{ cm}$$

$$l_{g6} = 0,28 \cdot D = 0,28 \cdot 23,43 = 6,56 \text{ cm}$$



Pour déterminer les hauteurs des grains on a la relation suiv

$$h_{g_i} = \sqrt{D^2 - l_{g_i}^2} \Rightarrow$$

$$h_{g1} = (23,43^2 - 22,49^2)^{\frac{1}{2}} = 6,57 \text{ cm}$$

$$h_{g2} = (23,43^2 - 20,73^2)^{\frac{1}{2}} = 10,92 \text{ cm}$$

$$h_{g3} = (23,43^2 - 18,16^2)^{\frac{1}{2}} = 14,8 \text{ cm}$$

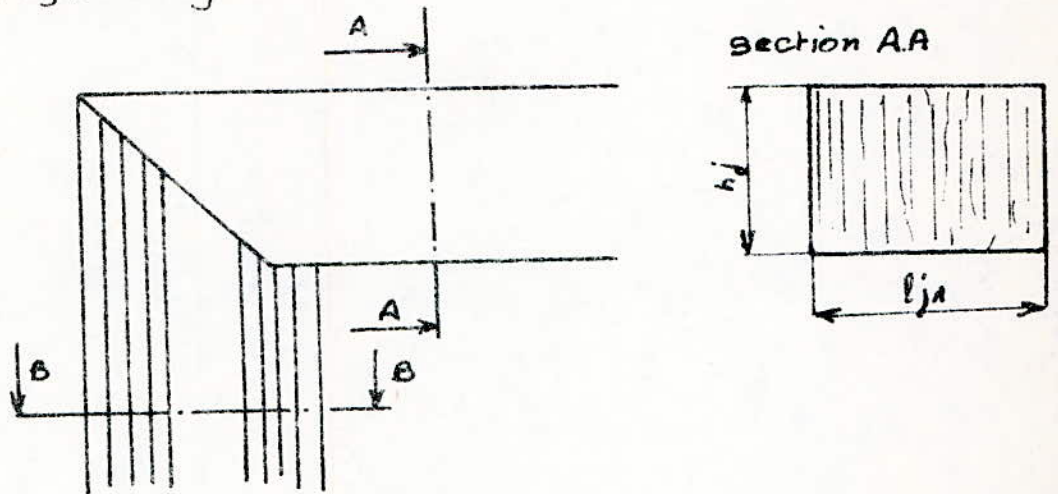
$$h_{g4} = (23,43^2 - 14,78^2)^{\frac{1}{2}} = 18,18 \text{ cm}$$

$$h_{g5} = (23,43^2 - 10,89^2)^{\frac{1}{2}} = 20,74 \text{ cm}$$

$$h_{g6} = (23,43^2 - 6,56^2)^{\frac{1}{2}} = 22,49 \text{ cm}$$

A37) Largeur de la culasse l_j

La largeur de la culasse doit être égale à la largeur de la tôle l_1 plus large du noyau



section B.B

$$l_j = l_{g1} = 22,49 \text{ cm}$$

A38) Hauteur de la culasse

$$h_j = \frac{S_j}{l_j} = \frac{433}{22,49} = 19,25 \text{ cm}$$

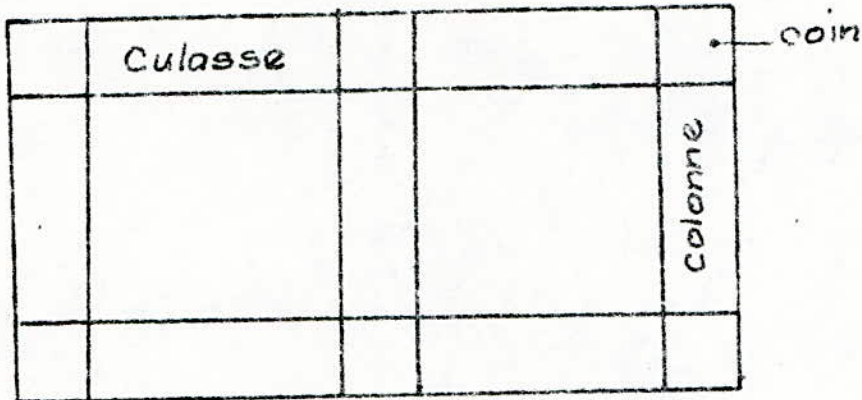
A39) Hauteur totale du circuit magnétique

$$H_{c.M} = h_c + 2h_j = 62,8 + 2(19,25) = 101,3 \text{ cm}$$

A310) Poids du circuit magnétique

On doit diviser le circuit magnétique en 3 parties

- Colonnes
- Culasses
- Coins



- Poids des colonnes

$$G_{col} = 3 \cdot \delta_2 \cdot V_{col}$$

$$\delta_2 = 7,65 \text{ Kg/dm}^3$$

Volume d'une colonne

$$V_{col} = S_{col} \cdot h_{col} = 377,62,8 = 23,67 \text{ dm}^3$$

$$\Rightarrow G_{col} = 3 \cdot 7,65 \cdot 23,67 = 543 \text{ Kg}$$

- Poids des culasses

$$G_{cul} = 4 \cdot \delta_2 \cdot V_j$$

Volume d'une portion de culasse

$$V_j = S_j \cdot L_F = 433 \cdot 20,44 = 8850 \text{ cm}^3 = 8,85 \text{ dm}^3$$

$$G_{cul} = 4 \cdot 7,65 \cdot 8,85 = 270,8 \text{ Kg}$$

- Poids des coins

$$G_{coin} = 6 \cdot \delta_2 \cdot V_c$$

Volume d'un coin

$$V_c = S_j \cdot D = 433 \cdot 23,43 \cdot 10^{-3} = 10,14 \text{ dm}^3$$

$$G_{coin} = 6 \cdot 7,65 \cdot 10,14 = 465 \text{ Kg}$$

Poids total du circuit magnétique G

$$G = G_{col} + G_{cul} + G_{coin} = 543 + 270,8 + 465 = 1278,8 \text{ Kg}$$

A4) Calcul des pertes et du rendement

A4.1) Pertes Joule:

- Dans les enroulements base tension

$$P_{j1} = m \cdot R_1 \cdot I_{p1}^2 \quad \text{ou } m \text{ désigne le nombre de phases}$$

$$P_{j1} = 3 \cdot 5,04 \cdot 10^{-4} \cdot (1804,14)^2 = 4901 \text{ W}$$

- Dans les connexions base tension

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

Pour cela, nous déterminons la longueur et la section de ces fils. Pour une connexion en étoile, elles sont données par

$$l_{\text{con}} = 1,5 h_B = 1,5 \cdot 28,8 = 43,2 \text{ cm} = 0,432 \text{ m}$$

$$S_{2 \text{ con}} = S_{21} = 14 \times 43,6 = 610,4 \text{ mm}^2$$

$$R_{\text{con}} = 0,021 \cdot \frac{4,11}{610,4} = 1,41 \cdot 10^{-4} \Omega$$

$$P_{j1} = R_{\text{con}} \cdot I_{p1}^2 = 1,41 \cdot 10^{-4} \cdot (1804,14)^2 = 459 \text{ W}$$

- Pertes supplémentaires dans l'enroulement B.T

Elles sont dues à l'effet pelliculaire et elles sont données par la formule suivante

$$P_{\text{sup}1} = (K_{MR1} - 1) m \cdot R_1 \cdot I_{p1}^2$$

K_{MR1} : coefficient de majoration en courant alternatif

Pour un conducteur méplat, sa valeur est donnée par

$$K_{MR1} = 1 + \frac{m^2 - 0,2 (\alpha a)^4}{g}$$

m : désigne le nombre de couches $m = ?$

a : Largeur du conducteur nu $a = 3,53$

$$\alpha = \sqrt{\frac{n \cdot b \cdot \omega \cdot \mu_0}{h_F \cdot 2 \cdot \rho}}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} b: \text{ mm} \\ h_F: \text{ mm} \\ \rho: \Omega \text{ mm}^2/\text{m} \\ \mu_0: 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m} \\ \alpha: \text{ m}^{-1} \end{array} \right.$$

n : désigne le nombre de conducteurs par couche $n = 34$

b : longueur du conducteur nu $b = 12,50$

$$\alpha = \left(\frac{34 \cdot 12,50 \cdot 314 \cdot 4\pi \cdot 10^{-9}}{628 \cdot 2 \cdot 2,1 \cdot 10^{-8}} \right)^{1/2} = 79,7 \text{ m}^{-1}$$

$$(\alpha a)^4 = [(79,7 \cdot 3,53) \cdot 10^{-3}]^4 = 6,1 \cdot 10^{-3}$$

Finalement

$$K_{mR1} = 1 + \frac{(\rho^2 - 0,2)}{9} \cdot 6,1 \cdot 10^{-3} = 1,02$$

$$P_{\text{sup}1} = (1,02 - 1) \cdot 3 \cdot 5,04 \cdot 10^{-4} \cdot 1804^2 = 98 \text{ W}$$

- Dans les enroulements haute tension

$$P_{j2} = m \cdot R_2 \cdot I_2^2 = 3 \times 1,348 \cdot 41,667 = 7020 \text{ W}$$

- Dans les connexions de l'enroulement HT

Pour la connexion en triangle, la section et la longueur des fils sont données par

$$l_{\text{con}} = 14 \cdot h_B = 14 \cdot 54 = 756 \text{ cm} = 7,56 \text{ m}$$

$$S_{2\text{con}} = \sqrt{3} \cdot S_{22} = \sqrt{3} \cdot 14,20 = 24,6 \text{ mm}^2$$

$$R_{\text{con}} = 0,021 \cdot \frac{7,56}{24,6} = 6,4 \cdot 10^{-3} \Omega$$

$$P'_{j2} = 6,4 \cdot 10^{-3} \cdot 41,667^2 = 11 \text{ W}$$

- Pertes supplémentaires

$$P_{\text{sup}2} = (K_{mR2} - 1) \cdot m \cdot R_2 \cdot I_2^2$$

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

- m désigne le nombre de spires par galette $m = 19$

- b : longueur du conducteur nu $b = 7,40 \text{ mm}$

- a : largeur du conducteur nu $a = 1,95 \text{ mm}$

- n : le nombre de galette $n = 42$

$$\alpha = \sqrt{\frac{n \cdot b}{h \cdot F} \cdot \frac{\omega \mu_0}{2 \cdot \rho}}$$

$$\alpha = \left(\frac{42.7.4 \cdot 314.4\pi \cdot 10^{-7}}{628 \cdot 2.2.1 \cdot 10^{-3}} \right)^{1/2} = 68 \text{ m}^{-1}$$

$$-(\alpha a)^4 = (68 \cdot 1.95 \cdot 10^{-3})^4 = 3 \cdot 10^{-4}$$

$$-K_{MR2} = 1 + \frac{19^2 - 0.2 \cdot 3 \cdot 10^{-4}}{9} = 1.01$$

$$-P_{sup2} = (1.01 - 1) \cdot 3 \cdot 1.348 \cdot 41.659^2 = 70 \text{ W}$$

- Pertes Joule dans les parties mécanique

Elles seront approximées par un coefficient K_{PK} dépendant de la puissance nominale $K_{PK} = 1.06$

$$\Rightarrow P_K = K_{PK} [\sum P_{cu i}]$$

- Pertes Joule totales dues à la charge

$$P_{cu1} = P_{j1} + P'_{j1} + P_{sup1} = 4.90 \text{ kW} + 0.459 \text{ kW} + 0.098$$

$$P_{cu1} = 5.4 \text{ kW}$$

$$P_{cu2} = P_{j2} + P'_{j2} + P_{sup2} = 7 \text{ kW} + 0.011 \text{ kW} + 0.07 \text{ kW}$$

$$P_{cu2} = 7.08 \text{ kW}$$

valeur de P_K

$$P_K = 1.06 [5.4 + 7.08] = 13.22 \text{ kW}$$

Erreur sur P_K

$$\frac{\Delta P_K}{P_K} = \frac{12 - 13.22}{13.22} \cdot 100 \approx 9\%$$

Cette valeur de P_K trouvée par le calcul étant admissible parce que l'erreur relative est inférieure à 10%

A42) Pertes dans le fer

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

Les pertes par hystérésis P_h sont dues aux frottements

entre les cristaux lors de l'inversion de l'aimantation alternative.
Les pertes par courants de Foucault P_F sont dues aux forces électromotrices créées dans les tôles par variation du flux

$$P_{f0} = P_h + P_F$$

Les pertes supplémentaires sont les pertes dans les différentes pièces de serrage, culasses et dans la cuve, ainsi que les pertes dans le fer par suite de la variation de la structure des tôles lors de leur usinage

Pour le calcul des pertes principales, nous disposons d'un tableau de la donnant les pertes spécifiques relatives à notre acier choisi pour une fréquence de 50 Hz

- Acier électrotechnique utilisé M6-ARMCO
avec une épaisseur des tôles de 0,35 mm
et un sens de laminage $\alpha = 0^\circ$

- Pertes dans le fer dans les différentes parties du circuit magnétique

- Pertes dans les colonnes

D'après le tableau (II) à une induction de 1,623 T correspond une valeur des pertes spécifiques $P_{s1} = 1,35 \text{ W/kg}$

$$P_{\text{fercol}} = P_{s1} \cdot G_{\text{col}} = 1,35 \cdot 543 = 733 \text{ W}$$

- Pertes dans les culasses

à une induction de 1,41 T correspond $P_{s2} = 0,93 \text{ W/kg}$

$$P_{\text{ferj}} = P_{s2} \cdot G_j = 0,93 \cdot 270,8 = 252 \text{ W}$$

Pertes principales de l'ensemble colonnes-culasses

$$P_{f0} = P_{\text{fercol}} + P_{\text{ferj}} = 733 + 252 = 985 \text{ W}$$

Les pertes supplémentaires m sont évaluées de 15 à 20% des pertes principales (P_{s0})

$$P_{s0} = 0,17 P_{f0} = 0,17 \cdot 985 = 167,45 \text{ W}$$

- Pertes dans les coins

Nous estimons que dans les coins, existe une induction de transition entre les colonnes et les culasses, dont la valeur est égale à la

valeur moyenne des 2 inductions $\hat{B}_m = \frac{\hat{B}_j + \hat{B}_c}{2}$

$$\hat{B}_m = \frac{1,623 + 1,41}{2} = 1,515 T$$

à cette valeur de \hat{B}_m correspond $P_{sc} = 1,2 \text{ W/kg}$

Dans les coins aux pertes supplémentaires, s'ajoutent les pertes par distorsion du flux magnétique

La valeur de ces pertes est estimée à 50% des pertes principales dans les coins

$$P_{\text{ferc}} = P_{sc} \cdot G_c = 1,2 \cdot 465 = 558 \text{ W}$$

$$P_{\text{soc}} = 558 \cdot 0,50 = 279 \text{ W}$$

- Pertes totales dans le fer

$$P_c = 983 + 167,45 + 558 + 279 = 1987,45 \text{ W}$$

RENDEMENT

Le rendement est le rapport entre la puissance fournie et la puissance absorbée

$$\eta [\%] = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100$$

ou P_2 c'est la puissance fournie

P_1 c'est la puissance absorbée

$$P_1 = P_2 + P_0 + P_{cu} \Rightarrow \eta \% = \frac{P_2}{P_2 + P_0 + P_{cu}} \cdot 100$$

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

avec $P_{cu} = RI^2 = RI_{cc}^2 \left[\frac{I}{I_{cc}} \right]^2$ en posant $\alpha = \frac{I}{I_{cc}}$

ou α est le coefficient de charge et $RI_{cc}^2 = P_k \Rightarrow$

$$P_{cu} = \alpha^2 P_k \text{ et } P_2 = [S n \cos \varphi] \cdot \alpha$$

Nouvelle écriture de l'expression donnant le rendement

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

Le rendement est maximum lorsque les pertes Joule sont égales aux pertes d'vide: $P_0 = \alpha^2 P_K$

Nous déduisons le coefficient de charge $\alpha = \sqrt{\frac{P_0}{P_K}}$

$$\alpha = \left(\frac{1989,45}{13220} \right)^{1/2} = 0,388$$

Nous nous proposons de déterminer les caractéristiques du rendement pour $\cos \varphi$ [charge résistive] et pour $\cos \varphi = 0,8$

Charge résistive [$\cos \varphi = 1$]

α	$\alpha^2 P_K$ ^{kw}	$P_0 + \alpha^2 P_K$ ^{kw}	$\alpha S_n \cos \varphi$ ^{kw}	$\alpha S_n \cos \varphi + P_0 + \alpha^2 P_K$ ^{kw}	η [%]
1/4	0,831	2,82	312,5	315,3	0,991
0,388	1,99	3,98	485	489	0,992
1/2	3,31	5,3	625	630,3	0,991
3/4	7,44	9,43	937,5	947	0,990
1	13,22	15,21	1250	1265,21	0,987
5/4	20,66	22,64	1562,5	1585	0,985

Charge à $\cos \varphi = 0,8$

α	$\alpha^2 P_K$	$P_0 + \alpha^2 P_K$	$\alpha S_n \cos \varphi$	$\alpha S_n \cos \varphi + P_0 + \alpha^2 P_K$	η [%]
1/4	0,831	2,82	257,2	260	0,988
0,388	1,99	3,98	388	392	0,989
1/2	3,31	5,3	500	505,3	0,988
3/4	7,44	9,43	750	759,43	0,987
1	13,22	15,21	1000	1015	0,985
5/4	20,66	22,64	1250	1272,64	0,982

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

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

$$\alpha = \frac{P_{ch}}{P_n} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \phi_2}{\sqrt{3} U_{2n} I_{2n}} = \frac{U_2}{U_{2n}} \cdot \frac{I_2}{I_{2n}} \cdot \cos \phi_2$$

La chute de tension au secondaire est définie par:

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

U_2 : tension au secondaire pour une charge et un facteur de puissance donnés

U_{2n} : tension secondaire nominale

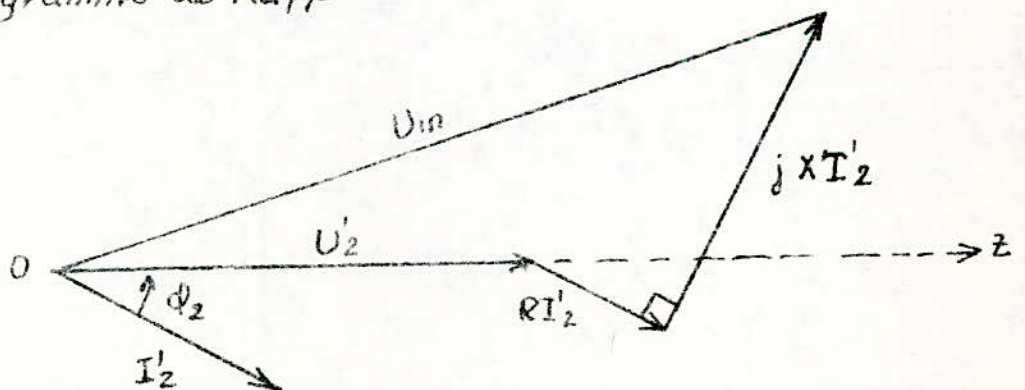
U'_2, U'_{2n} : tensions secondaires ramenées au primaire

$$U'_{2n} = U_{1n} \quad \Delta U' = U_{1n} - U'_2$$

La chute de tension devient

$$\Delta U [\%] = \frac{U_{1n} - U'_2}{U_{1n}} \cdot 100$$

Nous pouvons approximer cette chute de tension d'après le diagramme de Kapp



en projetant sur l'axe Oz en assimilant U_{1n} à sa projection

$$U_{1n} = U'_2 + R I'_2 \cos \phi_2 + X I'_2 \sin \phi_2$$

$$\Rightarrow \frac{U_{1n} - U'_2}{U_{1n}} \cdot 100 = \frac{I'_2}{I_{cc}} \left[\frac{R \cos \phi_2 I_{cc}}{U_{1n}} + \frac{X \sin \phi_2 I_{cc}}{U_{1n}} \right] \cdot 100$$

$$\Delta U(\%) = \alpha \left[\frac{100 U_{ka} \cos \phi_2}{U_{in}} + \frac{100 U_{kr} \sin \phi_2}{U_{in}} \right]$$

$$\Delta U(\%) = \alpha \left[\mu_{ka} \cos \phi_2 + \mu_{kr} \sin \phi_2 \right]$$

avec $\mu_{ka} = 0,96\%$

$$\mu_{kr} = 5,91\%$$

Cas d'une charge résistive $\cos \phi_2 = 1$, $\sin \phi_2 = 0$

$$\Delta U(\%) = \alpha U_{ka}(\%) = \alpha \cdot 0,96$$

α	$\Delta U(\%)$	$\Delta U'(V)$	$U_2'(V)$	$U_2(V)$	U_2/U_{2n}	I_2/I_{2n}	$I_2(A)$
1/4	0,24	24	3976	399,04	0,998	0,251	452,84
1/2	0,48	48	3952	398,1	0,995	0,50	902,08
3/4	0,72	72	3928	397,12	0,993	0,755	1362,12
1	0,96	96	3904	396,16	0,990	1,01	1822,2
5/4	1,2	120	3880	395,2	0,988	1,265	2282

Cas d'une charge capacitive: $\cos \phi_2 = 0,8$, $\sin \phi_2 = -0,6$

$$\Delta U(\%) = -2,778 \alpha$$

α	$\Delta U(\%)$	$\Delta U'(V)$	$U_2'(V)$	$U_2(V)$	U_2/U_{2n}	I_2/I_{2n}	$I_2(A)$
1/4	-0,694	-69,45	10069	402,8	1,007	0,248	447
1/2	-1,389	-138,9	10139	405,6	1,014	0,493	889,4
3/4	-2,083	-208,3	10208	408,3	1,020	0,735	1326
1	-2,778	-277,8	10277,8	411	1,027	0,984	1754
5/4	-3,472	-347,2	10347	414	1,035	1,21	2183

α	$\Delta U(\%)$	$\Delta U' (V)$	$U_2' (V)$	$U_2 (V)$	U_2/U_{2n}	I_2/I_{2n}	$I_2 (A)$
1/4	1,08	108	9892	395,68	0,989	0,253	456
1/2	2,16	216	9784	391,36	0,978	0,511	922,3
3/4	3,24	324	9676	387	0,968	0,775	1398
1	4,314	431,4	9569	382,7	0,957	1,045	1885
5/4	5,39	539	9461	378,4	0,946	1,321	2384

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

$$\Delta U[\%] = [0,96 \cdot 0,8 + 5,91 \cdot 0,6] \alpha = 4,314 \cdot \alpha$$

A43) CALCUL DU COURANT DE MARCHÉ A VIDE

Le courant de marche à vide à 2 composantes (I_0)

- Une composante active (ou watté) : I_{0a}

- Une composante réactive (ou dewatté) ou bien encore
composante magnétisante : $I_{0\mu}$

Les pertes dans le fer représentent une puissance active. Elles résultent de l'existence à vide de la composante active du courant, en phase avec la tension

$$P_0 = \sqrt{3} U_1 I_{0a} \Rightarrow I_{0a} = \frac{1989,45}{\sqrt{3} \cdot 10^4} = 0,115 \text{ A}$$

Les puissances réactives dans le fer et dans les entrefers correspondent au courant magnétisant nécessaire à la circulation du flux dans le circuit magnétique

La figure III donne pour chaque valeur de l'induction les pertes spécifiques réactives

- Dans les colonnes

\hat{B}_{col} : correspond $q_{0col} = 3 \text{ VAR/Kg}$

$$Q_{col} = q_{0col} \cdot G_{col} = 3 \cdot 543 = 1629 \text{ VAR}$$

- Dans les culasses

\hat{B}_j : correspond $q_{0j} = 1,4 \text{ VAR/Kg}$

$$Q_j = q_{0j} \cdot G_j = 1,4 \cdot 270,8 = 379 \text{ VAR}$$

- Dans les coins

\hat{B}_{coin} : correspond $q_{0coin} = 1,65 \text{ VAR/Kg}$

$$Q_{coin} = 1,65 \cdot 465 = 767 \text{ VAR}$$

- Dans les entrefers

Dans le cas où nous avons 6 entrefers et nous considérons que l'induction magnétique circulant dans l'entrefer est la même que celle de la colonne : $n_s = 6$

Les pertes par unité de surface $q_{0s} = 3,28 \text{ VAR/cm}^2$

$$Q_s = q_{0s} \cdot n_s \cdot S_s = 3,28 \cdot 6 \cdot 377 = 7419 \text{ VAR}$$

Puissance magnétique totale

$$Q = Q_{\text{col}} + Q_j + Q_{\text{coils}} + Q_{\text{c}} = 1629 + 379 + 767 + 7419$$

$$Q = 10194 \text{ VAR}$$

Nous déterminons la valeur du courant de marche à vide (de watté)

$$I_{0\mu} = \frac{Q}{\sqrt{3} \cdot U_1} = \frac{10194}{\sqrt{3} \cdot 10^4} = 0,588 \text{ A}$$

Maintenant puisque on connaît les 2 composantes de I_0 , on peut donc connaître ce courant

$$I_0 = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0\mu}^2} = \sqrt{0,115^2 + 0,588^2} = 0,6 \text{ A}$$

En grandeur réduite,

$$I_0 [\%] = \frac{I_0 \cdot 100}{I_n} = \frac{0,6 \cdot 100}{41,667} = 1,43 \%$$

Cette valeur du courant de marche à vide est très proche de celle imposée par le cahier de charge

$$\frac{\Delta I_0}{I_0} = \frac{1,4 - 1,43}{1,43} \cdot 100 = 2 \%$$

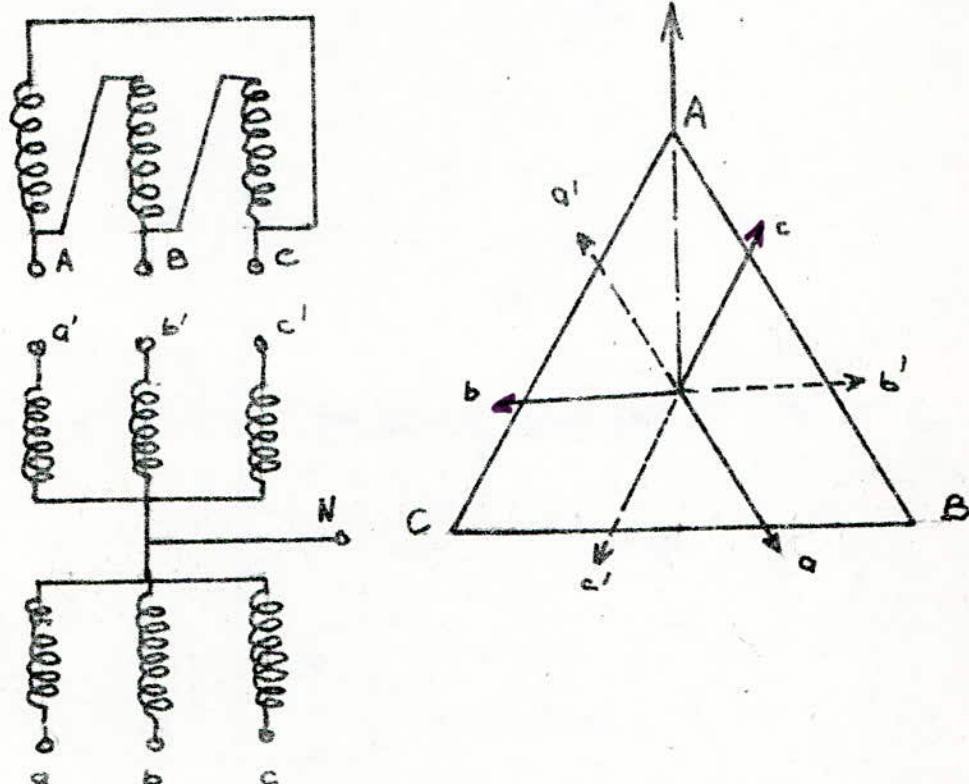
B) TRANSFORMATEUR HÉXAPHASÉ

- La connexion est Δyy

- 10KV / 0,8KV

- Le circuit magnétique du transformateur hexaphasé est identique à celui du transformateur triphasé

Le problème consiste à choisir les enroulements du transformateur hexaphasé afin de se rapprocher le plus près possible des caractéristiques du transformateur triphasé ayant la même puissance



B1) calcul des tensions de phases et des courants de phases

Le primaire (HT) est couplé en triangle

$$- U_{f2} = U_{l2} = 10KV$$

$$- I_{f2} = \frac{I_{l2}}{\sqrt{3}} = \frac{S_c}{U_{f2}} = \frac{416,667}{10} = 41,667A$$

- Le secondaire (BT) hexaphasé

$$U_{f1} = U_{l1} = 0,8KV$$

$$I_{f1} = I_{l1} = \frac{S_c}{2U_{f1}} = \frac{416,667}{2 \cdot 0,8} = \frac{520,83A}{2} = 260,41A$$

B12) Calcul du nombre de spires en BT et HT

sachant que $U_{sp} = 13,585 V$

- Nbre de spires d'un seul enroulement d'une colonne en BT: Z_1

$$Z_1 = \frac{U_1 t}{U_{sp}} = \frac{800}{13,585} = 58,8 ; \text{ on prend } Z_1 = 58 \text{ spires}$$

et pour les 2 enroulements d'une colonne $Z'_1 = 2Z_1$

- $Z'_1 = 2 \cdot 58 = 116$ spires

- Nbre de spire de l'enroulement HT: $Z_2 = \frac{U_2}{U_1} \cdot Z_1 = \frac{10}{0,8} \cdot 58 = 725$

Vu que l'on a fixé le nbre de spires pour les 2 enroulements, on peut recalculer \hat{B}_{cr} et U_{sp}

- Tension de spire recalculée $U_{sp} = \frac{800}{58} = 13,79 V$

- Induction magnétique de crête recalculée

$$\hat{B}_{cr} = \frac{13,79 \cdot 10^4}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot 377} = 1,65 T$$

B13) dimensions de l'enroulement BT

- Calcul de la densité moyenne de courant

$$J_m = 7,34 \frac{12 \cdot 13,79 \cdot 10^2}{1,06 \cdot 30,6 \cdot 1250} = 2,996 A/mm^2$$

- Section de l'enroulement BT $S_{z1} = \frac{260,41}{2,996} = 86,92 mm^2$

La section étant supérieure à $50 mm^2$. On prend 2 conducteurs élémentaires de section $S_{z1\text{él}} = S_{z1/2} = 43,46 mm^2$

- a cet conducteur correspond le conducteur normalisé de section $S_{z1\text{él norm}} = 47 mm^2$

$$a = 3,80 mm; a' = 4,44 mm$$

$$b = 12,50 mm; b' = 13,14 mm$$



schéma représentant 2 spires des 2 enroulements BT d'une colonne

Le type d'enroulement choisie est le spiralé

$$- a_1 = 2a' = 2 \cdot 13,14 = 26,28 \text{ mm (pour les 2 enroulements BT)}$$

$$- h_{sp} = 2a' = 2 \cdot 4,44 = 8,88 \text{ mm}$$

- hauteur du bobinage

$$h_B = (58+1) \cdot 0,888 + 3 \cdot 0,5 + 1 = 54,89 \text{ cm}$$

- Diamètre du canal de fuite

$$D_{12} = D + 2a_1 + 2a_{10} + a_{12} = 23,43 + 5,256 + 1 + 1,4 = 31,086 \text{ cm}$$

- Coefficient de Rogowski

$$\beta = \pi \cdot \frac{D_{12}}{h_B} = 1,78 \text{ valeur acceptable car } \frac{\Delta\beta}{\beta} = 5,6\% < 20\%$$

B14) Dimensions de l'enroulement HT

- Section du conducteur élémentaire

$$s_{ze} = \frac{I f_z}{J_m} = \frac{41,657}{2,996} = 13,91 \text{ mm}^2$$

qui correspond au conducteur normalisé $13,2 \text{ mm}^2 = S_{ze}$

$$\text{avec } a = 1,95 \quad \text{et} \quad a' = a + 8i_s = 2,59$$

$$b = 7,40 \quad \text{et} \quad b' = b + 8i_s = 8,04$$

Nbre de spires total (afin de réaliser le réglage à $\pm 5\%$)

$$Z'_L = 1,05 \cdot Z_L = 1,05 \cdot 725 = 761 \text{ spires}$$

$$Z''_L = 0,95 \cdot Z_L = 0,95 \cdot 725 = 689 \text{ spires}$$

- le nombre de spires de réglage: $Z_r = Z'_L - Z''_L = 72 \text{ spires}$

- Nbre de spires par galette $Z_{sp/g} = 0,025 \cdot 725 = 19 \text{ spires}$

- hauteur du bobinage h_B

$$- h_g = b' = 0,804 \text{ cm}$$

$$- h_B = 0,804 \cdot 42 + (42-1) \cdot 0,5 + 1 = 54,04 \text{ cm}$$

- épaisseur du bobinage $a_2 = 19a' = 19 \cdot 2,59 = 4,921 \text{ cm}$

- Valeur de la largeur rapportée du canal de fuite

$$a_r = 1,2 + \frac{2,628 + 4,921}{3} = 3,92 \text{ cm}$$

- Coefficient de Rogowski

$$K_R = 1 - \frac{1}{2\pi} \frac{2,8 + 4,921 + 2,628}{54,89} = 0,971$$

tension de court circuit

$$u_{kr} = \frac{[2\pi f \cdot (4\pi 10^{-7}) 58^2 \cdot 3,95 \cdot 1,78 \cdot 0,97260,4] \cdot 2}{800} = 5,85\%$$

valeur de la tension de court circuit μ_k

$$\mu_k = \sqrt{\mu_{k_a}^2 + \mu_{k_v}^2} = \sqrt{(0,96^2 + 5,85^2) \cdot 10^{-4}} = 5,93\%$$

valeur qui est acceptable puisque $\frac{\Delta \mu_k}{\mu_k} = 1,2\% < 5\%$

B15) Caractéristique des enroulements (résistances)

- Bas tension (Pour un seul enroulement d'une colonne)

- Résistance de l'enroulement Bas tension $R_1 = \rho \frac{\ell t_1}{S_{Z1}}$

avec $\ell t_1 = (Dm_1 \times \pi) \cdot (Z_1)$

$$\text{et } Dm_1 = D + 2a_{10} + a_1 = 23,43 + 1 + 2,628 = 27 \text{ cm}$$

$$\Rightarrow \ell t_1 = 27 \cdot \pi \cdot 58 = 4928 \text{ cm} = 49,28 \text{ m}$$

$$\Rightarrow R_1 = \rho \frac{\ell t_1}{S_{Z1}} = \frac{0,021 \cdot 49,28}{4 \cdot 47} = 55 \cdot 10^{-4} \Omega$$

- Haute tension

- Résistance de l'enroulement Haute tension $R_2 = \rho \frac{\ell t_2}{S_{Z2}}$

avec $\ell t_2 = Dm_2 \cdot \pi \cdot Z_2$

$$\text{et } Dm_2 = D + 2a_{10} + 2a_{12} + 2a_1 + a_2 = 23,43 + 1 + 2,8 + 5,26 + 4,9 = 37,4 \text{ cm}$$

$$\Rightarrow \ell t_2 = 37,4 \cdot \pi \cdot 961 = 89370 \text{ cm} = 893,7 \text{ m}$$

$$\Rightarrow R_2 = 0,021 \cdot \frac{893,7}{14,2} = 1,32 \Omega$$

B2) CALCUL DES PERTES ET DURENDEMENT

B21) Enroulement BT (uniquement pour 1 seul enroulement

- Pertes Joules d'une colonne)

dans les enroulements

$$p_{j1} = m R_1 \cdot I_{\phi 1}^2 = 3 \cdot 5,5 \cdot 10^{-4} (520,83)^2 = 4476 \text{ W}$$

- Pertes dans les connexions

Pour cela déterminons la résistance des connexions

$$- \ell_{\text{con}} = 9,5 \text{ tB} = 9,5 \cdot 64,8 = 411 \text{ m} = 4,11 \text{ m}$$

$$- \rho_{\text{con}} = \rho_{Z1} = 47 \cdot 4 = 188 \text{ mm}^2$$

$$\Rightarrow R_1' = 0,021 \cdot \frac{4,11}{188} = 4,59 \cdot 10^{-4} \Omega$$

$$\Rightarrow p_{j1}' = R_{\text{con}} \cdot I_{\phi 1}^2 = 4,59 \cdot 10^{-4} (520,83)^2 = 124,3 \text{ W}$$

pertes supplémentaires : P_{sup1}

$$P_{sup1} = (k_{MR1} - 1) m R_1 \cdot I_{f1}^2 \quad \text{avec } k_{MR1} = 1 + \frac{m^2 - 0,2 (\alpha b)^4}{9}$$

donc calculons α

$$\alpha = \left(\frac{n \cdot Q \cdot \omega \cdot \mu_0}{k_F \cdot e \cdot \rho} \right)^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{42 \cdot 7,4 \cdot 314,4 \pi 10^{-2}}{628 \cdot 2 \cdot 2,1 \cdot 10^{-8}} \right)^{\frac{1}{2}} = 81,2 \text{ m}^{-1}$$

$$\Rightarrow k_{MR1} = 1 + \frac{(4 - 0,2) (81,2 \cdot 12,5 \cdot 10^{-3})^4}{9} = 1,447$$

$$\Rightarrow P_{sup1} = (1,447 - 1) 3,5 \cdot 10^{-4} (520,83)^2 = 2000 \text{ W}$$

B22) enroulement haute tension

On a exactement les mêmes pertes que pour le transformateur triphasé $\Rightarrow P_{Cu2} = 7,08 \text{ kW}$

Pertes joules totales dues à la charge P_K

$$P_{Cu1} = 2(P_{j1} + P'_{j1} + P_{sup1}) = 2(4476 + 2000 + 124,5) = 13200 \text{ W}$$

$$P_K = 1,06 (13200 + 7080) = 21496,8 \text{ W} = 21,496 \text{ kW}$$

$$\left[\frac{\Delta P_K}{P_K} \right] \% = \frac{12 - 21,50}{21,50} = 44\% \quad \text{valeur qui dépasse la tolérance des transformateurs triphasés}$$

B23) Pertes dans le fer

- Pertes dans les colonnes

Pour une induction de 1,65 T correspond une valeur des pertes spécifique $P_{S1} = 1,51 \text{ W/kg}$

$$\Rightarrow P_{Fercol} = P_{S1} \cdot G_{col} = 1,51 \cdot 543 = 820 \text{ W}$$

- Pertes dans les culasses

$$\text{c} \hat{B}_j = 1,65 / 1,15 = 1,435 \text{ T correspond } P_{S2} = 1 \text{ W/kg}$$

$$P_{Ferj} = 1 \cdot 270,8 = 270,8 \text{ W}$$

Pertes principales de l'ensemble colonnes-culasses

$$P_{F0} = P_{Fercol} + P_{Ferj} = 820 + 270,8 = 1090,8 \text{ W}$$

$$\text{pertes supplémentaires} = 0,17 \cdot P_{F0} = 0,17 \cdot 1090,8 = 185,3 \text{ W}$$

- Pertes dans les coins

Calculons l'induction dans les coins $\tilde{B}_{\text{coins}} = \frac{\tilde{B}_c + \tilde{B}_j}{2} = \frac{1,65 + 1,44}{2}$

$\tilde{B}_{\text{coins}} = 1,54 \text{ T}$ et à $1,54 \text{ T}$ correspond $P_{sc} = 1,2 \text{ W/Kg}$

$$\Rightarrow P_{\text{Fer coins}} = 1,2 \cdot 465 = 558 \text{ W}$$

- Pertes par distorsion du flux dans les coins

$$P_{sc} = 0,5 P_{\text{Fer coins}} = 0,5 \cdot 558 = 279 \text{ W}$$

- Pertes totales dans le Fer

$$P_0 = 1090,8 + 185,3 + 558 + 279 = 2113 \text{ W}$$

B24) Rendement: $\eta = f(\alpha)$

$$\text{avec } \alpha = \left(\frac{P_0}{P_n} \right)^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{2113}{214941} \right)^{\frac{1}{2}} = 0,3135$$

	α	$\alpha^2 P_n$ (kW)	$P_0 + \alpha^2 P_n$ (kW)	$\alpha S n \cos \varphi$ (kW)	P_n (kW)	η (%)
$\cos \varphi = 1$	1/4	1,344	3,444	312,5	315,94	0,9890
	0,314	2,11	4,213	392,5	396,71	0,9894
	1/2	5,375	7,475	625	632,47	0,9882
	3/4	12,03	14,13	937,5	951,69	0,9850
	1	21,5	23,6	1250	1273,6	0,9810
	5/4	33,59	35,69	1562,5	1598	0,9776
$\cos \varphi = 0,8$	1/4	1,344	3,444	257,2	260,64	0,987
	0,314	2,1	4,213	314	318,213	0,988
	1/2	5,375	7,475	500	507,475	0,985
	3/4	12,1	14,2	750	764,2	0,981
	1	21,5	23,6	1000	1023,6	0,977
	5/4	33,59	35,69	1250	1285,69	0,972

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

$$\Delta U(\%) = \alpha [\mu_k a \cos \phi_2 + \mu_{kr} \sin \phi_2]$$

Cas d'une charge résistive

$$\Delta U(\%) = \alpha \mu_k a = 0,96 \alpha$$

α	$\Delta U(\%)$	$\Delta U'(V)$	$U_2'(V)$	$U_2(V)$	U_2/U_{2n}	I_2/I_{2n}	$2I_2(A)$
1/4	0,24	24	9976	798,1	0,998	0,251	131
1/2	0,48	48	9952	796,2	0,995	0,5	260,4
3/4	0,72	72	9928	794,2	0,993	0,755	393,2
1	0,96	96	9904	792,32	0,99	1,01	526,03
5/4	1,2	120	9880	790,4	0,988	1,265	658,8

Cas d'une charge inductive $\cos \phi_2 = 0,8$; $\sin \phi_2 = 0,6$

α	$\Delta U(\%)$	$\Delta U'(V)$	$U_2'(V)$	$U_2(V)$	U_2/U_{2n}	I_2/I_{2n}	$2I_2(A)$
1/4	1,07	107	9893	791,44	0,989	0,253	131,76
1/2	2,17	217	9783	782,6	0,978	0,511	266,1
3/4	3,21	321	9673	774,3	0,968	0,775	403,6
1	4,28	428	9592	765,7	0,957	1,045	544,27
5/4	5,35	535	9465	757	0,946	1,32	687,49

$$\Delta U(\%) = (0,96 \times 0,8 + 5,85 \cdot 0,6) \alpha = 4,278 \alpha$$

Calcul du courant de marche à vide

- Composante active (ou watté)

$$I_{0a} = \frac{P_0}{\sqrt{3} U_1} = \frac{2113}{\sqrt{3} \cdot 10^4} = 0,1220 \text{ A}$$

La figure III donne les pertes spécifiques réactives en fonction de l'induction

- Dans les colonnes

à $1,65 \text{ T}$ correspond $q_{0\text{col}} = 3,1 \text{ VAR/kg}$

$$Q_{\text{col}} = q_{0\text{col}} \cdot G_{\text{col}} = 3,1 \cdot 543 = 1683 \text{ VAR}$$

- Dans les culasses

à $\bar{B}_j = 1,43 \text{ T}$ correspond $q_{0j} = 1,6 \text{ VAR/kg}$

$$Q_j = q_{0j} \cdot G_j = 1,6 \cdot 270,8 = 433,3 \text{ VAR}$$

- Dans les coins

à $\bar{B}_{\text{coin}} = 1,54 \text{ T}$ correspond $q_{0\text{coin}} = 1,8 \text{ VAR/kg} \Rightarrow Q_{\text{coins}} = 837 \text{ VAR}$

- Dans les entrefers

sachant que $n\delta = 6$ et $q_{0\delta} = 3,28 \text{ VAR/cm}^2$

$$\Rightarrow Q_{\delta} = q_{0\delta} \cdot n\delta \cdot S_{\delta} = 3,28 \cdot 6 \cdot 377 = 7419 \text{ VAR}$$

Puissance magnétique totale

$$Q = Q_{\text{col}} + Q_j + Q_{\text{coins}} + Q_{\delta} = 1683 + 433,3 + 837 + 7419 = 10372 \text{ VAR}$$

Valeur de la composante de watté du courant magnétisant

$$I_{0\mu} = \frac{Q}{\sqrt{3} U_1} = \frac{10372}{\sqrt{3} \cdot 10^4} = 0,598 \text{ A}$$

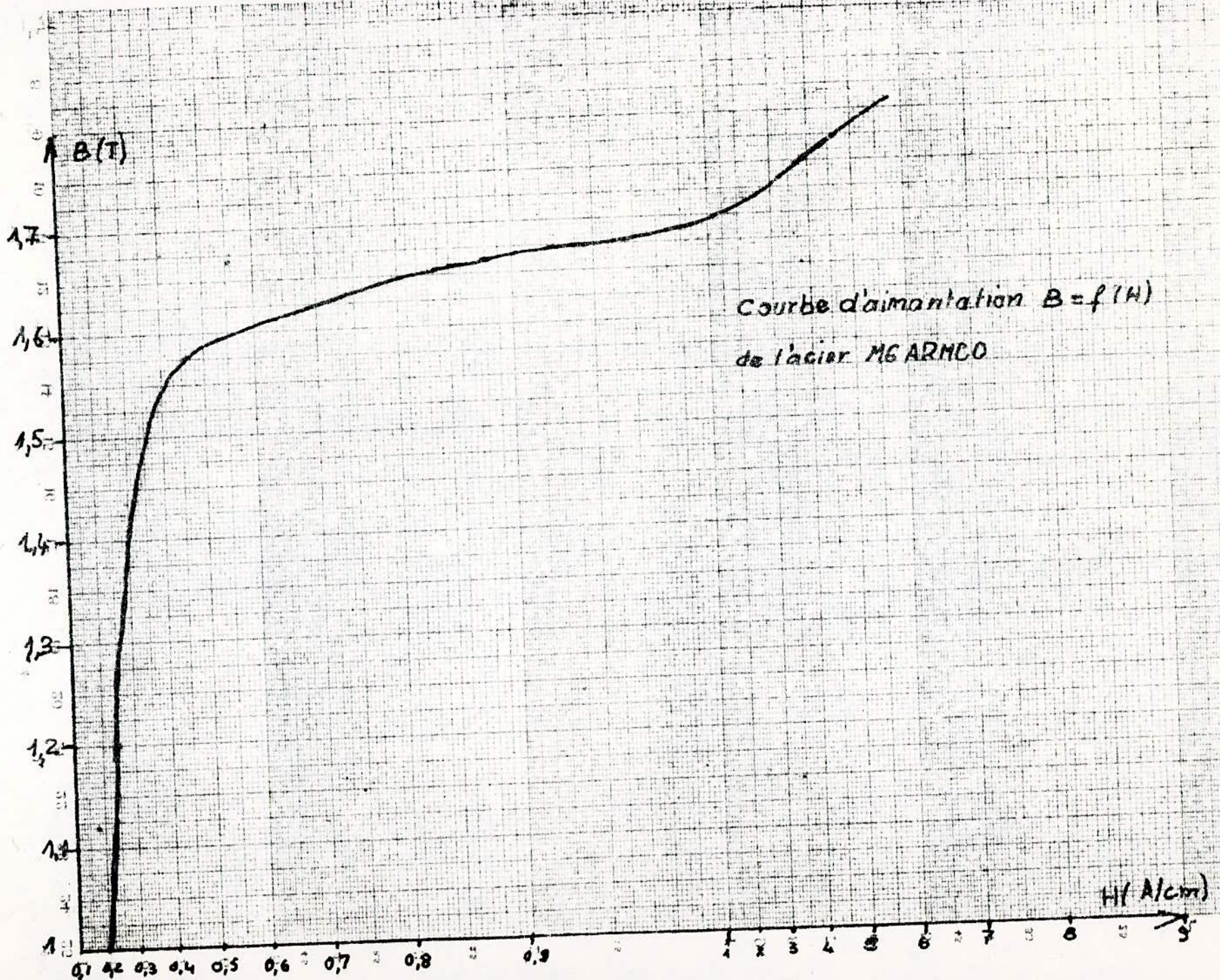
Valeur du courant magnétisant

$$I_0 = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0\mu}^2} = \sqrt{0,122^2 + 0,598^2} = 0,61$$

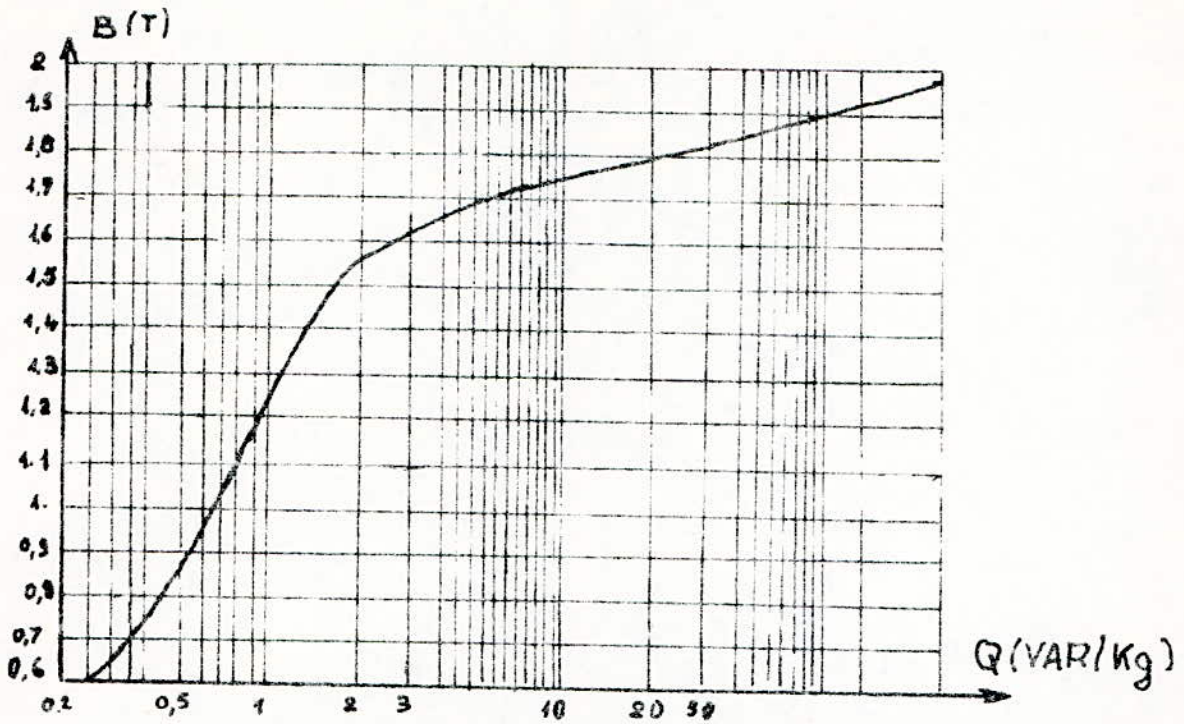
En grandeur réduite

$$i_0 [\%] = \frac{I_0}{I_n} \cdot 100 = \frac{0,61}{41,667} \cdot 100 = 1,45\%$$

$$\frac{\Delta i_0}{i_0} = 4\% < 10\% \text{ valeur donc acceptable.}$$

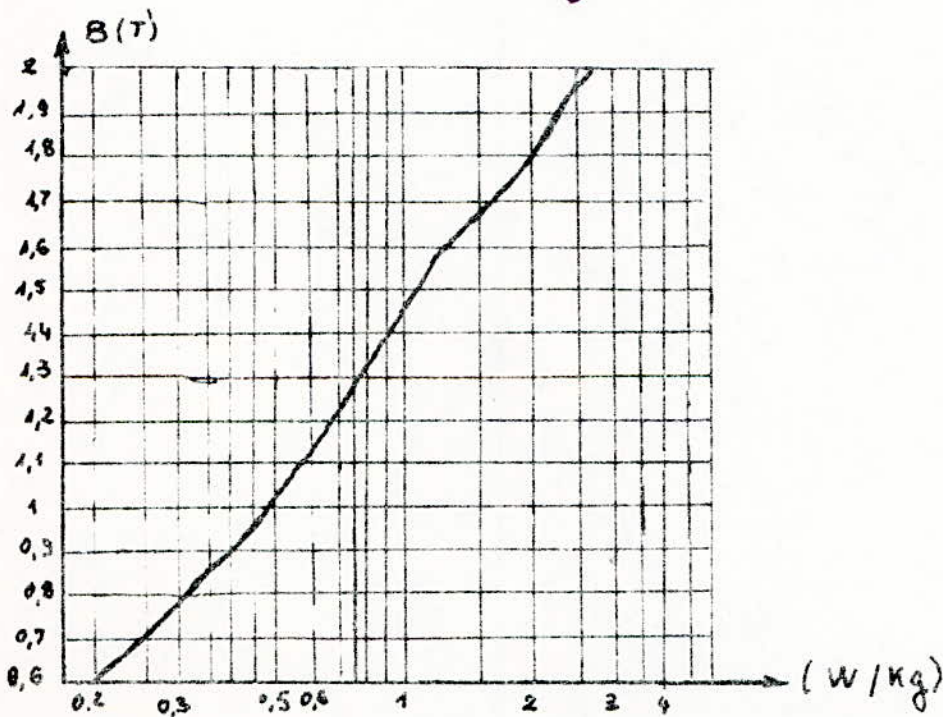


45



$B = f(Q)$ pour l'acier MB ARMCO (sens du laminage $\alpha = 0^\circ$)

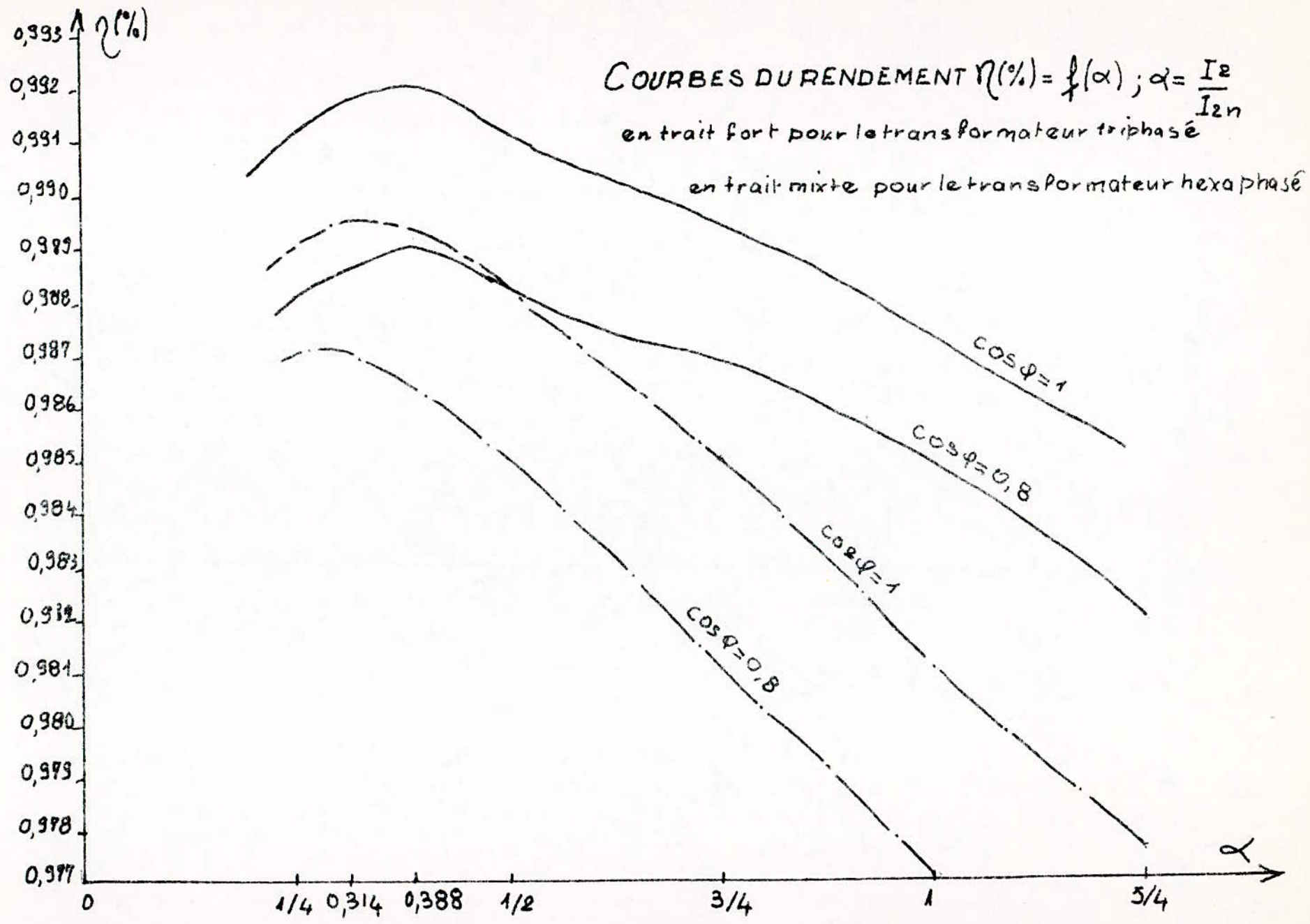
fig 3



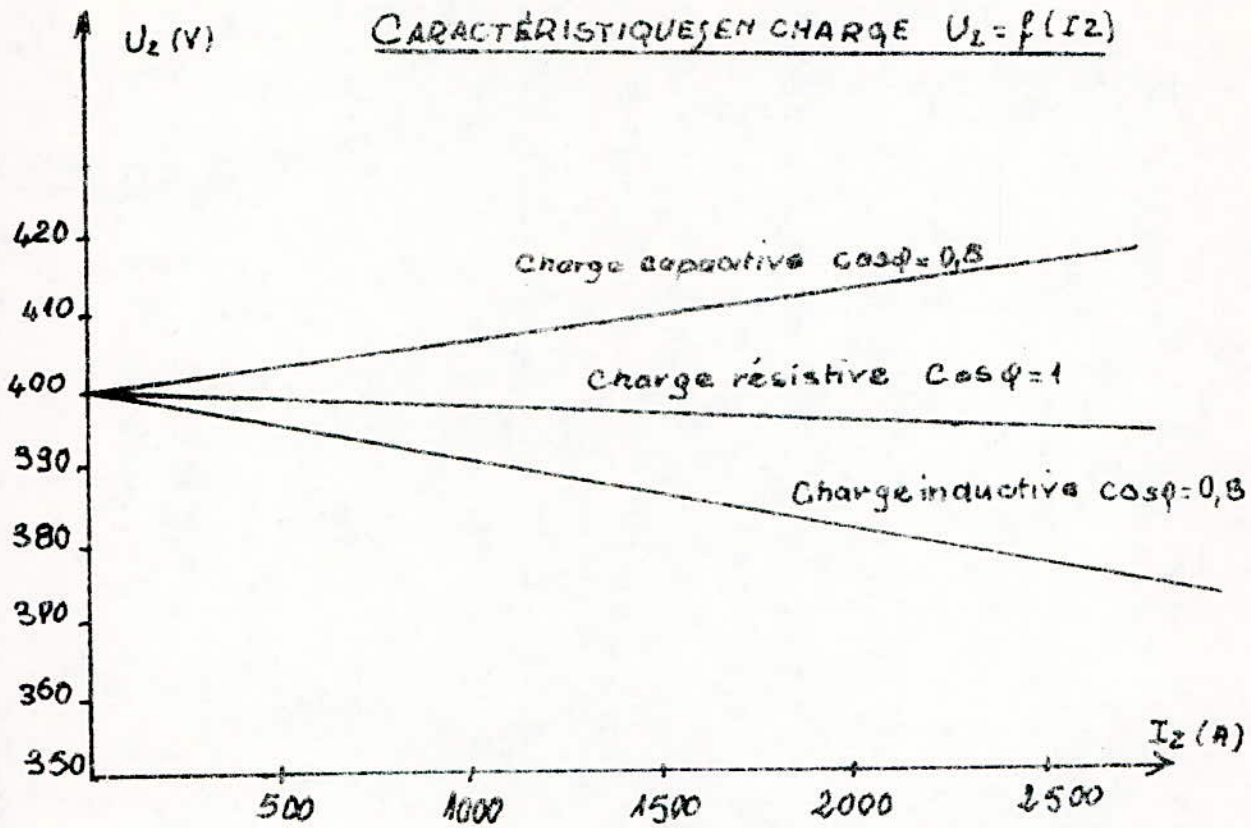
Courbe des pertes spécifiques $B = f(P_{sp})$ pour l'acier MB ARMCO avec des tôles de 0,35mm laminées à froid (sens du laminage $\alpha = 0^\circ$)
 Pour une fréquence de 50Hz

fig 2

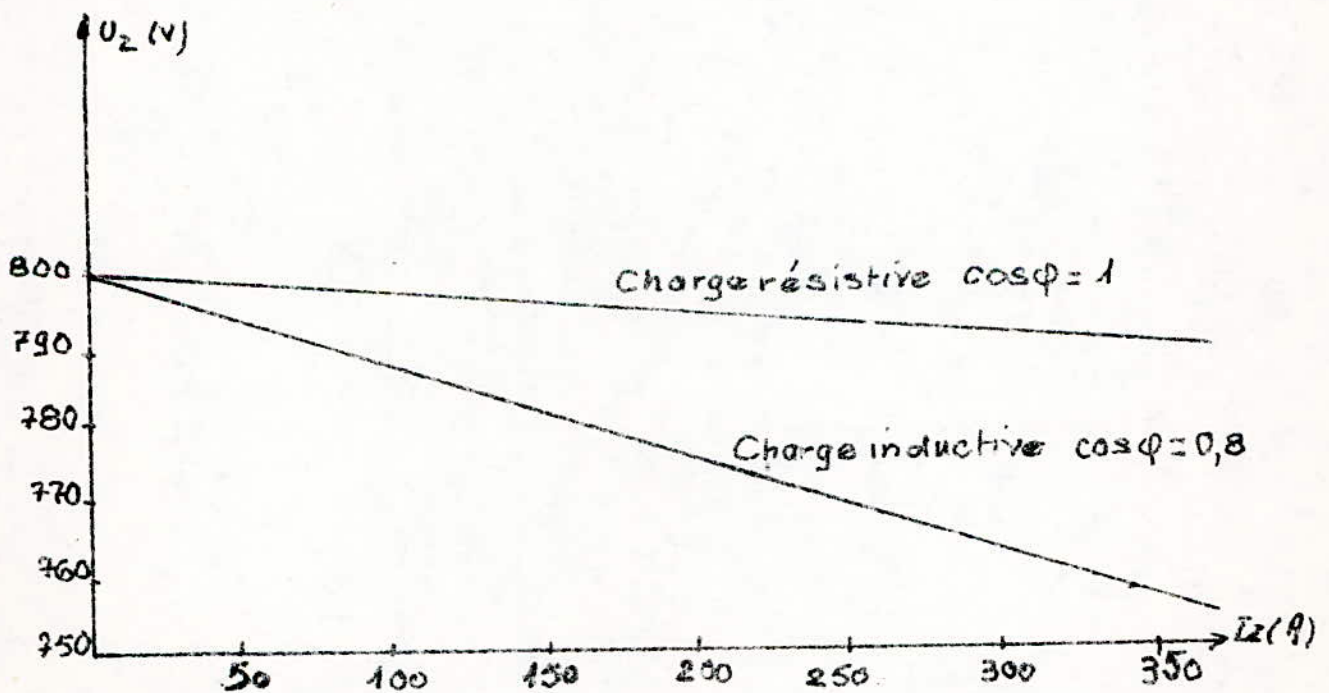
47



CARACTÉRISTIQUES EN CHARGE $U_2 = f(I_2)$



Caractéristiques en charge du transformateur triphasé



Caractéristiques en charge du transformateur hexaphasé

Sections des conducteurs profilés normalisées

b \ a	1,56	1,68	1,81	1,95	2,10	2,26	2,44	2,63	2,83	3,05	3,28	3,53	3,80	4,10	4,40	4,70
3,05	4,55	4,91	5,31	5,74	5,93	6,41	6,96	7,54	8,15	8,72	\	\	\	\	\	\
3,28	4,91	5,30	5,73	6,19	6,41	6,93	7,52	8,15	8,80	9,51	10,30	\	\	\	\	\
3,53	5,30	5,72	6,18	6,67	6,93	7,50	8,13	8,80	9,51	10,30	11,10	12	\	\	\	\
3,80	5,72	6,17	6,67	7,20	7,50	8,11	8,79	9,51	10,30	11,10	12	12,9	13,9	\	\	\
4,10	6,19	6,68	7,21	7,79	8,13	8,74	9,52	10,3	11,1	12	13	14	15,1	15,9	\	\
4,20	x	\	\	\	\	\	\	\	\	\	\	\	\	\	\	\
4,40	6,65	7,18	7,75	8,37	8,76	9,46	10,2	11,9	12	12,9	13,9	15	16,2	17,1	18,5	\
4,50	-	\	\	\	\	\	\	\	\	\	\	\	\	\	\	\
4,90	7,12	7,79	8,30	8,96	9,39	10,1	11,0	11,90	12,80	13,80	14,90	16,1	17,4	18,4	\	21,2
5,10	7,75	8,36	9,02	9,74	10,2	11	11,9	12,9	13,9	15,40	16,2	17,10	18,9	20	21,5	\
5,50	8,37	8,97	9,75	10,5	11,1	11,9	12,9	14	15,1	16,3	17,5	18,9	20,3	21,40	23,3	25
5,90	8,89	8,89	10,50	11,3	11,9	12,8	13,9	15	16,2	17,50	18,9	20,3	21,9	23,3	25,9	26,8
6,40	9,77	10,60	11,40	12,3	12,9	14	15,1	16,3	17,6	19	20,5	22,1	23,8	25,3	27,3	29,2
6,90	10,60	11,40	12,30	13,3	14	15,1	16,5	17,7	19	20,4	22,1	23,1	25,7	27,4	29,5	31,5
7,40	11,30	12,60	13,30	14,2	15	16,2	17,60	19	20,4	22,1	23,6	25,6	27,6	29,4	31,7	33,9
8,00	12,30	13,20	14,40	15,4	16,3	17,6	19	20,50	22,1	23,9	26,7	27,7	29,9	31,9	34,3	36,7
8,60	13,20	14,20	15,50	16,6	17,6	18,9	20,5	22,1	23,8	25,7	27,7	29,9	32,2	34,4	36,8	39,5
9,30	14,30	15,40	16,80	17,9	19	20,5	22,2	24	25,8	29,9	30	32,3	34,8	37,2	40,5	42,8
10	15,40	16,60	17,90	19,3	20,5	22,1	23	25,80	27,8	30	32,3	34,8	37,5	40,2	43,1	46,1
10,80	16,80	17,90	19,30	20,90	22,2	23,9	25,9	27,90	30,1	32,4	34,9	37,6	40,5	43,4	46,6	49,9
11,60	17,90	19,30	20,70	22,4	23,9	25,9	27,8	30	32,3	34,9	37,50	40,5	43,6	46,7	50,1	53,6
12,50	19,80	20,80	22,40	24,2	25,8	27,9	30	32,4	34,9	37,6	40,5	43,6	47	50,4	54,1	57,9

§ CALCUL THERMIQUE DU TRANSFORMATEUR TRIPHASE

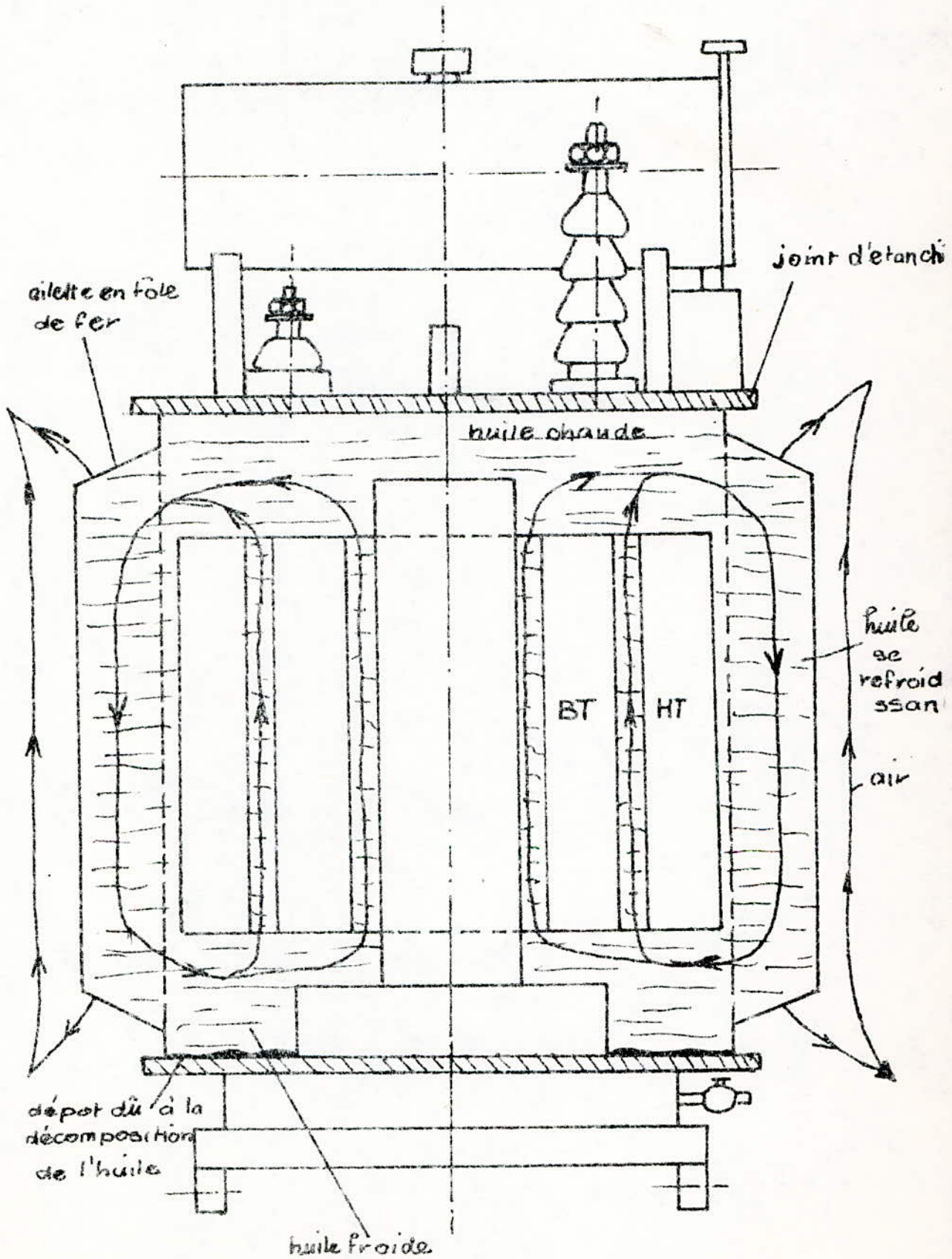
Le calcul thermique d'un transformateur consiste en la vérification des échauffements lors du fonctionnement en charge.

Les pertes qui se dégagent dans le noyau et dans les enroulements du transformateur lors de son fonctionnement sont transformées en énergie thermique et provoquent l'échauffement des parties correspondantes du transformateur. Depuis l'endroit où elle est dégagée, la chaleur est dirigée sous l'action des gradients thermiques vers les endroits où elle peut être transférée à l'agent réfrigérant, c'est à dire l'air dans notre cas.

La dispersion de la chaleur a lieu par rayonnement et par convection comme dans les machines électriques. Pour cela, il faut qu'il y ait une élévation de température des matériaux actifs par rapport à l'huile et abaissement de la température des parois de la cuve par rapport à l'huile.

La solution exigée par le cahier de charge consiste en l'immersion dans une cuve d'huile minérale spéciale et refroidissement naturel à l'extérieur.

Schéma de principe des phénomènes thermiques



CALCUL DES ECHAUFFEMENTS

- Echauffement moyen de l'enroulement HT par rapport à l'huile vu que la répartition de la température suivant la largeur et la hauteur de l'enroulement n'est pas uniforme, nous introduisons dans le calcul une surélévation moyenne de la température de l'enroulement par rapport à celle de l'huile

Pour les enroulements à disques, comme dans notre cas, l'échauffement moyen est donné par

$$\theta_{\text{moye-h2}} = q_2 \left(\frac{S_{is}}{\lambda_{is2}} + \frac{1}{\alpha_{con2}} \right)$$

- ou S_{is} : épaisseur de l'isolation de papier d'un seul côté

$$S_{is} = 0,32 \text{ mm}$$

λ_{is} : conductivité thermique du papier

Pour les papiers imprégnés à l'huile $\lambda_{is2} = 0,17 \text{ W/m}^\circ\text{C}$

q_2 : flux thermique spécifique qui traverse l'isolation vers l'huile baignant la galette. Il est donné par la relation:

$$q_2 = \frac{500 \cdot k_{m2} \cdot \rho \cdot J_2^2 \cdot S_{z2} \cdot Z_{sp/gal}}{\xi (b' + Z_{sp/gal} \cdot a')} \quad [\text{W/m}^2]$$

k_{m2} : Coefficient de majoration des pertes en courant alternatif $k_{m2} = 1,01$

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

J_2 : densité de courant qui traverse le conducteur

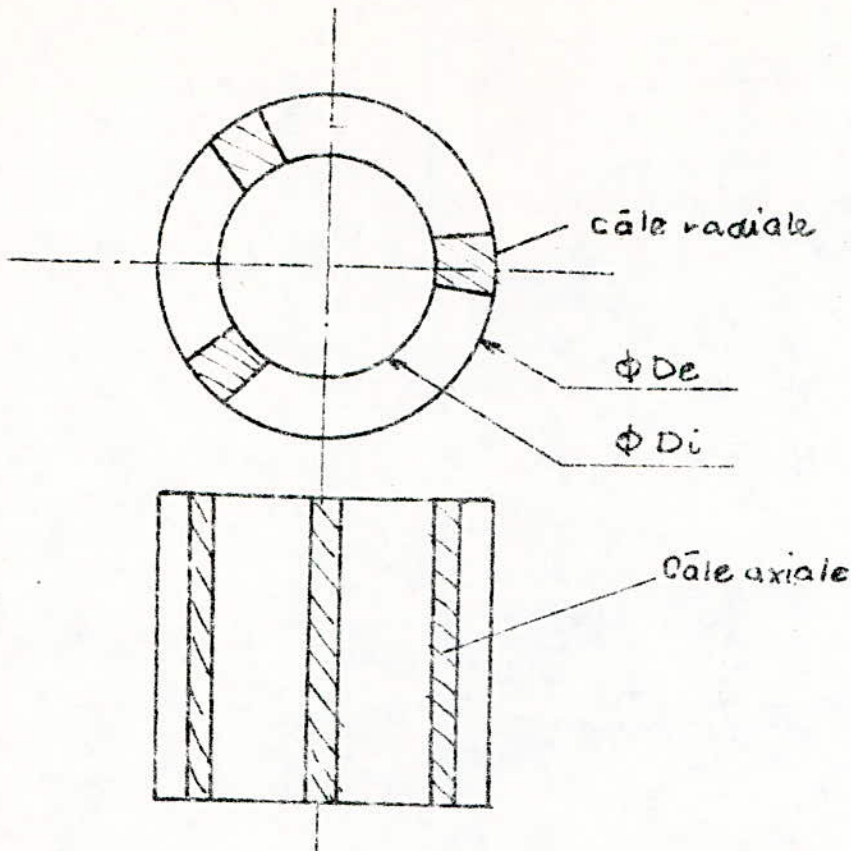
$$J_2 = 2,93 \text{ A/mm}^2$$

a', b' : Dimensions du conducteur isolé

$$a' = 2,53 \text{ mm} ; b' = 8,04 \text{ mm}$$

$Z_{sp/gal}$: nombre de spire par galette = 19

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



Ce coefficient est donné par:
$$\xi = \frac{\xi_v \cdot b' + \xi_h \cdot Zsp/gal \cdot a'}{b' + Zsp/gal}$$

ξ_v et ξ_h sont les coefficients qui tiennent compte respectivement des câbles axiaux et radiaux. Il sont donnés par

$$\xi_h = \frac{\frac{\pi}{4} (D_e^2 - D_i^2) - n_{câbles} \cdot S_{câbles \text{ radiaux}}}{\frac{\pi}{4} (D_e^2 - D_i^2)}$$

$$\xi_v = \frac{\pi \cdot D_e \cdot b' - n_{câbles} \cdot S_{câbles \text{ axiaux}}}{\pi \cdot D_e \cdot b'}$$

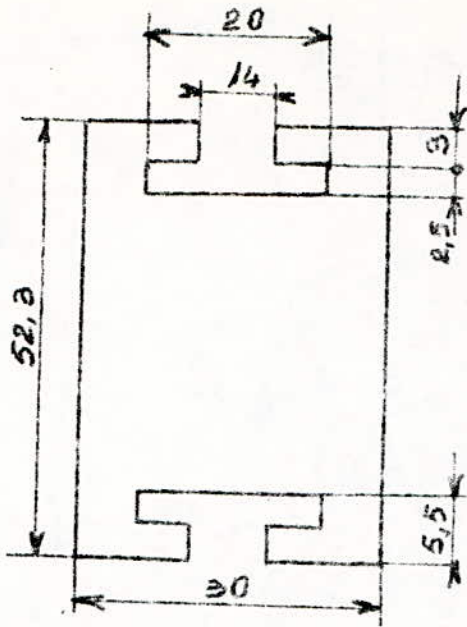
$$D_i = D_{12} + a_{12} = 31,47 + 1,2 = 32,67 \text{ cm}$$

$$D_e = D_i + 2a_2 = 32,67 + 2(4,9) = 42,47$$

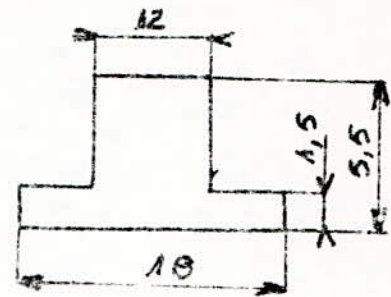
Le nombre de câbles est fonction du diamètre de bobinage

Dans notre cas nous choisissons $n_{câbles} = 10$

Dex mm	150-250	250-380	380-500	500-600	900-1200
$n_{câbles}$	6	8	10	12	14-16



Câble axiale



Câble radiale

Valeurs numériques de ξ_U et ξ_h

$$\xi_h = \frac{\frac{\pi}{4} (424,7^2 - 326,7^2) - 10 \cdot 52,3 \cdot 30}{\frac{\pi}{4} (424,7^2 - 326,7^2)} = 0,724$$

$$\xi_U = \frac{\pi \cdot 424,7 \cdot 8,04 - 10 \cdot 18 \cdot 5,5}{\pi \cdot 424,7 \cdot 8,04} = 0,907$$

$$\xi = \frac{0,907 \cdot 8,04 + 0,724 \cdot 19 \cdot 2,59}{8,04 + 19 \cdot 2,59} = 0,75$$

Nous déterminons la valeur du flux thermique q_2

$$q_2 = \frac{500 (1,01) (0,021) (2,93)^2 (14,2) (19)}{0,75 (8,04 + 19 \cdot 2,59)} = 572 \text{ W/m}^2$$

α_{con} : coefficient de convection globale pour toute la galette

il est donné par la relation suivante

$$\alpha_{con} = \frac{1 + \frac{\alpha_{conv} h}{\alpha_{conv} b'} \cdot \frac{Z_{sp/gal} \cdot a'}{b'} \cdot \frac{\xi_h}{\xi_U} \cdot \alpha_{conv}}{1 + \frac{Z_{sp/gal} \cdot a'}{b'} \cdot \frac{\xi_h}{\xi_U}} \quad \text{ou}$$

α_{conv} : Coefficient de transmission par convection pour les surfaces verticales

Pour le papier baigné dans l'huile nous choisissons $\alpha_{conv} = 105 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$

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

Dans le cas où la hauteur du canal de refroidissement est supérieure ou égale au $1/10^{\text{ème}}$ de l'épaisseur de la bobine HT. Le coefficient de transmission horizontale est la moitié du coefficient $\alpha_{\text{con v}}$

Dans notre cas $h_c = 5 \text{ mm}$

$$a_2 = \sum S A g a_i = 19.2,59 = 49,21 \text{ mm}$$

$$h_c = 5 > \frac{a_2}{10} = 4,921$$

$$\Rightarrow \alpha_{\text{con h}} = 52,5 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

Nous pouvons maintenant déterminer α_{con}

$$\alpha_{\text{con}} = \alpha_{\text{con v}} \frac{1 + \frac{105 \cdot 19 \cdot 2,59}{52,5 \cdot 8,04} \cdot \frac{0,724}{0,907}}{1 + \frac{19 \cdot 2,59}{8,04} \cdot \frac{0,724}{0,907}}$$

$$\alpha_{\text{con}} = \alpha_{\text{con v}} \cdot 0,584976 = 61,42 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

Finalement l'échauffement moyen de l'enroulement HT par rapport à l'huile sera

$$\theta_{\text{moy HT}} = 572 \left[\frac{0,32 \cdot 10^{-2}}{0,17} + \frac{1}{61,42} \right] = 10,4 \text{ °C}$$

- Echauffement moyen de l'enroulement BT par rapport à l'huile

L'enroulement BT est du type spiralé double fil de commencement. Le calcul de l'échauffement se fera comme celui de l'enroulement HT en faisant l'hypothèse que les pertes Joule sont distribuées uniformément sur la section de la spire

On peut donc appliquer la même relation

$$\theta_{\text{moye BT}} = q_1 \left[\frac{S i s_1}{\lambda h_1} + \frac{1}{\alpha_{\text{con 1}}} \right] \quad \text{où}$$

Le flux thermique spécifique qui traverse l'isolation vers l'huile, q_1

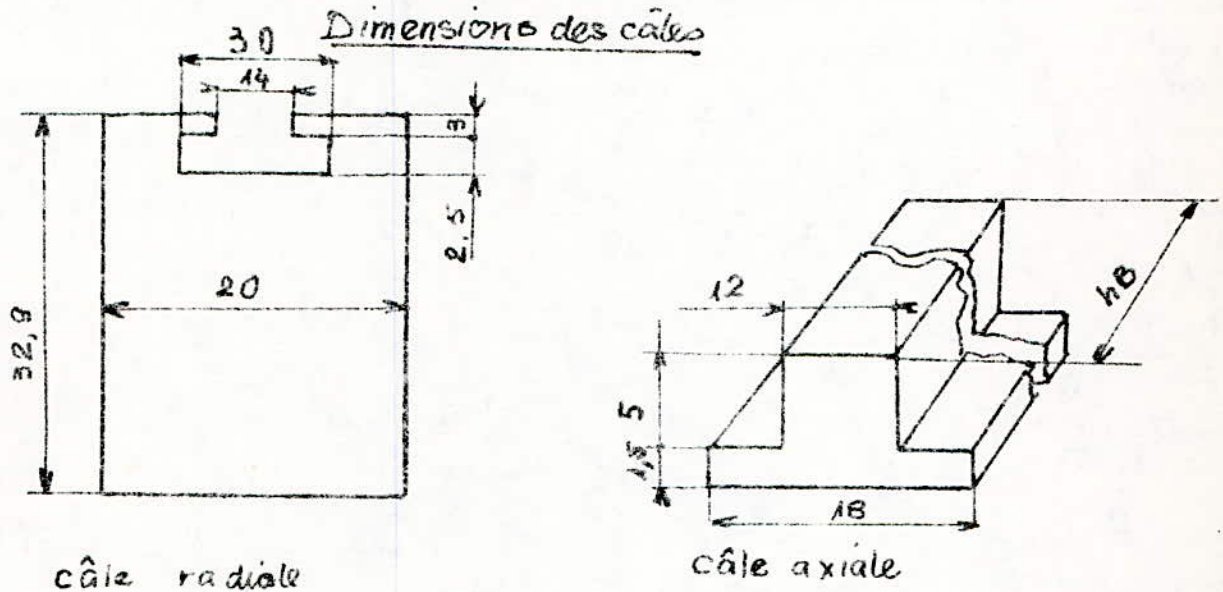
$$q_1 = \frac{500 \text{ Kmm}^1 \cdot \rho \cdot J_1^2 \cdot S z_1 \cdot n^{0.5/2}}{(2b' + a) \xi} \quad [\text{W/m}^2]$$

avec a, a', b, b' sont les dimensions des conducteurs BT

$$\xi = \frac{\xi_v \cdot 2b' + \xi_h \cdot a}{2b' + a}$$

Les coefficients ξ_v et ξ_h tenant compte respectivement des câbles axiaux et radiaux sont déterminés de la même façon que pour la HT

Les câbles radiaux séparant les galettes sont au nombre de 8 (d'après le tableau) ainsi que les câbles axiaux



Valeur des coefficients ξ_v et ξ_h

$$\xi_v = \frac{\pi D_i \cdot h_B + \pi D_e \cdot h_B - n_{\text{câbles}} \cdot l_{\text{câbles}} \cdot h_B}{\pi (D_i + D_e) h_B}$$

avec $D_i = D + 2a_0 = 23,43 + 1 = 24,43 \text{ cm}$

$D_e = D_{m1} + a_1 = 27,35 + 4,9 = 32,25 \text{ cm}$

$$\xi_v = \frac{\pi \cdot 24,3 + \pi 32,5 - 8 \cdot 18}{\pi (24,3 + 32,5)} = 0,92$$

de même la valeur numérique de ξ_h

$$\xi_h = \frac{\pi \frac{(D_{e1} + D_{i1})}{2} a_1 - n_{el} l c_{ale} a_1}{\pi \frac{(D_{e1} + D_{i1})}{2} a_1}$$

$$\xi_h = 1 - \frac{n_{el} l c_{ale} \cdot 2}{\pi (D_{e1} + D_{i1})} = 1 - \frac{8 \cdot 30 \cdot 2}{1780} = 0,73$$

La valeur du coefficient équivalent sera

$$\xi = \frac{0,92 \cdot 26,28 + 0,73 \cdot 29,19}{26,28 + 29,19} = 0,82$$

Nous déterminons la valeur du flux thermique

$$q_1 = \frac{500 \cdot 1,1 \cdot 0,021 (2,35)^2 \cdot 43,6 \cdot 7}{(26,28 + 29,19) \cdot 0,82} = 674,22 \text{ W/m}^2$$

Calcul des coefficients de transmission de la chaleur par conduction et par convection

sachant que la conductivité thermique $\lambda_{is} = 0,17 \text{ W/m}^\circ\text{C}$

Le coefficient de convection global est

$$\alpha_{con} = \alpha_{conU} \frac{1 + \frac{\alpha_{con.h}}{\alpha_{con.U}} \frac{a_1}{2b'}}{\frac{a_1}{2b'} + \frac{\xi_h}{\xi U}}$$

$$\text{avec } \frac{\alpha_{con.h}}{\alpha_{con.U}} = 0,5 \text{ et } \frac{\xi_h}{\xi U} = 0,79 \Rightarrow$$

$$\alpha_{con} = 105 \frac{1 + 0,5 \frac{29,19}{26,28} \cdot 0,79}{1 + \frac{29,19}{26,28} \cdot 0,79} = 84,25 \text{ W/m}^2$$

Finalement la valeur de l'échauffement moyen sera

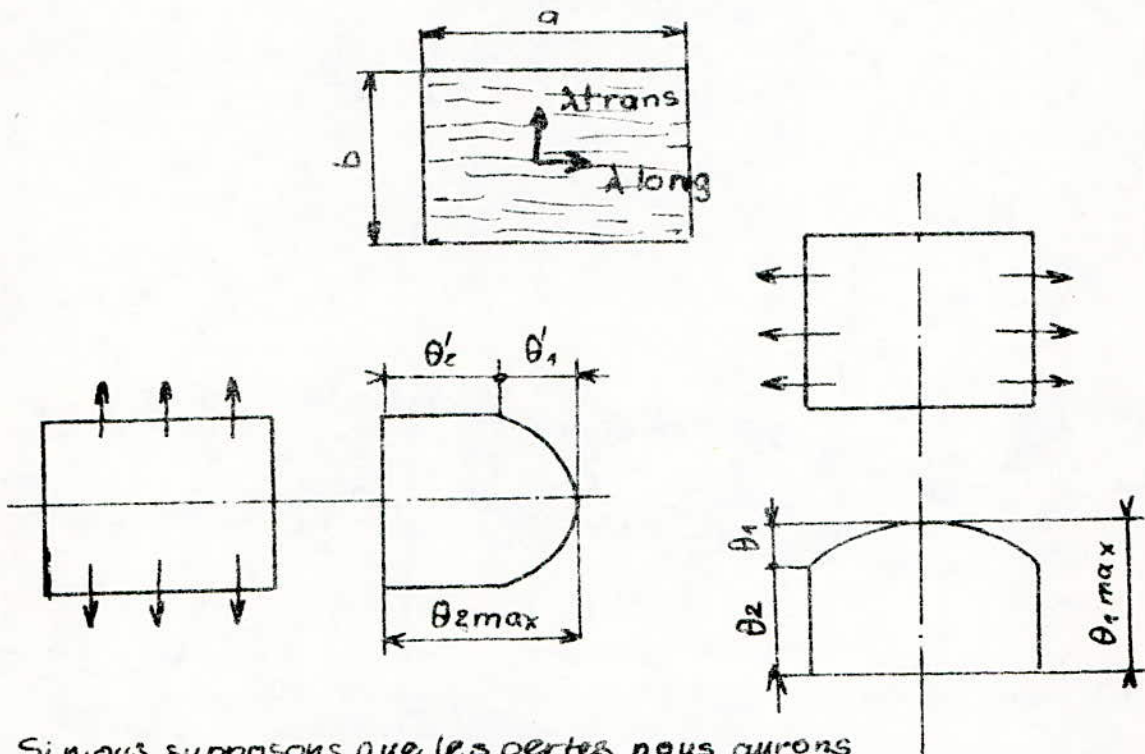
$$\theta_{moye.h1} = 674,22 \left[\frac{0,32 \cdot 10^{-3}}{0,17} + \frac{1}{84,25} \right] = 9,3^\circ\text{C}$$

Ce surchauffement étant faible donc acceptable par la construction

Echauffement du circuit magnétique

Les problèmes du calcul de l'échauffement du circuit magnétique sont assez compliqués à cause de la non homogénéité du circuit magnétique

Un calcul simplifié se ramène à l'équivalence de la section de la colonne par un rectangle inscrit dans le même cercle



Si nous supposons que les pertes nous aurons

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

$$\theta_2 = \frac{p \cdot a}{2 \alpha_{con}}$$

$$\theta_1' = \frac{p \cdot b^2}{8 \lambda_t}$$

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

avec

$$\theta_i : ^\circ\text{C}$$

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

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

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

$$p : \text{W/m}^3$$

λ_l : coefficient de transmission longitudinale

λ_t : coefficient de transmission transversale

p : pertes spécifiques des tôles par unité de volume

Pour obtenir les pertes spécifiques par unité de volume, nous devons multiplier les pertes spécifiques par unité de masse par le poids spécifique des tôles

$$P = P_{sp} \cdot \gamma \quad \begin{cases} P_{sp} : W / Kg \\ \gamma : Kg / dm^3 \end{cases}$$

$$p = 1,5 \cdot 8,65 \cdot 10^3 W / m^3$$

La section de la colonne peut être assimilée à un rectangle de dimensions

$$a = 0,9D = 0,9 \cdot 23,43 = 21 \text{ cm}$$

$$b = \frac{S_{col}}{a} = \frac{377}{21} = 17,94 \text{ cm}$$

Ces différents paramètres étant déterminés on peut donc calculer les différents échauffements

$$\theta_1 = \frac{11,5 \cdot 10^3 \cdot 0,21^2}{8 \cdot 20} = 3,17^\circ C$$

$$\theta_2 = \frac{11,5 \cdot 10^3 \cdot 0,21}{2 \cdot 105} = 11,5^\circ C$$

$$\theta'_1 = \frac{11,5 \cdot 10^3 \cdot 0,1794^2}{8 \cdot 3} = 15,4^\circ C$$

$$\theta'_2 = \frac{11,5 \cdot 10^3 \cdot 0,1794}{2 \cdot 105} = 9,82^\circ C$$

L'échauffement résultant du circuit magnétique est donné par la formule empirique

$$\theta_{max.C.M.a.R} = \theta_{2max} \frac{\theta'_2 + 1,5 \theta'_1}{\theta_{2max} + \theta'_2 + 1,5 \theta'_1}$$

avec

$$\theta_{1max} = \theta_1 + \theta_2 = 3,17 + 11,5 = 14,7^\circ C$$

$$\theta_{2max} = \theta'_1 + \theta'_2 = 15,4 + 9,82 = 25,22^\circ C$$

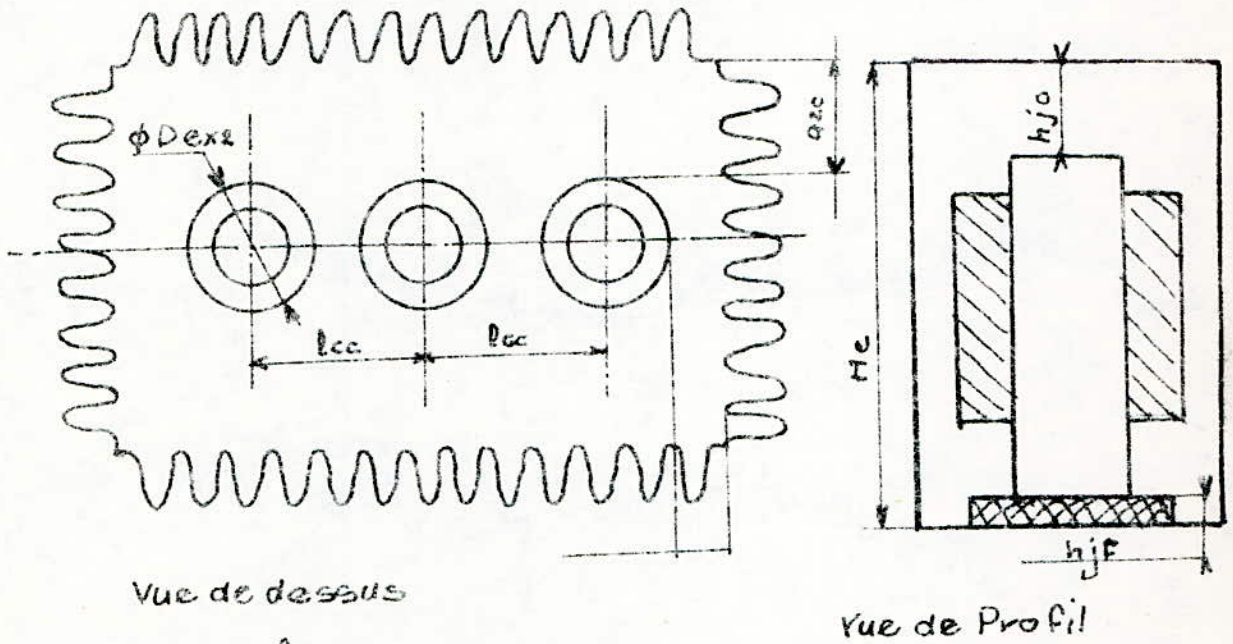
$$\theta_{max.C.M.a.R} = 25,22 \frac{9,82 + 1,5 \cdot 15,4}{25,22 + 9,82 + 1,5 \cdot 15,4} = 14,3^\circ C$$

Cette valeur trouvée a seulement un caractère indicatif; elle indique que le circuit magnétique ne sera pas chauffé excessivement

Echauffement de l'huile

- Dimensions de la cuve:

La cuve aura une section rectangulaire avec les parois en tôles ondulées afin de permettre un refroidissement de l'huile



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

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

$$H_c = h_m + h_{jo} + h_{jF}$$

Vu que notre tension de service est inférieure à 20 kV

Nous choisissons donc $a_{20} = 65 \text{ mm}$

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

$$h_{jF} = 85 \text{ mm}$$

Les dimensions de la cuve sont

$$D_{i2} = D + 2a_{10} + 2a_1 + 2a_{12}$$

$$= 23,43 + 1 + 2,4 = 32,67 \text{ cm}$$

$$D_{ext} = D_{int} + 2a_e = 32,67 + 2(4,9) = 42,47 \text{ cm}$$

$$h_m = h_F + 2h_j = 62,8 + 2(19,25) = 101,3 \text{ cm}$$

Enfin

$$A = 2(43,87) + 42,47 + 2(6,5) = 143,21 \text{ cm}$$

$$B = 42,47 + 2(6,5) = 55,47 \text{ cm}$$

$$H_c = 101,3 + 20 + 3,5 = 124,8 \text{ cm}$$

Les épaisseurs des tôles d'acier utilisées pour la réalisation de la cuve sont choisies à partir du tableau ci-dessus

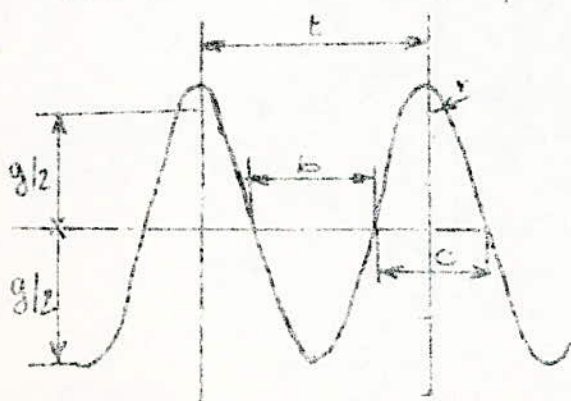
Sn	KVA	< 100	125 - 250	315 - 830	630 - 1600
épaisseur du fond	Δ_f mm	3 - 4	4 - 5	5 - 6	6 - 8
épaisseur du couvercle	Δ_c mm	4 - 5	5 - 6	6 - 8	10
épaisseur des parois latérales	Δ_p mm	0,75 - 1	1 - 1,5	1,5	2,5

$$\text{épaisseur du fond } \Delta_f = 7 \text{ mm}$$

$$\text{épaisseur du couvercle } \Delta_c = 10 \text{ mm}$$

$$\text{épaisseur des parois latérales } \Delta_p = 2,5 \text{ mm}$$

Il faut définir la géométrie des ailettes de refroidissement. La figure ci-dessous donne leur profil



dimensions

$$t = 40 \text{ mm}$$

$$g = 200 \text{ mm}$$

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

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

$$r = 5 \text{ mm}$$

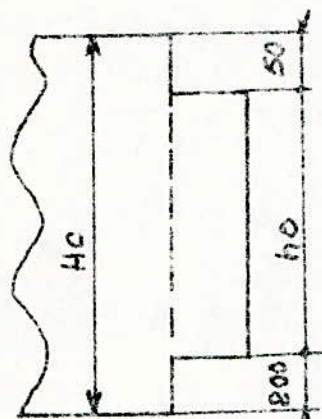
$$\text{on a } t = b + c + 2\Delta_p$$

La périmètre d'une ondule sera approximativement

$$P_{on} = b + 2g + \pi \cdot r$$

$$= 30 + 400 + \pi \cdot 5 = 446 \text{ mm}$$

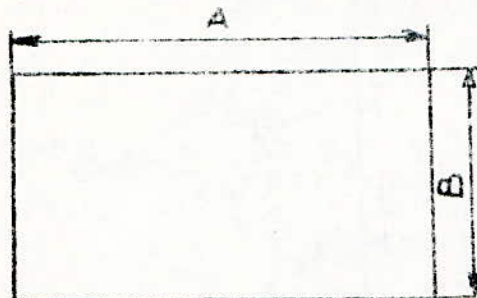
Hauteur des ondules



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

$$h_o = 1248 - 250 = 998 \text{ mm} = 99,8 \text{ cm}$$

Détermination des nombres d'ondules n_1 et n_2 sur les parois



$$A = 1432,1 \text{ mm}$$

$$B = 554,7 \text{ mm}$$

Nombre d'ondules sur la longueur

$$n_1 + 1 = \frac{A}{e} = \frac{1432}{40} = 35,8 \Rightarrow n_1 = 35 \text{ ondules}$$

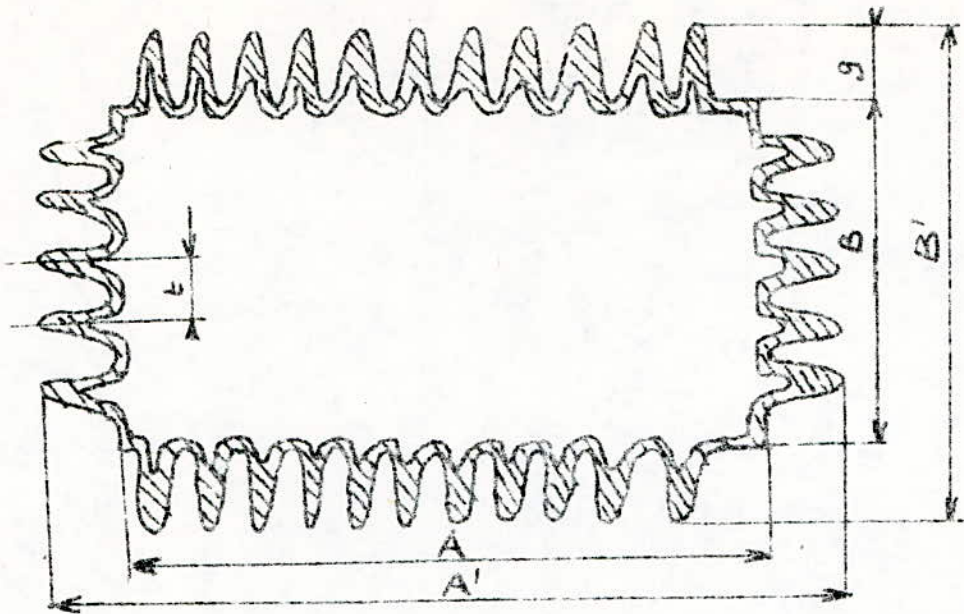
Nombre d'ondule sur la largeur

$$n_2 + 1 = \frac{B}{e} = \frac{554,7}{40} = 13,8 \Rightarrow n_2 = 13 \text{ ondules}$$

La cuve avec les ondules peut être encadrée dans un rectangle de dimensions

$$A' = A + 2 \cdot g + r = 143,21 + 40 + 0,5 = 183,71 \text{ cm}$$

$$B' = B + 2 \cdot g + r = 55,47 + 40 + 0,5 = 95,97 \text{ cm}$$



Echauffement de l'huile par rapport à la cuve

La chaleur transportée par l'huile se transmet à la cuve par convection naturelle. Cette chaleur est due à toutes pertes dans le transformateur. L'échauffement sera en liaison directe avec la grandeur de la surface de contact de l'huile avec la cuve

L'échauffement de l'huile par rapport à la cuve lors d'une transmission par convection naturelle, est donné par la relation

$$\theta_{hc} = 0,165 \left[\frac{1,05 (P_0 + P_k)}{S_c} \right]^{0,5}$$

P_0 et P_k : pertes à vide et dues à la charge en W

S_c : surface de contact avec l'huile en m^2 ; elle est égale à:

$S_c = S_{co} + S_{cc}$ avec

S_{co} : Surfaces des ondules

$$S_{co} = n_0 \cdot p_{on} \cdot h_0 = 2(35 + 13) \cdot 0,446 \cdot 0,998 = 42,73 \text{ m}^2$$

S_{cc} : Surface du couvercle

$$S_{cc} = A \cdot B = 1,432 \cdot 0,555 = 0,795 \text{ m}^2$$

Finalement

$$\theta_{hc} = 0,165 \left[\frac{1,05 (1989 + 13220)}{43,525} \right]^{0,5} = 5,7^\circ\text{C}$$

$$\text{avec } S_c = 42,73 + 0,795 = 43,525$$

Echauffement de la cuve par rapport à l'air

La cuve transmet la chaleur à l'air environnant par convection et par radiation. L'échauffement de la cuve par rapport à l'air est donné par la relation

$$\theta_{ca} = \left[\frac{1,05 (P_o + P_k)}{2,85r + 2,55c} \right]^{0,8} \quad \text{où}$$

S_r : surface radiante de la cuve en m^2 . Elle est égale à la somme de la surface enveloppante de la cuve et de la surface du couvercle

$$S_r = 2(A' + B') \cdot h_o + S_{cc}$$

$$= 2(1,84 + 0,96) \cdot 0,998 + 0,795 = 6,384 \text{ m}^2$$

$$\text{Finalement } \theta_{ca} = \left[\frac{1,05(1389 + 13220)}{2,8(6,384) + 2,5(43,6)} \right]^{0,8} = 120^{0,8} = 46,1^\circ\text{C}$$

La température des bobinages sera

$$t_{e1} = \theta_{em} + \theta_{hc} + \theta_{ca} + t_a$$

$$t_{e1} = 9,3^\circ + 5,7^\circ + 46,1^\circ + 35^\circ = 96,1^\circ\text{C}$$

Cette température étant inférieure à celle imposée par les normes ($t_n = 105^\circ\text{C}$) l'échauffement n'est pas excessif

$$t_{e2} = \theta_{em2} + \theta_{hc} + \theta_{ca} + t_a$$

$$t_{e2} = 10,4^\circ\text{C} + 5,7^\circ + 35^\circ + 46,1^\circ\text{C} = 97,2^\circ\text{C}$$

Il en est de même pour t_{e2} : $t_{e2} < 105^\circ\text{C}$

La température du circuit magnétique sera

$$t_{C.M.} = \theta_{emh} + \theta_{hc} + \theta_{ca} + t_a$$

$$t_{C.M.} = 14,3 + 5,7 + 46,1 + 35 = 101,1^\circ\text{C}$$

Cette température de l'échauffement des tôles est toute à fait acceptable par notre circuit magnétique

III). → CALCUL MÉCANIQUE ~.

Des efforts mécaniques importants apparaissent lors d'un court circuit c'est pour cela qu'il faut dimensionner les différents éléments de serrages ou de liaison afin qu'ils résistent à ces efforts

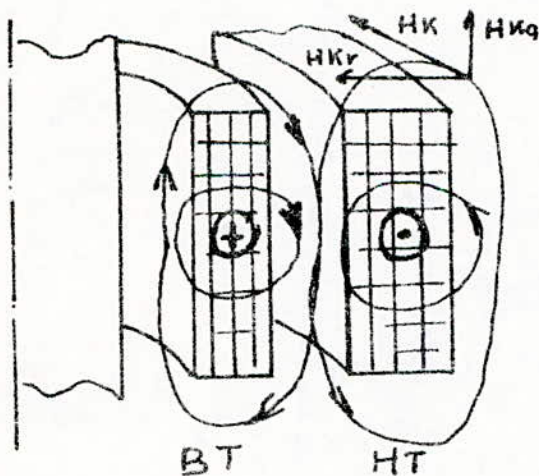
Calcul mécanique des enroulements

En régime normal les enroulements des transformateurs sont soumis aux forces de leur propre poids et des forces qui tendent à comprimer les enroulements qui sont en générales très faible.

Pendant un court circuit ces forces électrodynamiques peuvent atteindre de très grandes valeurs du fait qu'elles sont proportionnelles à i^2

Pour cela il faut concevoir des organes de liaisons susceptibles de résister à ces efforts

Les forces de court circuit peuvent être classées d'après la direction d'action en forces radiales et forces axiales



Le champ de forces peut être décomposé en 2 composantes

$$H_k = \sqrt{H_{kr}^2 + H_{ka}^2}$$

- H_{kr} composante radiale
- H_{ka} composante axiale

- La composante radiale donnera une force axiale
- La composante axiale donnera une force radiale

Les forces radiales exercent une compression sur la BT et une traction sur la haute tension

D'une manière générale, les forces axiales sont fortement dépendantes des dissymétries dans la disposition des enroulements et surtout dans la disposition des spires de réglages.

Il faut vérifier lors du calcul d'un transformateur que les efforts électrodynamiques produits sont plus petits que les efforts admissibles.

Le cas de court circuit le plus défavorable est celui du court circuit triphasé symétrique. Dans ce cas, la valeur maximale du courant de court circuit est donnée par:

$$i_{Kmax} = \sqrt{2} \cdot K_m \cdot I_{Kdim} \quad [A] \quad \text{où}$$

- K_m : coefficient de crête ou d'impulsion

$$K_m = 1 + e^{-\pi \frac{U_{K0}}{U_{Kr}}}$$

- I_{Kdim} : Courant stationnaire de court circuit.

Nous avons utilisée l'hypothèse que la puissance du réseau qui alimente le transformateur est infinie

- Le courant stationnaire de court circuit est donné par:

$$I_{Kdim} = I_n \cdot \frac{100}{U_K}$$

La valeur du coefficient de crête sera:

$$K_m = 1 + e^{-\pi \frac{0,96}{5,99}} = 1,6$$

Valeurs des courants stationnaires de court circuit dans les enroulements BT et HT

$$I_{Kdim1} = I_{n1} \cdot \frac{100}{U_K} = 1804,14 \cdot \frac{100}{5,99} = 30,12 \cdot 10^3 A$$

$$I_{Kdim2} = I_{n2} \cdot \frac{100}{U_K} = 41,667 \cdot \frac{100}{5,99} = 696 A$$

Connaissant ces valeurs on peut déterminer les valeurs numériques de i_{Kmax1} et i_{Kmax2}

$$i_{Kmax1} = \sqrt{2} \cdot 1,6 \cdot 30,12 \cdot 10^3 = 68,15 \cdot 10^3 A$$

$$i_{Kmax2} = \sqrt{2} \cdot 1,6 \cdot 696 = 1575 A$$

Forces radiales

elles sont proportionnelles au carré du courant de court circuit, elles sont données par

$$Fr = \frac{6,4 (Z \cdot i_{kmax})^2 \cdot l_{moy} \cdot KR \cdot 10^{-8}}{h_B} \quad [KgP]$$

où KR : coefficient de Rogowski

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

h_B : hauteur de la bobine [m]

La force radiale dans l'enroulement B.T a pour valeur:

$$Fr_1 = 6,4 \frac{(17.58,15 \cdot 10^3)^2 \cdot 0,86 \cdot 0,97 \cdot 10^{-8}}{0,548} = 1,31 \cdot 10^5 \text{ KgP}$$

La force radiale dans l'enroulement H.T a pour valeur

$$Fr_2 = 6,4 \frac{(736.1575)^2 \cdot 1,18 \cdot 0,97 \cdot 10^{-8}}{0,548} = 1,796 \cdot 10^5 \text{ KgP}$$

Forces axiales

Les forces axiales sont fortement influencées par les dissymétries dans la dispositions des enroulements.

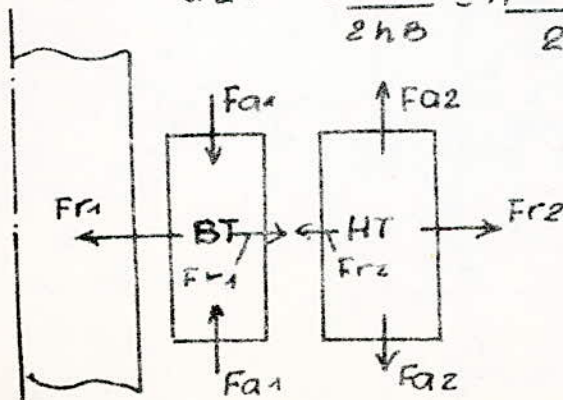
Vu que les hauteurs des enroulements sont identiques, les forces axiales de court circuit sont données par

$$Fa = Fr \cdot \frac{a_r}{2h_B} \quad \text{où } a_r \text{ est la largeur du canal de fuite}$$

Ces forces axiales auront pour valeur numérique

$$Fa_1 = Fr_1 \cdot \frac{a_r}{2h_B} = \frac{1,31 \cdot 10^5 \cdot 3,8}{2 \cdot 54,8} = 4,5 \cdot 10^3 \text{ KgP}$$

$$Fa_2 = Fr_2 \cdot \frac{a_r}{2h_B} = \frac{1,796 \cdot 10^5 \cdot 3,8}{2 \cdot 54,8} = 6,227 \cdot 10^3 \text{ KgP}$$



La bobine BT est comprimée

La bobine HT est étirée

Il faut déterminer l'effort unitaire produit par ces forces dans les enroulements

- Effort unitaire produit dans l'enroulement B.T

$$\sigma_{r1} = \frac{F_{r1} \cdot 10^2}{2\pi \cdot n_{el} \cdot z_1 \cdot S_{z1}} \quad \text{en kgf/cm}^2$$

$$\sigma_{r1} = \frac{1,31 \cdot 10^5 \cdot 10^2}{2 \cdot \pi \cdot 14 \cdot 17 \cdot 43,6} = 200,9 \text{ kgf/cm}^2$$

- Effort unitaire produit dans l'enroulement HT

$$\sigma_{r2} = \frac{F_{r2} \cdot 10^2}{2\pi \cdot S_{z2} \cdot z_2} \quad \text{en kgf/cm}^2$$

$$\sigma_{r2} = \frac{1,796 \cdot 10^5 \cdot 10^2}{2\pi \cdot 736 \cdot 14,2} = 273,64 \text{ kgf/cm}^2$$

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

Donc nos enroulements sont bien stable, car les efforts unitaires radiaux sont inférieurs aux efforts admissibles

Les efforts unitaires, dus aux forces axiales, dans les enroulements BT et HT auront respectivement pour valeur

$$\sigma_{a1} = \frac{F_{a1}}{S_1} \quad \text{en kgf/cm}^2$$

$$\text{avec } S_1 = \pi \cdot D_{m1} \cdot a_1 = \pi \cdot 27,35 \cdot 2,92 = 251 \text{ cm}^2$$

$$\sigma_{a1} = \frac{4,510^3}{251} = 17,93 \text{ kgf/cm}^2 \quad \text{valeur qui est inférieure à } \sigma_{adm} = 700 \text{ kgf/cm}^2$$

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

$$\text{avec } S_2 = \pi \cdot D_{moy2} \cdot a_2 = \pi \cdot 37,57 \cdot 4,9 = 578,4 \text{ cm}^2$$

$$\sigma_{a2} = \frac{6,227 \cdot 10^3}{578,4} = 10,76 \text{ kgf/cm}^2$$

de même $\sigma_{a2} < \sigma_{ad}$ ou $10,76 \text{ kgf/cm}^2 < 700 \text{ kgf/cm}^2$

En conclusion, les enroulements auront une bonne tenue aux efforts électrodynamiques de court-circuit

Pour pouvoir faire le calcul mécanique de la cuve, nous déterminons les différents volumes et poids suivant

- Volume occupé par les enroulements B.T

$$V_1 = (l_{t1} \cdot S_{z1} \cdot 10^{-3})^3$$

$S_{z1} : \text{mm}^2$
 $l_{t1} : \text{m}$
 $V_1 : \text{dm}^3$

$$V_1 = 14,60 \cdot 14,43,6 \cdot 3 \cdot 10^{-3} = 26,73 \text{ dm}^3$$

- Volume occupé par les enroulements HT

$$V_2 = (l_{t2} \cdot S_{z2} \cdot 10^{-3})^3$$

$$V_2 = (94,9 \cdot 14,2 \cdot 10^{-3})^3 = 38,85 \text{ dm}^3$$

- Volume occupé par les colonnes

$$V_{\text{col}} = 3 \cdot S_{\text{col}} \cdot h_{\text{col}} \quad \text{en dm}^3$$

$$V_{\text{col}} = 3 \cdot 377 \cdot 62,8 = 71026 \text{ cm}^3 = 71,026 \text{ dm}^3$$

- Volume occupé par les culasses

$$V_j = 2 S_j (3D + 2lF) = 2 \cdot 443 (3 \cdot 23,43 + 2 \cdot 20,44) = 96,27 \text{ dm}^3$$

- Volume occupé par le cuivre

$$V_{\text{cu}} = V_{\text{cu1}} + V_{\text{cu2}} = 26,73 + 38,85 = 65,58 \text{ dm}^3$$

- Volume occupé par le circuit magnétique

$$V_{\text{C.M}} = V_{\text{col}} + V_j = 71,026 + 96,27 = 167,3 \text{ dm}^3$$

- Volume de la masse décuatable

Nous estimons le volume du matériel de serrage à 20% du volume du cuivre et du circuit magnétique

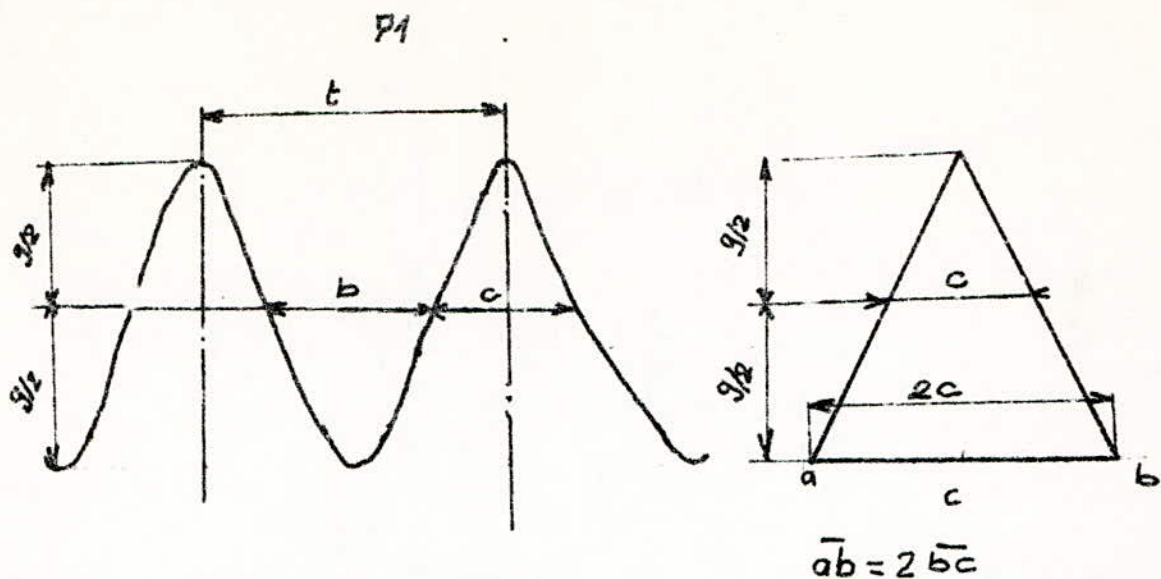
$$V_{\text{décu}} = 1,20 (V_{\text{C.M}} + V_{\text{cu}}) = 1,20 (167,3 + 65,58) = 279,45 \text{ Kg}$$

- Volume de la cuve

$$V_{\text{cu}} = A \cdot B \cdot H_{\text{c}} = 143,21 \cdot 55,47 \cdot 124,8 = 991,39 \text{ dm}^3$$

- Volume des ondules

Si nous assimilons la surface de base de l'ondule à un triangle



Surface d'une onde

$$S_{\text{ond}} = \frac{g \times 2c}{2} = gc = 200 \cdot 10 = 2000 \text{ mm}^2 = 20 \text{ cm}^2$$

Volume d'une onde

$$V_{\text{ond}} = 99,8 \cdot 20 = 1,996 \text{ dm}^3$$

- Volume total des ondes

$$V_{\text{ond}t} = 2(35 + 13) \cdot 1,996 = 191,6 \text{ dm}^3$$

- Volume totale de la cuve

$$V_{\text{cuve}t} = V_{\text{cu}} + V_{\text{ond}t} = 991,39 + 191,6 = 1183 \text{ dm}^3$$

- Nous déduisons le volume de l'huile

$$V_h = V_{\text{cu}t} - V_{\text{décl}} = 1183 - 279,45 = 903,55 \text{ dm}^3$$

- Poids de l'huile

$$P_h = \gamma_h \cdot V_h = 0,9 \cdot 903,55 = 813,2 \text{ kgf}$$

avec $\gamma_h = 0,9 \text{ kgf/dm}^3$

- Poids du circuit magnétique

$$G_{\text{C.M}} = \gamma_{\text{Fer}} \cdot V_{\text{C.M}} = 9,65 \cdot 167,3 = 1280 \text{ kgf}$$

- Poids du Cuivre

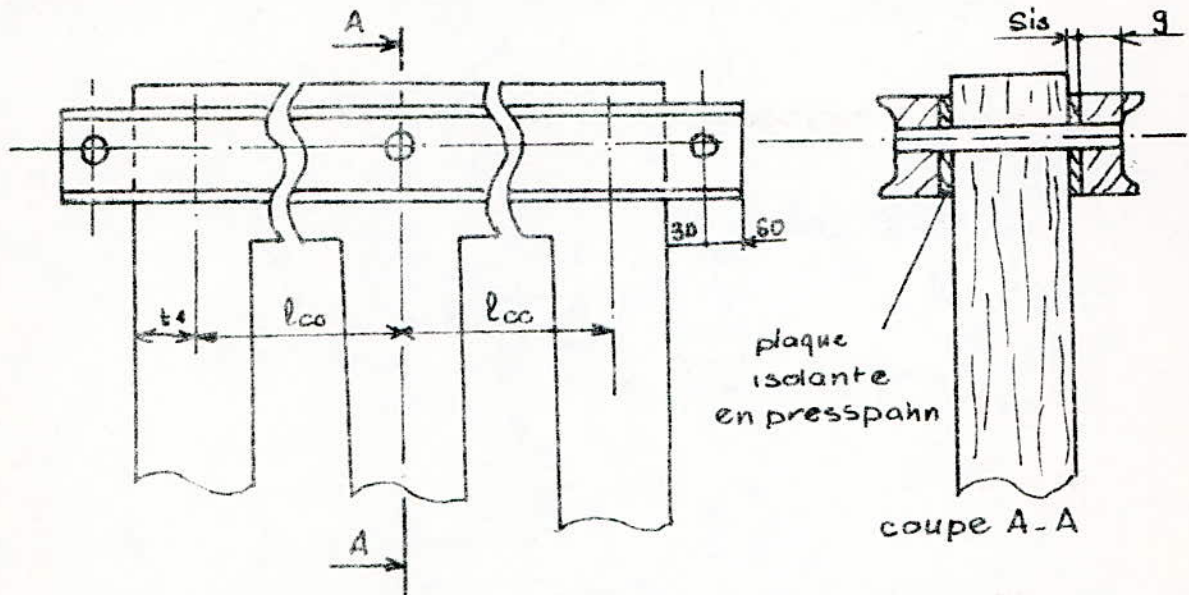
$$G_{\text{cu}} = \gamma_{\text{cu}} \cdot V_{\text{cu}} \text{ avec } \gamma_{\text{cu}} = 8,9 \text{ kgf/dm}^3$$

$$G_{\text{cu}} = 8,9 \cdot 65,68 = 583,66 \text{ kgf}$$

CALCUL MÉCANIQUE DES PARTIES CONSTRUCTIVES DU TRANSFORMATEUR

Les poutres et les boulons de serrage des culasses

Les culasses sont serrées par 2 poutres réalisées en profilés U



Le serrage se fait à l'aide de 3 boulons dont 1 seulement traverse effectivement le circuit magnétique

La pression exercée par les boulons et les écrous se transmet aux poutres et, plus loin, aux tôles de la culasse

La force totale de serrage exercée est $P = p \cdot h_j \cdot l_m$ où
 p : est la pression entre la culasse et la poutre considérée uniformément répartie. Cette pression est variable entre les limites 2 - 6 kgf/cm²

Nous choisissons $p = 4 \text{ kgf/cm}^2$

h_j : la hauteur des tôles du paquet latéral de la culasse

l_m : longueur de la culasse \Rightarrow Finalement

$$P = 4 \cdot 19,25 \cdot 111,17 = 8560 \text{ kgf}$$

Cette force doit être assurée par les boulons de serrage et de plus, la poutre doit être choisie afin qu'elle résiste à l'action de la pression des tôles

Le moment maximal supporté par la poutre est donné par la relation suivante

$$- M_{\max} = \frac{p \cdot h_j (l_{cc} + t_1)^2}{8} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} h_j : \text{cm} \\ l_{cc} : \text{cm} \\ t_1 : \text{cm} \\ p : \text{KgP/cm}^2 \end{cases}$$

$$- t_1 = D/2 + 3 \text{ cm} = 11,715 + 3 = 14,72 \text{ cm}$$

$$\Rightarrow M_{\max} = \frac{4 \cdot 19,25 [43,87 + 14,72]^2}{8} = 33,04 \cdot 10^3 \text{ KgP/cm}$$

Le module de résistance du profilé en U qui sert à la réalisation de la poutre est donné par la relation

$$W_y = \frac{M_{\max}}{\sigma_a} \quad [\text{cm}^3]$$

W_y : module de résistance sur l'axe y

σ_a : effort unitaire admissible dans l'acier de la poutre KgP/cm^2

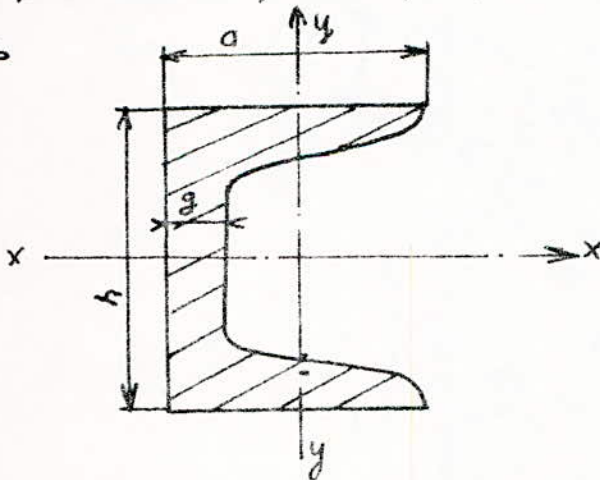
L'acier utilisée est un acier de nuance A33 avec la charge minimale de rupture de 3300 KgP/cm^2 et une charge admissible (effort unitaire) de valeur égale à $\sigma_a = 1200 \text{ KgP/cm}^2$

Le module de résistance aura pour valeur $W_y = \frac{33,04 \cdot 10^3}{1,2 \cdot 10^3} = 27,53 \text{ cm}^3$

d'après les normes (N.F.A 45-202 et 45-210)

des profilés en U, notre profilé aura pour dimensions et caractéristi-

ques



UPN220

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

$$h = 220 \text{ mm}$$

$$g = 9 \text{ mm}$$

La longueur de la poutre sera

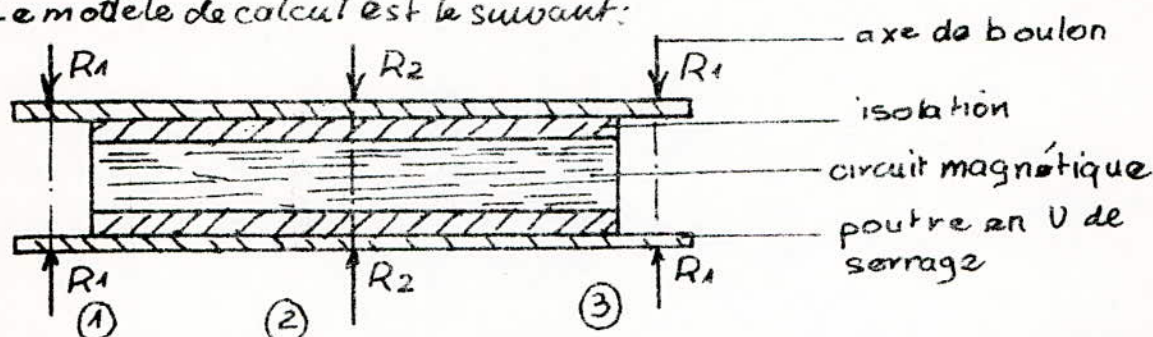
$$l_p = 2(l_{cc} + t_1 + 6) = 2(43,87 + 14,72 + 6) = 129,18 \text{ cm}$$

Les boulons de serrage des poutres

les forces qui s'exercent sur les boulons de serrage des poutres sont

- Les forces de réaction des tôles serrées qui exercent une action de traction
- Le poids de la partie découvrable (si cette partie est suspendue au couvercle, elle produit une flexion et en même temps un cisaillement)

Le modèle de calcul est le suivant:



Du fait de l'approximation que la longueur de la poutre est égale à la distance entre les boulons 1 et 3, les forces R_1 et R_2 auront pour valeur

$$R_1 = \frac{3}{16} P = \frac{3}{16} \cdot 8560 = 1605 \text{ kgf}$$

$$R_2 = \frac{5}{8} P = \frac{5}{8} \cdot 8560 = 5350 \text{ kgf}$$

$R_2 > R_1 \Rightarrow$ que le boulon du milieu est le plus sollicité

Le calcul du boulon se fait en considérant que les efforts qui s'y produisent doivent être plus petits que les efforts unitaires

Sous l'hypothèse des efforts de traction seulement

$$\sigma_{\text{traction}} = \frac{R_2}{S_2} = \frac{4 R_2}{\pi d_2^2} < \sigma_{\text{traction}}$$

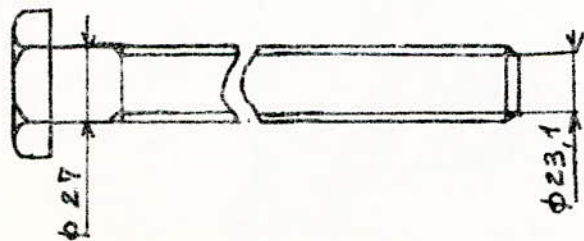
où d_2 est le diamètre du boulon le plus sollicité

Si le boulon est réalisé en A48 avec une contrainte admissible

$$\sigma_{\text{at}} = 1000 \text{ kgf/cm}^2$$

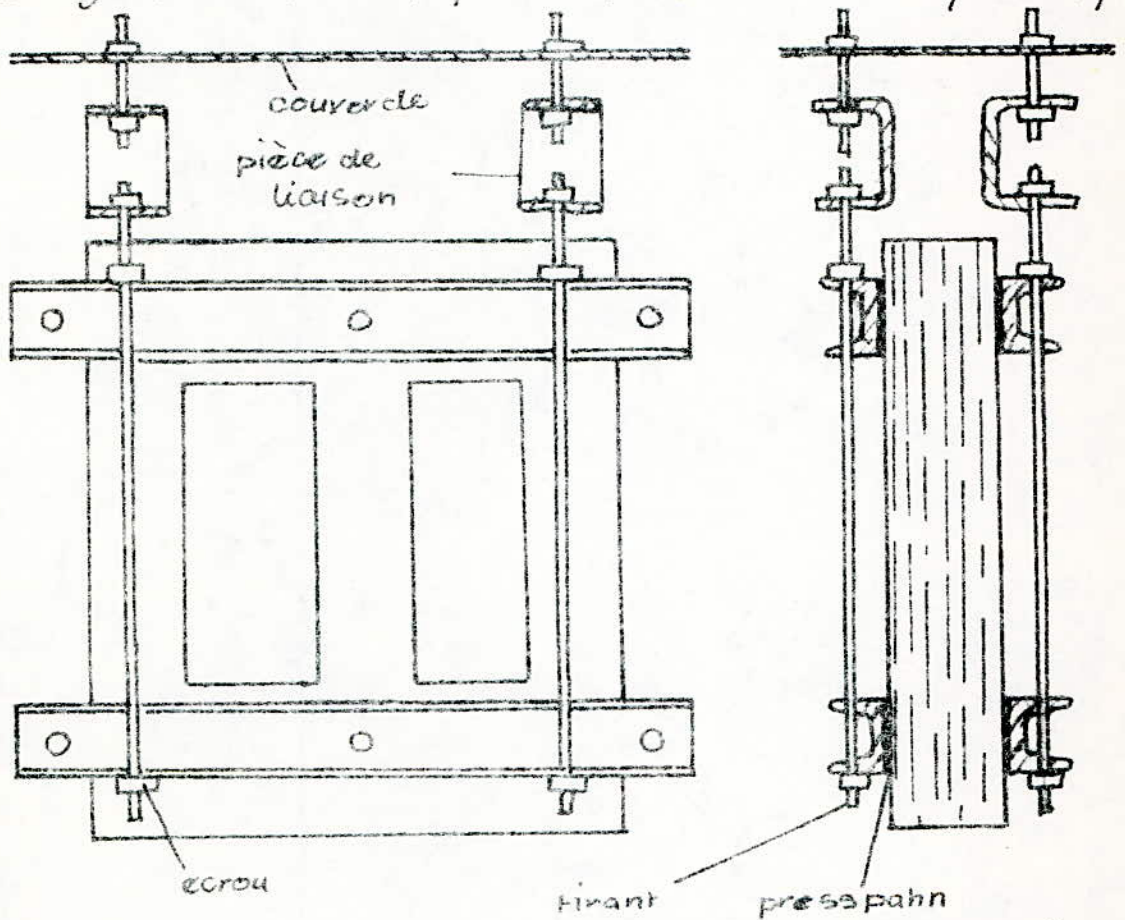
$$d_2 = \sqrt{\frac{4 R_2}{\sigma_{\text{at}}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 5350}{\pi \cdot 1000}} = 2,6 \text{ cm}$$

boulon normalisé correspondait à $d_2 = 2,6 \text{ cm}$



Les tirants

La partie décuvable est attachée au couvercle par quatre tirants. Les poutres inférieures et supérieures sont reliées elles aussi par quatre tirants qui servent en même temps à presser les bobinages et à soulever la partie active comme l'indique la figure.



Chaque tirant supporte le quart du poids de la partie décuvable et soumis à la traction.

- Poids de la partie décuvable

$$G_{\text{decu}} = G_{\text{cu}} + G_{\text{C.M.}} + G_{\text{poutres}}$$

et $G_{\text{poutres}} = 4 \ell_{\text{poutres}} \cdot G_{\text{unitaire}}$ avec $G_{\text{un}} = 29,4 \text{ kgf}$

$$G_{\text{poutres}} = 4 \cdot 1,2918 \cdot 29,4 = 152 \text{ kg}$$

$$G_{\text{decu}} = 583,33 + 1280 + 152 = 2015,33 \text{ kg}$$

Le diamètre du tirant est donné par

$$d_{\text{tir}} = \sqrt{\frac{4 G_{\text{decu}}}{4 \pi \sigma_{\text{at}}}}$$

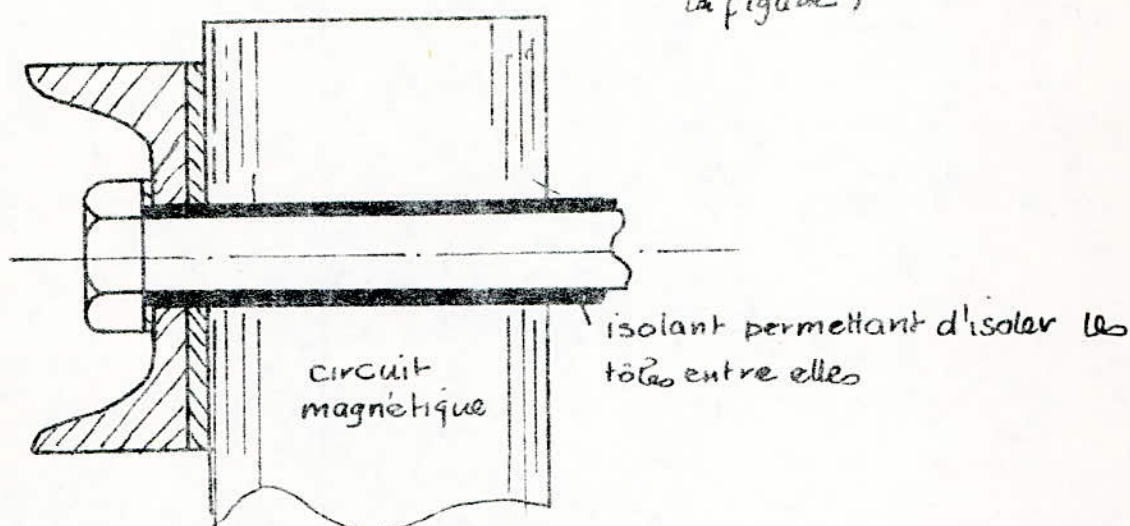
Si le tirant est réalisé en A48 sa contrainte admissible est $\sigma_{at} = 1000 \text{ kgf/cm}^2$

$$d_{tir} = \sqrt{\frac{4 \cdot 2015,33}{4 \cdot \pi \cdot 100}} = 0,8 \text{ cm}$$

\Rightarrow Nous choisissons des tirants de diamètre $d_{tir} = 10 \text{ mm}$

Vérification de l'isolation des boulons de serrage

Le boulon est isolé avec du papier (représenté en noir sur la figure)



La zone la plus sollicitée est celle qui traverse la poutre de serrage. À cet endroit, l'isolation est soumise à un effort de compression qui tend à l'écraser.

L'effort maximal supporté par le papier est $\sigma_{acis} = 250 \text{ kgf/cm}^2$

L'effort réel auquel est soumise l'isolation est

$$\sigma_{ois} = \frac{Q_{deca}}{4dz \cdot g} \quad g \text{ est l'épaisseur de la poutre} = 0,9 \text{ cm}$$

$$\sigma_{ois} = \frac{2015,33}{4 \cdot 2,6 \cdot 0,9} = 215,31 \text{ kgf/cm}^2 < \sigma_{acis} = 250 \text{ kgf/cm}^2$$

La cuve est réalisée avec les parois ondulées dont l'épaisseur est généralement suffisante, mais afin de réaliser une construction suffisamment rigide aux efforts de pression exercés par l'huile et par toutes les actions mécaniques de manoeuvre, nous prévoyons des bandages en méplat de dimensions $30 \times 5 \text{ mm}^2$

APPAREILLAGE AUXILIAIRE

Ce sont les appareils qui assurent une protection partielle ou totale, le réglage ainsi que le levage et le déplacement du transformateur

Relais Buchholz (ou relais à gaz)

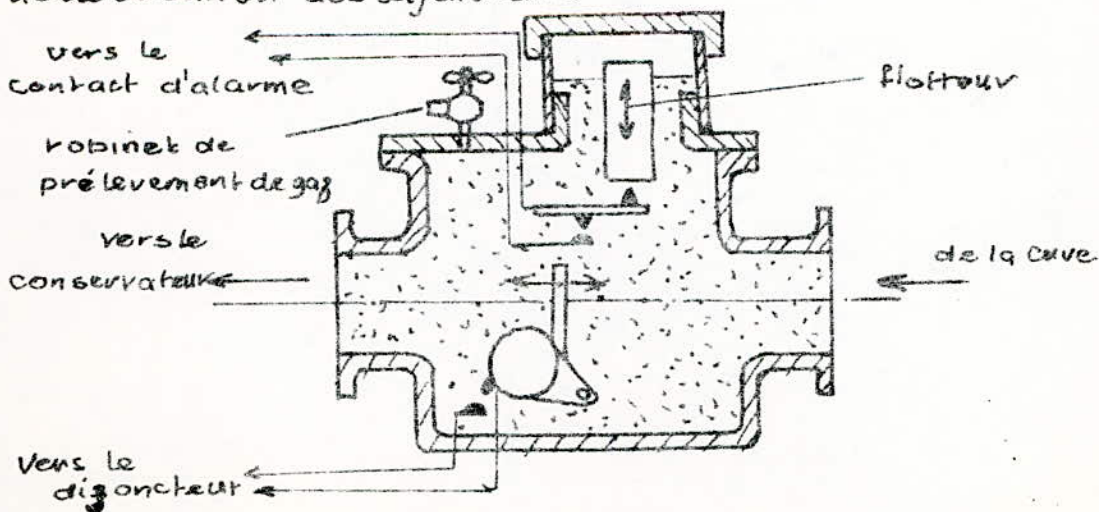
Ce relais est basé sur le fait que toute surchauffe dans le transformateur détruit l'isolation de la partie où elle a lieu. Il en résulte toujours l'apparition d'une certaine quantité de produits de décomposition gazeiformes qui se dégagent avec une vitesse plus ou moins grande en fonction de l'intensité du processus thermique.

Principe:

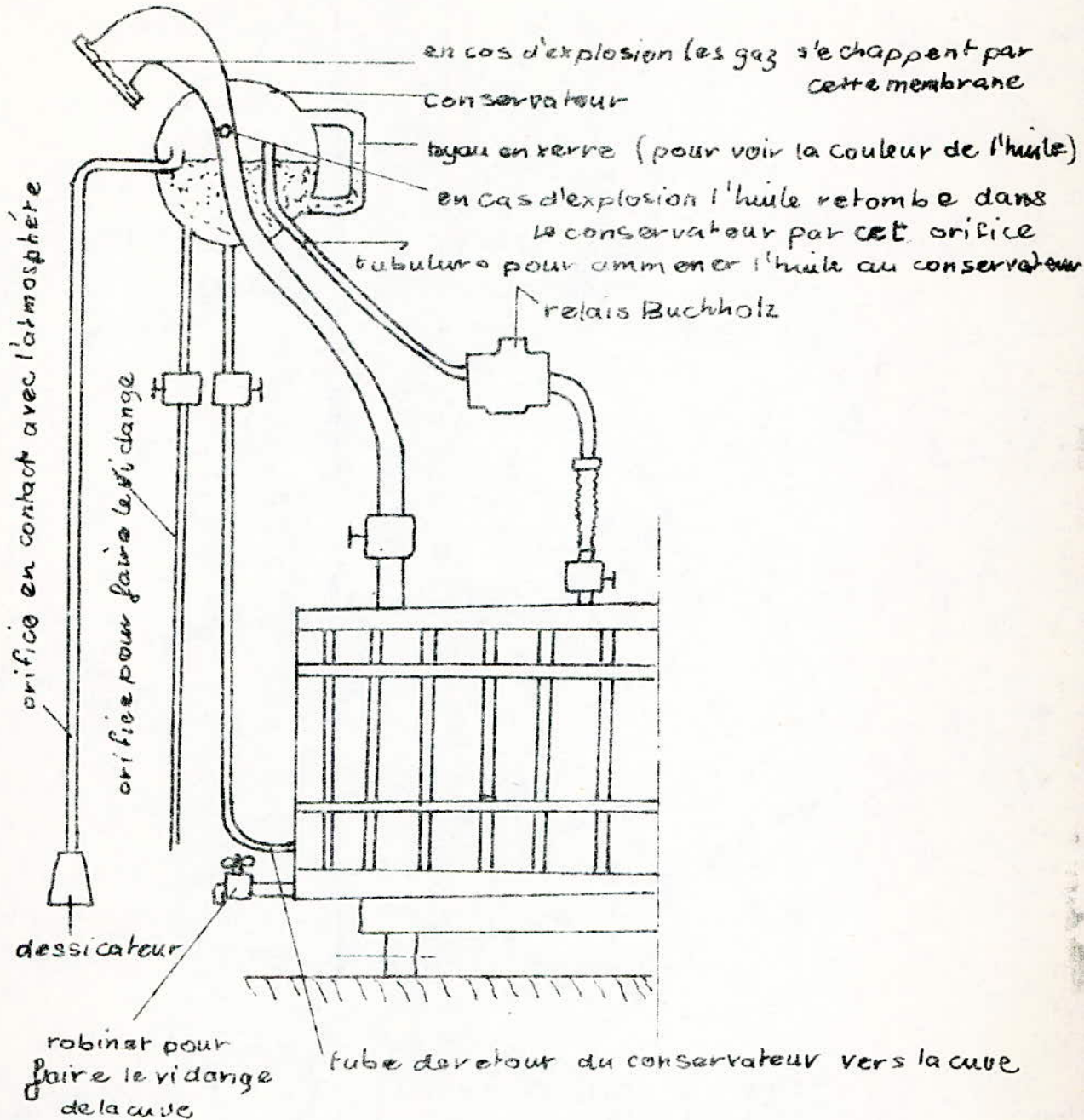
Dès qu'un défaut apparaît, les bulles gazeuses s'accumulent dans la partie supérieure et le niveau de l'huile s'abaisse. Le flotteur supérieur s'abaisse également et établit un contact commandant un circuit d'alarme.

Le robinet permet de prélever du gaz et d'en faire l'analyse pour localiser le défaut

En cas de défaut grave, le flotteur inférieur entre en action au moment du passage des grosses bulles gazeuses et provoque le déclenchement des disjoncteurs



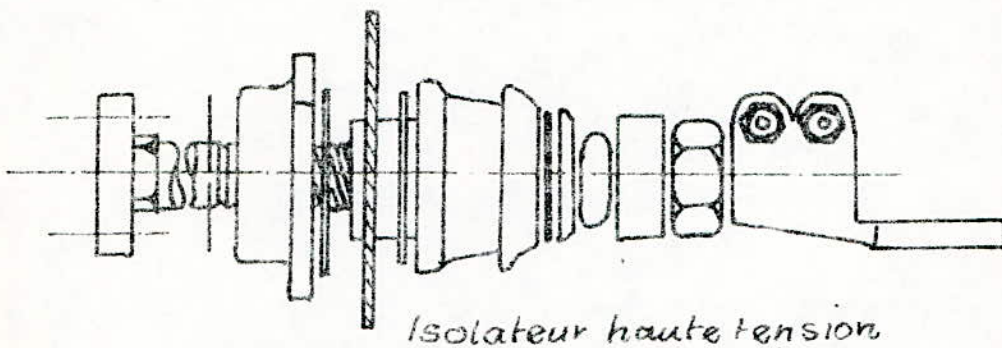
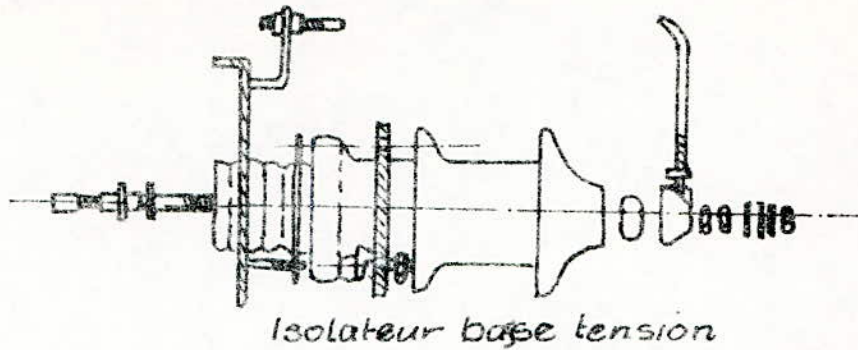
Conservateur d'huile



But du conservateur:

Pour éviter l'oxydation de l'huile et son humidification, qui diminuent ses qualités diélectriques, il faut le mettre à l'abri de l'air. tout en permettant sa libre dilatation, pour cela on prévoit en surmontant la cuve d'un réservoir (conservateur d'huile) dans lesquels s'effectuent les dilatations, l'air qui est admis est séché par un dessiccateur; la surface en contact est réduite ainsi que l'oxydation

Isolateurs (traversées)

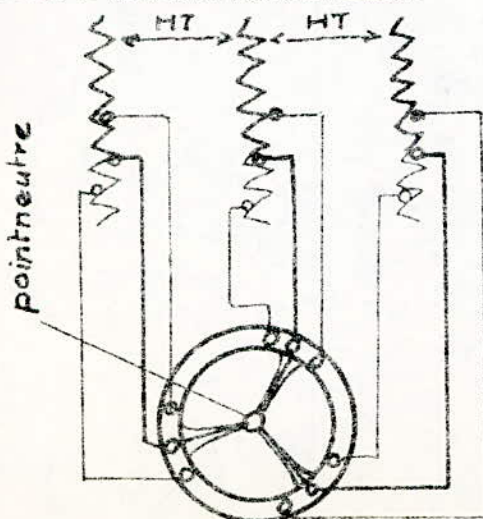


Les traversées isolantes ont pour but d'assurer la liaison électrique entre les extrémités des enroulements primaire et secondaire, d'une part, d'autre part au travers du couvercle

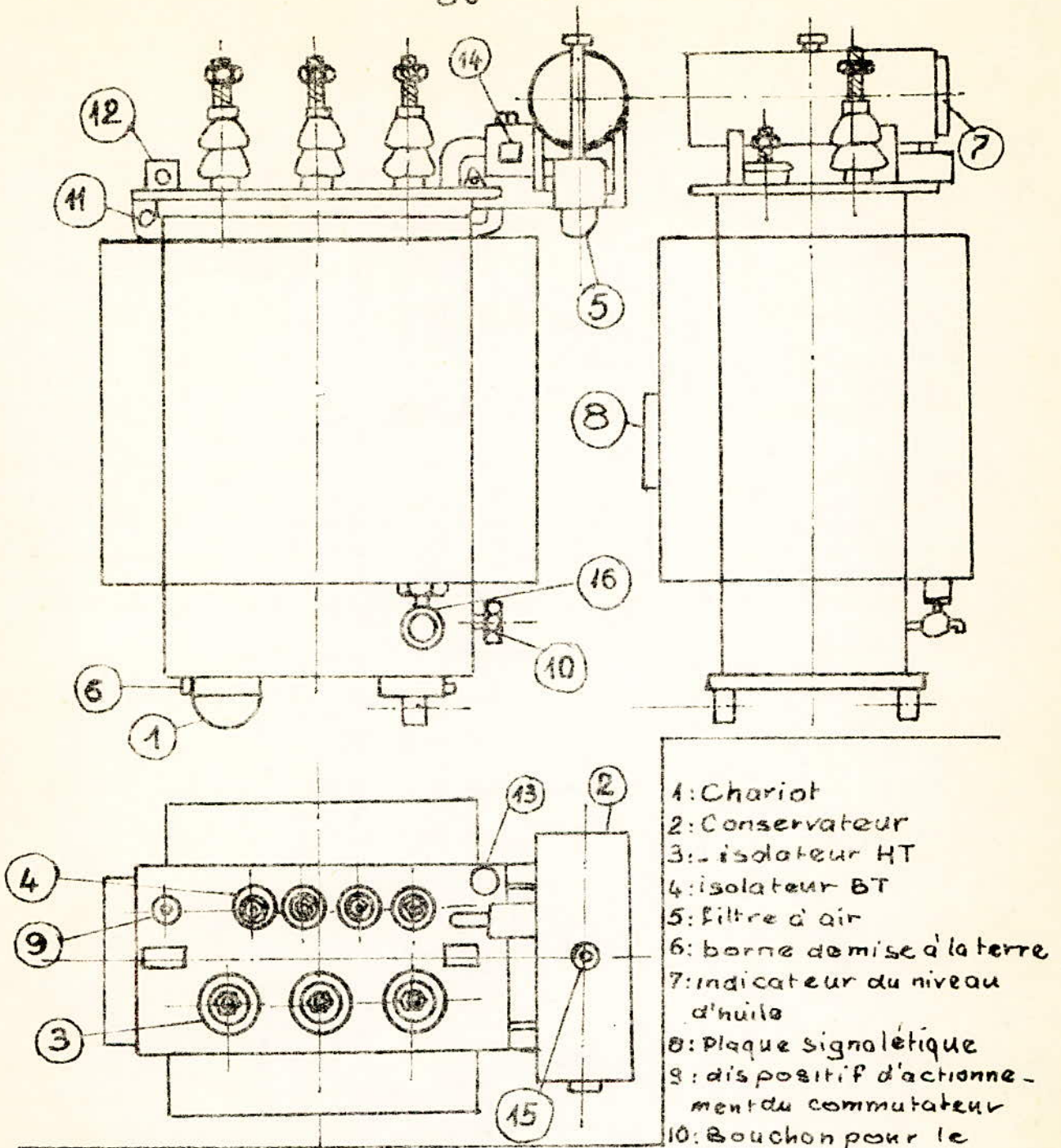
Conditions à remplir pour les isolateurs

- isolement de la connexion par rapport au couvercle
- Résistance aux efforts mécaniques
- Fixation étanche et robuste sur le couvercle
- Bonne répartition du champ électrique

Règlage de la tension (par un ajusteur de tension)



L'enroulement HT est muni de prises supplémentaires qui permettent en ajoutant ou en retranchant des spires de faire varier le rapport de transformation de $\pm 5\%$ de sa valeur. L'ajusteur de tension n'a pas de pouvoir de coupure et ne doit être manœuvré qu'à vide.



prélèvement des échantillons d'huile

- 11: Crochet pour le levage du transformateur
 12: Crochet pour le levage de la partie décapable
 13: emplacement pour thermomètre
 14: Relais à gaz type Buchholz
 15: Bouchon de remplissage (du conservateur)
 16: Bouchon de vidange du transformateur

- 1: Chariot
 2: Conservateur
 3: isolateur HT
 4: isolateur BT
 5: filtre à air
 6: borne de mise à la terre
 7: indicateur du niveau d'huile
 8: plaque signalétique
 9: dispositif d'actionnement du commutateur
 10: Bouchon pour le

___ CONCLUSION ___

Actuellement, la technologie de pointe nous permet d'obtenir des matériaux de plus en plus élaborés, en re autre l'acier électrotechnique laminé à froid, d'épaisseur de plus en plus faible (0,28mm). Ceci permet d'obtenir des résultats plus avantageux (diminution des pertes fer, diminution du poids du circuit magnétique etc...)

Ces aciers étant récent, leurs caractéristiques ne se trouvent pas à notre portée, ce qui nous amène à nous contenter d'utiliser des aciers d'épaisseurs courantes (ex. 0,35mm) dont les qualités sont moins bonnes

Au niveau de l'élève ingénieur, les résultats obtenus pour le calcul du dimensionnement d'une machine ne sont pas certe optimaux. Toutefois, l'étude nous permet une approche du calcul réel de la machine. Actuellement dans l'industrie on obtient de meilleurs résultats surtout pour le calcul des transformateurs grâce à l'apport de l'informatique

L'intérêt du calcul d'une machine est d'obliger l'élève ingénieur à acquérir des connaissances de plus en plus approfondies et à faire preuve de savoir personnel et de réflexion.

— Bibliographie —

- Notes de cours de construction des machines électriques
- Anciens projets de construction des transformateurs
- Liwshitz : Calcul des machines électriques tome I et II
- M. Kostenko et L. Piotrowski : machines électriques tome I
- H. Boyer; M. Norbert et R. philipe : Technologie d'électricité tome II
- Normes françaises N.F.C 28.920. Tôles magnétiques laminées à froid

