

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

14/78

UNIVERSITE D'ALGER

nea

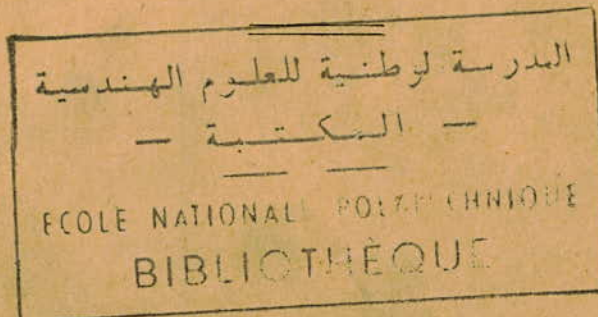
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT D'ELECTRICITE



PROJET DE FIN D'ETUDES

ETUDE DE CONSTRUCTION
D'UN TRANSFORMATEUR
DE 400 KVA — 10 KV / 0,4 KV



Proposé par :

M^r V. STIRBU

Maitre de Conférence

Etudié par :

M^r A. MEZIANI

JUIN 1978

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE D'ALGER

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT D'ELECTRICITE

PROJET DE FIN D'ETUDES

ETUDE DE CONSTRUCTION
D'UN TRANSFORMATEUR
DE 400 KVA — 10 KV/0,4 KV

Proposé par :

M^r V. STIRBU

Président de Conférence

Etudié par :

M^r A. MEZIANI

JUIN 1978

+) mes parents , mon frère aîné
.. et à tous ceux qui me sont chers
... je dédie ce modeste ouvrage.

A. MEZIANI

A. Meziani

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

-----ooOoo-----

Je tiens à remercier Monsieur STIRBU ,professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, qui a bien voulu diriger ce travail.

Mes remerciements vont à Messieurs M. OURARI et à K. BENTABET dont la coopération m'a été d'un grand apport, ainsi qu'à tous ceux qui de près ou de loin m'ont aidé à l'élaboration de ce projet.

ooOoo

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

Durant de longues années, un problème non des moindres, était rencontré quant au transport de l'énergie électrique du point de production au lieu de consommation.

On notera que la première base essentielle de fabrication de cette énergie était l'eau emmagasinée dans les barrages d'où le nom de centrales hydrauliques lesquelles furent suivies de centrales thermiques, géothermiques, le progrès de la science a permis enfin la centrale atomique.

Il a fallu par conséquent trouver un moyen de liaison entre le centre de production et les centres d'utilisations; c'est ainsi que fut découvert le transformateur.

Le terme transformateur peut en toute rigueur s'appliquer à n'importe quelle machine électrique qui fournit un certain courant électrique en consommant un autre courant de caractéristiques différentes (nombre de phases- fréquence- tension..).

En pratique, on appelle transformateur, un appareil électrique ne comportant aucune pièce mobile, destiné à transformer un courant alternatif donné en un autre courant alternatif de même fréquence mais de tension différente.

Les transformateurs sont et de beaucoup, les appareils les plus répandus; car leur possibilité de transiter de l'énergie électrique à des tensions différentes, en fait les éléments économiques indispensables au transport de cette forme d'énergie (L'éloignement des centres de production et de consommation nécessite le transport de l'énergie électrique).

Le transport occasionne des pertes dont l'importance est directement liée à la tension du réseau.

Nous savons, en effet, que les pertes sont proportionnelles au carré de l'intensité du courant.

Ainsi aux extrémités d'un réseau de transport, nous trouverons des transformateurs dit élévateur de tension qui sont utilisés aux points de production pour faciliter le transit et

ceux dit abaisseurs de tension qui sont quant à eux utilisés aux points où commence le réseau d'alimentation du consommateur (public- petites et grandes entreprises- industrie -etc.)

Ce sont donc là les deux rôles essentiels des transformateurs de puissance.

Neanmoins il existe des transformateurs spéciaux de faible puissance qui sont destinés à l'alimentation de circuit de mesure (Ampéremètre - Voltmètre- Wattmètre -Compteur etc...). Le rôle de ces " transformateurs de mesures " est multiple.

-- Réseau à Haute Tension ; ils isolent les appareils de mesures qui deviennent accessibles sans danger.

-- Ils permettent de faire porter les mesures sur des grandeurs acceptables (Haute Tension - forte Intensité).

-- Ils permettent de normaliser les appareils de mesures .

*** La conception d'un transformateur se fait toujours de telle sorte que les fuites magnétiques soient les plus réduites possibles.

Avant d'entrer dans la phase décisive de l'élaboration de notre appareil; il serait bon de schématiser la méthode à l'aide de laquelle sera entamé ce travail.

L'importante expérience acquise dans le domaine de la construction de machines électriques, entre autre le transformateur (le plus important dans notre cas), nous permet de construire un transformateur en lui imposant des performances dès le départ au lieu de le construire pour ensuite le soumettre à des essais pour évaluer ses performances.

Cette solution nous oblige, même en connaissant parfaitement la théorie de fonctionnement , à faire intervenir un certain nombre de paramètres technologiques variant d'un genre à l'autre pour satisfaire les conditions initiales.

Un calcul préliminaire des dimensions principales tenant compte des conditions imposées par le cahier de charges; est devenu la première opération dans le calcul des transformateurs ou d'autres machines électriques.

A partir du calcul préliminaire ; on se penchera sur un calcul définitif des différents éléments (parties du transformateur); caractéristiques géométriques , électromagnétiques etc..., qui seront à comparer avec le cahier de charges dont les conditions sont données dans la page suivante dans notre cas.

CAHIER DE CHARGES
 ooooooooooOooooooooooooo
 o

- Puissance apparente nominale $S_n = 400\text{KVA}$
- .. Tension aux bornes
 - Coté Haute Tension 10KV
 - Coté Basse Tension..... $0,4\text{KV}$
- Pertes à vide $P_o = 930\text{W}$
- Pertes à charges $P_k = 4,6\text{KW}$
- Tension de court-circuit $U_k\% = 4$
- Courant à vide $I_o\% = 1,9$
- Tension de réglage $\pm 5\%$
- Mode de couplage :..... / ΔY
- Nombre de phases $m = 3$
- Fréquence $f = 50\text{HZ}$

Les enroulements seront en cuivre.

Il sera du type intérieur avec refroidissement naturel.

Tout transformateur est donc caractérisé par la connaissance de certaines pièces maitresses nécessaires pour sa construction.

Il faut donc obligatoirement connaître leurs dimensions afin de pouvoir élaborer une étude approfondie de la construction du transformateur. Ces dimensions doivent correspondre aux données du cahier de charges qui fixe, si besoin est, le domaine d'utilisation ainsi que les performances auxquelles il devrait satisfaire. Les dimensions principales seront celles de la colonne et celle de la bobine.

Détermination de la puissance apparente.

S_n : puissance apparente nominale

m : nombre de colonnes

S_c : puissance apparente par colonne

$$S_c = \frac{S_n}{m} = \frac{400}{3} = 133,33 \text{KVA}$$

Tension nominale d'un enroulement

On définira par tension nominale d'un enroulement, la tension spécifiée pour être appliquée aux bornes de lignes d'un transformateur en fonctionnement à vide.

On aura à utiliser spécialement la tension de phase qui dépend obligatoirement du mode de couplage utilisé dans les parties des enroulements du transformateur.

On signalera que les principaux couplages utilisés sont:
Etoile - étoile ; Etoile- triangle ; Triangle- étoile
Triangle- triangle ; Etoile- zigzag ; Zigzag- étoile.

Nous utilisons dans notre cas le couplage Triangle-étoile; soit le côté haute tension en couplage triangle et le côté basse tension en couplage étoile. Ce qui nous donne les valeurs suivantes pour la tension nominale de phase:

$$U_{f1} = \frac{\sqrt{3} U_{1n}}{\sqrt{3}} = 230,95 \text{V}$$

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

COUPLAGES PRINCIPAUX

SYMBOLE	ANCIENNE DESIGNATION	DIAGRAMME VECTORIEL	SCHEMA DES CONNEXIONS
Dd 0	G 11		
Yy 0	G 12		
Dz 0	G 13		
Dd 6	G 21		
Yy 6	G 22		
Dz 6	G 23		
Dy II	G 31 NORMALISEE		
Yd II	G 32		
Yz II	G 33 NORMALISEE		

SYMBOLE	ANCIENNE DESIGNATION	DIAGRAMME VECTORIEL	SCHEMA DES CONNEXIONS
Dy 5	G 41		
Yd 5	G 42		
Yz 5	G 43		
Dy I			
Yd I			
Yz I			

D, d : triangle
Y, y : étoile
z : zig-zag

majuscules : Haute Tension
minuscules : Basse Tension

Après ces lettres figure l'indice horaire.
La valeur du déphasage entre les traversées homologues A et a s'obtient en multipliant cet indice horaire par 30°.

Les lettres A, B, C sont relatives à l'enroulement Haute Tension
les lettres a, b, c à l'enroulement Basse Tension.
Ces lettres sont repérées sur les transformateurs, au droit des traversées correspondantes.

Les schémas des connexions sont tracés en admettant que les enroulements ont le même sens relatif de bobinage.

Courant nominal

Il dépend essentiellement de la puissance nominale du transformateur imposée par le cahier de charge et du facteur de phase K_f qui sera égal à :

$\sqrt{3}$ dans le cas d'un transformateur triphasé
1 dans le cas d'un transformateur monophasé

$$I_f = \frac{S_n}{K_f \cdot U_n}$$

Des opérations précédentes il nous sera aisé de déterminer le courant de phase circulant respectivement dans l'enroulement basse tension et dans l'enroulement haute tension.

$$I_{f1} = I_n = \frac{S_c}{U_{f1}} = \frac{133,333 \cdot 10^3}{230,95} = 577,31A$$

$$I_{f2} = I_n / \sqrt{3} = S_c / U_{f2} = \frac{133,333}{10} = 13,33A$$

Tension de court-circuit.

Elle a deux composantes :

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

Nous définirons par tension de court-circuit aux bornes d'un enroulement, la tension nécessaire pour la création d'une circulation d'un courant égal au courant nominal dans l'enroulement qui se trouve en court-circuit. Les deux composantes de la tension de court-circuit sont liées par la relation suivante/ :

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

Relation aussi valable en grandeurs réelles qu'en grandeurs réduites. La grandeur active est quant à elle définie de la manière suivante avec P_k qui représente les pertes à charge.

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

Nous pouvons facilement constater que la grandeur active est indirectement imposée par le cahier de charges.

$$U_{ka} = \frac{4,6}{400} \times 100 = 1,15\%$$

D'où la détermination de la composante réactive de la tension de court-circuit.

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

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

$$U_{kr} = \sqrt{(4)^2 - (1,15)^2} = 3,83\%$$

Coefficient de sveltesse : β

D_{12} : Diamètre du canal de fuite

H_b : Hauteur de la bobine

$$\beta = \frac{\pi \cdot D_{12}^2}{H_b}$$

Nous pouvons de part cette relation, voir que le coefficient de sveltesse impose la géométrie du transformateur. Il déterminera entre autre son caractère svelte ou trapu.

Il est donc d'une délicatesse réelle d'opérer au choix de ce coefficient dans la phase préliminaire. Par ailleurs on s'apercevra rapidement dans la suite des opérations qu'il joue un grand rôle; dans le poids des colonnes, des enroulements..... donc dans le prix de réalisation; dans le poids des culasses, des pertes dues à la charge, du courant de marche à vide, de la tension de court-circuit par conséquent dans le prix d'exploitation.

Sa valeur est donnée par le tableau T01 déterminé d'une manière statistique à partir des différents essais de constructions. Il est donc directement lié à la connaissance du transformateur, à la tension d'alimentation et enfin au matériau utilisé. Nous choisirons dans notre cas un coefficient de sveltesse de valeur égale à :

$$\beta = 1,8$$

Largeur rapportée du canal de fuite

Dans le cas où l'on utilise un système d'enroulement dit concentrique; elle sera donnée par la relation suivante:

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

a_{12} : largeur du canal de fuite (qui dépend de la tension la plus élevée , dans notre cas 10KV) donnée par le tableau T02, dans le cas d'un transformateur immergé dans l'huile, qui nous permet de choisir:

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

$a_1 - a_2$: sont respectivement les épaisseurs de l'enroulement basse tension et de l'enroulement haute tension.

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

Le facteur K est donné par le tableau T03 et est fonction de la puissance du transformateur et de la tension la plus grande des enroulements. En fonction de nos données on choisit la valeur suivante/:

$$K = 0,485$$

d'où l'on a :

$$\frac{a_1 + a_2}{3} = 0,485 \sqrt[4]{133,33} = 1,648\text{cm}$$

Et enfin la valeur de la largeur rapportée du canal de fuite sera la suivante:

$$a_r = a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3} = 1 + 1,648 = 2,648\text{cm}$$

Coefficient de Rogowski : K_p

Le facteur de Rogowski intervient dans le calcul de beaucoup de paramètres du transformateur.

Il tient compte du fait que les lignes du champ dans le canal de fuite sont incurvées et non parallèles. Il se prend égal à 0,95 d'une manière générale pour le calcul préliminaire.

Sc KVA	3	2000	3	2000	2000	20 000	2000	20 000
U KV.	6	10	35		35		110	
β_{cu} .	3,4 à 1,75		3 à 1,8		1,8 à 1,3		2 à 1,5	

Tableau : T01 . Facteur de sveltesse en fonction de la puissance par colonne et de la tension.

U_n KV.	3	6	10	15	20	35	60	110	220
U.KV CEI.	3,6	7,2	12	17,5	24	35	72,5	123	245
U KV essai	16	22	28	38	50	70	140	230	460
α_{12}	0,6 à 1	0,8 à 1,2	1 à 1,5	1,2 à 1,8	2,1 à 2,7		8 à 6	13 à 22	

Tableau : T02 . Largeur du canal de fuite en fonction de la tension la plus élevée.

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

Tableau : T03 . Les valeurs les plus grande de K correspondent aux transformateurs en Al.

Sa valeur exacte s'obtient après avoir défini les dimensions principales et les dimensions des enroulements du transformateur.

Facteur géométrique K_g

Il dépend du nombre de gradins dont on se sert pour réaliser la colonne, ainsi que de la puissance par colonne de notre transformateur.

On prendra dans notre cas et ce d'après le tableau T04 la valeur suivante: $K_g = 0,93$

$$n : \text{nombre de gradins} = 6$$

Facteur de remplissage K_r

Il dépend principalement du type d'isolation des tôles et de l'épaisseur de la tôle. Le tableau T05 nous permet de choisir dans le cas d'une isolation de la tôle en carlite et pour une épaisseur de tôle de 0,35mm la valeur suivante de K_r :

$$K_r = 0,94$$

Facteur d'utilisation K_u

$$K_u = K_g \times K_r$$

Comme la relation l'indique, il dépend du coefficient de remplissage et du coefficient ou facteur géométrique. Par conséquent des paramètres dont dépendent ces derniers.

$$K_u = 0,93 \times 0,94 = 0,87$$

Induction magnétique de crête B_c

On constatera par la suite des calculs que sa valeur est d'une importance considérable.

Elle influe directement sur les pertes et le courant de marche à vide imposés par l'utilisateur.

On essaiera d'éviter au maximum la saturation vue qu'elle est en liaison directe avec le courant de marche à vide. De plus on sait que le phénomène de saturation risque de créer des distorsions qui peuvent apparaître dans la tension de ligne.

En optant pour les tôles laminées à froid; le tableau T06 nous permet de faire un choix judicieux en tenant compte de la puissance apparente par colonne du transformateur. On aura:

$$B_c = 1,58 \text{ Tesla}$$

Diamètre de la colonne.

Il sera déterminé par la relation suivante qui sera démontrée en annexe.

$$D = 1,0674 \sqrt[4]{\frac{Q_r \cdot \beta \cdot K_R \cdot S_c}{(K_u)^2 \cdot B_c^2 \cdot U_{kr}}}$$

On constate qu'il dépend de plusieurs paramètres que nous nous sommes empressés de déterminer où de choisir au préalable. Cette valeur sera d'une grande importance pour la suite des opérations concernant le dimensionnement de notre appareil; elle

sera de:

$$D = 1,0674 \sqrt[4]{\frac{2,648 \cdot 1,2 \cdot 0,95 \cdot 133,33 \cdot 10^3}{(0,87)^2 \cdot (1,58)^2 \cdot 3,83}}$$

$$D = 0,18141m = 18,14cm.$$

Détermination du diamètre du canal de fuite

Il sera déduit de l'expression suivante:

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

avec:

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

$$= 0,55 \sqrt[4]{13,33}$$

$$a_1 = 1,869$$

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

a_{10} : Distance entre la colonne et le premier enroulement qui est dans notre cas celui de la basse tension. Elle dépend de la tension nominale de cet enroulement. Le choix s'est fait d'après le tableau T07; d'où:

$$a_{10} = 0,5cm.$$

Sc KVA.	5	5	15	15	45	45	500
n gradins	2	4		5		6	
D cm. appro.	8	8	12	12	16	16	51
Kg	0,786	0,886		0,91		0,93	

Tableau T04 : facteur géométrique en fonction de la puissance par colonne et du nombre de gradins.

tôles mm.	Isolations avec papier	Isolation au carlite	
0,5	0,875	0,97	0,98
0,35	0,85	0,94	0,95
0,28	-	0,93	0,94

Tableau T05 : facteur de remplissage Kr en fonction du type d'isolation et de l'épaisseur de tôle.

Sc KVA.	10	50	75	250	315	600	630	1000	1000
Bc T.L. à froid	1,25 ÷ 1,55		1,55 ÷ 1,65		1,62 - 1,68		1,63 - 1,69		1,64 ÷ 1,7
Be T.L. à chaud	1,1 ÷ 1,35		1,41 - 1,46		1,42 ÷ 1,47				1,43 ÷ 1,48

Tableau T06: Induction en fonction de la puissance.

U _{n1} KV;	1	3	6	10	15	20	35
Q ₁₀ cm.	0,5	1,2	1,2 ÷ 1,5	1,8	1,8 ÷ 2	2,1 ÷ 2,3	3

Tableau T07 : Distance entre les colonnes et le premier enroulement en fonction de la tension.

d'où l'on a :

$$\begin{aligned} D_{12} &= 18,14 + 2.0,5 + 2.1,87 + 1 \\ &= 23,88 \text{ cm.} \end{aligned}$$

Hauteur de la bobine.

Elle est déterminée par la relation suivante :

$$\begin{aligned} H_b &= (\pi \cdot D_{12}) / \beta \\ H_b &= \frac{\pi \cdot 23,88}{1,8} = 41,68 \text{ cm.} \end{aligned}$$

Valeur qui pourrait être soumise à un réajustement dans le calcul ultérieur, mais ceci en liaison directe avec le coefficient de sveltesse.

CALCUL DES ENROULEMENTS

Il sera déterminé par le calcul :

- de la section du conducteur ou des conducteurs en parallèles
- du nombre de spires
- des dimensions géométriques de l'espace qu'occupe l'enroulement.
- de la structure de l'isolation.

Section du fer de la colonne

$$\begin{aligned} S_{fec} &= \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot K_u \\ &= \frac{\pi \cdot (18,14)^2}{4} \cdot 0,87 = 224,87 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

Tension de spire

Du fait que le flux magnétique utile demeure essentiellement dans le fer de la colonne, la tension de spire primaire et celle de l'enroulement secondaire sera la même. Elle est donnée par la relation ci-après :

$$U_{sp} = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot S_{fec} \cdot B_c$$

$$U_{sp} = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot 50 \cdot 224,87 \cdot 1,58 \cdot 10^{-4}$$

$$U_{sp} = 7,893 \text{ Volts}$$

On constatera que l'on ne sort pas de la marge donnée par le tableau T08 (de la tension de spire en fonction de la puissance par colonne.).

Nombre de spires.

- Enroulement basse tension;

$$W_1 = \frac{U_{f1}}{U_{sp}} = \frac{230,95}{7,895} = 29,261 \text{ spires}$$

$$W_{1arr.} = 29 \text{ spires.}$$

Afin de ne pas modifier l'induction même substanciuellement on peut arrondir le nombre de spires mais dans des limites qui soient assez serrées.

Tension de spires recalculée.

$$U_{spr} = \frac{U_{f1}}{W_{1arr.}} = \frac{230,95}{29} = 7,964 \text{ V.}$$

La même remarque reste aussi valable pour U_{spr} que pour la première tension de spires préliminaire.

Néanmoins nous pouvons constater une légère variation de la tension de spires; de ce fait, nous devons opérer à un calcul de l'induction magnétique de crête compte tenu des calculs précédent.

Induction magnétique de crête recalculée: B_{cr}

$$B_{cr} = \frac{U_{spr}}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot S_{fec}}$$

$$B_{cr} = \frac{7,964}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot 50 \cdot 224,87 \cdot 10^{-4}} = 1,594 \text{ Tesla}$$

Calcul de la densité moyenne de courant

Ce calcul sera fait en utilisant l'expression suivante:

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

K_{pk} : facteur des pertes supplémentaires qui est fonction de la puissance du transformateur. Le choix de cette valeur s'est fait d'après le tableau T09 soit:

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

d'où :

$$J_m = 7,34 \frac{4,6 \times 7,964}{23,88 \times 400 \times 1,038 \cdot 10^{-2}}$$

$$J_m = 2,71 \text{ A/mm}^2$$

Nous pouvons remarquer qu'en plus de sa dépendance de la puissance, la valeur de la densité de courant dépend aussi du mode de refroidissement.

Elle influe directement sur les pertes joules et sur la consommation spécifique du cuivre.

Choix des conducteurs et type d'enroulements

- Enroulement basse tension
- Détermination de la section

$$S_{w1} = \frac{I_{f1}}{J_m} = \frac{577,31}{2,71} = 213,03 \text{ mm}^2$$

On constatera que la section est supérieure à 50 mm^2 ; De ce fait, en respectant le règlement international, qui prévoit dans ce cas des conducteurs en parallèle de sections inférieure à 50 mm^2 ; on opérera à un choix standard de la section.

Choix de la section standard.

On choisira cinq (5) conducteurs en parallèle de $43,8 \text{ mm}^2$ de section. Une transposition totale de ces conducteurs est prévue.

Les conducteurs étant normalisés; d'après le tableau T10 nous choisirons la section de 219 mm^2 soit $43,8 \text{ mm}^2$ par conducteur standard avec les dimensions suivantes/:

$$S_{wn} = 43,8 \text{ mm}^2 \quad ; \quad a = 3,28 \text{ mm} \quad ; \quad b = 13,5 \text{ mm}$$

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	10,3	11,1	12				
3,80	5,72	6,17	6,67	7,20	7,50	8,11	8,79	9,51	10,3	11,1	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	12,0	13,0	14,0	15,1	15,9		
4,20																
4,40	6,65	7,18	7,75	8,37	8,76	9,46	10,2	11,9	12,0	12,9	13,9	15,0	16,2	17,1	18,5	
4,50																
4,70	7,12	7,79	8,30	8,96	9,39	10,1	11,0	11,9	12,8	13,8	14,9	16,1	17,4	18,4		21,2
5,10	7,75	8,36	9,02	9,74	10,2	11,0	11,9	12,9	13,9	15,1	16,2	17,5	18,9	20,0	21,5	
5,50	8,37	9,03	9,75	10,5	11,1	11,9	12,9	14,0	15,1	16,3	17,5	18,9	20,4	21,7	23,3	25,0
5,90	8,89	9,70	10,5	11,3	11,9	12,8	13,9	15,0	16,2	17,5	18,9	20,3	21,9	23,3	25,9	26,8
6,40	9,77	10,6	11,4	12,3	12,9	14,0	15,1	16,3	17,6	19,0	20,5	22,1	23,8	25,3	27,3	29,2
6,90	10,6	11,4	12,3	13,3	14,0	15,1	16,3	17,7	19,0	20,4	22,1	23,1	25,7	27,4	29,5	31,5
7,40	11,3	12,6	13,3	14,2	15,0	16,2	17,6	19,0	20,4	22,1	23,6	25,6	27,6	29,4	31,7	33,9
8,00	12,3	13,2	14,4	15,4	16,3	17,6	19,0	20,5	22,1	23,9	25,7	27,7	29,9	31,9	34,3	36,7
8,60	13,2	14,2	15,5	16,6	17,6	18,9	20,5	22,1	23,8	25,7	27,7	29,9	32,2	34,4	36,9	39,5
9,30	14,3	15,4	16,6	17,9	19,0	20,5	22,2	24,0	25,8	29,9	30,0	32,3	34,8	37,2	40,0	42,8
10,0	15,4	16,6	17,9	19,3	20,5	22,1	23,0	25,8	27,8	30,0	32,3	34,8	37,5	40,1	43,1	46,1
10,8	16,8	17,9	19,3	20,9	22,2	23,9	25,9	27,9	30,4	32,4	34,9	37,6	40,5	43,4	46,6	49,9
11,6	17,9	19,3	20,8	22,4	23,9	25,7	27,8	30,0	32,3	34,9	37,5	40,5	43,6	46,7	50,1	53,6
12,5	19,8	20,8	22,4	24,2	25,8	27,8	30,0	32,4	34,9	37,6	40,5	43,6	47,0	50,4	54,1	57,9
13,5											43,8					

Tableau de sections des conducteurs profilés avec: Tableau T10
la section en mm^2 ; a et b en mm.

Sn KVA.	30	180	600	1000	1600	2000	2500	4000	6000	10000
K _{pk.}	1,02	1,025	1,05	1,06	1,07	1,075	1,08	1,09	1,11	1,125

Tableau: T09 ; facteur de pertes supplémentaires en fonction de la puissance nominale.

Ayant fait un choix définitif de la section de nos conducteurs nous devons par conséquent calculer la densité réelle de courant.

$$J_{r1} = \frac{I_{f1}}{S_{w1arr.}} = \frac{577,31}{5 \times 43,8} = 2,64 \text{ A/mm}^2$$

Nous remarquons que la différence entre la densité moyenne et la densité réelle n'excède pas 5% ; tolérance acceptée par les normes internationales (3% dans notre cas.).

En prenant en considération l'isolation des conducteurs on aura les dimensions suivantes.

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

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

δ_{is} : étant l'épaisseur de l'isolation réalisée avec deux rubans de 0,05mm enroulés avec recouvrement de 1/2 ce qui donne : $2 \times 2 \times 0,05 = 0,20 \text{ mm}$. Et un (1) ruban de 0,12mm enroulé sans recouvrement.

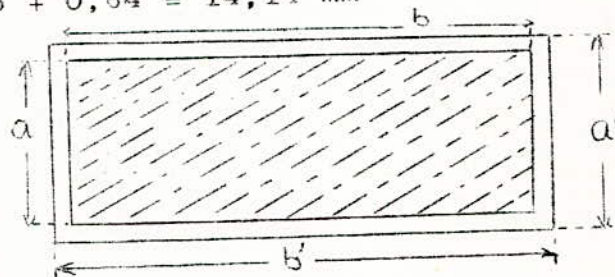
$$\delta_{is} = (0,20 + 0,12 \text{ mm}) \times 2 = 0,64 \text{ mm}$$

d'où l'on a :

$$a' = 0,64 + 3,28 = 3,92 \text{ mm}$$

$$b' = 13,5 + 0,64 = 14,14 \text{ mm}$$

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



Dimensions géométriques de la bobine Basse Tension

Hauteur de la bobine.

Elle s'obtient d'après la relation suivante :

$$H_b = (W_1 + 1) H_{sp} + (W_{e1} - 1) H_c + 10$$

$H_c = 4 \text{ à } 6 \text{ mm}$: représente la hauteur du canal de refroidissement, utilisé aussi pour la transposition des conducteurs. Dans notre cas on prendra : 4mm.

D'après le tableau TIO on a W_{e1} qui a pour valeur cinq (5).

H_{sp} : hauteur de la spire

$H_{sp} = b'$ dans notre cas.

$$\text{d'où : } H_b = (29+1) \times 14,14 + (5-1) \times 4 + 10$$

$$H_b = 45,02 \text{ cm.}$$

Vue que l'on adopte la disposition à plat des conducteurs ce qui augmente la stabilité mécanique et facilite le travail du bobineur.

Épaisseur de la bobine

$$a'_1 = 5 a' = 5 \times 3,92 = 19,6 \text{ mm.}$$

Diamètre du canal de fuite recalculé.

$$\begin{aligned} D_{12r} &= D + 2 a_{10} + 2 a'_1 + a_{12} \\ &= 18,14 + 2 \times 0,5 + 2 \times 1,96 + 1 = 24,06 \text{ cm.} \end{aligned}$$

Coefficient de sveltesse recalculé

$$\beta_r = \frac{\pi \cdot D_{12r}}{H_b} = \frac{\pi \cdot 24,06}{45,02} = 1,68$$

L'erreur relative sur le coefficient de sveltesse sera :

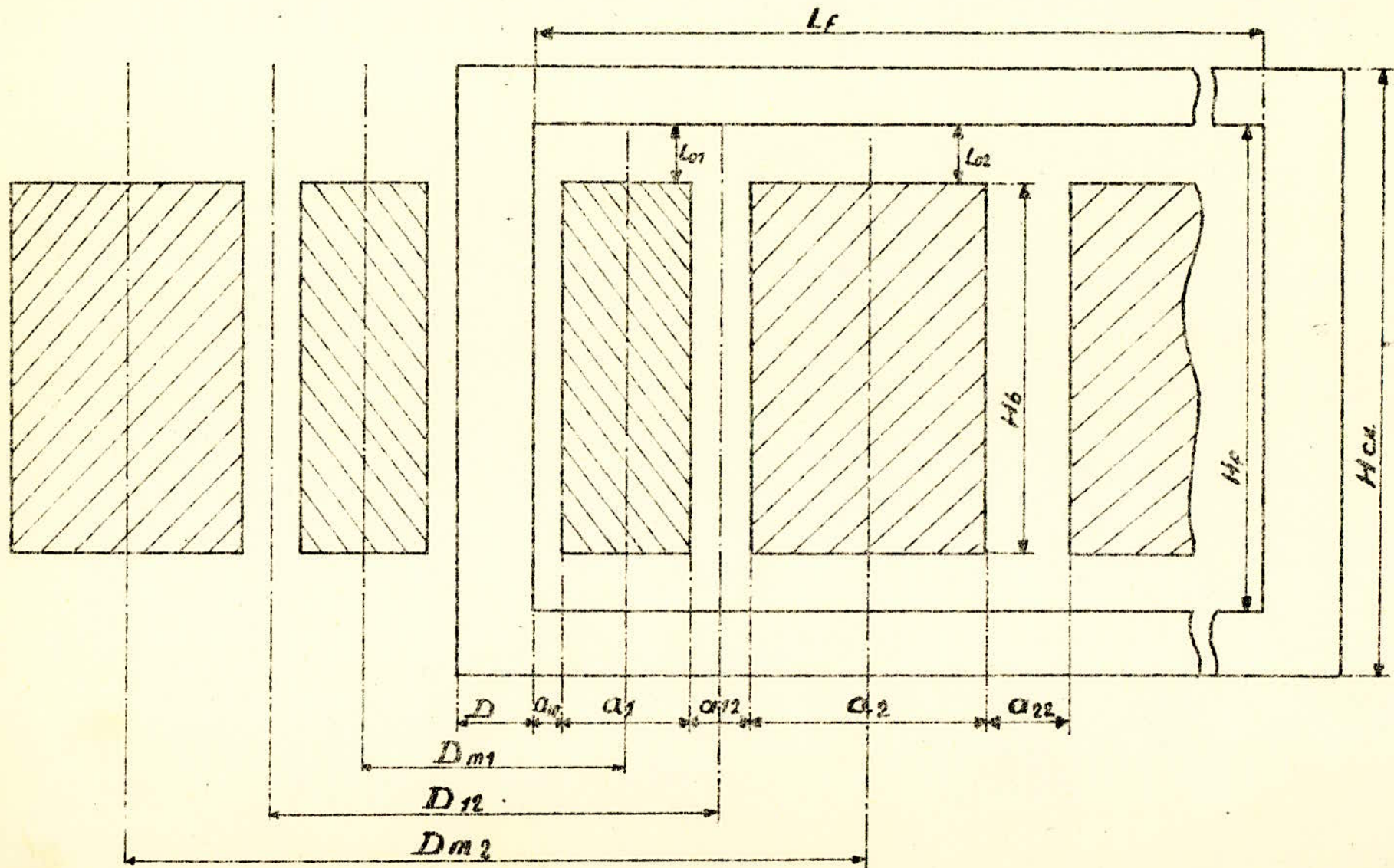
$$\frac{\Delta \beta}{\beta} = \frac{1,8 - 1,68}{1,68} \cdot 100 = 3$$

On signalera que l'erreur acceptée par rapport à la valeur choisie au préalable doit être inférieure à 20% .

Enroulement haute tension.

Il se trouve en liaison directe avec celui de la basse tension
Détermination de la section des conducteurs.

$$S_{w2} = \frac{I_{f2}}{J_m} = \frac{13,33}{2,71} = 4,92 \text{ mm}^2$$



Le tableau T12 donnant les sections standards des conducteurs et les diamètres correspondant: nous permet de choisir comme section de notre conducteur circulaire pour cet enroulement

$$S_{w_{2arr.}} = 4,909 \text{ mm}^2$$

section à laquelle correspond le diamètre du conducteur suivant:

$$d = 2,5 \text{ mm.}$$

De la même manière que pour le côté basse tension, ayant fait une légère approximation sur la section, il s'avère nécessaire de faire une vérification de la densité de courant.

$$J_{2r} = \frac{I_{f2}}{S_{w_{2arr.}}} = \frac{13,33}{4,909} = 2,72 \text{ A/mm}^2$$

Nous constatons que la valeur de la densité de courant recalculée n'est guère différente de sa valeur moyenne.

Détermination des spires haute tension.

Connaissant la relation qui lie le rapport des tensions au rapport du nombre de spires. Alors, pour le côté haute tension on aura le nombre de spires suivant:

$$W_2 = W_{1arr.} \frac{U_2}{U_1} = \frac{29 \times 10^4}{230,95} = 1255,68 \text{ spires}$$

Sachant

$$W_{2arr.} = 1256 \text{ spires.}$$

Sachant que l'on doit permettre un réglage de la tension à $\pm 5\%$. On doit par conséquent déterminer le nombre de spires total de l'enroulement.

$$W'_2 = 1,05 \times W_{2arr.} = 1,05 \times 1256 = 1318 \text{ spires}$$

$$W''_2 = 0,95 \times W_{2arr.} = 0,95 \times 1256 = 1193 \text{ spires}$$

Il est souvent conseillé de placer les spires de réglage à la dernière couche pour faciliter le montage et la commutation des spires de même que la diminution de l'isolation.

\emptyset mm.	S mm ²	g ₁ 10 ⁻³ mm.	g ₂ 10 ⁻³	g ₃ 10 ⁻³	\emptyset mm.	S mm ²	g ₁ 10 ⁻³ mm.	g ₂ 10 ⁻³	g ₃ 10 ⁻³
0,1	0,00785	9	10	26	1,32	1,365	39	64	90
0,125	0,01225	11	21	31	1,4	1,539	40	65	92
0,14	0,01539	12	23	33	1,5	1,767	41	66	93
0,16	0,02011	13	24	36	1,6	2,011	41	67	95
0,18	0,02545	14	26	39	1,7	2,270	42	68	96
0,2	0,03142	15	28	43	1,8	2,545	43	70	98
0,25	0,04909	16	30	47	1,9	2,835	44	71	99
0,355	0,09902	19	36	55	2,0	3,142	45	72	100
0,4	0,1257	21	37	57	2,12	3,598	46	73	102
0,45	0,1590	23	40	61	2,24	3,922	47	74	104
0,5	0,1964	25	43	64	2,3	4,155			
0,56	0,2475	27	45	66	2,36	4,480	47	75	104
0,63	0,3102	28	48	70	2,5	4,909	48	76	106
0,71	0,3945	30	50	73	2,65	5,498	49	77	107
0,75	0,4418	31	51	74	2,8	6,158	50	79	110
0,80	0,5027	32	53	77	3,0	7,069	51	80	112
0,85	0,5675	33	54	78	3,15	7,76	52	81	112
0,9	0,6362	33	56	81	3,35	8,835	53	82	114
0,95	0,7088	34	57	81	3,55	9,895	54	84	116
1,0	0,7854	35	58	83	3,75	11,02	55	85	117
1,06	0,988	36	59	84	4,0	12,57	56	87	120
1,12	0,988	37	61	86	4,25	14,12	57	87	121
1,18	1,0875	37	62	87	4,5	15,85	58	89	123
1,25	1,227	38	62	88					

Tableau T12 . des conducteurs de sections circulaire utilisé dans la construction des machines électrique. D'après N.F.C. 31-423.

Détermination du nombre de spires de réglage

$$W_{\text{reg.}} = W_2' - W_2'' = 1318 - 1193 = 125 \text{ spires}$$

Il faudra par conséquent trouver un compromis dans la répartition des spires par couche de façon à pouvoir avoir les spires de réglage dans les deux dernières couches. Et ce de façon à pouvoir placer les spires de réglage sans créer un problème d'isolation supplémentaire.

Avant de continuer à dimensionner notre transformateur. Il est bon de voir si le rapport de transformation reste toujours respecté avec les légères approximations faites sur le nombre de spires du côté basse tension et celle du côté haute tension.

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{0,23095}{10} = 0,023095 = k_1$$

$$\frac{W_{1\text{arr.}}}{W_{2\text{arr.}}} = \frac{29}{1256} = 0,023089 = k_2$$

$$k_{\text{f}} = k_1 = k_2 = 0,023$$

Dimensionnement géométrique de la bobine haute tension.

Hauteur de la bobine.

$$Hb_2 = d' (W_s + 1) + 0,5$$

$$\text{avec } d' = d + \delta_{is} = 2,5 + 0,3 = 2,8 \text{ mm}$$

$$W_s = \frac{Hb_1 - \alpha}{d'} = \frac{45,02 - 0,78}{0,28} = 158 \text{ sp}$$

$$Hb_2 = 0,28 (158 + 1) + 0,5 = 45,02 \text{ cm.}$$

Avec W_s : le nombre de spires approximatif d'une couche.

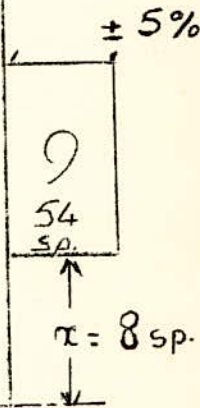
Détermination du nombre de couches.

$$W_{sc} = \frac{W'_2}{W_s} = \frac{1318}{158} = 8,34 \text{ sp.}$$

On choisira neuf (9) couches qui seront réparties de la manière suivante.

- Les huit (8) premières se composeront de 158 spires chacune
- La dernière couche , soit la neuvième , de 54 spires.

<u>1</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>4</u>	<u>5</u>	<u>6</u>	<u>7</u>	<u>8</u>	<u>9</u>
158	158	158	158	158	158	158	158	54
sp.	sp.	sp.	sp.	sp.	sp.	sp.	sp.	sp.

$\pm 5\%$


 $\pi = 8 \text{ sp.}$

Schéma de répartition des couches.

Nous signalerons que l'isolation entre couches δ_s est choisie d'après la tension entre deux couches.

Calcul de la tension entre deux couches.

$$U_{sp2c} = \frac{U_f}{W_2} = \frac{10\ 000}{1256} = 7,96 \text{ V.}$$

$$2 \times U_{sp2c} \cdot W_s = U = 2 \times 7,96 \times 158 = 2,52 \text{ V:}$$

En fonction de cette valeur, le tableau T14 nous donne :

$$\delta_s = 0,48 \text{ mm.}$$

Epaisseur de la bobine haute tension.

$$a_2 = d' \cdot W_{sc} + \delta_s (W_{sc} + 1) + \delta_c$$

δ_c : paramètre qui tient compte de l'épaisseur des canaux de refroidissement. Lorsque l'on a plusieurs couches il vari

il varie de quatre (4) à douze (12) mm..

$a_2 = 2,8 \times 9 + 0,48 (9 - 1) + 5 = 3,404 \text{ cm.}$
soit avec un choix de 5mm. pour δ_c

Épaisseur du canal de fuite.

$$\begin{aligned} a_r &= a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3} \\ &= 1 + \frac{3,404 + 1,96}{3} = 2,788 \text{ cm.} \end{aligned}$$

cCalcul du coefficient de rogowski

IL se calcul à l'aide dell'expression suivante:

$$\begin{aligned} K_{Rr} &= 1 - \frac{1}{2 \pi} \cdot \frac{2 \times a_{12} + a_1 + a_2}{Hb_2} \\ &= 1 - \frac{1}{2 \pi} \cdot \frac{2 \times 1 + 3,404 + 1,96}{45,02} \end{aligned}$$

$$K_{Rr} = 0,97$$

Détermination de la tension de court circuit/:

Après le calcul définitif des différents paramètres, nous pouvons procéder à la vérification de la tension de court-circuit à l'aide de l'expression suivante:

$$\begin{aligned} U_{kr} &= \frac{2 \cdot \pi \cdot F \cdot \rho_o \cdot W_1^2 \cdot a_r \cdot \beta_r \cdot K_{Rr} \cdot I_{f1}}{U_{f1}} \\ U_{kr} &= \frac{0,97 \cdot 1,68 \cdot 2 \cdot 50,4 \cdot 10^{-7} \cdot (29)^2 \cdot 2,79 \cdot 577,31}{230,95} \end{aligned}$$

ce qui donne: $U_{kr} = 3,77\%$

d'autre part on sait que :

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

d'où l'on peut déduire la valeur de U_k qui sera:

Sn kVA	10	20	30	50	75	100	125	160	200
Usp.	1,2 à 1,6	1,6 à 2	2 à 2,5	2,6 à 3	3,2 à 3,7	3,7 à 4,3	4,3 à 4,8	5 à 5,5	5,5 à 6,2
Sn kVA	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600
Usp. kVA	6,5 à 7	7 à 7,5	7,5 à 8	8 à 9	9 à 10	10 à 12	12 à 14	13 à 16	15 à 17
Sn kVA	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000	
Usp.	16 à 20	18 à 23	21 à 26	26 à 30	30 à 34	34 à 38	40 à 44	46 à 54	

Tableau T08 : Tension de spire en fonction de la puissance nominale.

U entre 2 couches	≤ 1	1 ÷ 2	2 ÷ 3	3 ÷ 3,5	3,5 ÷ 4	4 ÷ 4,5	4,5 ÷ 5
δ_s	0,24	0,36	0,48	0,6	0,72	0,84	0,96

Tableau T14 : Isolation entre couche en fonction de la tension entre deux couches.

Un KV.	5	10	20	30
a_{22} Cm.	1	1,4	1,7	2 à 3
L_{02} Cm.	2 à 3	3 à 5	5	6 à 7,5

Tableau T13 : Distance séparant deux bobines H.T. en fonction de la tension nominale.

$$U_k = \sqrt{(1,15)^2 + (3,77)^2}$$

$$U_k = 3,941 \%$$

Calcul de l'incertitude relative:

$$\frac{\Delta U_k}{U_k} = \frac{4 - 3,941}{3,941} = 1,49\%$$

Nous constatons que la valeur de la tension de court-circuit calculée est acceptable vue les normes internationales prévoient une variation de 5% par rapport à celle imposée par le cahier de charges.

On signalera que c'est qu'à partir de ce stade de calcul que l'on peut rentrer dans la phase de calcul définitif du transformateur.

CALCUL des PARAMETRES des ENROULEMENTS

Enroulement basse tension.

Par paramètres des enroulements, on entend surtout la résistance et le poids de l'enroulement. Compte tenu des différentes composantes calculées précédemment et de la figure il nous sera possible de calculer le diamètre moyen de l'enroulement basse tension: Dm_1 .

$$\begin{aligned} Dm_1 &= D + 2 \times a_{10} + a_1 \\ &= 18,14 + 2 \times 0,5 + 1,96 \end{aligned}$$

$$Dm_1 = 21,10 \text{ cm.}$$

Longueur moyenne de la spire.

$$\begin{aligned} Lw_1 &= \pi \cdot Dm_1 \\ &= \pi \cdot 21,10 = 66,29 \text{ cm.} \end{aligned}$$

Longueur totale du conducteur.

$$Lt_1 = W_{1arr.} \cdot Lw_1 = 29 \times 66,29 = 1922,4 \text{ cm.}$$

Longueur de conducteur servant aux connexions

$$L_{co1} = 7,5.Hb$$

$$= 7,5 \times 45,02 = 337,65 \text{ cm.}$$

Section des connexions.

$$S_{wco} = S_{w1} \text{ pour la connexion en étoile.}$$

$$S_{wco} = 5 \times 43,8 = 219 \text{ mm}^2$$

Calcul des résistances en courant continu.

$$R = \frac{L \cdot \rho}{S_w} \quad \begin{array}{l} \rho : \Omega \text{ mm}^2/\text{m.} \\ S_w : \text{mm}^2 \end{array}$$

Résistance du conducteur.

$$R_1 = \rho \frac{L_{t1}}{S_{w1}} = \frac{0,0216 \cdot 19,22}{5 \cdot 43,8}$$

$$R_1 = 1,896 \cdot 10^{-3} \Omega$$

Résistance des connexions.

$$R_{co1} = \rho \frac{L_{co1}}{S_{wco}} = \frac{0,0216 \cdot 3,3765}{5 \cdot 43,8}$$

$$R_{co1} = 3,33 \cdot 10^{-4} \Omega$$

Poids du matériel actif.

Il est donné par la relation suivante:

$$G = \gamma \cdot V = \gamma \cdot L_t \cdot S_w \cdot 10^{-3}$$

γ : poids spécifique en Kg/dm^3

$$\gamma = \begin{cases} 2,7 \text{ Kg}/\text{dm}^3 & \text{pour les conducteurs en Al.} \\ 8,9 \text{ Kg}/\text{dm}^3 & \text{pour les conducteurs en Cu.} \end{cases}$$

avec : L_t en mètres et S_w en mm^2 .

d'où les calculs suivants:

Poids des conducteurs

$$\begin{aligned}g_1 &= \gamma \cdot Lt_1 \cdot Sw_1 \cdot 10^{-3} \\ &= 8,9 \times 19,224 \times 5 \times 43,8 \times 10^{-3} \\ g_1 &= 37,47 \text{ Kg.}\end{aligned}$$

Poids des conducteurs de connexion.

$$\begin{aligned}g_2 &= \gamma \cdot Lco_1 \cdot Swco \cdot 10^{-3} \\ g_2 &= 8,9 \times 3,377 \times 5 \times 43,8 \times 10^{-3} \\ g_2 &= 6,58 \text{ Kg.}\end{aligned}$$

Ces calculs nous permettent de déduire le poids du matériel actif du côté basse tension.

$$G_1 = g_1 + g_2$$

$$G_1 = 37,47 + 6,58 = 44,05 \text{ Kg.}$$

Enroulement haute tension.

De la même manière que pour le côté basse tension on aura:

Diamètre moyen de la spire.

$$\begin{aligned}Dm_2 &= 2 \cdot a_{10} + 2 \cdot a_{12} + 2 \cdot a_1 + a_2 + D \\ Dm_2 &= 2 \times 0,5 + 2 \times 1 + 2 \times 1,96 + 3,404 + 18,14 \\ Dm_2 &= 28,47 \text{ cm.}\end{aligned}$$

Longueur moyenne de la spire.

$$\begin{aligned}Lw_2 &= \pi \cdot Dm_2 \\ Lw_2 &= \pi \times 28,47 = 89,44 \text{ cm.}\end{aligned}$$

Longueur totale du conducteur.

$$Lt_2 = Lw_2 \cdot W_2' = 0,894 \times 1318 = 1178,834 \text{ m.}$$

Longueur du conducteur servant aux connexions.

$$L_{co2} = 14 \cdot H_b \quad ; \text{étant en couplage triangle.}$$

$$L_{co2} = 14 \times 45,02 \cdot 10^{-2} = 6,303\text{m.}$$

Section des connexions.

$$S_{wco2} = \sqrt{3} \cdot S_{w2arr.} \quad ; \text{ceci pour le cas du couplage triangle.}$$

$$S_{wco2} = \sqrt{3} \times 4,909 = 8,503 \text{ mm}^2$$

Calcul des différentes résistances en courant continu.

Résistance du conducteur.

$$R_2 = \rho \cdot \frac{L_{t2}}{S_{w2arr.}}$$

$$R_2 = \frac{0,0216 \times 1178,834}{4,909} = 5,187 \Omega$$

Résistance des connexions.

$$R_{co2} = \rho \cdot \frac{L_{co2}}{S_{wco2}}$$

$$R_{co2} = \frac{0,0216 \times 6,303}{\sqrt{3} \times 4,909} = 16 \cdot 10^{-3} \Omega$$

De la même façon que pour le côté basse tension, on déterminera le poids du matériel actif.

Poids des conducteurs.

$$g'_1 = \gamma \cdot L_{t2} \cdot S_{w2arr.} \cdot 10^{-3}$$

$$g'_1 = 8,9 \times 1178,834 \times 4,909 \times 10^{-3}$$

$$g'_1 = 51,5 \text{ Kg.}$$

Poids des connexions.

$$g'_2 = \gamma \cdot L_{co2} \cdot S_{wco2} \cdot 10^{-3}$$

$$g_2' = 8,9 \times \sqrt{3} \cdot 4,909 \times 6,303 \times 10^{-3}$$

$$g_2' = 0,477 \text{Kg.}$$

Poids des conducteurs actifs du côté haute tension

$$G_2 = g_1' + g_2'$$

$$G_2 = 51,5 + 0,477 = 51,98 \text{Kg.}$$

Poids total du matériel actif (côté basse tension et haute tens.)

Nous rappelons que tout notre calcul se rapporte à une colonne et comme on est dans le cas d'un transformateur triphasé par conséquent trois (3) colonnes, on aura:

$$G_t = 3 (G_1 + G_2)$$

$$G_t = 3 (51,98 + 44,05) = 288,09 \text{Kg.}$$

ooOoo

CALCUL DEFINITIF DU CIRCUIT MAGNETIQUE.

Le circuit magnétique sera entièrement défini que lorsque l'on connaîtra les dimensions de:

- la fenêtre
 - la culasse
 - la hauteur totale
- et enfin son poids.

Hauteur de la fenêtre voir fig.

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

H_f : hauteur de la fenêtre ou distance entre les 2 culasses

L_{o2} : espace, entre la bobine et la culasse, qui dépend de la tension la plus élevée. Le tableau T13 nous permet de prendre pour valeur de L_{o2} : 4 cm.

d'où l'on a :

$$H_f = 45,02 + 2 \times 4 = 53,02 \text{ cm.}$$

Longueur de la fenêtre

$$L_f = 2 (\textcircled{0}_{10} + \textcircled{0}_1 + \textcircled{0}_2 + \textcircled{0}_{12}) + \textcircled{0}_{22}$$

$\textcircled{0}_{22}$: distance séparant deux bobines de haute tension; elle est fonction de la tension nominale et nous est donnée par le tableau T13.

$$\textcircled{0}_{22} = 1,4 \text{ cm.}$$

d'où:

$$L_f = 2 (0,5 + 1,96 + 3,40 + 1) + 1,4$$

$$L_f = 15,12 \text{ cm.}$$

Longueur entre axe de deux colonnes.

$$L_{ac} = L_f + D$$

$$L_{ac} = 15,12 + 18,14 = 33,26 \text{ cm.}$$

Section de la culasse.

Il est bon de signaler que la section de la culasse doit être quinze (15) à vingt (20) pourcent plus grande que la section de la colonne et ce afin de diminuer au maximum la dissymétrie magnétique due à la distribution linéaire des colonnes. On choisira arbitrairement dans notre cas 15%.

$$S_{cu.} = 1,15 \cdot S_{fec}$$

$$S_{cu.} = 1,15 \times 224,87 = 258,6 \text{ cm}^2$$

Induction magnétique dans la culasse.

En utilisant la loi de conservation des flux; on aura:

$$B_{cu.} \times S_{cu.} = S_{fec.} \times B_{cr.}$$

$$B_{cu.} = \frac{S_{fec} \times B_{cr.}}{S_{cu.}} = \frac{B_{cr.}}{1,15}$$

$$B_{cu} = \frac{1,594}{1,15} = 1,386 \text{ Tesla}$$

Dimensionnement de la culasse .

Nous choisirons une culasse de section rectangulaire. Sa largeur doit être égale à la largeur la plus grande du noyau.



Nous savons par ailleurs que notre Colonne est formée de six (6) gradins. Il faudra par conséquent déterminer les dimensions de nos six gradins .

Longueur des différents gradins.

$$Lg_1 = 0,96 \cdot D = 0,96 \times 18,141 = 17,42 \text{ cm.}$$

$$Lg_2 = 0,885 \cdot D = 0,885 \times 18,141 = 16,06 \text{ cm.}$$

$$Lg_3 = 0,775 \cdot D = 0,775 \times 18,141 = 14,06 \text{ cm.}$$

$$Lg_4 = 0,631 \cdot D = 0,631 \times 18,141 = 11,45 \text{ cm.}$$

$$Lg_5 = 0,465 \cdot D = 0,465 \times 18,141 = 8,44 \text{ cm.}$$

$$Lg_6 = 0,28 \cdot D = 0,28 \times 18,141 = 5,08 \text{ cm.}$$

Avec $D = 18,141 \text{ cm.}$

Hauteur des différents gradins.

Elle sera déterminée grâce à la relation suivante :

$$H_{g_i} = \sqrt{D^2 - L_{g_i}^2} \quad \text{avec : } i = 1 \quad 6$$

$$H_{g_1} = \sqrt{D^2 - L_{g_1}^2} = \sqrt{(18,141)^2 - (17,42)^2} = 5,08 \text{ cm.}$$

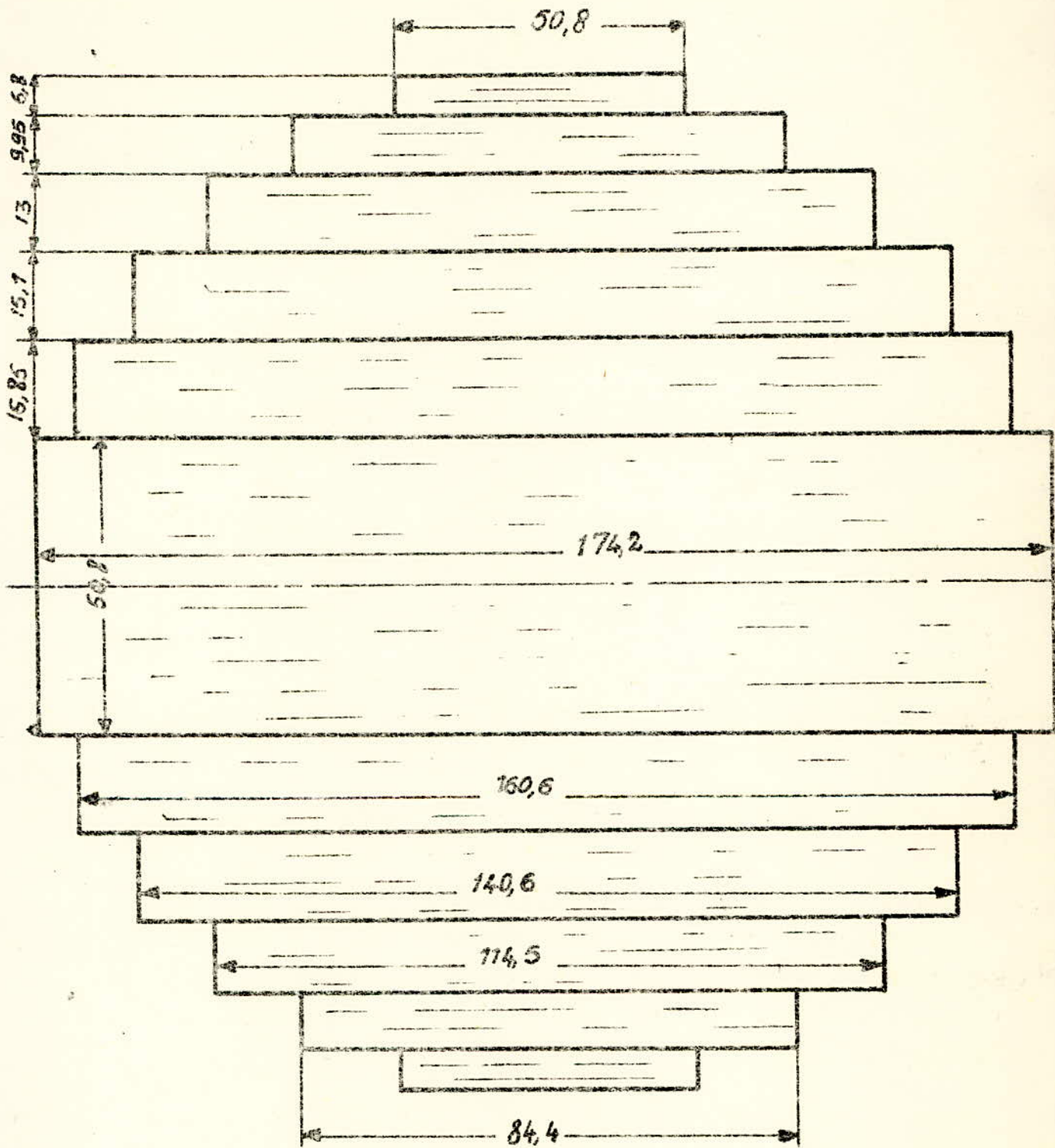
$$H_{g_2} = \sqrt{D^2 - L_{g_2}^2} = \sqrt{(18,141)^2 - (16,06)^2} = 8,45 \text{ cm.}$$

$$H_{g_3} = \sqrt{D^2 - L_{g_3}^2} = \sqrt{(18,141)^2 - (14,06)^2} = 11,47 \text{ cm.}$$

$$H_{g_4} = \sqrt{D^2 - L_{g_4}^2} = \sqrt{(18,141)^2 - (11,45)^2} = 14,07 \text{ cm.}$$

$$H_{g_5} = \sqrt{D^2 - L_{g_5}^2} = \sqrt{(18,141)^2 - (8,44)^2} = 16,06 \text{ cm.}$$

$$H_{g_6} = \sqrt{D^2 - L_{g_6}^2} = \sqrt{(18,141)^2 - (5,08)^2} = 17,42 \text{ cm.}$$



SECTION DE LA COLONNE Ech. 1

Largeur de la culasse.

$$L_{cu.} = L_{g_1} = 17,42 \text{ cm.}$$

De là nous déduirons la hauteur de la culasse.

$$H_{cu.} = \frac{S_{cu.}}{L_{cu.}} = \frac{258,6}{17,42} = 14,85 \text{ cm.}$$

Ayant les hauteurs respectivement de la culasse et de la colonne; nous pouvons déduire la hauteur du circuit magnétique

Hauteur du circuit magnétique.

$$H_{cm} = H_f + 2 \times H_{cu.}$$

$$H_{cm.} = 53,02 + 2 \times 14,85 = 82,72 \text{ cm.}$$

Poids du circuit magnétique

Nous savons que le circuit magnétique se comporte de plusieurs parties. Il est donc préférable de calculer séparément le poids de chacune d'elles et d'en déduire le poids du circuit magnétique.

Poids de la colonne.

$$G_{col} = 3 \cdot \gamma_2 \cdot H_{col} \cdot S_{col}$$

Le coefficient " 3 " vient du fait que l'on a trois colonnes.

$$\gamma_2 = 7,6 \text{ KG./dm}^3$$

d'où:

$$G_{col} = 3 \times 7,6 \times 53,02 \times 224,87 \cdot 10^{-3}$$

$$G_{col} = 273,624 \text{ Kg.}$$

Poids de la culasse.

$$G_{cu.} = 4 \cdot \gamma_2 \cdot H_{cu.} \cdot S_{cu.}$$

$$G_{Cu.} = 4 \times 7,65 \times 14,85 \times 258,6 \cdot 10^{-3}$$

$$G_{Cu.} = 117,5 \text{ Kg.}$$

Poids des coins.

$$G_{Coi} = 6 \cdot \gamma_2 \cdot S_{Coi} \cdot D.$$

$$G_{Coi} = 6 \cdot 7,65 \cdot 18,141 \cdot 258,6^{-3}$$

$$G_{Coi} = 215,047 \text{ Kg.}$$

De tous ces calculs on peut enfin deduire la valeur du poids du circuit magnétique.

$$G_{cm.} = G_{Cu.} + G_{Coi} + G_{Coi}$$

$$G_{cm.} = 117,5 + 273,624 + 215,047$$

$$G_{cm.} = 606,17 \text{ Kg.}$$

CALCUL DES PERTES.

Dans tout appareil électrique, une partie de la puissance reçue est dissipée dans le milieu ambiant sous forme de pertes joules et de pertes fer. Ces pertes affectent deux grandeurs d'exploitation qui sont très importantes, entre autre le rendement et l'échauffement de l'appareil.

Enroulement basse tension.

Pertes joules.

-Enroulement.

$$P_{je1} = m R_1 I_{f1}^2$$

$$= 3 \times 1,896 \cdot 10^{-3} \times (577,31)^2$$

$$P_{je1} = 1895,74 \text{ W.}$$

- Connexions

Pertes dues à la résistance des conducteurs qui relient les différentes phases du transformateur.

$$P_{jc1} = R_{co} \cdot I_{f1}^2$$

$$= 3,33 \cdot 10^{-3} \times (577,31)^2$$

$$P_{jc1} = 110,98 \text{ W}$$

- Supplémentaires

Elles sont dues spécialement à l'effet pelliculaire.

$$P_{sup1} = (K_{mr1} - 1) \cdot m \cdot R_1 \cdot I_{f1}^2$$

$$\text{avec : } K_{mr1} = 1 + \frac{m^2 - 0,2}{9} (\alpha Q)^4$$

m : nombre de couches

Q : largeur du conducteur nu

K_{mr} : Coefficient de majoration de la résistance en courant alternatif.

$$\alpha = \sqrt{\frac{n \cdot b \cdot w \cdot \mu_0}{H_f \cdot 2 \cdot \rho}}$$

n : nombre de conducteurs par couche

b : longueur du conducteur nu

$$\alpha = \sqrt{\frac{29 \cdot 13,5 \cdot 4 \cdot 10^{-7} \cdot 2 \cdot 50}{530,2 \cdot 2 \cdot 2,16 \cdot 10^{-8}}} = 82,15 \text{ m}^{-1}$$

$$(\alpha Q)^4 = (82,15 \times 3,28 \cdot 10^{-3})^4 = (0,2695)^4$$

$$K_{mr1} = 1 + \frac{(5)^2 - 0,2}{9} (0,2695)^4 = 1,01453$$

d'où les pertes supplémentaires.

$$P_{sup1} = (1,01453 - 1) \times 3 \times 1,896 \cdot 10^{-3} \cdot (577,31)^2$$

$$P_{sup1} = 27,54 \text{ W.}$$

Enroulement haute tension.

- Enroulement.

$$\begin{aligned} P_{je2} &= m \cdot R_2 \cdot I_{f2}^2 \\ &= 3 \times 5,187 \times (13,33)^2 \\ P_{je2} &= 2765,02 \text{ W.} \end{aligned}$$

- Connexions.

$$\begin{aligned} P_{jc2} &= R_{c2} \cdot I_{f2}^2 \\ &= 16 \cdot 10^{-3} \times (13,33)^2 \\ P_{jc2} &= 2,843 \text{ W.} \end{aligned}$$

- Supplémentaires.

$$\begin{aligned} P_{sup2} &= (K_{mr2} - 1) \cdot m \cdot R_2 \cdot I_{f2}^2 \\ K_{mr2} &= 1 + \frac{m^2 - 0,2}{15,25} (\alpha d)^4 \end{aligned}$$

d : diamètre du conducteur nu.

$$\alpha = \sqrt{\frac{n \cdot d \cdot w \cdot \mu_0}{2 \cdot H_f \cdot \rho}}$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{158 \cdot 2,5 \cdot 2 \cdot 50 \cdot 4 \cdot 10^{-7}}{2 \cdot 530,2 \cdot 2,16 \cdot 10^{-8}}} = 82,512$$

$$(\alpha d)^4 = (82,512 \times 2,5 \cdot 10^{-3})^4 = 1,81 \cdot 10^{-3}$$

$$K_{mr2} = 1 + \frac{9^2 - 0,2}{15,25} \cdot 1,8106 \cdot 10^{-3}$$

$$K_{mr2} = 1,009593$$

d'où :

$$P_{sup2} = (1,009593 - 1) \cdot 3 \cdot 5,187 \cdot (13,33)^2$$

$$P_{\text{sup}2} = 26,525 \text{ W.}$$

Pertes totales dues à la charge.

$$P_k = K_{pk} (P_{\text{cu}1} + P_{\text{cu}2})$$

$P_{\text{cu}1}$: pertes cuivre dans le côté basse tension.

$P_{\text{cu}2}$: pertes cuivre dans le côté haute tension.

avec:

$$\begin{aligned} P_{\text{cu}1} &= P_{\text{je}1} + P_{\text{jci}} + P_{\text{sup}1} \\ &= 1895,74 + 110,98 + 27,545 \end{aligned}$$

$$P_{\text{cu}1} = 2034,265 \text{ W.}$$

$$\begin{aligned} P_{\text{cu}2} &= P_{\text{je}2} + P_{\text{j}c2} + P_{\text{sup}2} \\ &= 2765,02 + 2,843 + 26,525 \end{aligned}$$

$$P_{\text{cu}2} = 2794,39 \text{ W.}$$

K_{pk} : facteur de pertes supplémentaires qui approxime les pertes dans les parties mécaniques. Il est fonction de la puissance par colonne et est donné par le tableau T09. On prendra dans notre cas

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

d'où :

$$P_{kr} = 1,038 (2034,265 + 2794,39)$$

$$P_{kr} = 5,012 \text{ KW.}$$

Détermination de l'erreur relative.

$$\frac{\Delta P_k}{P_k} = \frac{5,012 - 4,6}{5,012} = 9,2 \%$$

Nous constatons que c'est une valeur admise car elle n'excède pas de plus de 10 % celle donnée par le cahier de charges.

Calcul de la tension de court-circuit réelle

- Partie active.

$$U_{ka} = \frac{P_{kr}}{S_n} \cdot 100$$

$$U_{ka} = \frac{5,012}{400} \times 100 = 1,253 \%$$

- Partie réactive.

$$U_{kr} = \frac{27 f \mu_0 W_1^2 a_r K_R \beta I_{f1}}{U_{f1}}$$

$$U_{kr} = \frac{0,97.2 \quad 50.4 \quad 10^{-7} (29)^2 \quad 2,788. \quad 577,31.1,68}{230,95}$$

$$U_{kr} = 3,77 \%$$

d'où:

$$U_k = \sqrt{(3,77)^2 + (1,253)^2}$$

$$U_k = 3,973 \%$$

Calcul de l'erreur relative.

$$\frac{U_k}{U_k} = \frac{4 - 3,973}{3,973} = 0,68 \%$$

Notons que la tolérance est de cinq (5) pourcent par rapport à celle donnée par le cahier de charges.

Pertes dans le fer.

Les pertes fer dans les machines électriques se divisent d'une façon générale en deux.

- Les pertes par hystérésis qui sont dues aux frottements des cristaux lors de l'inversion de l'aimantation alternative.

- Les pertes par courant de Foucault qui sont dues à la variation du flux créant des forces électrodynamiques dans les tôles.

L'expérience montre néanmoins que les machines finies ont des pertes réelles dans le fer toujours supérieures à celles obtenues par le calcul. D'où la nécessité de prévoir leur existence dans notre calcul .

Elles sont dues généralement aux différentes pièces de serrage soit l'usinage et le montage des tôles de fer actif.

On utilisera pour notre transformateur l'Acier du type ARMACO d'épaisseur 0,55 mm. et temp. de 0°C. .

Le choix étant fait on peut donc procéder au calcul des pertes dans les différentes parties du circuit magnétique.

Pertes dans les colonnes.

$$P_{f\ col} = G_{col} \times P_{ocol}$$

P_{ocol} : pertes spécifiques correspondantes à l'induction l'induction de la colonne. Elles sont données par le graphe $P_o = f (B; f; S)$. en W/Kg.

Nous savons que la valeur de l'induction dans la colonne est de 1,594 Tesla et d'après la courbe près-citée, les pertes spécifiques auront pour valeur et ce dans le cas de la colonne tout en signalant que le même procédé sera utilisé pour les autres parties de notre circuit magnétique.

$$P_{ocol} = 1,24 \text{ W/Kg.}$$

d'où:

$$P_{f\ col} = 1,24 \times 273,624 = 339,29 \text{ W.}$$

Pertes dans la culasse.

A l'induction de 1,386 Tesla dans la culasse correspond des pertes spécifiques de 0,93 W/Kg.

Avec le poids de la culasse de : 117,5 Kg. on aura:

$$P_{f\ cu.} = P_{ocu.} \times G_{cu.}$$

$$P_{f\ cu.} = 0,93 \times 117,5 = 109,28 \text{ W.}$$

Pertes fer colonne - culasse.

De part les opérations précédentes, on aura :

$$P_{fo} = P_{fcu.} + P_{fcol.}$$

$$P_{fo} = 109,28 + 339,29 = 448,57 \text{ W.}$$

Comme les pertes supplémentaires ne peuvent être évaluées quantitativement par calcul, l'expérience a montré qu'elles peuvent être estimées à quinze , vingt pourcent des pertes principales.

Nous choisirons dans notre cas dix-huit pourcent (18%) .
Ce qui nous donne :

$$P_{so} = 0,18 \times P_{fo}$$

$$P_{so} = 0,18 \times 448,57 = 80,74 \text{ W.}$$

Pertes fer dans les coins.

Un problème important se pose quant à la valeur de l'induction dans les coins , qui représentent la zone de transition colonne - culasse. On a opté pour un compromis qui consiste à prendre pour induction dans les coins , l'induction moyenne colonne-culasse.

$$B_{coi} = \frac{B_{cu.} + B_{col}}{2} = \frac{1,386 + 1,594}{2}$$

$$B_{coi} = 1,49 \text{ Tesla.}$$

Cette valeur de l'induction nous donne la valeur des pertes spécifiques dans les coins qui sera de ; $P_{ocoi} = 1,09 \text{ W/Kg.}$
d'où l'on a :

$$P_{fcoi} = P_{ocoi} \times G_{coi}$$

$$P_{fcoi} = 1,09 \times 215,047 = 234,4 \text{ W.}$$

Dans les coins , en plus des pertes fer , existe des pertes supplémentaires dues à la distorsion du flux magnétique. Cette

valeur est estimée d'après l'expérience acquise dans le domaine de la construction des transformateurs à cinquante pourcent (50%) des pertes principales dans les coins. On aura alors:

$$P_{fcois} = P_{fcoi} \times 0,5$$

$$P_{fcois.} = 234,4 \times 0,5 = 117,2 \text{ W.}$$

Par conséquent les pertes totales dans le fer seront égales à:

$$P_o = P_{fcoi} + P_{fcois} + P_{so} + P_{fo}$$

$$P_o = 234,4 + 117,2 + 80,74 + 448,57$$

$$P_o = 880,91 \text{ Watts}$$

CALCUL DU RENDEMENT/

Le rendement d'un transformateur fonctionnant sous une tension primaire constante est maximum lorsque les pertes dans le fer sont égales à celles dans cuivre, les premières étant constantes et les secondes, variables avec la charge. Lorsque le transformateur est destiné à fonctionner en régime normal de pleine charge que pendant un temps très court, tandis qu'il reste sous tension d'une façon continue, il y a intérêt à réduire les pertes à vide ; Tel est notre cas.

Le rendement d'un transformateur ou de toute autre machine électrique est d'une façon générale, le résultat en pourcent du rapport de la puissance utile de celui-ci et de sa puissance absorbée, laquelle est égale à la puissance utile augmentée de la somme des différentes pertes.

Le rendement représente un critère de choix très important pour l'achat d'un appareil électrique.

$$\eta \% = \frac{P_2}{P_1}$$

P_2 : puissance utile ou puissance fournie.

P_1 : puissance absorbée

$$P_1 = P_0 + P_2 + P_{cu}$$

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

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

avec:

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

$$\alpha = \frac{I}{I_{cc}} : \text{étant défini comme coefficient de charge.}$$

$$P_k = R I_{cc}^2 \quad \text{ce qui entraîne : } P_{cu} = \alpha^2 \cdot P_k$$

d'où l'on aura :

$$P_2 = (S_n \cos \phi) \alpha$$

On déterminera alors le rendement par la relation suivante:

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

De part la relation précédente nous pouvons constater que le rendement sera maximum lorsque : $P_0 = P_k \cdot \alpha^2$

De ce fait on pourra déterminer le coefficient de charge.

$$P_0 = P_k \cdot \alpha^2 = 880,91 \text{ W.}$$

$$P_k = 5012,1 \text{ W.}$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{P_0}{P_k}} = \sqrt{\frac{880,91}{5012,1}} = 0,42$$

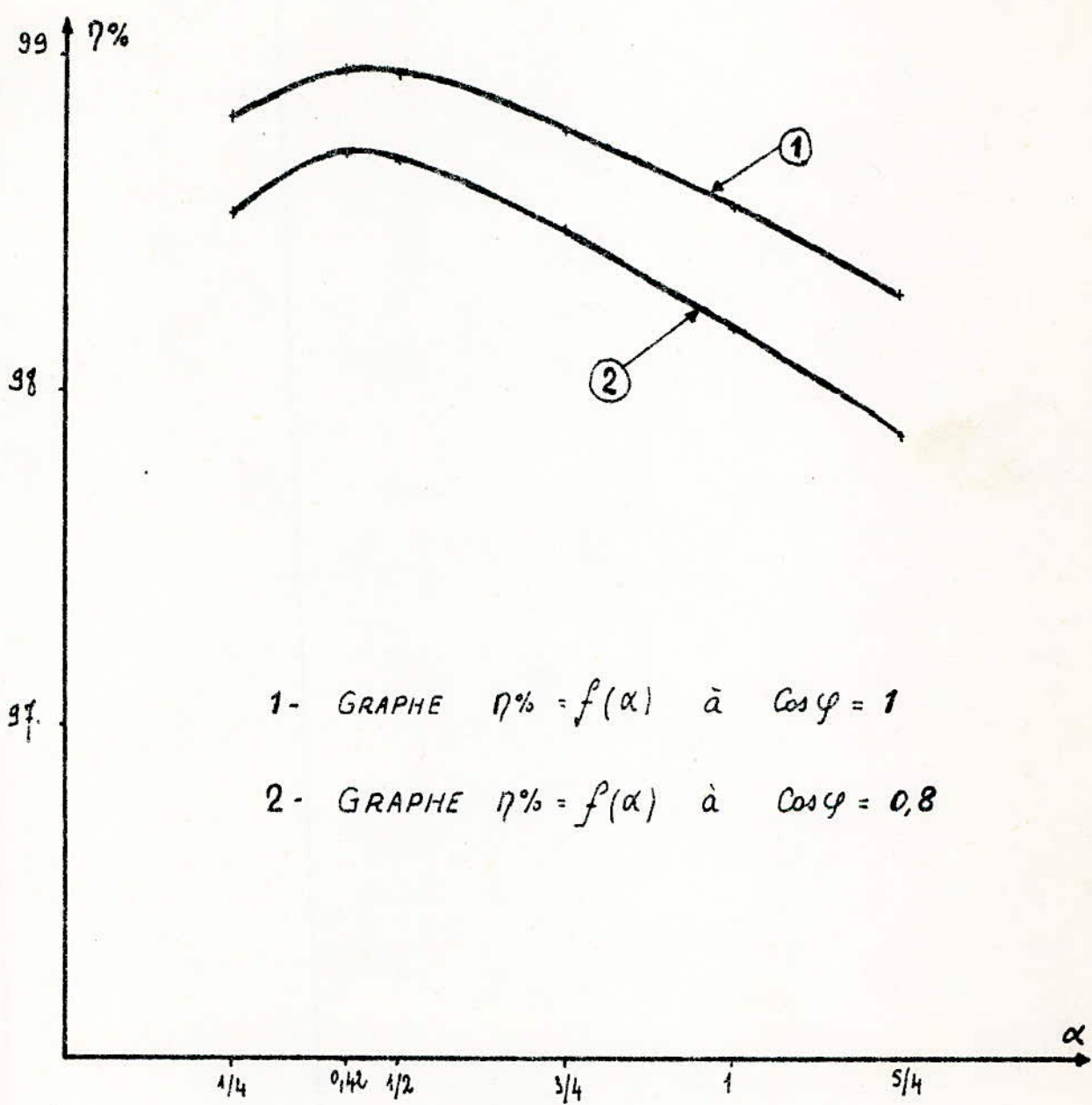
Après le calcul des différentes composantes du rendement, on se proposera de déterminer les caractéristiques du rendement suivante

1°)- Caractéristique du rendement en fonction du coefficient de charge : $\eta = f(\alpha)$, dans le cas d'une charge résistive soit à $\cos \phi = 1$.

α	$\alpha^2 P_k$	$P_o + \alpha^2 P_k$	$\alpha S_n \cos \phi$	$\alpha S_n \cos \phi + P_o + \alpha^2 P_k$	$\eta \%$
1/4	0,71	1,19	100	101,19	98,82
0,42	0,88	1,76	168	169,76	98,96
1/2	1,25	2,13	200	202,13	98,95
3/4	2,82	3,70	300	303,70	98,78
1	5,01	5,89	400	405,89	98,55
5/4	7,83	8,71	500	508,71	98,29

2°)- $\eta \% = f(\alpha)$ pour une charge à $\cos \phi = 0,8$

α	$\alpha^2 P_k$	$P_o + \alpha^2 P_k$	$\alpha S_n \cos \phi$	$\alpha S_n \cos \phi + P_o + \alpha^2 P_k$	$\eta \%$
1/4	0,31	1,19	80	81,19	98,53
0,42	0,88	1,76	134,4	136,16	98,71
1/2	1,25	2,13	160	162,13	98,69
3/4	2,82	3,70	240	243,70	98,48
1	5,01	5,89	320	325,89	98,19
5/4	7,83	8,71	400	408,71	97,87



1- GRAPHE $\eta\% = f(\alpha)$ à $\cos\varphi = 1$

2- GRAPHE $\eta\% = f(\alpha)$ à $\cos\varphi = 0,8$

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

On définira la charge par le rapport de sa puissance sur la puissance nominale.

$$K = \frac{P_{ch.}}{P_n} \quad \text{avec :} \quad \begin{array}{l} P_{ch.} : \text{puissance de la charge} \\ P_n : \text{puissance nominale} \end{array}$$

$$K = \frac{\sqrt{3} \cdot U_2 \cdot I_2 \cdot \cos\phi_2}{\sqrt{3} \cdot U_{2n} \cdot I_{2n}}$$

On définit la chute de tension secondaire par:

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

avec:

U_2 : Tension secondaire pour une charge donnée et un facteur de puissance donné.

U_{2n} : Tension nominale secondaire.

U'_2 : Tension secondaire pour une charge donnée et un facteur de puissance donné ramenée au primaire.

U'_{2n} : Tension nominale secondaire ramenée au primaire.

$$U'_{2n} = U_{1n} \quad ; \quad \Delta U' = U_1 - U'_2$$

d'où l'on peut écrire que:

$$\Delta U \% = \frac{U_{2n} - U'_2}{U_{1n}} \cdot 100$$

Cette même relation peut être approximée en utilisant les chutes de tension active et réactive, par la relation suivante

$$\Delta U \% = U_{ka} (\%) \cos\phi_2 + U_{kr} (\%) \sin\phi_2$$

U_{ka} : chute de tension active = 1,15%

U_{kr} : chute de tension réactive = 3,77%

Détermination des caractéristique $U_2 = f(I_2)$

1°)- Cas d'une charge résistive : $\cos\phi_2=1 \Rightarrow \sin\phi_2=0$

avec: $\Delta U\% = \alpha U_{ka}(\%) = 1,15 \cdot \alpha$

α	$\Delta U (\%)$	$\Delta U' (V)$	$U'_2 (V)$	$U_2 (V)$	U_2/U_{2n}	I_n/I_{2n}	$I_2 (A)$
1/4	0,288	28,8	9971,2	398,85	0,997	0,251	144,9
1/2	0,575	57,5	9942,5	397,7	0,994	0,503	290,4
3/4	0,863	86,3	9913,7	396,55	0,991	0,757	437,02
1	1,15	115	9885,0	395,40	0,988	1,011	583,66
5/4	1,438	143,8	9856,2	394,40	0,987	1,268	732,03

2°)- Cas d'une charge capacitive: $\cos\phi_2=0,8 \quad \sin\phi_2=0,6$

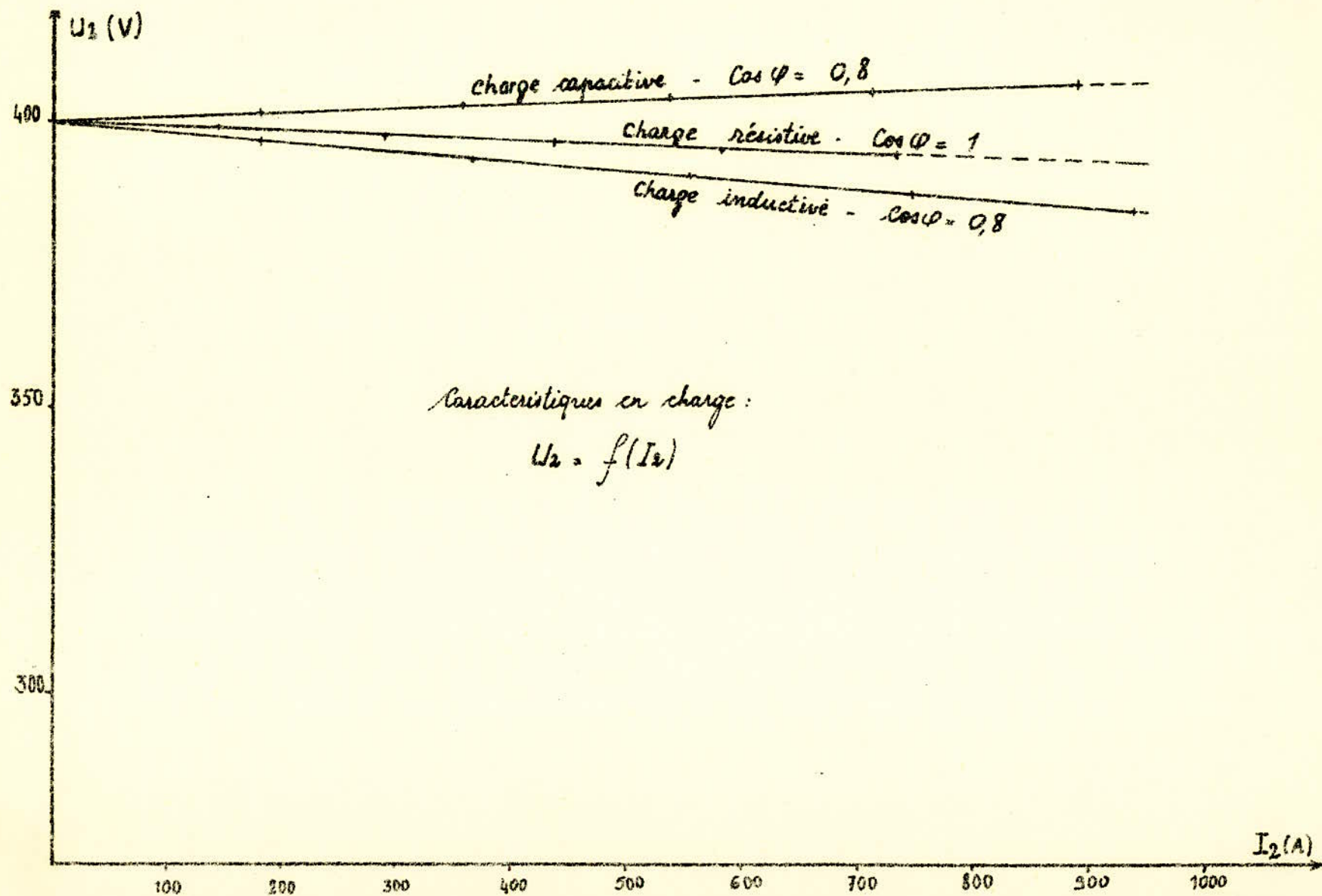
avec: $\Delta U\% = \alpha (0,8 \times 1,15 + (-0,6) \times 3,77) = -1,342 \cdot \alpha$

α	$\Delta U \%$	$\Delta U' (V)$	$U'_2 (V)$	$U_2 (V)$	U_2/U_{2n}	I_n/I_{2n}	$I_2 (A)$
1/4	-0,34	-34	10034	401,4	1,003	0,312	180,12
1/2	-0,67	-67	10067	402,68	1,007	0,621	358,51
3/4	-1,01	-101	10101	404,04	1,010	0,928	535,74
1	-1,34	-134	10134	405,36	1,013	1,234	712,4
5/4	-1,68	-168	10168	406,72	1,017	1,536	886,75

3°)- Cas d'une charge inductive: $\cos\phi_2=0,8 \quad \sin\phi_2=0,6$

avec: $\Delta U\% = \alpha (0,8 \times 1,15 + 0,6 \times 3,77) = 3,182 \cdot \alpha$

	$\Delta U\%$	$\Delta U'$	U'_2	U_2	U_2/U_{2n}	I_n/I_{2n}	$I_2 (A)$
1/4	0,796	79,6	9920,4	396,82	0,992	0,315	181,85
1/2	1,59	159	9841,0	393,64	0,984	0,635	366,59
3/4	2,39	239	9761,0	390,44	0,976	0,961	554,79
1	3,18	318	9682,0	387,28	0,968	1,291	745,31
5/4	3,98	398	9602,0	384,08	0,960	1,628	939,86



CALCUL du COURANT de MARCHÉ à VIDE

Dans toute machine fonctionnant à base d'énergie électrique, il y a obligatoirement existence d'un courant de marche à vide.

Le courant à vide d'un transformateur à deux composantes, la composante active, correspondant aux pertes dans le transformateur pertes comprenant essentiellement les pertes dans le fer par hystérésis et par courant de Foucault, celles par effet Joule étant insignifiantes à vide.

I_{Oa} : représente la composante active qui est d'une manière générale la plus importante.

I_{Op} : composante réactive ou composante magnétisante. L'existence de la composante active dans le courant de marche à vide résulte des pertes dans le fer qui représentent une puissance active : P_o

$$P_o = \sqrt{3} \cdot U_1 \cdot I_{Oa}$$

d'où:

$$I_{Oa} = \frac{P_o}{\sqrt{3} \cdot U_1} = \frac{880,91}{\sqrt{3} \cdot 10^4} = 0,05 \text{ A.}$$

La composante réactive du courant de marche à vide nécessaire pour la circulation du flux dans le circuit magnétique, crée quant à elle des pertes en puissance réactive dans le fer et l'entre-fer.

Calcul des différentes pertes réactives.

Dans les colonnes.

On rappellera que l'induction dans la colonne est de : 1,594 Tesla, et de la figure "a" on en déduit les pertes spécifiques réactives correspondantes à cette induction de colonne.

$$q_{ocol} = 2,3 \text{ VAR/Kg.}$$

$$Q_{col} = q_{ocol} \times G_{col} = 2,3 \times 273,624 =$$

$$Q_{col.} = 629,34 \text{ VAR.}$$

Energie réactive dans la culasse.

De la même manière que précédemment, on aura des pertes spécifiques réactive correspondante à une induction de 1,386T dans la culasse de : 1,16 VAR/Kg.

$$Q_{cu.} = q_{ocu.} \times G_{cu.}$$

$$Q_{cu.} = 1,16 \times 117,5 = 136,3 \text{ VAR.}$$

Energie réactive dans les coins.

A l'induction de 1,49T dans les coins correspond des pertes spécifiques réactives de : 1,29VAR/Kg.

$$Q_{coi} = q_{occoi} \times G_{coi}$$

$$Q_{coi} = 1,29 \times 215,047 = 277,41 \text{ VAR.}$$

Si l'on considère un entre-fer δ dans le cas de notre transformateur, et l'approximation de l'induction magnétique circulant dans l'entrefer à celle de la colonne, on aura:

$$Q_{\delta} = q_{o\delta} \cdot n_{\delta} \cdot S_{\delta}$$

avec: $n_{\delta} = 6$ entrefer ; $B_{\delta} = B_{col} = 1,594T$. à laquelle correspond une pertes spécifique réactive de : $q_{o\delta} = 2,59 \text{ VAR/cm}^2$

on aura:

$$Q_{\delta} = 2,59 \times 6 \times 224,87 = 3494,48 \text{ VAR.}$$

Il sera donc facile, maintenant, de calculer l'énergie réactive totale.

$$Q_t = Q_{col} + Q_{cu.} + Q_{coi} + Q_{\delta}$$

$$Q_t = 3494,48 + 277,41 + 136,3 + 629,34$$

$$Q_t = 4537,53 \text{ V.A.R.}$$

Composante magnétisante du courant de marche à vide.

Elle sera déduite de l'expression suivante:

$$I_{0\mu} = \frac{Q}{\sqrt{3} U_1} = \frac{4537,53}{\sqrt{3} \cdot 10^4} = 0,262 \text{ A.}$$

d'autre on sait que:

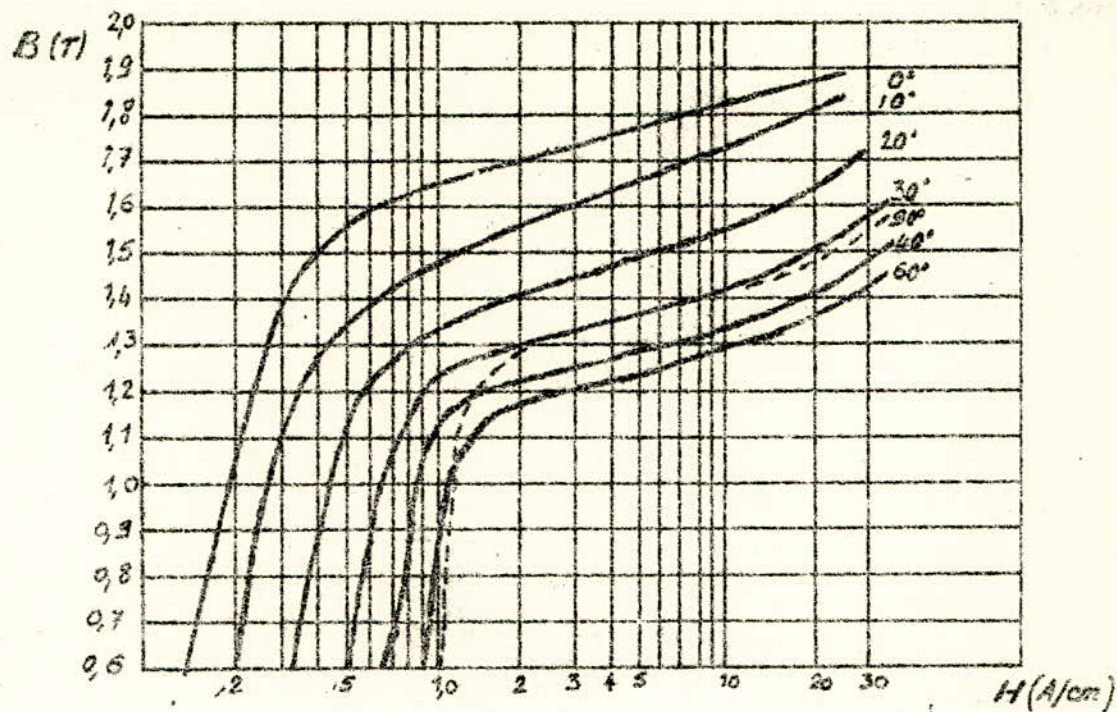
$$I_0 = \sqrt{I_{0\alpha}^2 + I_{0\mu}^2}$$
$$= \sqrt{(0,262)^2 + (0,05)^2}$$

$$I_0 = 0,2667$$

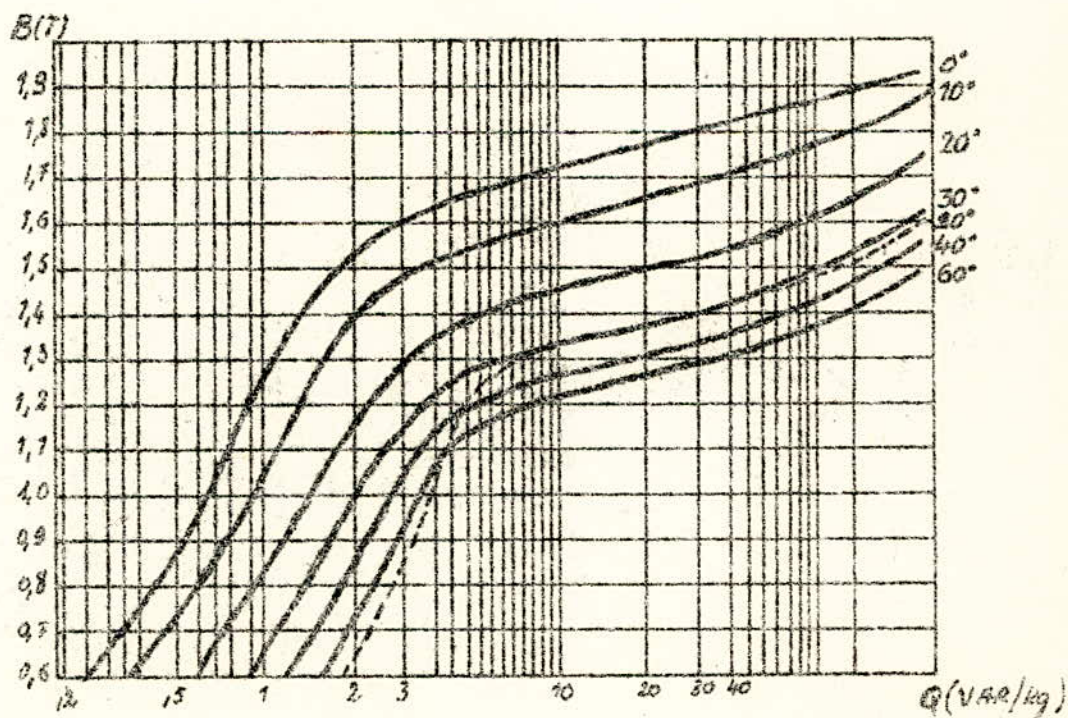
d'où

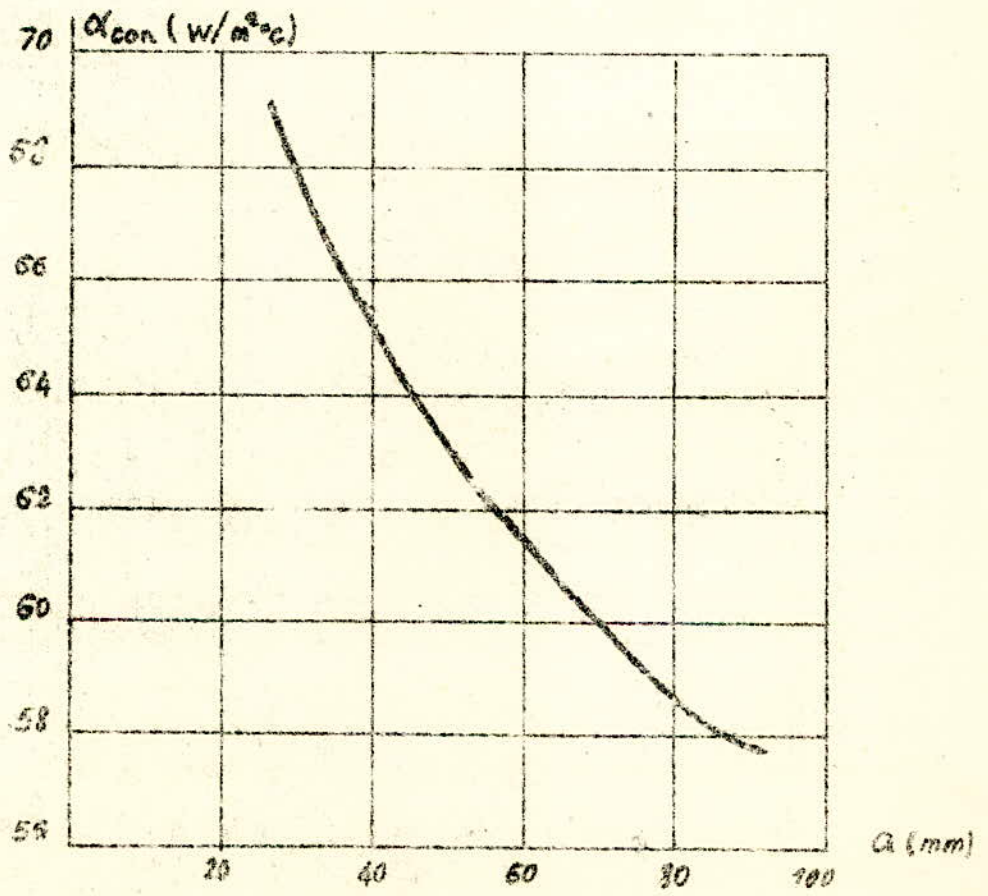
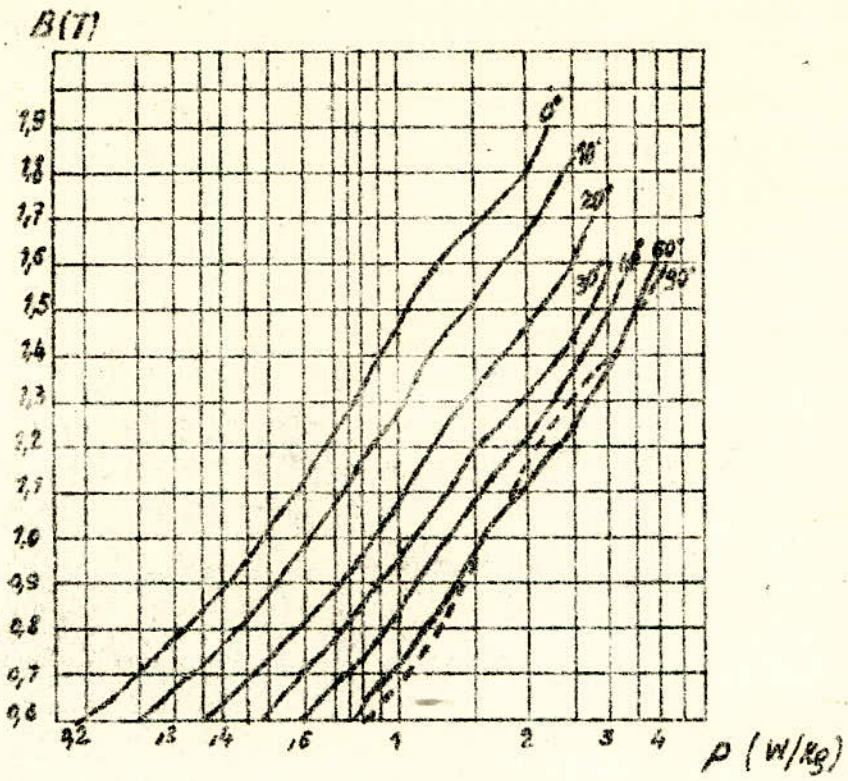
$$i_0 = \frac{I_0}{I_n} \cdot 100 = \frac{0,2667}{13,33} \cdot 100 = 2\%$$

Nous constaterons que la valeur du courant de marche à vide est acceptable vue qu'elle ne diffère de celle donnée par le cahier de charges que de cinq pourcent (5%°) . La valeur donnée par le cahier de charges étant de deux pourcent (2%) .



COURBES D'AIMANTATION DE
L'ACIER ARMÉ - M6





Généralités.

Comme dans toute machine électrique, le transformateur est le siège de pertes dans le fer et dans le cuivre. Ces différentes pertes engendrent par conséquent un échauffement de celui-ci.

Il devra, pour préserver la durée de vie des isolants, être limité à une valeur telle qu'en aucun point des différents constituants la température atteigne une valeur trop élevée préjudiciable à la bonne tenue des isolants dont l'importance est très grande.

Si la surcharge d'un transformateur est très importante, sa température augmente rapidement et, il se produit une carbonisation des isolants, l'appareil peut donc être détruit en un temps relativement court.

De ce fait, un bilan thermique s'impose dans l'étude de la construction d'un transformateur.

Calcul thermique.

Le calcul thermique d'un transformateur consiste en la vérification de l'échauffement des différentes parties où un échange de chaleur peut se produire en charge.

De ces différents échauffements résultent des conséquences nuisibles pour les constituants du transformateur. Ils agissent notamment sur les propriétés suivantes:

- Chimique: augmentation de la rapidité d'oxydation.
- Electrique: augmentation de la résistivité.
- Diélectrique: Réduction de la durée de vie des matériaux magnétiques et des isolants.
- Mécanique: Diminution notable de la tenacité, élasticité, et dilatation des matériaux.

Compte tenu de ces différents éléments perturbateurs, l'étude du phénomène et le choix du mode de refroidissement relient d'une grande importance.

On notera qu'il existe différents modes de refroidissement et ce pour des genres de puissance déterminée.

Refroidissement naturel (IN).

- Avec cuve à flancs ondulés jusque vers 2000 à 3000 KVA.
- Faisceaux de tubes rapportés sur la cuve et dans lesquels le liquide circule par thermo-siphon.
- Radiateurs à faisceaux tubulaires jusqu'à 10000 à 12000 KVA

Ce mode de refroidissement est d'une grande sécurité et très économique. Le transformateur étant dans ce cas autonome, démunie de tout appareil auxiliaire.

Refroidissement par soufflage des radiateurs.

Dispositif assez complexe, mode utilisé pour de très gros transformateurs de puissance.

Refroidissement par circulation forcée du liquide.

Dispositif aussi complexe que le précédent, et est utilisé pour le cas de gros transformateurs.

Refroidissement par circulation d'eau.

Remplacé actuellement par un dispositif de circulation forcée de l'huile.

Ce mode de refroidissement est très efficace, permet des surcharges importantes, et il est silencieux. Par contre il exige une grande quantité d'eau; soit environ un (1) litre d'eau à 15°C pour un (1) Kilowatt de pertes et par minute. Il doit également fonctionner en permanence. A cela s'ajoute un problème non des moindres, le fait que l'eau ne soit entièrement démunie de calcaire entraîne un problème délicat de détartrage des conduites de refroidissement.

Ce sont là, d'une manière générale, les différents systèmes de refroidissement des transformateurs à grande puissance.

Pour les transformateurs de moyenne puissance deux modes de refroidissement sont couramment utilisés.

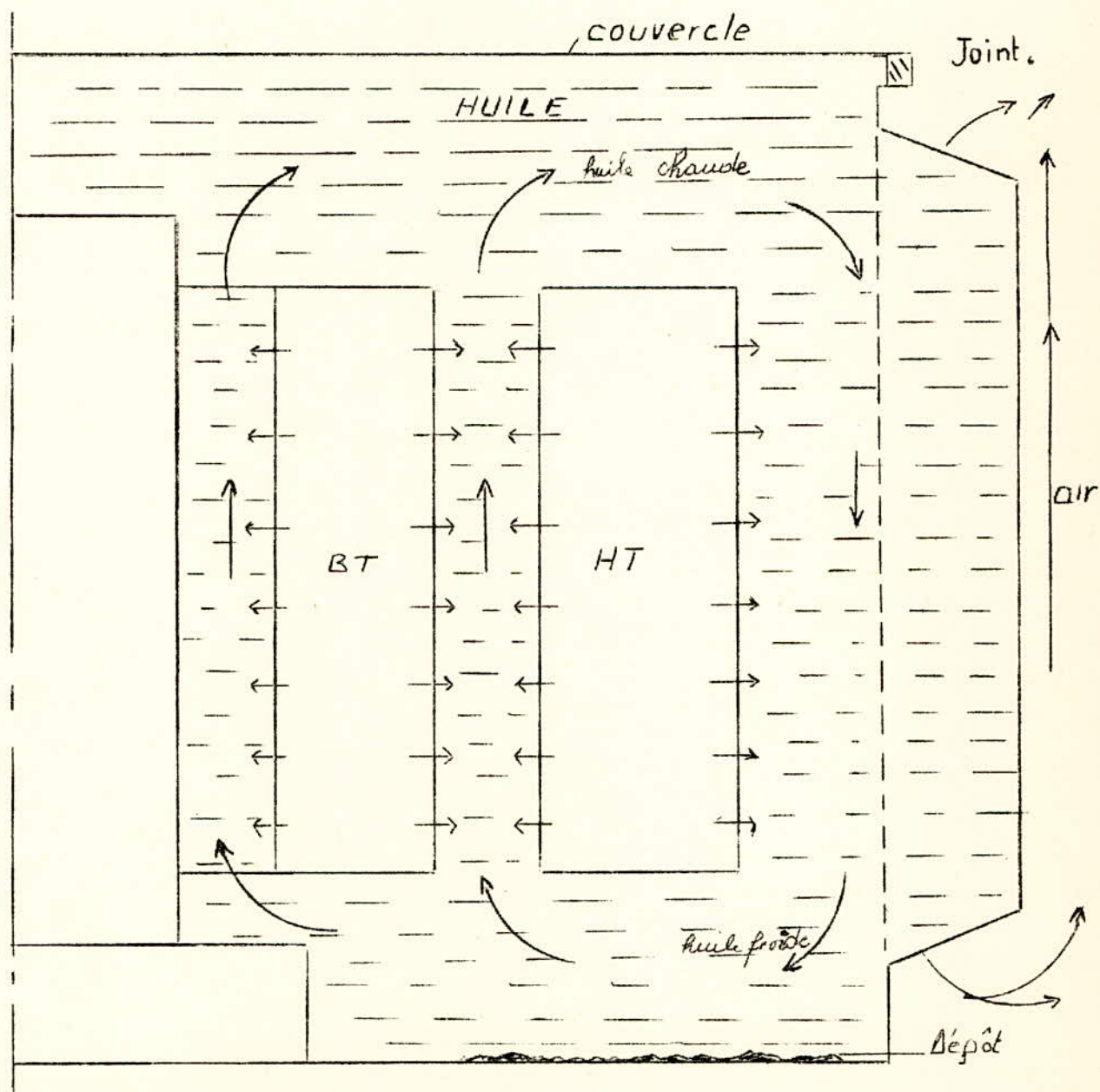
- Refroidissement à sec,
- Refroidissement par immersion.

Le second procédé est de loin le plus utilisé: L'appareil est installé dans une cuve métallique remplie d'un liquide isolant

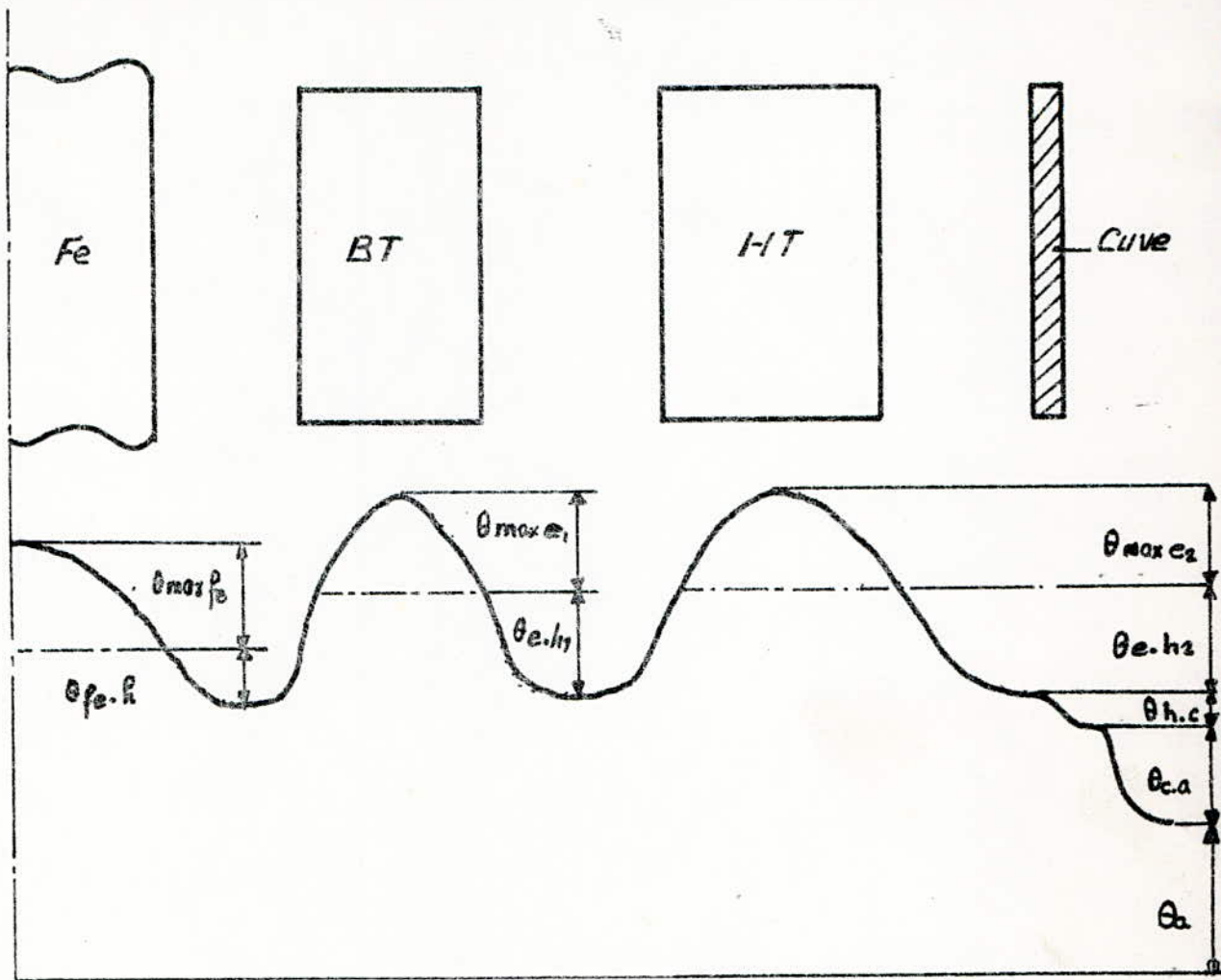
(huile ou diélectrique). Cette construction, outre le refroidissement, soustrait le transformateur au milieu ambiant et le préserve des poussières.

Les échauffements sont standardisés de ce fait, ils ne doivent pas dépasser les valeurs admissibles recommandées par les normes françaises de construction N.F.C. 52-100 et 52-112 .

Les différents phénomènes thermiques se produisant dans le transformateur sont schématisés par la figure ci-après.



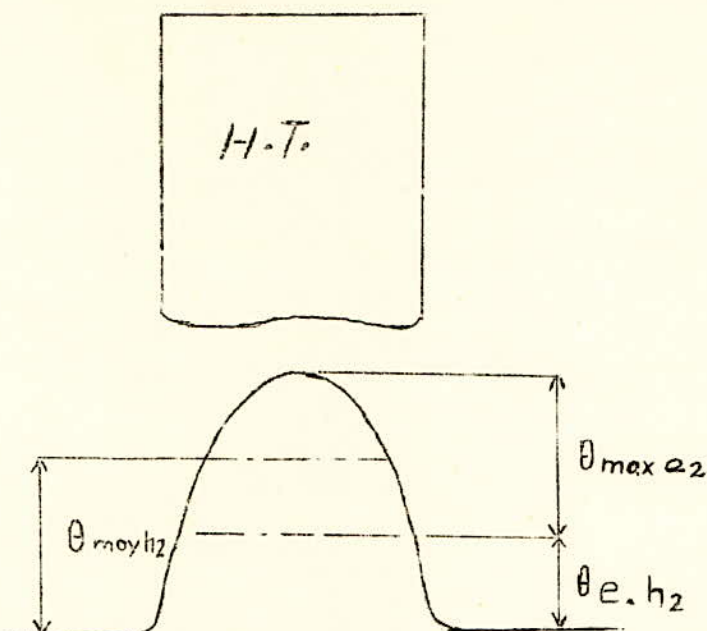
REPRESENTATION DES DIFFERENTS ECHAUFFEMENTS



- θ_a : température de l'air ambiant
- $\theta_{c.a}$: échauffement cuve - air
- $\theta_{h.c}$: échauffement huile - cuve
- $\theta_{e.h_2}$: échauffement surface enroulement HT - huile
- $\theta_{max e_2}$: échauffement enroulement HT - surface
- $\theta_{f.e}$: échauffement surface fer - huile
- $\theta_{max f_e}$: échauffement fer - surface
- $\theta_{e.h_1}$: échauffement surface enroulement BT - huile
- $\theta_{max e_1}$: échauffement enroulement BT - surface.

Calcul des différents échauffements à partir des données.

Echauffement moyen de l'enroulement H.T. / huile.



Les phénomènes physico-chimiques ne permettent pas d'avoir une répartition uniforme de la température suivant la largeur et la hauteur de l'enroulement, nous introduisons alors, dans notre calcul, une surélévation moyenne de la température de l'enroulement par rapport à celle de l'huile.

L'échauffement moyen est donné d'une manière générale par la relation suivante:

$$\theta_{moy.h_2} = q_2 \left\{ \frac{\delta_{is}}{\lambda_{is}} + \frac{1}{\alpha_{con.}} \right\} \quad \text{avec,}$$

δ_{is} : épaisseur de l'isolation de papier d'un seul coté

$$\delta_{is} = 0,64/2 = 0,32\text{mm.}$$

λ_{is} : conductivité thermique du papier

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

q_2 : flux thermique spécifique qui traverse l'isolation vers l'huile baignant les conducteurs.

Le flux thermique spécifique q_2 est calculer d'après l'expression suivante:

$$q_2 = \frac{P_{cu2} + P_{sup2}}{Str.}$$

Str. : surface totale de refroidissement de l'enroulement
Surface de refroidissement.

La surface de refroidissement représente toute la surface qui se trouve en contact direct avec l'huile ,soit la surface soumise à un échange de chaleur avec l'huile de refroidissement.

Nous rappellerons que pour le côté haute tension ,on a une bobine de neuf (9) couches dont les huit (8) premières se composent de 158 spires et la neuvième (9) de 54 spires.

Détermination des surfaces de refroidissement.

La surface de refroidissement représente toutes les parties où a lieu un échange thermique entre l'élément chauffant et l'élément de refroidissement.

- S_{12} = Surface de refroidissement latérale axiale externe

$$S_{12} = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot Hb = 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{Dm_2 + a_2}{2} \right) \cdot Hb$$

$$S_{12} = 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{28,47 + 3,404}{2} \right) 45,02$$

$$S_{12} = 2 \cdot \pi \cdot (28,47 + 3,404) 45,02$$

$$S_{12} = 3508,08 \text{ cm}^2 = 3508,08 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

- S_{22} : surface de refroidissement latérale axiale interne.

$$S_{22} = 2 \cdot \pi \cdot R' \cdot Hb = 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{Dm_2 - a_2}{2} \right) \cdot Hb$$

$$S_{22} = \pi \cdot (D_{m2} - A_2) \cdot H_b = \pi \cdot (28,47 - 3,404) \cdot 45,02$$

$$S_{22} = 3545,2 \text{ cm}^2 = 3545,2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

- S_{32} : surface de refroidissement transversale longitudi.

$$S_{32} = \frac{\pi}{4} (D_{m2} + A_2)^2 - \frac{\pi}{4} (D_{m2} - A_2)^2$$

$$S_{32} = \frac{\pi}{4} ((D_{m2} + A_2) + (D_{m2} - A_2)) ((D_{m2} + A_2) - (D_{m2} - A_2))$$

$$S_{32} = \pi (2D_{m2}) (2A_2) = \pi \cdot D_{m2} \cdot A_2$$

$$S_{32} = \pi \cdot 28,47 \cdot 3,404 = 304,46 \text{ cm}^2 = 304,46 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

Comme nous savons que toute bobine possède deux surfaces transversales (inférieure et supérieure), nous pourrions alors calculer la surface de refroidissement transversale totale pour une colonne.

$$S_{32t} = 2 \times S_{32} = 2 \times 304,46 = 608,92 \text{ cm}^2$$

Surface totale de refroidissement.

$$S_{Trc} = S_{32t} + S_{12} + S_{22}$$

$$S_{Trc} = 608,92 + 4508,08 + 3545,2 = 8662,2 \text{ cm}^2$$

Sachant que l'on est en présence d'un transformateur à trois (3) colonnes, il nous est facile de calculer la surface totale de refroidissement.

$$S_{Tr} = 3 \times S_{Trc} = 3 \times 8662,2 = 25986,6 \text{ cm}^2$$

Calcul du flux thermique spécifique.

$$q_2 = \frac{P_{cu2} + P_{sup2}}{S_{Tr}} \quad \text{avec: } \begin{cases} P_{cu2} = 2794,39 \text{ W.} \\ P_{sup2} = 26,525 \text{ W.} \end{cases}$$

$$q_2 = \frac{26,55 + 2794,39}{2,59866} = 1085,5 \text{ W/m}^2$$

D'une façon générale et ce d'après des résultats expérimentaux le flux thermique spécifique varie entre 800 et 1600 W/m².

Calcul de l'échauffement moyen H.T./huile.

$$\theta_{\text{moy.h}_2} = q_2 \left(\frac{\delta_{is}}{\lambda_{is}} + \frac{1}{\alpha_{con.}} \right) \text{ avec: } \begin{cases} \delta_{is} = 0,32 \cdot 10^{-3} \text{ m} \\ \lambda_{is} = 0,17 \text{ W/m}^\circ\text{C} \end{cases}$$

D'après le graphe (III), on a un coefficient de convection, correspondant à : $A_2 = 3,404 \text{ cm.}$, de 66,53 W/m²°C.

d'où:

$$\theta_{\text{moy.h}_2} = 1085,5 \left(\frac{0,32 \cdot 10^{-3}}{0,17} + \frac{1}{66,53} \right)$$

$$\theta_{\text{moy.h}_2} = 18,3^\circ\text{C}$$

Echauffement moyen de l'enroulement B.T. par rapport à l'huile.

Le mode de calcul est pratiquement le même pour l'enroulement du côté haute tension. Ce qui nous permet d'écrire:

$$\theta_{\text{moy.h}_1} = q_1 \left(\frac{\delta_{is}}{\lambda_{is}} + \frac{1}{\alpha_{con}} \right) \text{ avec:}$$

$$q_1 = \frac{P_{cu1} + P_{sup1}}{S_{Tr1}}$$

Détermination des surfaces de refroidissement.

S_{11} : surface latérale axiale extérieure

$$S_{11} = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot H_b = 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{D_{m1} + \phi_1}{2} \right) \cdot H_b.$$

$$S_{11} = 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{21,10 + 1,96}{2} \right) 45,02$$

$$S_{11} = \pi (21,10 + 1,96) 45,02 = 3261,48 \text{ cm}^2$$

S_{21} : surface latérale axiale intérieure.

$$S_{21} = 2 \cdot \pi \cdot R' \cdot H_b = 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{D_{m1} - a_1}{2} \right) H_b$$

$$S_{21} = \pi (21,10 - 1,96) 45,02 = 2707,06 \text{ cm}^2$$

S_{31} : surface transversale longitudinale.

$$S_{31} = \frac{\pi}{4} (D_{m1} + a_1)^2 - \frac{\pi}{4} (D_{m1} - a_1)^2$$

$$S_{31} = \pi D_{m1} \cdot a_1 = \pi \times 21,10 \times 1,96 = 129,92 \text{ cm}^2$$

$$S_{31t} = 2 \times S_{31} = 2 \times 129,92 = 259,84 \text{ cm}^2$$

En tenant compte du fait que notre bobine basse tension se compose d'une couche de cinq (5) conducteurs en parallèles où une transposition complète des conducteurs est prévue, il apparaîtra donc une surface de refroidissement supplémentaire que l'on évaluera arbitrairement à deux fois la surface transversale.

$$S_{sup.} = 259,84 \text{ cm}^2$$

Surface totale de refroidissement.

$$S_{trc.} = S_{31t} + S_{sup} + S_{11} + S_{21}$$

$$S_{trc} = 259,84 + 259,84 + 3261,48 + 2707,06$$

$$S_{trc} = 6488,22 \text{ cm}^2$$

d'où,

$$S_{Tr} = 3 \times S_{trc} = 3 \times 6488,22 = 19464,66 \text{ cm}^2$$

Calcul du flux thermique spécifique.

$$q_1 = \frac{P_{sup1} + P_{cu1}}{S_{Tr}} \quad \text{avec :} \quad \begin{array}{l} P_{cu1} = 27,54 \text{ W} \\ P_{sup1} = 2034,265 \text{ W} \\ S_{Tr} = 19464,66 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \end{array}$$

d'où,

$$q_1 = \frac{27,54 + 2034,265}{19464,66 \cdot 10^{-4}} = 1059,26 \text{ W/m}^2$$

Calcul de l'échauffement moyen BT/huile.

D'après le graphe (III), on a un coefficient de convection, correspondant à : $\alpha_1 = 19,6 \text{ mm}$, de $74 \text{ W/m}^2\text{°C}$.

$$\theta_{\text{moy.h1}} = q_1 \left(\frac{\delta_{is}}{\lambda_{is}} + \frac{1}{\alpha_{con}} \right), \quad \text{avec :} \quad \begin{array}{l} \delta_{is} = 0,32 \text{ mm.} \\ \lambda_{is} = 0,17 \text{ W/m}^2\text{°C.} \end{array}$$

$$\theta_{\text{moy.h1}} = 1059,26 \left(\frac{0,32 \cdot 10^{-3}}{0,17} + \frac{1}{74} \right)$$

$$\theta_{\text{moy.h1}} = 16,3 \text{ °C.}$$

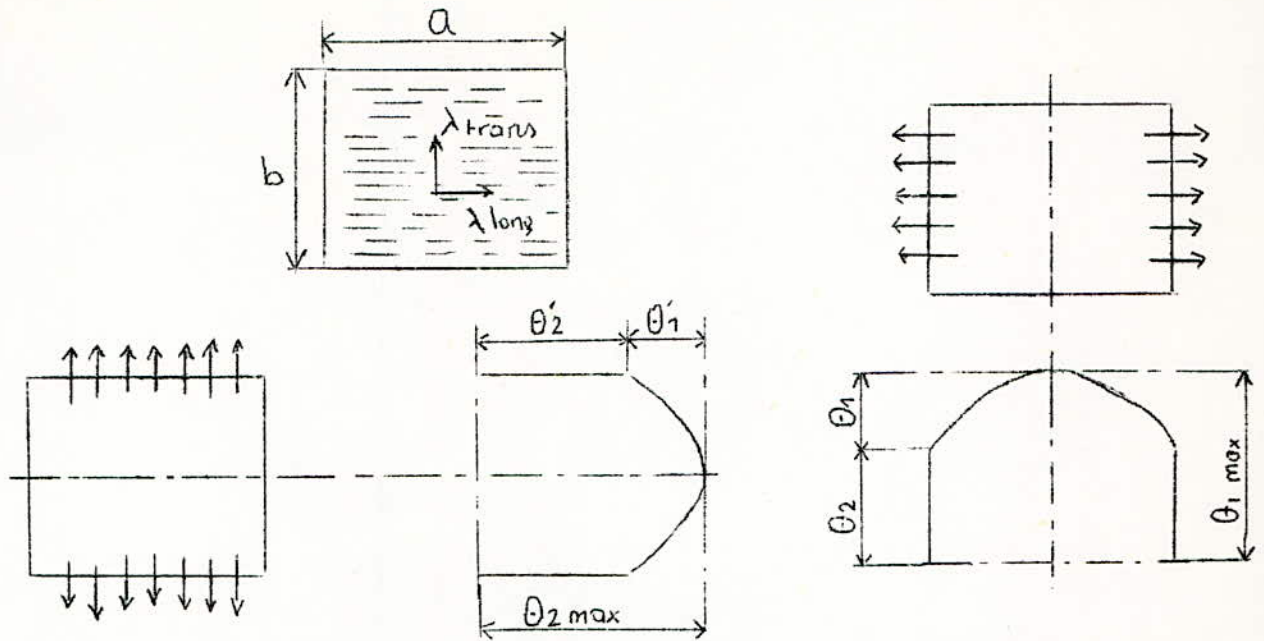
Echauffement du circuit magnétique.

A cause,

- de la différence des conditions de refroidissement de la colonne et de la culasse;
- de la constitution non homogène du circuit magnétique
- des formes compliquées de la colonne et de la culasse

le calcul de l'échauffement du circuit magnétique présente beaucoup de difficultés.

On optera pour une simplification qui présente comme équivalence de la section de la colonne un rectangle inscrit dans le même cercle.



On supposera aussi que les pertes sont uniformément réparties.
Pertes spécifiques des tôles par unité de volume.

p_{sp} : pertes spécifiques par unité de masse, sont données par la figure II en fonction de l'induction qui est dans notre cas de 1,586 Teslas ; $p_{sp} = 1,24 \text{ W/Kg.}$

: poids spécifique des tôles = $7,65 \cdot 10^3 \text{ Kg./m}^3$

P : pertes spécifiques des tôles par unité de volume.

Il paraît clair que pour avoir les pertes spécifiques par unité de volume, il faudra multiplier les pertes spécifiques par unité de masse par le poids spécifique des tôles.

$$P = p_{sp} \times \gamma$$

avec $p_{sp} = 1,24 \text{ W/Kg.}$ et $\gamma = 7,65 \cdot 10^3 \text{ Kg./m}^3$

d'où

$$P = 1,24 \times 7,65 \cdot 10^3 = 9,49 \text{ KW/m}^3$$

Toujours en tenant compte des difficultés que pose le calcul thermique ; vue que l'on a pas des formes régulières, on assimilera la section de la colonne à une forme rectangulaire de dimensions:

$$a = 0,9 D = 0,9 \times 18,141 = 16,33 \text{ cm.}$$

$$b = \frac{S_{col}}{a} = \frac{224,87}{16,33} = 13,77 \text{ cm.}$$

Ces approximations faites nous permettent de déterminer les valeurs des différents échauffements.

Détermination de la valeur des différents échauffements.

$$\theta_1 = P \cdot a^2 / 8 \lambda_1 \quad \text{où:}$$

λ_1 : coefficient de transmission longitudinale = 20 W/m°C.

$$\theta_1 = \frac{9,49 \cdot 10^3 (0,1633)^2}{8 \times 20} = 1,58 \text{ } ^\circ\text{C.}$$

$$\theta_2 = \frac{P \cdot a}{2 \alpha_{\text{con}}} \quad \text{avec : } \alpha_{\text{con}} = 110 \text{ W/m}^2\text{ } ^\circ\text{C.}$$

$$\theta_2 = \frac{9,49 \cdot 10^3 \times 0,1633}{2 \times 110} = 7,05 \text{ } ^\circ\text{C.}$$

$$\theta'_1 = \frac{P \cdot b^2}{8 \lambda_t}$$

λ_t : coefficient de transmission transversale = 3W/m°C.

$$\theta'_1 = \frac{9,49 \cdot 10^3 (0,1377)^2}{8 \times 3} = 7,49 \text{ } ^\circ\text{C.}$$

$$\theta'_2 = \frac{P \cdot b}{2 \alpha_{\text{con}}} = \frac{9,49 \cdot 10^3 \cdot 0,1377}{2 \times 110} = 5,94 \text{ } ^\circ\text{C.}$$

Nous déduisons:

$$\theta_{1\text{max}} = \theta_1 + \theta_2$$

$$\theta_{1\text{max}} = 1,58 + 7,05 = 8,63 \text{ } ^\circ\text{C.}$$

$$\theta_{2\text{max}} = \theta'_1 + \theta'_2$$

$$\theta_{2\text{max}} = 7,49 + 5,94 = 13,43 \text{ } ^\circ\text{C.}$$

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

$$\theta_{\text{max.CM.h}} = \theta_{2\text{max}} \frac{\theta'_2 + 1,5 \theta'_1}{\theta_{2\text{max}} + \theta'_2 + 1,5 \theta'_1}$$

$$\theta_{\text{max.CM.h}} = 13,43 \frac{5,94 + 1,5 \times 7,49}{13,43 + 5,94 + 1,5 \times 7,49}$$

$$\theta_{\text{max.CM.h}} = 7,54^{\circ}\text{C.}$$

Cette valeur est purement indicative, elle montre que le circuit magnétique ne sera pas chauffé excéssivement.

Echauffement de l'huile.

Dimensions de la cuve.

On optera pour une forme standard de la cuve, forme rectangulaire avec ondules dont les dimensions seront les suivantes:

A : longueur de la cuve sans ondules.

B : largeur de la cuve sans ondules.

Hc : hauteur de la cuve.

avec:

Q_{20} : distance entre la paroi de la cuve et la dernière couche du bobinage de la bobine. Paramètre dépendant de la puissance et de la tension. Il est donné par le tableau TIV et aura pour valeur:

$$Q_{20} = 65\text{mm.}$$

h_{jc} : distance minimale entre le plafond de la cuve et l'extrémité supérieure de la colonne. Elle sera donné par le tableau TIV, et aura pour valeur:

$$h_{jc} = 220\text{mm.}$$

Lcc: distance entre axes de deux colonnes :

$$L_{cc} = L_f + D = 15,12 + 18,14$$

$$L_{cc} = 33,26 \text{ cm.}$$

Toujours d'après le tableau TIV, on choisit $h_{jf} = 35 \text{ mm.}$

D'où l'on aura:

$$\begin{aligned} D_{i2} &= D + 2A_{10} + 2A_1 + 2A_{12} \\ &= 18,14 + 1 + 2 \times 1,96 + 2 = 25,06\text{cm.} \end{aligned}$$

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

$$D_{ex2} = 25,06 + 2 \times 3,404 = 31,87 \text{ cm.}$$

U(KV.)	Sn(KVA.)	a_{20} (mm)	h_{j0} (mm)	h_{jf} (mm)
< 20	20 - 160	55	150 - 250	30
	200 - 1600	65	150 - 300	à
	2000- 10000	90	150 - 350	40
> 20	20 - 160	65	150 - 300	30
< 30	200 - 1600	75	150	à
	2000- 10000	120	350	40

TABLEAU TIV

$$h_m = H_f + 2 \times H_{cul}$$

$$h_m = 53,02 + 2 \times 14,85 = 82,72 \text{ cm}$$

Ce qui nous permet enfin d'avoir:

$$A = 2 \times L_{cc} + D_{ex2} + 2 \times a_{20}$$

$$A = 2 \times 33,26 + 31,87 + 2 \times 6,5 = 111,39; \text{ on prendra:}$$

$$A = 112 \text{ cm.}$$

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

$$B = 31,87 + 2 \times 6,5 = 44,87 ; \text{ on prendra:}$$

$$B = 45 \text{ cm.}$$

$$H_{c'} = h_m + h_{j0} + h_{jf}$$

$$Hc. = 82,72 + 22 + 3,5 = 108,22\text{cm. on prendra :}$$

$$Hc. = 109\text{cm.}$$

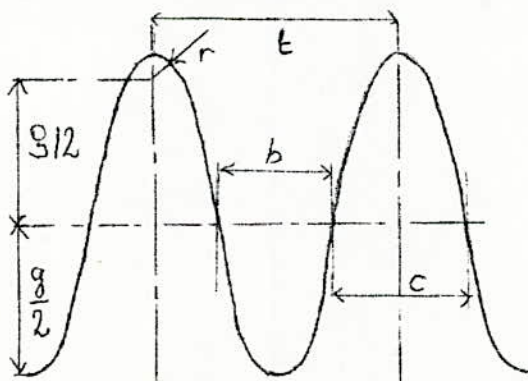
Les épaisseurs des tôles utilisées pour la réalisation de la cuve seront choisies d'après le tableau suivant:

Sn (KVA.)	100	125 - 250	315 - 630	630 - 1600
épaisseur du fond Δf (mm)	3 - 4	4 - 5	5 - 6	6 - 8
épaisseur du couvercle Δc (mm)	4 - 5	5 - 6	6 - 8	10
épaisseur des parois latérales Δp (mm)	0,75 - 1	1 - 1,5	1,5	2,5

Nous opterons pour le choix suivant:

- $\Delta f = 5,5$ mm pour le fond,
- $\Delta c = 7$ mm pour le couvercle,
- $\Delta p = 1,5$ mm pour les parois latérales.

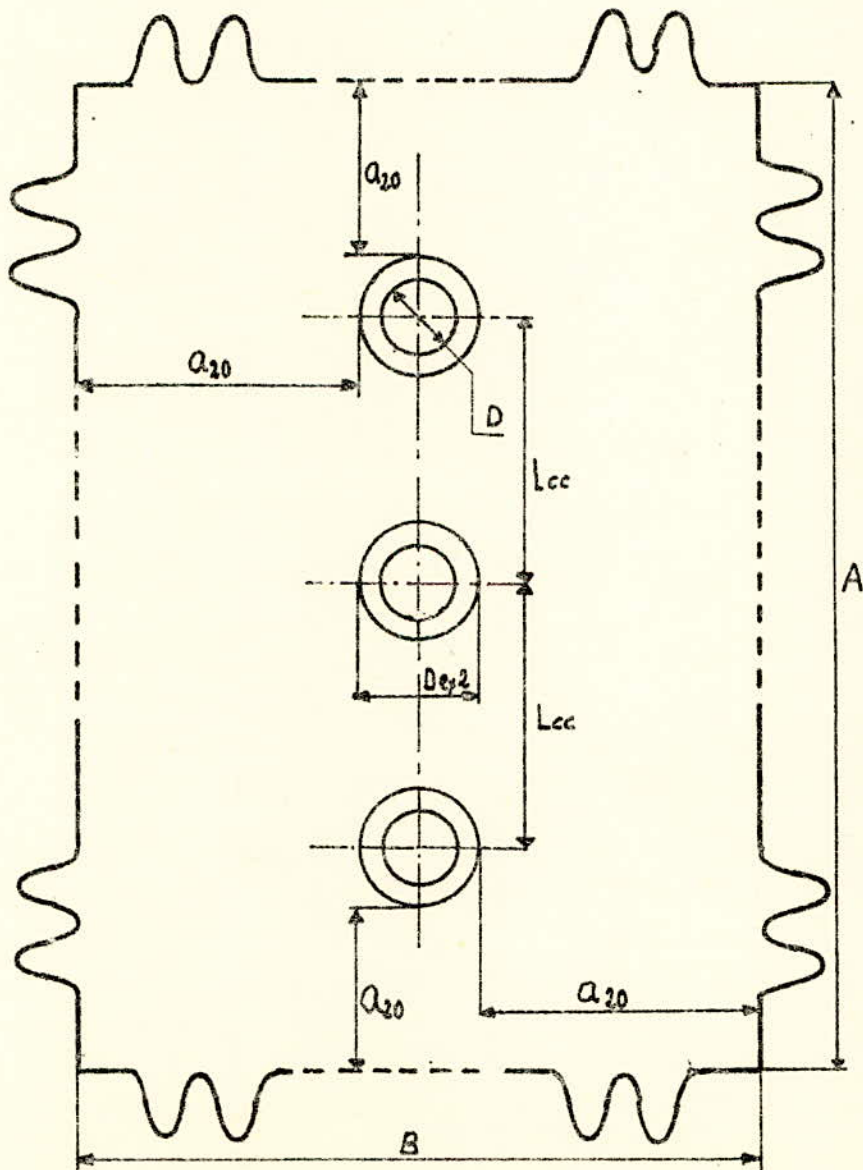
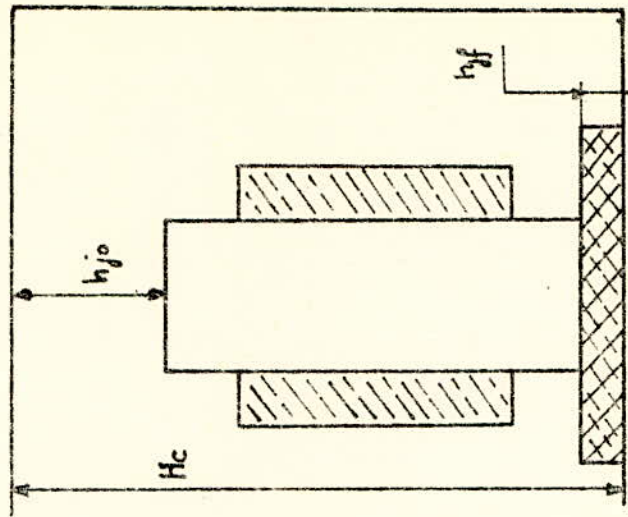
Détermination de la géométrie des ailettes.



Profil des ailettes.

Indications générales:

- $t_{\text{mini.}} = 40\text{mm.}$
- $g_{\text{max.}} = 300\text{mm.}$
- $b_{\text{mini.}} = 30\text{ mm.}$
- $c_{\text{mini.}} = 10\text{ mm.}$



DIMENSIONS
de la
CUVE

On choisira les paramètres suivants:

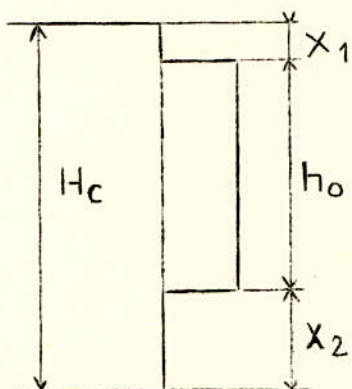
- g = 200mm. ; - c = 10mm.
- b = 30 mm. ; - r = 5 mm.
- t = 43 mm.

Le périmètre d'une ondule sera déterminé d'une manière approximative par la relation suivante:

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

$$= 30 + 400 + 5 = 445,71 \text{ mm.}$$

Hauteur d'une ondule par rapport à celle de la cuve



$$h_0 = H_c - (x_1 + x_2)$$

on choisit : $x_1 = 50\text{mm.}$ et

$$x_2 = 150\text{mm.}$$

$$h_0 = 109 - (5 + 15)$$

$$h_0 = 89\text{cm.} = 890\text{mm.}$$

Nombre d'ondules sur les parois

On signalera qu'il n'y a aucune restriction quant à l'approximation du nombre d'ondules.

Sur la longueur on aura:

$$n_1 + 1 = \frac{A}{t} = \frac{1120}{43} = 26,05$$

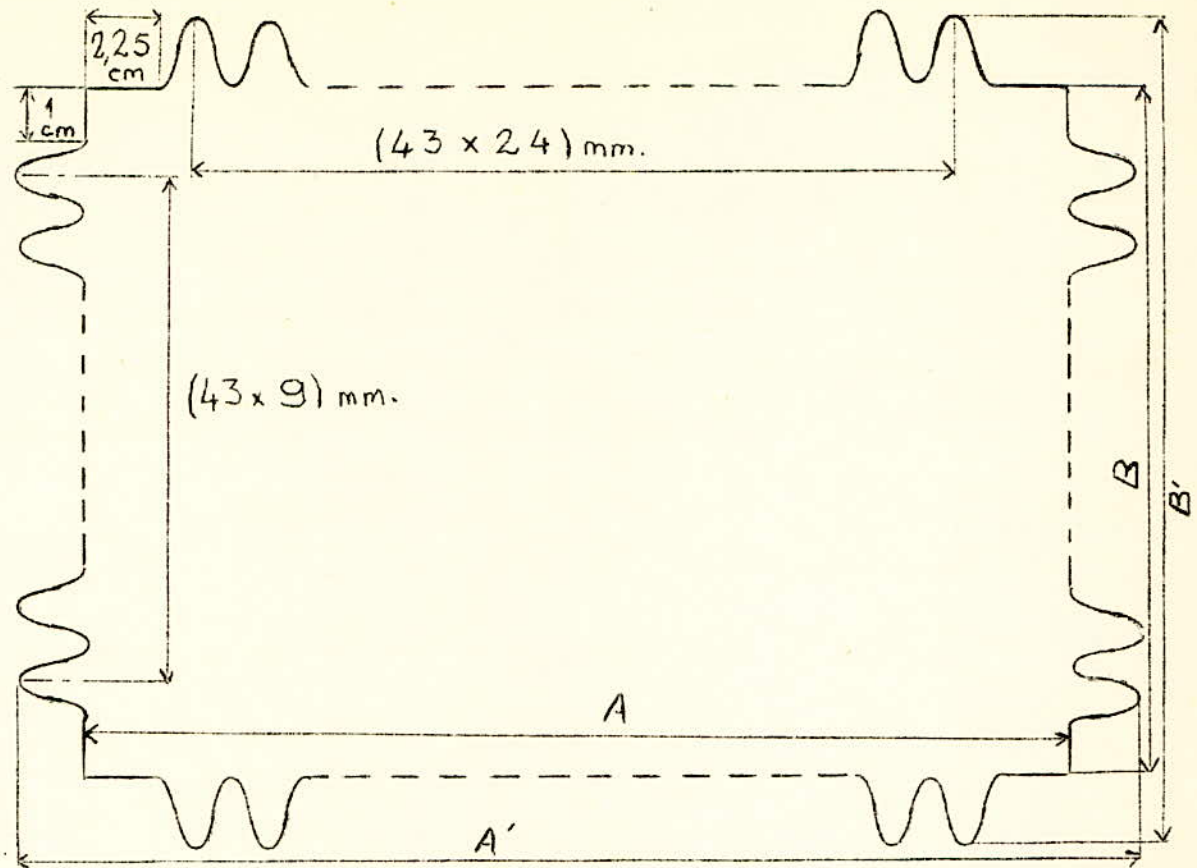
on choisira un arrondi de $n_1 = 24$ ondules

Sur la largeur on aura le nombre suivant:

$$n_2 + 1 = \frac{B}{t} = \frac{450}{43} = 10,465$$

on prendra un arrondi de : $n_2 = 9$ ondules

d'où la disposition générale des ondules de la page suivante.



On aura, pour le rectangle pouvant encadrer la cuve, les dimensions suivantes:

$$A' = A + 2g + r$$

$$A' = 1120 + 400 + 5 = 1525 \text{ mm.} = 142,5 \text{ cm.}$$

$$B' = B + 2g + r$$

$$B' = 450 + 400 + 5 = 855 \text{ mm.} = 85,5 \text{ cm.}$$

Echauffement de l'huile par rapport à la cuve.

L'échauffement est une grandeur, en liaison directe avec la surface de contact de l'huile avec la cuve.

La transmission de chaleur se fait par convection naturelle. L'échauffement de l'huile par rapport à la cuve lors d'une transmission par convection naturelle est donné par la relation suivante:

$$\theta_{h.c} = 0,165 \left(\frac{1,05 (P_o + P_k)}{\text{Sch}} \right)^{0,6}$$

avec:

- Sch : surface de contact avec l'huile
- P_o : pertes à vide,
- P_k : pertes dues à la charge,
- Scc : surface de contact du couvercle,
- Sco : surface de contact des ondules,

et les relations suivantes:

$$S_{co} = n_o \cdot P_{éond} \cdot h_o$$

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

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

- n_o : nombre total d'ondules.

Applications numériques:

$$S_{co} = 2 (24 + 9) \times 0,4457 \times 0,89 = 26,18 \text{ m}^2$$

$$S_{cc} = 1,12 \times 0,45 = 0,504 \text{ m}^2$$

d'où,

$$S_{ch} = 26,18 + 0,504 = 26,684 \text{ m}^2$$

finalement:

$$\theta_{h.c.} = 0,165 \left(\frac{1,05 (880,91 + 5012,14)}{26,684} \right)^{0,6}$$

$$\theta_{h.c.} = 4,33^\circ\text{C.}$$

Echauffement de la cuve par rapport à l'air.

Le phénomène de transmission de chaleur de la cuve à l'air se fait par convection et radiation. Il s'obtient par utilisation de l'expression suivante:

$$\theta_{c.a.} = \left(\frac{1,05 (P_o + P_k)}{2,8 S_r + 2,5 S_{cc}} \right)^{0,8}$$

cù :

Sr : représente la surface radiante de la cuve.

$$S_r = 2 (A' + B') h_0 + S_{cc}$$

$$S_r = 2 (1,525 + 0,855) \cdot 0,89 = 0,504$$

$$S_r = 4,74 \text{ m}^2$$

d'où:

$$\theta_{c.a.} = \left(\frac{1,05 (880,91 + 5012,14)}{2,8 \cdot 4,74 + 2,5 \cdot 26,684} \right) 0,8$$

$$\theta_{c.a.} = 32,42^\circ\text{C.}$$

par consequent la température des bobinages sera:

$$T_{e1} = \theta_{\text{moy.h}_1} + \theta_{h.c.} + \theta_{c.a.} + \theta_a$$

θ_a : température ambiante prise égale à 40°C.

$$T_{e1} = 16,3 + 4,33 + 32,42 + 40 = 93,05^\circ\text{C.}$$

Cette température est inférieure à celle imposée par les normes ($T_n = 105^\circ\text{C}$), par conséquent acceptable

$$T_{e2} = \theta_{\text{moy.h}_2} + \theta_{h.c.} + \theta_{c.a.} + \theta_a$$

$$T_{e2} = 18,3 + 4,33 + 32,42 + 40 = 95,05^\circ\text{C.}$$

T_{e2} est inférieure à la température admissible de ce fait on pourra dire, aussi bien pour l'enroulement haute tension que pour celui basse tension, qu'ils ne seront pas soumis à de fortes contraintes électrothermiques.

Température du circuit magnétique.

$$T_{C.M.} = \theta_{\text{maxCM.h}} + \theta_{h.c.} + \theta_{c.a.} + \theta_a$$

$$T_{C.M.} = 7,54 + 4,33 + 32,42 + 40 = 84,29^\circ\text{C.}$$

Nous pouvons conclure que, ni le circuit magnétique, ni les enroulements, ne seront soumis à de fortes contraintes électrothermiques vu que leur température est inférieure à la limite imposée par les normes de construction de machines.

CALCUL MECANIQUE

Dans toute élaboration de machines à courant alternatif ou à courant continu, un calcul mécanique, de résistance des matériaux, consistera à vérifier si le mode de construction ainsi que les matériaux utilisés sont capables de résister à tous les efforts et contraintes découlant de l'étude.

- Effort électrodynamique de court-circuit aux niveau des bobine
- Dimensionnement :
 - des poutres .
 - des culasses.
 - des boulons de serrage.
- Vérification mécanique de la cuve.

Effet mécanique du courant de court-circuit.

Les courants dans les enroulements primaire et secondaire exercent des actions électrodynamiques sur les conducteurs voisins, et sur la colonne, actions qui, en cas de court-circuit, peuvent atteindre des valeurs élevées.

Signalons que dans le cas de bobinage concentrique simple, de hauteurs égales. L'effort est sensiblement réparti d'une façon uniforme.

Calcul mécanique des enroulements

Un transformateur ne sera dit bien conçu et réalisé que s'il résiste à l'action de toutes les forces auxquelles il sera soumis.

Dans un transformateur, les enroulements sont soumis aux forces dues au poids propre des enroulements et aux forces électrodynamiques. Le champ magnétique de fuite peut être décomposé en deux :

H_{kr} : composante radiale

H_{ka} : composante axiale

A la composante radiale du champ correspondra une force radiale.

A la composante axiale du champ correspondra une force axiale.

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

Quant aux forces axiales; elles sont fortement dépendantes des dissymétries dans la disposition des enroulements et surtout dans la disposition des spires de réglage.

Il faudra vérifier dans chaque branche que les résultats des calculs sont inférieurs aux données admissibles.

Valeur maximale du courant de court-circuit.

Elle sera donnée par l'expression suivante:

$$i_{j\max} = \sqrt{2} \cdot K_m \cdot I_{kdm}$$

K_m : coefficient de crête ou d'impulsion.

avec:

$$K_m = 1 + \exp\left(-\frac{\pi U_{ka}}{U_{kr}}\right)$$

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

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

Dans le côté basse tension

$$\begin{aligned} I_{kdm_1} &= I_n \frac{100}{U_k} = 577,31 \cdot \frac{100}{3,973} \\ &= 14530,83 \text{ Ampères} \end{aligned}$$

$$K_m = 1 + \exp\left(-\frac{\pi \cdot 1,15}{3,77}\right) = 1,384$$

$$i_{1\max.} = \sqrt{2} \cdot 1,384 \cdot 14,53 \cdot 10^3 = 28,44 \cdot 10^3 \text{ A}$$

Dans le côté haute tension.

$$I_{kdm_2} = I_{n2} \frac{100}{U_k} = 13,33 \times \frac{100}{3,973}$$

$$I_{kdm_2} = 335,6 \text{ Amperes}$$

$$i_{2max} = \sqrt{2} \cdot 1,384 \cdot 335,6 = 656,86 \text{ Ampères}$$

Forces radiales.

Elles sont fonction du courant maximum de court-circuit et sont données par la relation suivante:

$$F_r = 6,4 \frac{(W \times i_{1max.})^2 \times L_{moy.} \times K_R \times 10^{-8}}{H_b}$$

K_R : Coefficient de Rogowski

L_m : Longueur moyenne de la spire

H_b : hauteur de la bobine

Dans l'enroulement basse tension on aura

$$F_{r1} = 6,4 \frac{(29 \times 28,44 \cdot 10^3)^2 \times 0,663 \times 0,97 \cdot 10^{-8}}{0,4502}$$

$$F_{r1} = 62,189 \cdot 10^3 \text{ Kgf.}$$

Dans l'enroulement haute tension on aura.

$$F_{r2} = \frac{6,4 (1256 \times 656,86)^2 \times 0,984 \times 0,97 \cdot 10^{-8}}{0,4502}$$

$$F_{r2} = 83,95 \cdot 10^3 \text{ Kgf.}$$

FORCES AXIALES:

Nous signalerons que les hauteurs des bobines basse tension et haute tension sont égales. Dans ce cas les forces axiales de court-circuit sont données par la relation suivante

$$F_a = F_r \frac{Q_r}{2 \cdot H_b}$$

Q_r : Largeur du canal de fuite.

Enroulement basse tension

$$F_{a1} = F_{r1} \times \frac{a_r}{2 H_b}$$
$$= 62,189 \times 10^3 \times \frac{2,788}{2 \times 45,02}$$

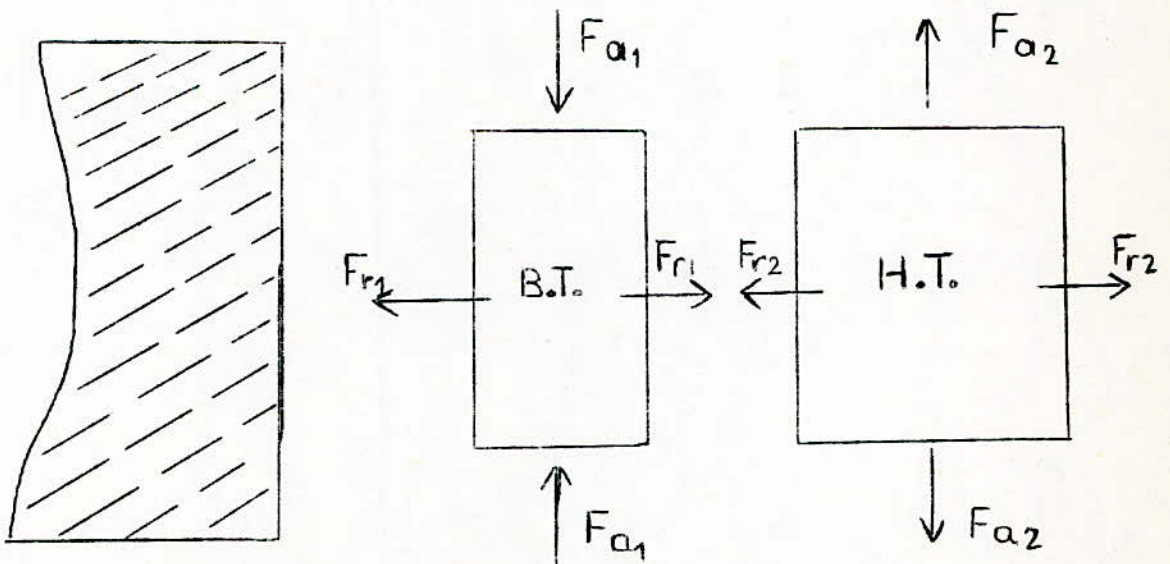
$$F_{a1} = 1925,6 \text{ Kgf.}$$

Enroulement haute tension

$$F_{a2} = F_{r2} \frac{a_r}{2 \times H_b}$$

$$F_{a2} = 33,95 \cdot 10^3 \cdot \frac{2,788}{2 \times 45,02} = 2599,43 \text{ Kgf}$$

Schéma de répartition des forces/



Effort unitaire produit dans l'enroulement par les forces radiales

- Enroulement basse tension.

Il sera déterminé par la relation suivante

$$\begin{aligned}\sigma_{r1} &= \frac{F_{r1} \cdot 10^2}{2 \times \pi \times W_1 \times S_{w1}} \\ \sigma_{r1} &= \frac{62,189 \cdot 10^3 \times 10^2}{2 \cdot \pi \times 29 \times 5 \times 43,8} = 155,84 \text{Kgf/cm}^2\end{aligned}$$

- Enroulement haute tension.

De la même manière que pour l'enroulement basse tension on aura :

$$\begin{aligned}\sigma_{r2} &= \frac{F_{r2} \cdot 10^2}{2 \cdot \pi \cdot W_2 \cdot S_{w2}} \\ \sigma_{r2} &= \frac{83,95 \cdot 10^3 \cdot 10^2}{2 \cdot \pi \cdot 4,909 \cdot 1256} = 216,7 \text{Kgf/cm}^2\end{aligned}$$

Nous savons que le cuivre a une contrainte admissible de :

$$\sigma_{\text{acui.}} = 700 \text{Kgf/cm}^2$$

de ce fait, on constatera que les bobines supportent facilement les efforts radiaux auxquels elles sont soumises; ils sont de loin inférieurs aux efforts admissibles.

Effort unitaire produit dans l'enroulement par les forces axiales.

-Enroulement basse tension.

L'effort se déduit de la formule suivante:

$$\sigma_{a1} = \frac{F_{a1}}{S_1}$$

avec:

$$S_1 = \pi D_{m1} \cdot a_1 = 21,1 \times 1,96 = 129,92 \text{cm}^2$$

$$\sigma_{a1} = \frac{1,926 \cdot 10^3}{129,32} = 14,82 \text{ Kgf/cm}^2$$

de la même manière que précédemment, on constate que la contrainte déduite par calcul est inférieure à l'admissible.

Enroulement haute tension

De la même manière que pour l'enroulement basse tension, on calcul l'effort unitaire dans l'enroulement haute tension:

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

avec:

$$\begin{aligned} S_2 &= \pi \cdot Dm_2 \times a_2 \\ &= \pi \times 28,47 \times 3,404 = 304,46 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

d'où :

$$\sigma_{a2} = \frac{2599,43}{304,46} = 8,54 \text{ Kgf/cm}^2$$

on constate que :

$$\sigma_{a2} < \sigma_{adm.}$$

Nous pouvons conclure, aussi bien du côté basse tension que du côté haute tension, que les enroulements ont une très bonne tenue aux efforts électrodynamiques de court-circuit.

Avant de passer au calcul mécanique de la cuve, il est nécessaire de dimensionner, par leur volume, les éléments suivants dont dépend la cuve:

- Enroulement basse tension.
- Enroulement haute tension.
- Colonnes.
- Culasse.
- Cuivre.
- Circuit magnétique.
- Enroulement basse tension.

$$V_{e1} = Lt_1 \times Sw_1 \times 3 \times 10^{-3}$$

$$V_1 = 19,224 \times 5 \times 43,8 \times 3 \times 10^{-3}$$

$$V_1 = 12,63 \text{ dm}^3$$

- Enroulement haute tension.

$$V_2 = Lt_2 \times Sw_2 \times 3 \times 10^{-3}$$

$$V_2 = 1178,834 \times 4,909 \times 3 \times 10^{-3}$$

$$V_2 = 17,36 \text{ dm}^3$$

- Colonnes.

$$V_{col} = 3 \times S_{col} \times H_{col}$$

$$V_{col} = 3 \times 224,87 \times 53,02 \times 10^{-3}$$

$$V_{col} = 35,77 \text{ dm}^3$$

- Culasse.

$$V_{cu.} = 2 \times S_{cu.} (3D + 2L_f)$$

$$V_{cu.} = 2 \times 258,6 (3 \times 18,14 + 2 \times 15,12)$$

$$V_{cu.} = 43,79 \text{ dm}^3$$

- Cuivre.

$$V_{cui} = V_1 + V_2 = 12,63 + 17,36$$

$$V_{cui} = 29,99 \text{ dm}^3$$

- Circuit magnétique.

$$V_{cm.} = V_{col.} + V_{cu.}$$

$$V_{cm.} = 35,77 + 43,79$$

$$V_{cm.} = 79,56 \text{ dm}^3$$

Volume de la masse décuvable.

Dans ce calcul nous faisons l'approximation suivante:
Le volume du matériel de serrage (cales - poutres - isolation etc.)
représente environ vingt (20) pourcent du volume du cuivre et
de celui du circuit magnétique. On pourra donc écrire que:

$$\begin{aligned}V_{\text{déc.}} &= 1,2 (V_{\text{cm.}} + V_{\text{cui}}) \\ &= 1,2 (79,56 + 29,99)\end{aligned}$$

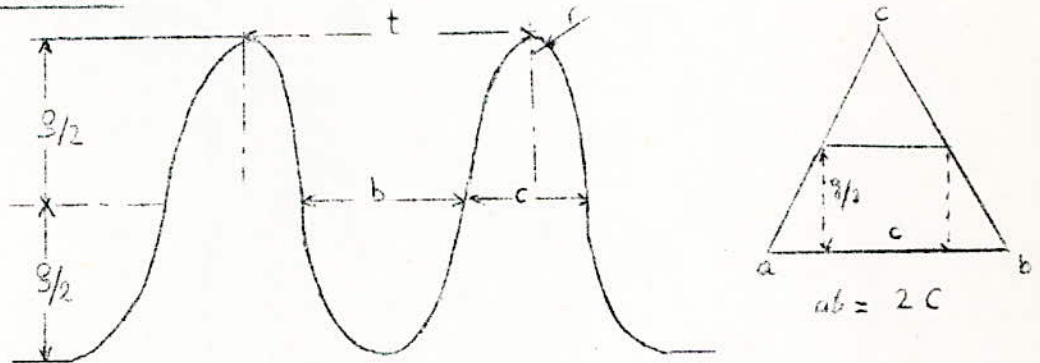
$$V_{\text{déc.}} = 131,56 \text{ dm}^3$$

Volume de la cuve.

$$\begin{aligned}V_{\text{cuv}} &= A \cdot B \cdot H_c \\ &= 112 \times 45 \times 109 \cdot 10^{-3}\end{aligned}$$

$$V_{\text{cuv.}} = 549,36 \text{ dm}^3$$

Volume des ondules



Nous assimilons la surface de base d'une ondule à celle d'un triangle.

Surface des ondules.

$$\begin{aligned}\text{Sond.} &= \frac{g \times 2 c}{2} = g \times c \\ &= 200 \times 10 \times 10^{-2} = 20 \text{ cm}^2\end{aligned}$$

Volume d'une ondele:

$$\begin{aligned}V_{\text{Ond}} &= S_{\text{Ond}} \times h_0 \\ &= 20 \times 89 \times 10^{-3} = 1,78 \text{ dm}^3\end{aligned}$$

Volume total des ondules

$$\begin{aligned}V_{\text{tOnd}} &= V_{\text{Ond}} (n_1 + n_2) \times 2 \\ &= 1,78 (24 + 9) \times 2 \\ V_{\text{tOnd}} &= 117,48 \text{ dm}^3\end{aligned}$$

Volume total de la cuve.

$$\begin{aligned}V_{\text{tcuv}} &= V_{\text{cuv}} + V_{\text{tOnd}} \\ &= 519,36 + 117,48 \\ V_{\text{tcuv}} &= 666,84 \text{ dm}^3\end{aligned}$$

Volume de l'huile.

$$\begin{aligned}V_h &= V_{\text{tcuv}} + V_{\text{déc}} \\ &= 666,84 + 131,46 = 535,38 \text{ dm}^3\end{aligned}$$

Avant de passer au calcul du poids de l'huile, il faudra en premier lieu calculer le volume total de l'huile. Compte tenu de la variation de la température ambiante ainsi que celle de l'huile contenue dans la cuve. Il y aura dilatation ou diminution du volume de l'huile dans la cuve, lequel devra être évacué ou compensé. Le phénomène de diminution entraîne obligatoirement une compensation. Pour cela il a été prévu un réservoir dit "conservateur d'huile" qui a pour rôle de recevoir l'huile en surplus lors d'une dilatation et de compenser le manque d'huile dans la cuve lors d'une diminution de température.

On signalera que pour tous les transformateurs immergés dans l'huile, une condition à remplir pour avoir un bon fonctionnement et surtout un bon refroidissement, est que la cuve doit toujours être pleine d'huile.

Le volume d'huile dans le conservateur lors d'un fonctionnement en régime normal de notre transformateur sera donné par la relation suivante:

$$V_{\text{cons}} = (0,07 \text{ à } 0,10) V_h$$

On choisira dans notre cas 7% du volume d'huile dans la cuve.

$$\begin{aligned} V_{\text{cons}} &= 0,07 \times 535,38 \text{ dm}^3 \\ &= 37,476 \text{ dm}^3 \end{aligned}$$

Volume total d'huile.

$$\begin{aligned} V_{\text{th}} &= V_h + V_{\text{cons}} \\ &= 535,38 + 37,47 = 572,85 \text{ dm}^3 \end{aligned}$$

Poids de l'huile.

$$\begin{aligned} G_h &= \gamma_h \times V_{\text{th}} \\ &\text{avec } \gamma_h = 0,9 \text{ Kg/dm}^3 \\ G_h &= 0,9 \times 572,85 \\ &= 515,56 \text{ Kg} \end{aligned}$$

Poids du circuit magnétique.

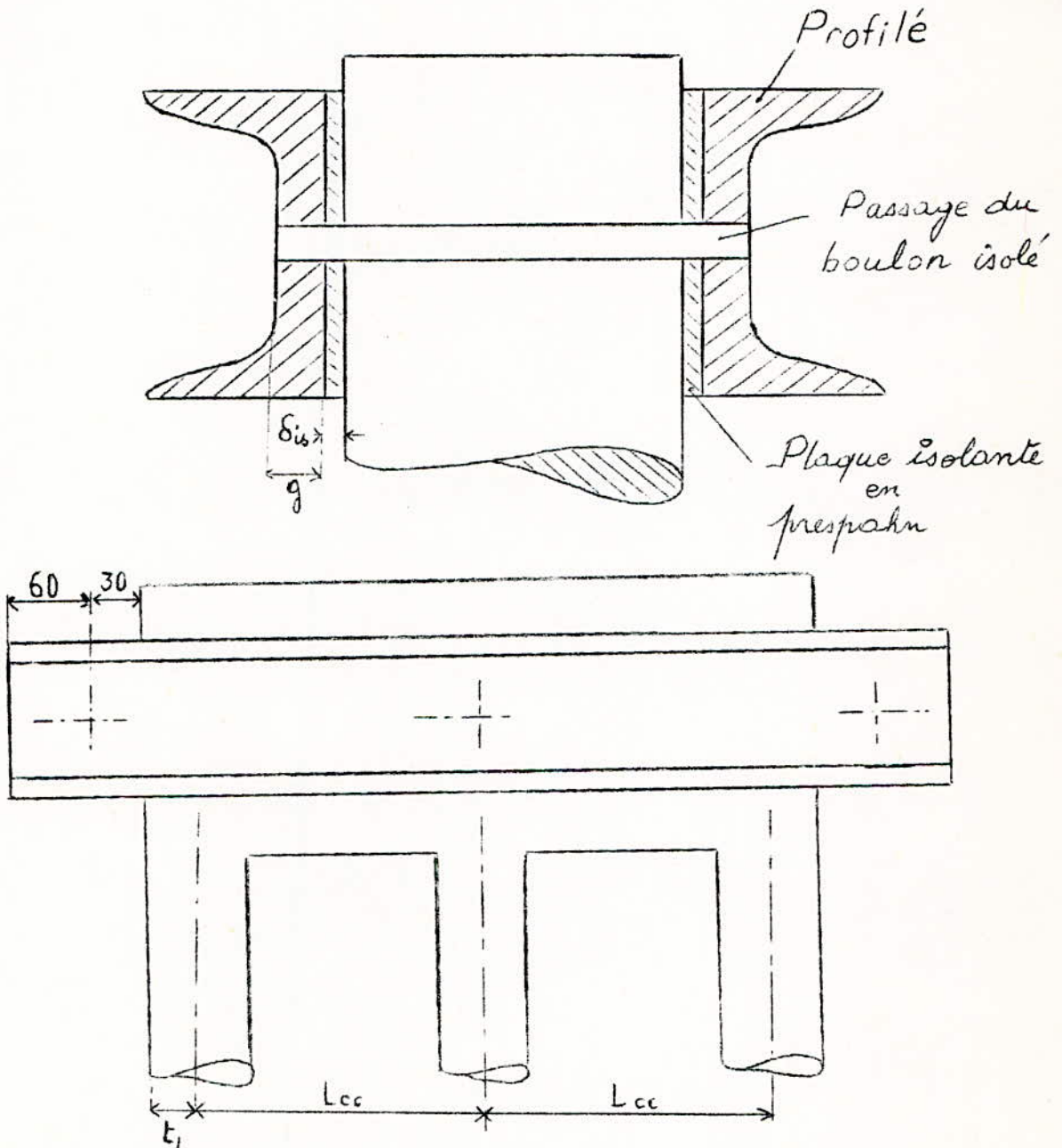
$$\begin{aligned} G_{\text{cm.}} &= \gamma_{\text{fer}} \times V_{\text{cm.}} \\ \text{avec } \gamma_{\text{fer}} &= 7,65 \text{ kg/dm}^3 \\ &= 7,65 \times 79,56 = 608,63 \text{ Kg.} \end{aligned}$$

Poids du cuivre

$$\begin{aligned} G_{\text{cui}} &= \gamma_{\text{cui}} \times V_{\text{cui}} \\ \text{avec: } \gamma_{\text{cui}} &= 8,9 \text{ Kg/dm}^3 \\ G_{\text{cui}} &= 8,9 \times 29,99 = 266,91 \text{ Kg} \end{aligned}$$

Calcul Mécanique des Parties Constructives du Transformateur.

Poutres et Boulons de serrage des culasses.



D'après la représentation schématique ci-dessus, nous constatons qu'il y a qu'une seule vis qui traverse effectivement le circuit magnétique. Les deux autres se trouvent à l'extérieur.

Les boulons et écrous exercent une pression, sur les poutres, qui se transmet aux tôles et à la culasse. La force totale de serrage exercée par les boulons et écrous se calcule d'après la relation suivante

$$P = p \cdot Hc_j \cdot L_m$$

Hc_j : hauteur des tôles du paquet latéral de la culasse.

L_m : représente le gabarit - largeur de la culasse.

avec

$$\begin{aligned} L_m &= D + 2 L_{cc} \\ &= 18,14 + 2 \times 33,26 \end{aligned}$$

p : pression entre la culasse et la poutre, considérée uniformément répartie.

Elle varie entre les limites suivantes/:

p : entre 2 et 6 Kgf/cm^2

On prendra dans notre cas : $p = 2,5 \text{ Kgf/cm}^2$

$$P = 2,5 \times 14,35 (18,14 + 2 \times 33,26)$$

$$P = 3143 \text{ Kg.}$$

La poutre doit être choisie de telle sorte qu'elle puisse résister à l'action de la pression des tôles.

Cette force doit être assurée par les boulons de serrage.

Moment maximum supporté par la poutre.

Il sera donné par la relation ci-après:

$$M_{\text{ax.}} = \frac{p \cdot Hc_j (L_{cc} + t_1)}{8}$$

avec:

$$t_1 = D/2 + 2 = 18,14/2 + 2$$

$$t_1 = 11,07 \text{ cm.}$$

d'où l'on aura:

$$M_{ax} = \frac{2,5 \times 14,85 \times (33,26 + 11,07)^2}{8}$$

$$M_{ax} = 9119,52 \text{ Kg.cm.}$$

Détermination du module de la résistance du profilé en U.

On rappellera qu'il sert à la réalisation de la poutre et est donné d'après l'expression suivante:

$$W_y = \frac{M_{ax}}{\sigma_a}$$

W_y : représente le module de résistance sur l'axe y

σ_a : effort unitaire admissible dans l'acier qui compose la poutre.

On utilisera un acier qui a pour charge minimale de rupture 3300 Kgf/cm² et un effort unitaire de 1200Kgf/cm².

Il est dit Acier de nuance A33.

D'où la détermination du module de résistance du profilé:

$$W_y = \frac{9119,5}{1200} = 7,6 \text{ cm}^3$$

et d'après le tableau donnant les dimensions et les caractéristiques mécaniques des profilés en U d'après :

N.Γ. A. 45-202 et 45 - 210

On choisit un profilé U.P.N. 140 qui a un moment de résistance supérieur à celui calculé puisqu'il doit lui être au moins égal.

Schéma du profilé U.P.N. 140.

Il répond aux données suivantes:

$$W_y = 11,8 \text{ cm}^3$$

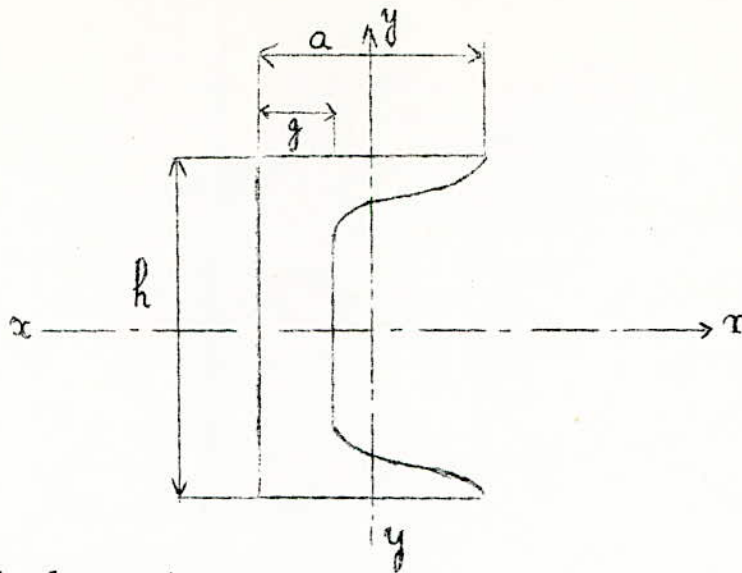
$$h = 140\text{mm.}$$

$$a = 60 \text{ mm.}$$

$$g = 07\text{mm.}$$

U.P.N.	Dimension (mm.)			Section mm ²	Poids Kg/m	sur l'axe x-x		sur l'axe y-y	
	h	a	g			I _x mm ⁴	W _x cm ³	I _y mm ⁴	W _y cm ³
12	120	55	7	17	13,4	364	60,7	43,2	11,1
14	140	60	7	20,4	16,0	605	86,4	62,7	14,8
16	160	65	7,5	24,0	18,8	925	116	85,3	18,3
18	180	70	8	28	22	1350	150	114	22,4
20	200	75	8,5	32,2	25,3	1910	191	148	27
22	220	80	9	37,4	29,4	2690	245	197	33,6
24	240	85	9,5	42,3	33,2	3600	300	248	39,6

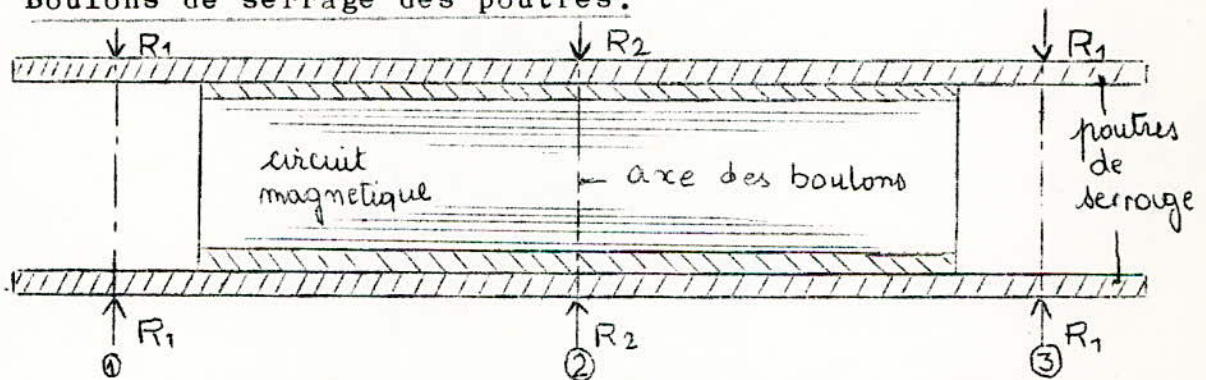
TABEAU d'après N. F. A. 45-202 et 45-210



Longueur de la poutre.

$$\begin{aligned}
 L_p &= 2 \times (L_{cc} + t_1 + 5) \\
 &= 2 \times (33,26 + 11,07 + 5) \\
 L_p &= 98,66 \text{ cm.}
 \end{aligned}$$

Boulons de serrage des poutres.



Les boulons seront soumis à deux forces principales:

- Les forces de réactions des tôles serrées ce qui entraîne un phénomène de traction.
- Le poids de la partie décuvable.

Dans le cas où la partie décuvable est suspendue au couvercle; elle produit une flexion et en même temps un cisaillement.

En utilisant la figure ci-dessus on obtient un modèle de calcul. Du fait de l'approximation de la longueur de la poutre qui est égale à la distance entre les boulons extrêmes; on aura:

$$R_1 = \frac{3 P}{16} = \frac{3 \times 3143}{16}$$

$$R_1 = 589,31 \text{ Kgf.}$$

$$R_2 = \frac{3 P}{8} = \frac{3 \times 3143}{8}$$

$$R_2 = 1964,38 \text{ Kgf.}$$

Une constatation évidente apparait, c'est que le boulon central est le plus sollicité.

Calcul des boulons.

Le calcul du boulon doit toujours se faire de telle sorte que les efforts unitaires (charge admissible) soient toujours supérieurs aux efforts se produisant sur les boulons.

En considérant les efforts de traction on aura :

$$\sigma_{2tr} = \frac{R_2}{S_2} = \frac{4 R_2}{d_2^2} < \sigma_{at}$$

d_2 : représentant le diamètre du boulon le plus sollicité.

σ_{2t} : effort unitaire à la traction ou contrainte admissible à la traction.

En utilisant l'acier A48 qui a une résistance minimale de rupture de 4800 Kgf/cm^2 et une contrainte admissible de 1000 Kgf/cm^2 on aura le diamètre du boulon qui sera le suivant :

$$d_2 = \sqrt{\frac{4 R_2}{\sigma_{at}}} = \sqrt{\frac{4 \times 1964,38}{1000}}$$

$$d_2 = 1,58 \text{ cm.}$$

On choisira un diamètre arrondi de : 1,6 cm.

$$d_{2arr.} = 1,6 \text{ cm.}$$

d _{ext} mm.	14	16	18	20	22	24	27	30
d _{int.} mm.	11,4	13,4	14,75	16,75	18,75	20,1	23,1	25,45
Pas des filet, mm.	2	2	2,5	2,5	2,5	3	3	3,5

Tirants .

Le couvercle supporte la partie décuvable à l'aide de quatre (4) tirants.

Les poutres inférieures et supérieures sont reliées par (4) quatre tirants qui servent à presser les bobines et en même temps à soulever la partie active.

On adoptera la solution des tirants longs ; qui auront à accomplir deux fonctions à la fois.

Chaque tirant aura donc à supporter le quart (1/4) du poids de la partie décuvable. Il sera donc soumis à une traction.

Poids de la partie décuvable.

$$G_{\text{déc}} = G_{\text{cui}} + G_{\text{cm}} + G_{\text{p}}$$

$$G_{\text{p}} = 4 \times L_{\text{p}} \times G_{\text{un}}$$

Nous savons par ailleurs que G unitaire est donné par le tableau T.QU et est égal à 16Kgf.

d'où:

$$G_{\text{p}} = 4 \times 16 \times 98,66 \cdot 10^{-2}$$

$$G_{\text{p}} = 63,14 \text{ Kgf.}$$

$$G_{\text{dec}} = 266,91 + 608,63 + 63,14$$

$$G_{\text{déc}} = 938,68 \text{ Kgf.}$$

Diamètre du tirant.

$$d_{\text{t}} = \sqrt{\frac{4 \cdot G_{\text{déc}}}{4 \pi \tilde{\sigma}_{\text{at}}}}$$

Il est réalisé en acier A33 qui a une contrainte admissible à la traction de 1000 Kgf/cm²

$$d_t = \sqrt{\frac{4 \times 938,68}{4 \cdot 1000}} = 0,55 \text{ cm.}$$

Nous opterons pour un tirant de diamètre:

$$d_t = 6 \text{ mm.}$$

Vérification de l'isolation des boulons de serrage.

La zone la plus sollicitée est évidemment celle qui traverse la poutre; l'isolation dans celle-ci sera soumise au maximum d'effort de compression qui tendra à l'écraser.

Nous savons par ailleurs que le papier a une contrainte admissible au cisaillement de :

$$\sigma_{\text{aci}} = 250 \text{ Kgf/cm}^2$$

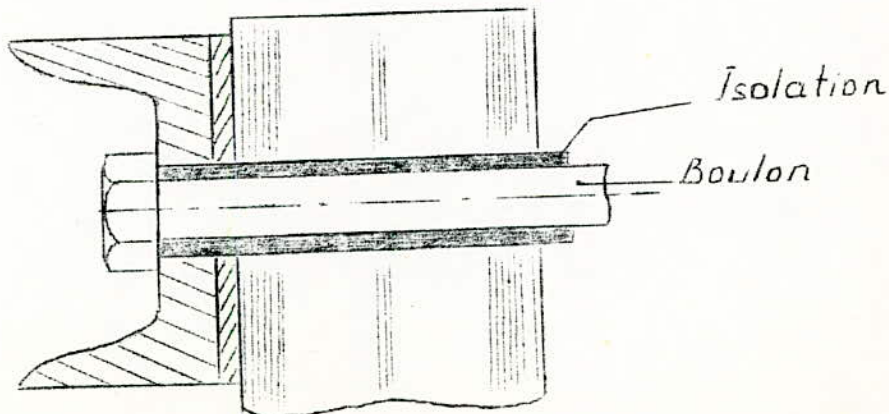
de ce fait, il nous est donc aisé de calculer l'effort réel auquel est soumise notre isolation.

$$\sigma_{\text{cis}} = \frac{G_{\text{déc}}}{4 \cdot d_2 \cdot g.}$$

g : représente l'épaisseur de la poutre donnée par le tableau des normes : pour U.P.N. 140 on a g = 0,7cm.

$$\sigma_{\text{cis}} = \frac{938,68}{4 \cdot 1,6 \cdot 0,7} = 209,53 \text{ Kgf/cm}^2$$

on voit bien que: $\sigma_{\text{cis}} < \sigma_{\text{aci}}$



CALCUL MECANIQUE DE LA CUVE

Pour accentuer le refroidissement, choisi naturel, il a été jugé nécessaire de choisir des parois de la cuve qui soient ondulées. Elles offrent une plus faible résistance mécanique que les parois lisses. Par conséquent un meilleur échange de chaleur avec le milieu ambiant.

Il faut néanmoins tenir compte de certaines contraintes telle que la pression exercée par l'huile sur les parois et les autres forces d'origine mécanique .

Pour cela, il faudra assurer une construction qui soit suffisamment rigide pour supporter ces efforts. Raison pour laquelle un bondage de la cuve sera prévu.

Le bondage est assuré avec un matériau qui soit suffisamment résistant à l'effort de traction auquel il sera soumis. Le matériau servant pour le bondage est de forme méplat pour permettre une assez grande surface d'adhérence avec la cuve et par la même une assez large répartition des forces.

On utilisera une bande de dimension $30 \times 5 \text{ mm}^2$.

Nous constaterons par ailleurs que la partie inférieure est la partie la plus sollicitée . Car la pression à ce niveau est la plus élevée ne serait ce que par l'existence d'un certain niveau d'huile : $p = \rho \cdot g \cdot h$

Nous choisirons l'acier de nuance A33 pour la réalisation de la cuve, On aura donc une épaisseur qui sera la suivante :

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

A et B : représentent les dimensions du fond de la plaque

$$A = 112 \text{ cm.} \quad ; \quad B = 45 \text{ cm.}$$

La résistance des matériaux nous permettra de procéder au calcul de la flèche au milieu de la plaque.

Surface de la cuve.

$$S_{\text{cuv}} = A \times B = 112 \times 45$$

$$S_{\text{cuv}} = 5040 \text{ cm}^2$$

Poids propre du fond de la cuve.

$$G_{fc} = \gamma_{\text{fer}} \cdot S_{\text{cuv}} \cdot \Delta f$$
$$= 7,65 \times 5040 \times 0,55 \times 10^{-3}$$

$$G_{fc} = 21,206 \text{ Kgf.}$$

Force exercée sur le fond de la cuve.

La cuve est soumise à l'effet de son poids propre d'une part et à l'effet des poids de la partie décuvable et de l'huile.

$$G_t = G_{\text{déc.}} + G_{ht} + G_{fc}$$
$$= 938,68 + 515,56 + 21,206$$

$$G_t = 1475,45 \text{ Kg.}$$

Pression exercée sur le fond de la cuve.

Elle est donnée par la relation suivante:

$$P_f = \frac{G_t}{S_{\text{cuv}}} = \frac{1475,45}{5040}$$

$$P_f = 0,292 \text{ Kgf/cm}^2$$

Si l'on désigne par:

E : module de Young qui est égal à : $2,1 \times 10^6 \text{ Kgf/cm}^2$
 α : facteur multiplicatif, fonction du rapport A/B ,
qui est donné par le tableau se trouvant sur la
page suivante.

Connaissant les paramètres "A" et "B" caractérisant la cuve,
on pourra calculer leur rapport.

$$\alpha = \frac{A}{B} = \frac{1120}{450} = 2,49$$

A/B	α	β_1	β_2
1	0,0138	0,0229	0,0229
1,5	0,0241	0,0204	0,0368
2	0,0276	0,0140	0,0399
3	0,0279	0,0130	0,0405
4	0,0282	0,0127	0,0409

En fonction de la valeur du rapport A/B qui est égal à 2,49 on prendra:

$$\alpha = 0,0277$$

$$\beta_1 = 0,0136$$

$$\beta_2 = 0,0401$$

ON pourra calculer la flèche au milieu de la plaque, laquelle est donnée par la relation ci-dessous:

$$f_{cp} = \alpha \frac{p_f \cdot B^4}{E X - (\Delta f)^2}$$

$$= 0,0277 \frac{0,292 \times (45)^4}{2,1 \times 10^6 \times (0,55)^2}$$

$$f_{cp} = 0,052 \text{ cm.}$$

On peut constater que cette flèche est pratiquement négligeable, par conséquent assez bien supportée par la plaque.

—○—

ETUDE TECHNOLOGIQUE

Etude des différentes parties du transformateur.

Constitution générale.

Du point de vue électrotechnique, un transformateur comprend essentiellement :

- un circuit électrique primaire, se comportant en récepteur à force contre électro-motrice, relié au réseau fournissant l'énergie;
- un circuit électrique secondaire, se comportant comme un générateur à force électro-motrice et débitant sur les récepteurs;
- un noyau magnétique assurant le transport du flux, dans les meilleures conditions, entre les deux enroulements.

Sur le plan technologique, il y a lieu d'ajouter à ces organes :

- un système de refroidissement évacuant les pertes;
- des organes de prises de courant, constitués par les traversées;
- un commutateur de réglage permettant d'agir sur la tension en fonction de l'état de la charge secondaire et de la tension primaire;
- des organes annexes, ayant pour but de contrôler la marche ou de faciliter l'exploitation.

Circuit Magnétique.

Le tableau MO1, donne les fonctions que doit assurer le circuit magnétique et les conditions auxquelles doit satisfaire sa fabrication.

. Une condition primordiale pour obtenir un minimum de fuite et un meilleur rendement global, est que, les tôles utilisées soient des tôles isolées, à faibles pertes, et que la forme donnée au circuit magnétique soit telle que le rapport entre le volume de cuivre et le volume du fer reste entre une certaine limite.

. On utilisera dans notre cas des tôles laminées à froid et qui soient en Acier du type ARMCO .

. L'assemblage des noyaux formant le circuit magnétique se fera par enchevêtrement ce qui nous permettra une diminution de l'entrefer et une augmentation de la stabilité dynamique.

fonctions à assurer	conditions d'un fonctionnement rationnel et économique	caractéristiques magnétiques ou électriques	Incidences sur le choix des matériaux et la construction
assurer le transport du flux entre les enroulements	courant magnétisant minimal	réductance faible	perméabilité élevée section des noyaux importante, longueur des noyaux faible, entrefer réduit au maximum.
	pertes par courants de foucault réduites	résistivité élevée	feuilletage du circuit dans la direction du flux
	pertes par hystérésis réduites	cycle d'hystérésis réduit coefficient de Steinmetz faible	
	pas de déformation de la tension secondaire	absence de saturation	induction choisie à une valeur n'entraînant pas la saturation.

Tableau M01

Noyau .

On appelle noyau d'un transformateur, les différentes parties de l'ensemble formant le circuit magnétique.

Suivant le type de noyau on peut distinguer:

- Transformateur à colonnes,
- Transformateurs cuirassés.

On utilisera l'Acier laminé à froid pour les noyaux, car il possède de meilleures caractéristiques magnétiques dans le sens du laminage que l'acier laminé à chaud.

On rappellera que la section la plus économique à attribuer aux noyaux est la section circulaire; mais elle est d'exécution très

difficile avec des paquets de tôles. On utilisera une section rectangulaire avec un certain nombre de gradins ce qui nous permettra un assez bon rapprochement de la section circulaire. On orientera dans l'axe normal de la culasse la plus grande dimension de notre noyau, et ce afin de permettre une réduction des pertes dans le fer pour le transformateur immergé dans l'huile.

Dans notre cas, on aura recours à six (6) gradins soit six longueurs de tôles différentes de 0,35mm. d'épaisseur placées parallèlement à l'axe des bobines.

Tôles.

Les tôles se présentent sous forme de grand rouleau d'Acier de 0,35mm. d'épaisseur suivant le cas, que l'on découpe en section rectangulaire de dimension: a et b avec une tolérance technologique de cinq (5) mm.

Type de tôles	dimensions $a \times b$ mm ²	nombre de tôles/colonne	nombre total de tôles
1	250,8 x 802,6	204	612
2	231,6 x 802,6	136	408
3	203,4 x 802,6	122	366
4	166,5 x 802,6	105	315
5	124 x 802,6	80	240
6	76,7 x 802,6	55	165

Une fois le travail de découpage terminé on procédera à un contrôle systématique des dimensions.

- Finition des plaques, soit enlèvement des bavures résultantes du découpage,
- Sachant que l'érouissage lors du découpage en bandes rectangulaires diminue leur qualité, il est donc nécessaire de procéder à un recuit dans une ambiance d'Hydrogène
- On opère statistiquement à un contrôl fin.

Culasse,

Les culasses ont généralement une forme semblable à celle des noyaux, mais il y a intérêt à ce que la section active de la culasse soit égale à celle du noyau ou augmentée de 5 à 10% pour réduire les pertes dans le fer de la culasse ainsi que le courant à vide.

Le fait d'utiliser six gradins impose des longueurs de tôles formant la culasse différentes.

Tôles,

Elles se présentent sous forme de rouleaux isolés par un revêtement en carlite capable de résister au recuit.

Comme précédemment; on opère à un découpage des bandes avec une tolérance technologique de cinq (5) mm. sur "0."

Le nombre de tôles est donné par le tableau suivant en fonction du type de tôles.

Type de tôles	Dimensions $a \times b$ mm ²	nombre de tôles/culasse	nombre total de tôles
1	843 x 210,4	204	408
2	823,8 x 210,4	136	272
3	795,6 x 210,4	122	244
4	768,7 x 210,4	105	210
5	716,2 x 210,4	80	160
6	668,9 x 210,4	55	110
1	1435 x 210,4	351	702

Une fois le travail de découpage terminé, on procédera à un contrôle systématique ci-dessous;

- Finitions des plaques (enlèvement des bavures).
- Recuit,
- Contrôle statistique final et stockage.

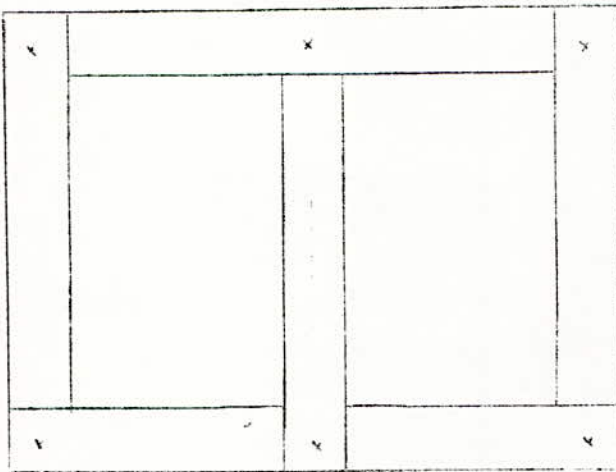
Assemblage du circuit magnétique,

Il peut se réaliser de deux manières différentes:

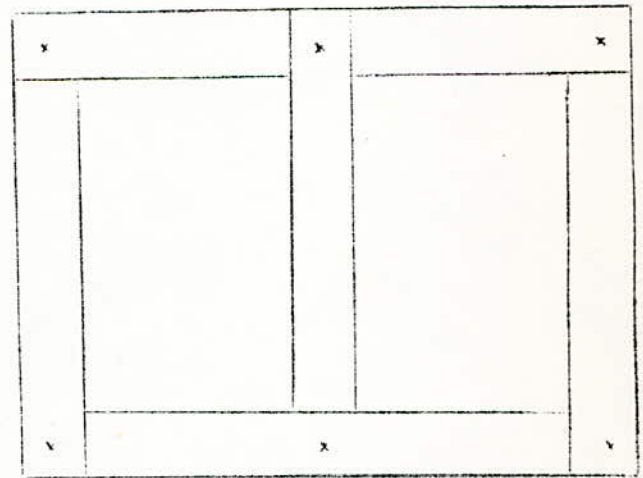
- Réunir les noyaux bout à bout;
- Réunir les noyaux par enchevêtrement.

Lors de l'assemblage par enchevêtrement l'entrefer entre les tôles des colonnes et des culasses peut être réduit au minimum, car l'endroit de jonction dans une couche est recouvert par tôle dans une autre couche. Par contre lors de l'assemblage bout à bout, il faudra placer entre la colonne et la culasse une couche d'isolation pour prévenir la formation de courant de Foucault à l'endroit de jonction.

L'absence de câles dans l'assemblage enchevêtré permet une diminution considérable du courant à vide et une augmentation de la stabilité mécanique.



Câles pour les couches
impaires: 1,3,5 etc...



Câles pour les couches
paires: 2,4,6 etc....

- Assemblage d'un noyau enchevêtré.-

Serrage du circuit magnétique.

Le circuit magnétique, constitué par les noyaux et les culasses, doit former un ensemble très rigide, afin de réduire au maximum les petits entrefers dues à la jonction des tôles, d'éviter

l'augmentation du courant magnétisant, d'atténuer le ronflement du transformateur.

Tirants.

Se présentent sous forme de barres cylindriques en Acier A48 avec un diamètre de six(6) millimètres. Comme on l'a constaté dans l'étude mécanique un total de quatre tirants nous est nécessaire pour pouvoir tirer le circuit magnétique de la cuve; de ce fait on procédera à un découpage systématique de quatre (4) tirants de longueur 462mm. (Voir schéma.)

Boulons.

Permettront le serrage du circuit magnétique ,et seront réalisés en Acier A48 avec les dimensions normalisées;(Voir dessin).

Profilés.

Sont des pièces brutes qui viennent directement des moules elles se présentent sous forme de profilés en U réalisés en Acier A33. Ce sont des pièces normalisées suivant les contraintes mécaniques auxquelles elles seront soumises.

Suite des opérations.

- Découpage suivant une longueur appropriée à l'utilisation
- Perçage de trois(3) trous permettant le passage des boulons
- Perçage de quatre (4) trous permettant le passages des tirants servant en même temps de support. (Détails voir figure.)

Téchnologie de bobinage.

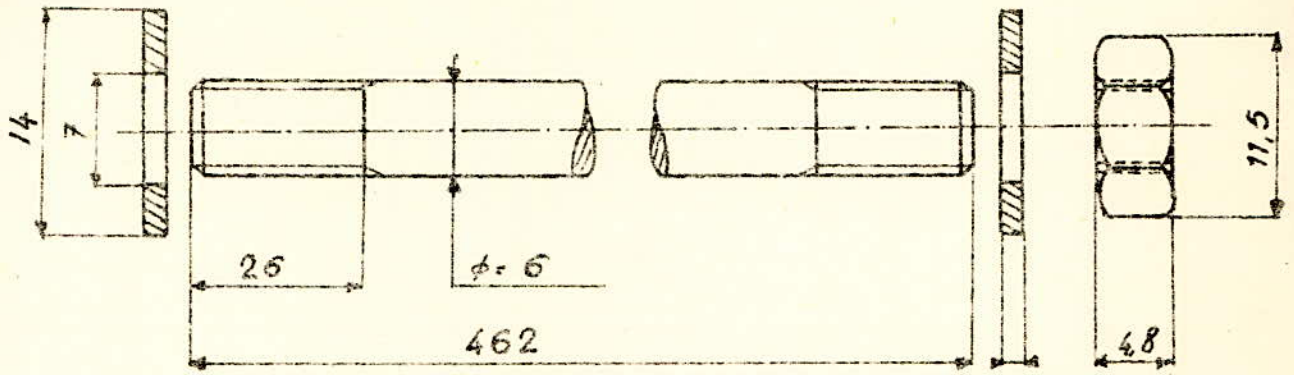
Les bobines doivent être montées et conçues de telle sorte que les enroulements soient traversés par le même flux et aient un même sens. La forme et le mode de construction des enroulements sont déterminés par la puissance du transformateur.

Construction des bobines des enroulements.

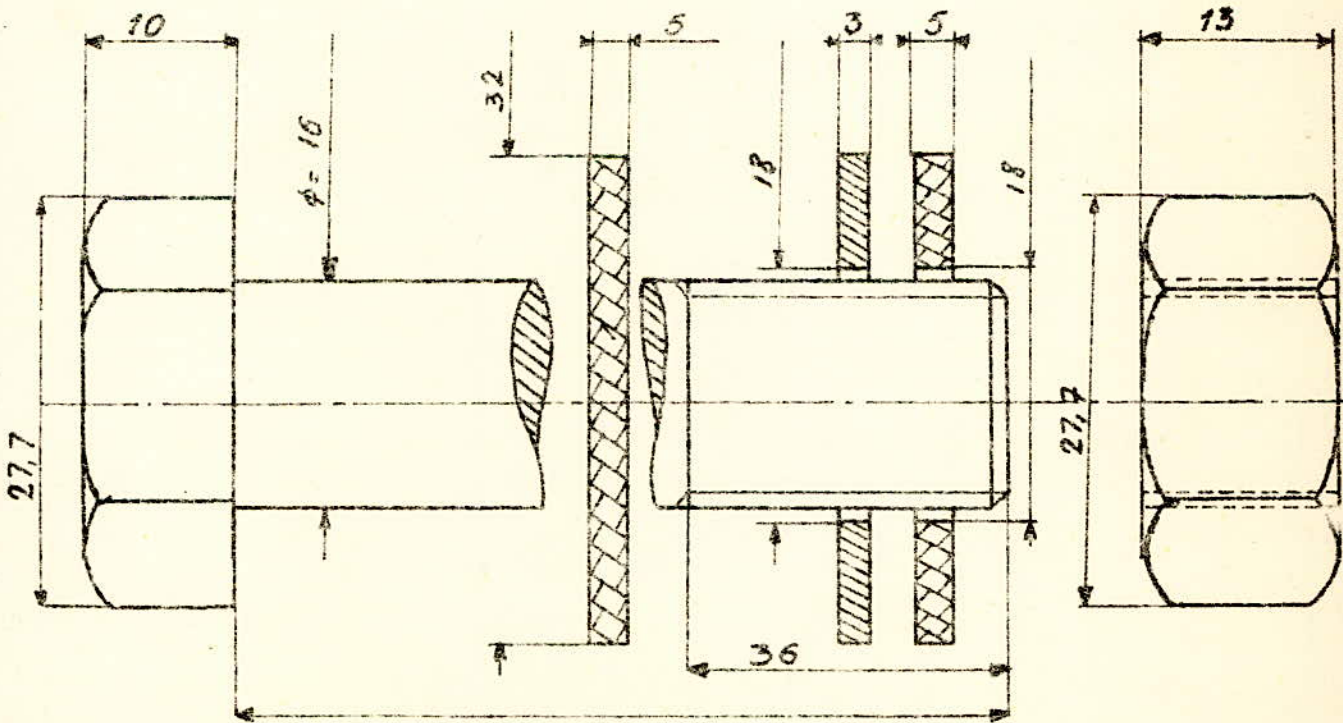
Réalisation des bobines.

Des maisons spécialisées "CABLERIES", suivant des dimensions standardisées, fournissent le fils de bobinage que l'on se propose d'utiliser pour effectuer le bobinage désiré.

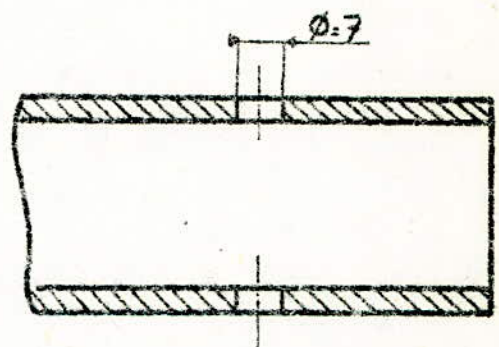
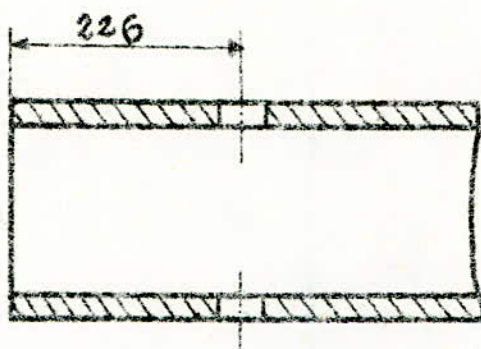
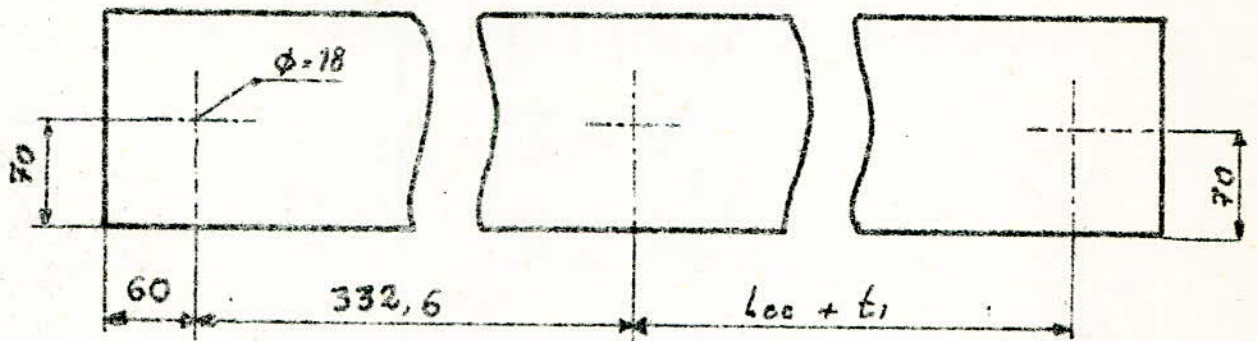
TIRANT



BOULON



PROFILES en U



Suite des opérations.

Le travail se fait souvent à la chaîne par des ouvriers spécialisés pour chacune des étapes essentielles.

- Préparation du gabarit et du touret de fils de bobinage et fixation de ces derniers sur la machine à bobiner
- Fixation du bout de fil de bobinage sur le gabarit
- Coller les cales longitudinales
- Mise en marche du compte tour de la machine
- Après réalisation d'une spire, opérer à la transposition des conducteurs.
- Introduire les câbles transversales;
- On répétera les deux dernières opérations jusqu'à la réalisation totale de la bobine.
- Envelopper la bobine avec des feuilles de Kraft.
- Enlever le gabarit
- Retirer la bobine.

&&- Le même procédé est utilisé pour la bobine haute tension .

REMARQUES.

++ Pour prévenir les ondes de chocs, l'isolation de la dernière ^{couche} comportant 54 spires aura une isolation renforcée.

++ Le guidage et la tension du fil se font automatiquement par la machine à bobiner ou éventuellement à la main.

++ Les prises de réglage se situent respectivement à la ,

-1193° spire pour le réglage à moins cinq pourcent (-5%) .

-1256° spire pour le réglage à la tension nominale (0%)

-1318° spire pour le réglage à plus cinq pourcent (+5%) .

Les prises sont enfouies dans des gaines isolantes, assez longues, pour atteindre les bornes du dispositif de réglage choisi.

Téchnologie de montage.

- Après poinçonnage et découpage automatique de la tôle avant recuit, on confectionne le circuit magnétique par assemblage des tôles du circuit en différents lits de façon à permettre l'enchevêtrement entre elles.

- Le serrage se fera à l'aide de profilés en U isolés des tôles par des feuilles de Préospahn et des boulons enfouis dans le tube en backélite .

- Fixer une extrémité des tirants.

- Démontez les tôles de la culasse supérieure

- Introduire les cylindres en backélite dans chaque noyau

- Placer les câles de séparation entre noyaux et cylindre en backélite pour ne pas détériorer les gradins.

- Introduire le cylindre isolant servant de pièce de serrage et d'isolation entre les tôles et la culasse.

- Monter l'enroulement basse tension en veillant à ce que les sorties soient suffisamment longues pour permettre les connexions.

- Introduire un second cylindre isolant

- Mettre en place l'enroulement haute tension

- Remettre en place les tôles de la culasse supérieure

- Placer les poutres 'en U' isolées

- Terminer le processus par un serrage du circuit magnétique.

La liaison de la partie décuvable et du couvercle de la cuve se fait à l'aide de tirants.

- Une fois, les différentes opérations terminées on procédera à la suppression des traces de l'humidité résiduelle en plaçant l'ensemble dans une enceinte chauffée à 80°C pour une durée d'environ 48 heures.

- Le remplissage de la cuve du transformateur se fera au moment de l'utilisation **ceci** pour faciliter son transport . Le remplissage se fera par siphonnage pour éviter toute existence de bulles d'air, sachant que celle ci est un parasite.

Remarques:

- Les transformateurs , une fois entièrement montés, sont soumis à des tests de laboratoire pour prévenir tout défaut de fabrication.

- Les câles ont pour rôle :

- de maintenir en toutes circonstances les canaux de circulation d'huile de façon que le refroidissement s'y fasse toujours dans les meilleures conditions.

- d'éviter toute déformation ou déplacement des bobines de haute tension et de basse tension sous l'effet:
 - des court-circuits donnant lieu à des efforts électrodynamiques,
 - des vibrations en service normal ou des chocs de transport,
 - du tassement éventuel des isolants.



Conservateur d'huile ou Ballonnet.

Un conservateur d'huile est un réservoir qui se trouve sur la partie extérieure de la cuve. Suivant les cas, selon sa longueur, il peut se trouver suivant la longueur ou la largeur du couvercle de la cuve.

Le conservateur a généralement une forme cylindrique, il est directement fixé sur le couvercle de la cuve à l'aide de deux supports généralement. Le ballonnet est muni d'une canalisation (tube) assurant une liaison permanente entre l'huile contenue dans la cuve et l'huile du ballonnet et d'un bouchon de remplissage; sur le côté se trouve une jauge indiquant le niveau d'huile contenue dans le ballonnet.

Le ballonnet possède un volume de (0,07 à 0,1) le volume d'huile contenue dans la cuve. Il ne sera jamais rempli entièrement mais à moitié, le voyant placé sur la paroi du ballonnet indique les différents niveaux entre autre les niveaux : mini, normal, max.

Le ballonnet aura pour rôle principal de compenser les variations du niveau d'huile sous l'effet des écarts de température. Suivant les cas, le ballonnet est muni d'un tube de respiration établissant une communication permanente entre le diélectrique et l'atmosphère, ce qui évite les condensations intérieures. Si l'air est très humide, il est possible de compléter le respirateur par un assécheur contenant du Chlorure de calcium renouvelé périodiquement

Tube d'expansion.

Tout transformateur à refroidissement à l'huile est obligatoirement muni d'un tube d'expansion qui est en liaison directe avec l'huile de la cuve.

La tubulure d'expansion sert de soupape de sécurité en cas de surpression dans la cuve du transformateur.

Des incidents graves du transformateur (clacage entre bobines, ou bobines et masse) s'accompagnent d'un dégagement brusque de gaz provenant de la décomposition des isolants ou de l'arc élec-

trique. Ces gaz pourront provoquer une surpression interne de la cuve capable de détériorer celle-ci.

La soupape de sécurité doit par conséquent intervenir avant que la surpression n'atteigne une valeur dangereuse.

Le tube d'expansion comprend: généralement:

- Un tube de gros diamètre fixé sur le couvercle de la cuve.
- A l'intérieur de ce tube se trouve fixé une membrane qui se déchire ou se casse sous l'effet d'une faible pression elle peut être constituée par une mince feuille de verre ou clinquant en laiton. Quand la membrane est crevée, l'huile sera donc rejetée vers l'extérieur où une canalisation d'évacuation de l'huile vers l'extérieur est prévue pour éviter tout risque d'incendie.
- Dans le cas où un claquage aurait déjà eu lieu on prévoit dans certain cas un niveau permettant de contrôler l'existence d'huile au dessus de la membrane, indice certain de la rupture de la membrane.

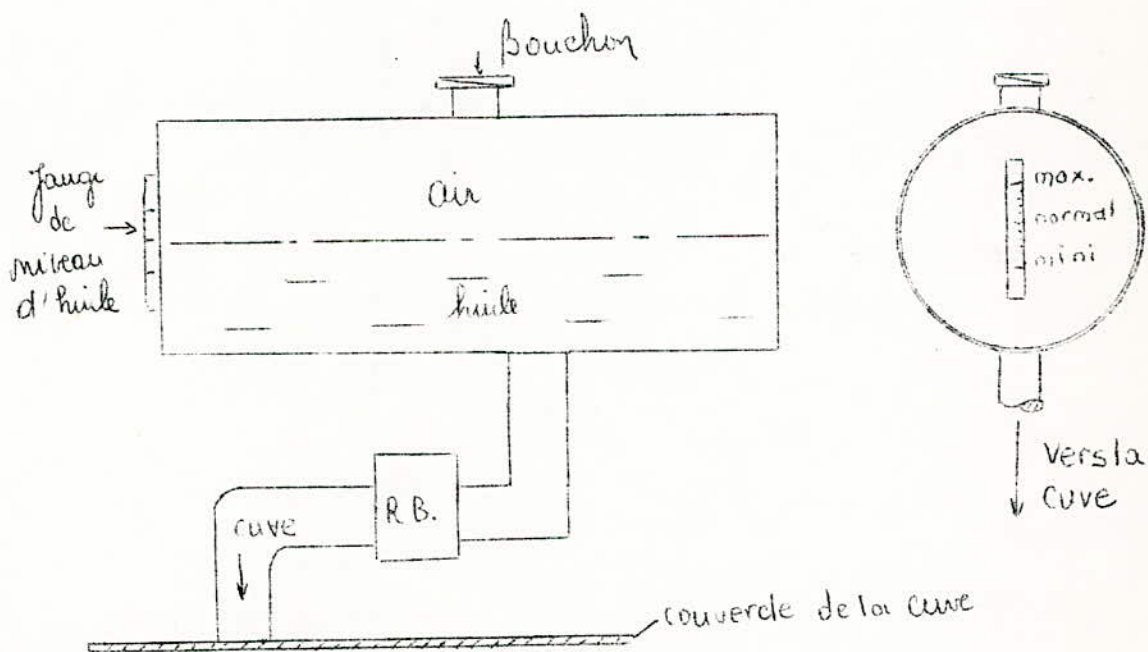
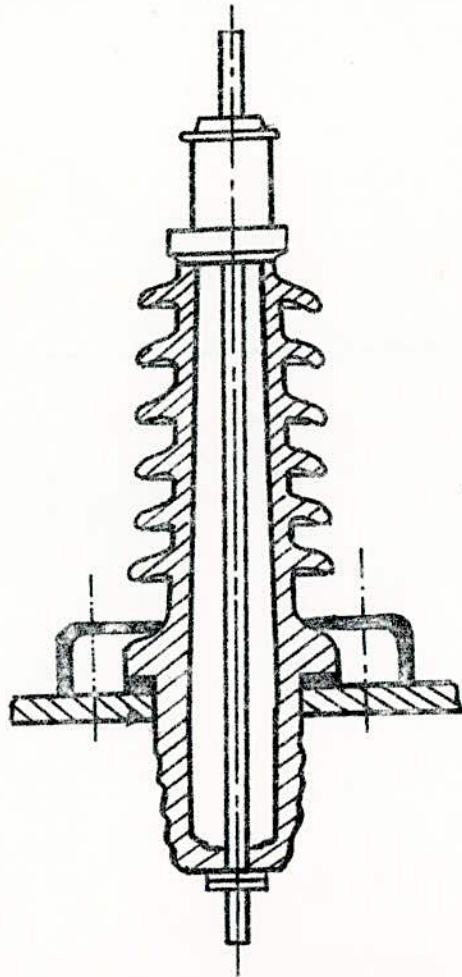
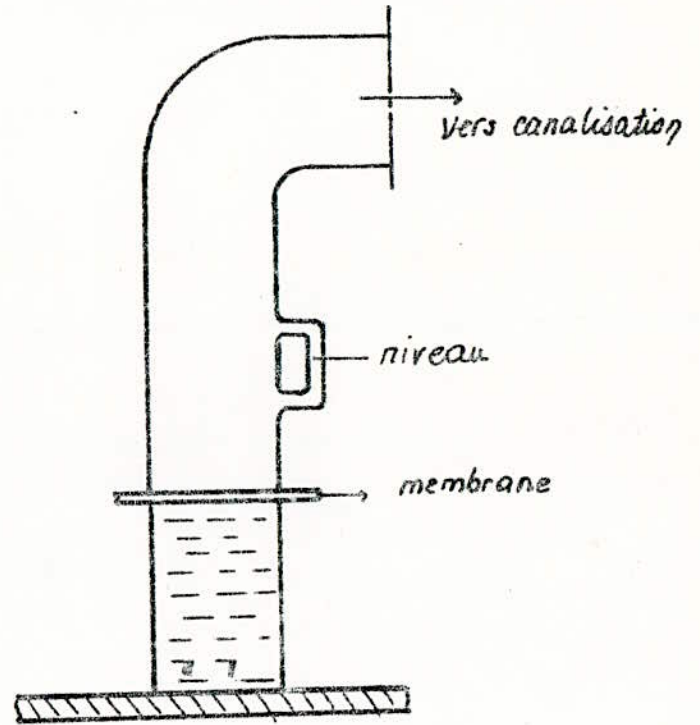


Schéma du conservateur d'huile ou ballonnet



ISOLATEUR . H.T.



TUBULURE

Rélais BUCHHOLZ

Dans un transformateur , comme dans tout appareil électrique plongé dans un diélectrique liquide , un accident interne se traduit dans tous les cas par un dégagement plus ou moins important de gaz provenant de la décomposition du diélectrique sous l'action de la chaleur et de l'arc électrique.

Etant monté au dessus de la cuve contenant l'huile, lorsqu'un défaut peu important se produit, le dégagement de gaz est lent, les bulles de gaz ont une tendance naturelle à monter au point haut du transformateur et vont s'accumuler à la partie supérieure du relais BUCHHOLZ ; le niveau d'huile baisse dans le relais et par conséquent le flotteur supérieur suivant le niveau d'huile descendant, descend jusqu'à fermeture du premier contact , qui est le contact d'alarme.

Dans le cas où le défaut est grave , il se produit un violent dégagement de gaz qui provoque par conséquent un violent mouvement d'huile et de gaz, ceci entraîne le mouvement du second flotteur qui enclenche une seconde alarme ou directement provoque le déclenchement du disjoncteur de protection.

Un robinet se trouve à la partie supérieure du relais permettant la purge du réservoir des gaz qui s'y sont accumulés, l'analyse de ces gaz renseigne sur la nature du défaut:

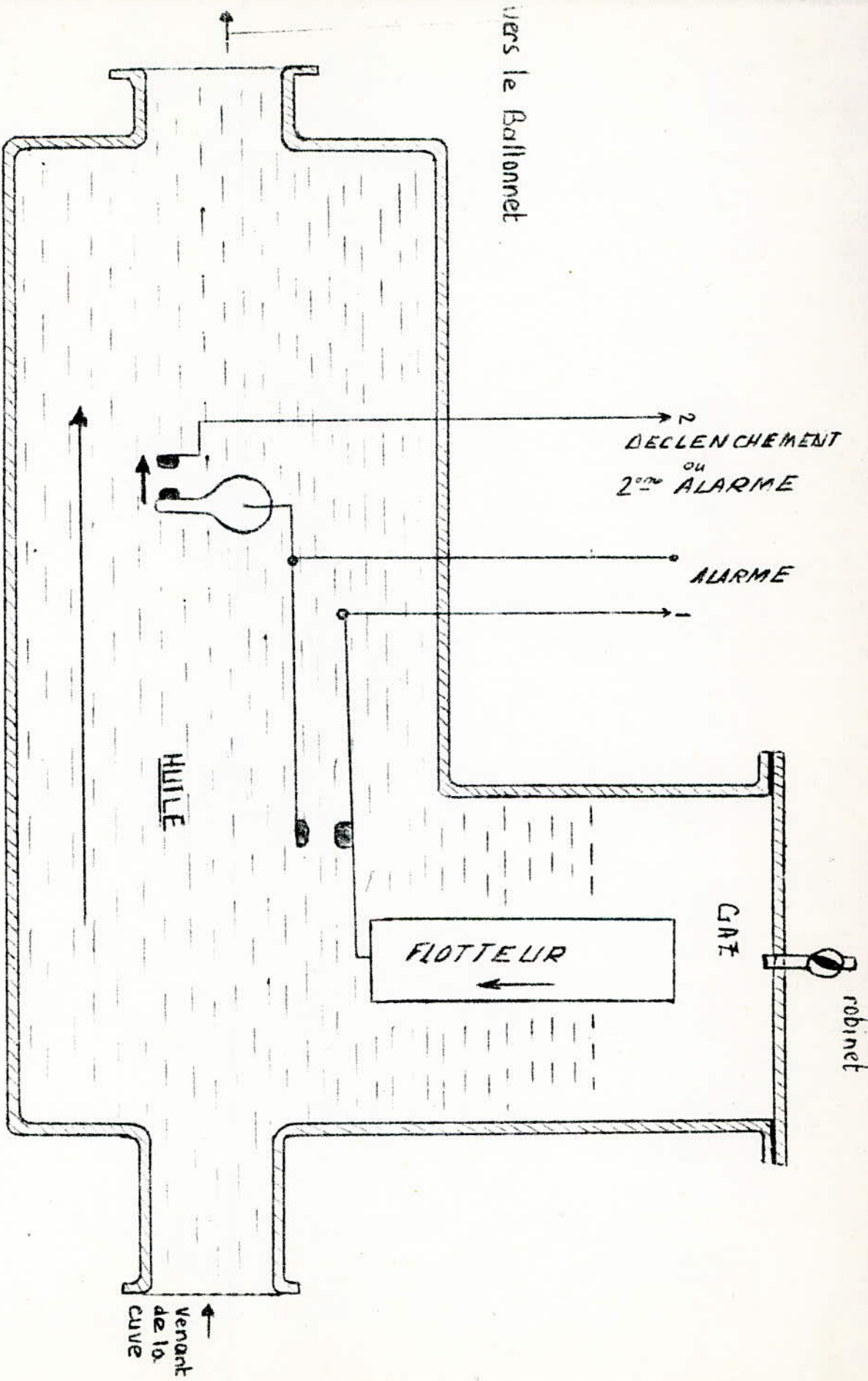
- GAZ inflammable (hydrocarbures provenant de la décomposition de l'huile), ce qui nous permet de déduire qu'il y a eu formation d'un arc électrique.
- GAZ incombustible (azote et oxygène de l'air), on en déduit qu'il s'agit seulement d'entrées d'air parasites.

Le relais BUCHHOLZ présente trois gros avantages:

- Il détecte la totalité des défauts internes
- Il détecte les défauts même petits dès le début d'apparition.
- Il provoque instantanément et automatiquement l'ouverture du disjoncteur de protection en cas d'accident grave.

Le relais BUCHHOLZ est utilisé généralement pour tous les transformateurs de puissance supérieure à cent KVA (100 KVA).

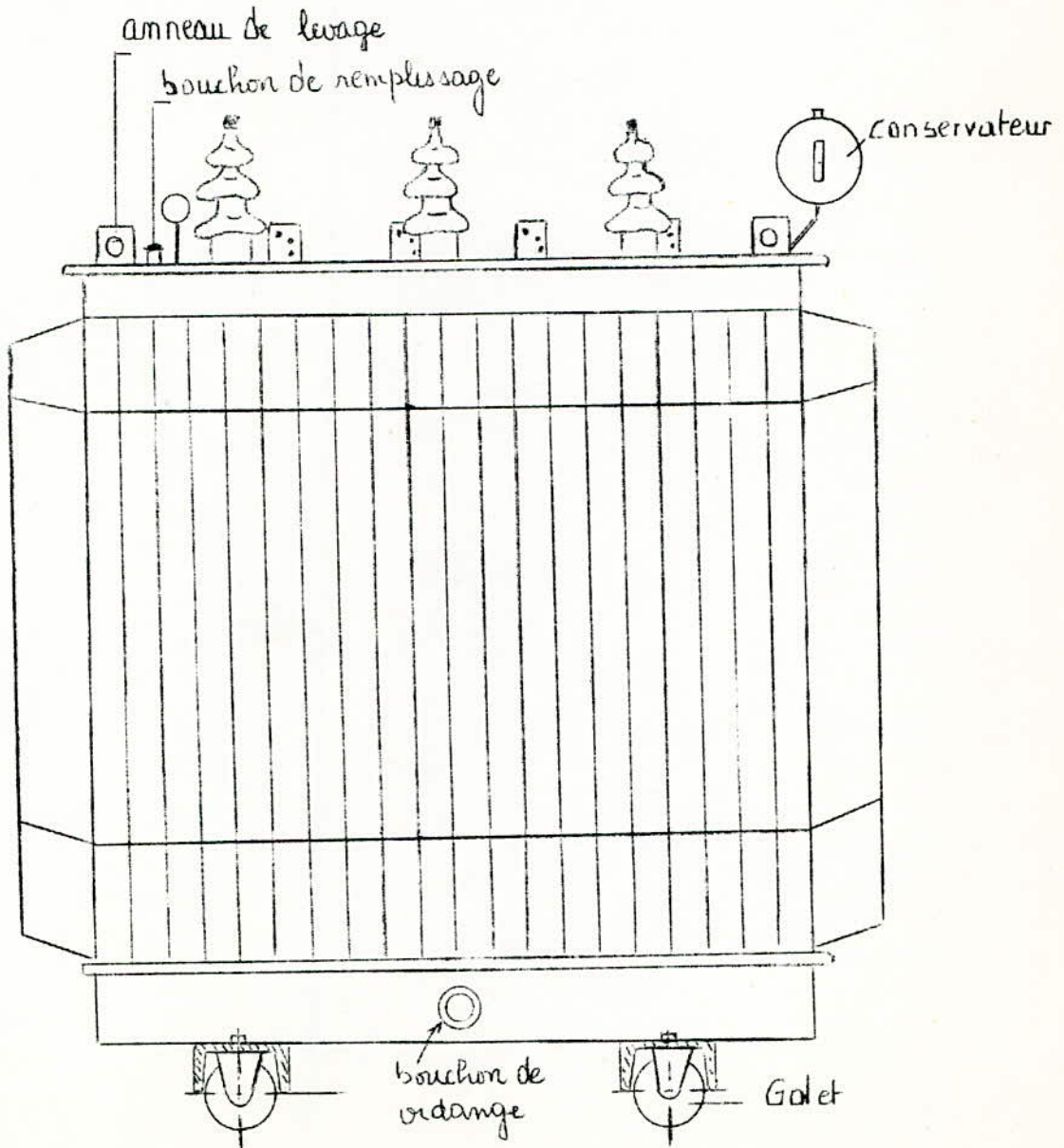
RELAIS BUCHHOLZ



Manutention.

Le transformateur est muni de quatre (4) galets orientables qui permettent un déplacement facile.

- Deux (2) anneaux de levage pour le transport.
- Un (1) bouchon de vidange se trouvant au niveau inférieur de la cuve, capable de supporter la pression de l'huile contenue dans la cuve et ce même en cas d'accident. Car le transport d'un transformateur se fait toujours à vide, le calcul mécanique nous a déjà donné un aperçu sur la valeur de son poids.



Reglage de la tension.

Les appareils électriques sont généralement prévus pour fonctionner dans des conditions précises de tension, d'intensité, de facteur de puissance; leur rendement devient médiocre lorsqu'on s'écarte de ces conditions ; on est donc obligé de régler continuellement ces différentes grandeurs électriques.

Ce réglage peut être manuel ou automatique; il s'effectue soit à la production, soit au transport, soit à la distribution, soit chez l'utilisateur.

Problème.

En raison des caractéristiques des machines et chutes de tension dans les lignes, il se produit des variations continues et importantes de tension, le réglage doit donc être permanent et doit être effectué à tous les échelons.

Sur les réseaux de transport, où il n'y a pas de client, on peut se permettre de se contenter d'une approximation de l'ordre de 10%; il n'en est pas de même au niveau de la distribution où la précision ne doit guère dépasser trois à quatre pourcents (3% à 4%).

Réglage.

Deux procédés de réglages sont utilisables.

- Réglage à vide ,
- Réglage en charge.

Réglage à vide.

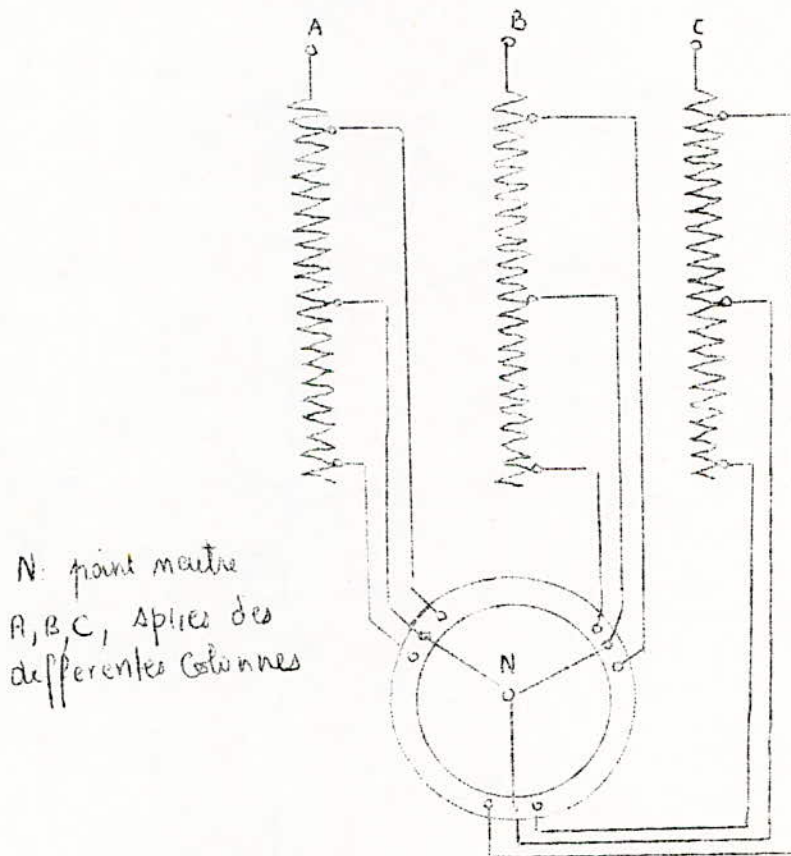
L'enroulement haute tension est muni de prises supplémentaires lui permettant, en ajoutant ou en retranchant des spires, de faire varier le rapport de transformation, de $\pm 5\%$ de sa valeur; ces spires sont reliées à un commutateur, appelé Ajusteur de tension qui n'a pas de pouvoir de coupure et qui ne doit être manoeuvré qu'à vide.

Cette solution n'est adoptée que pour des transformateurs dont la puissance n'excède pas deux (2) MVA.

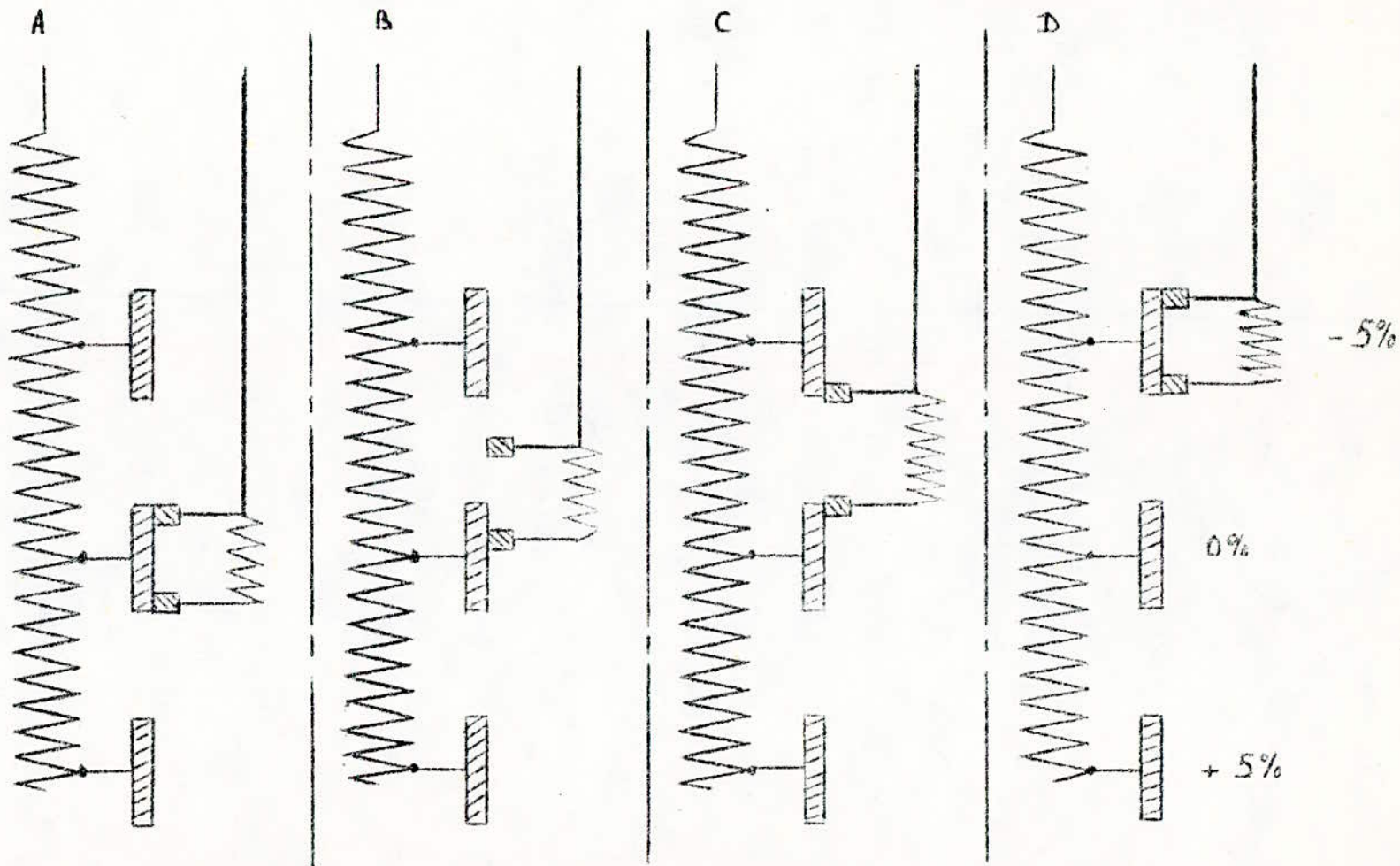
Réglage en charge

On remarquera que réglage précédent n'est donc dans la majorité des cas pas suffisant, car la continuité de l'exploitation exige que le réglage puisse s'effectuer en charge sur le réseau de transport. La solution consiste à faire varier le rapport de transformation en ajoutant ou en retranchant des spires sur l'un des enroulements du transformateur, comme dans le cas du réglage à vide, mais cette opération doit obligatoirement être faite sans interruption du courant; la liaison doit donc être établie avec la prise suivante avant d'être abandonnée sur la prise précédente; des spires vont donc être momentanément en court-circuit.

Afin de limiter le court-circuit à une valeur qui ne soit pas dangereuse, on insère une résistance ou une réactance entre les spires en court-circuit. Voir figure 2.



Ajusteur de tension, enroulement H.T.



Principe de réglage de la tension en charge

Exemple sur une bobine

PROTECTION

Généralités.

Dans toute installation électrique, il est nécessaire, si non obligatoire de protéger aussi bien le côté haute tension que le côté basse tension .

Un transformateur comporte des bobines montées sur un circuit magnétique, d'où découle certains problèmes:

- D'ordre mécanique.

- Vibrations de conducteurs sous l'effet de vibration du champ magnétique .
- Efforts électrodynamiques s'exerçant entre **conducteurs**
- Efforts dus à la déformation des conducteurs par variation de température et différence de déformation des parties voisines entre autre (cuivre / circuit magnét.)

- D'ordre Thermique.

- Dégradation des isolants sous l'effet d'un échauffement exagéré (surcharge prolongée, défaut de refroidissement)

- D'ordre électrique.

- Surtensions provoquées par des manoeuvres ,ou d'origine atmosphérique. Les transformateurs sont protégés contre les défauts ou contre les conditions anormales de fonctionnement suivantes:

- Incidents réseaux.
 - Court-circuits,
 - Surcharges,
 - Surtension
- Défauts à l'intérieur de la cuve.
 - Amorçage entre conducteurs de connexions ou une spire et la masse: cuve ou circuit magnétique ce qui entraîne un court-circuit.
 - Court-circuit provoqué par amorçage entre spires d'un même enroulement,

- Amorçage entre tôles du circuit magnétique mal isolées entre elles
- Coupure d'enroulement.

Défauts à l'extérieur de la cuve.

- Sur la cuve elle même par contournement ou avarie de traversée ou par amorçage d'un éclateur lorsque celui-ci existe.
- Entre le transformateur et ses disjoncteurs ou entre les disjoncteurs eux mêmes

Protection générale.

Situé en aval de l'arrivée haute tension ,elle est destinée à mettre hors tension le réseau de l'abonné en cas de défaut sur le circuit haute tension . Les normes définissent ,suivant les caractéristiques du poste, le type de protection générale à adopter

Le choix des cellules de protection dépend de la puissance du poste,dans notre cas 400KVA., et de la nature des protections à réaliser,ces deux impératifs devant être compatibles.

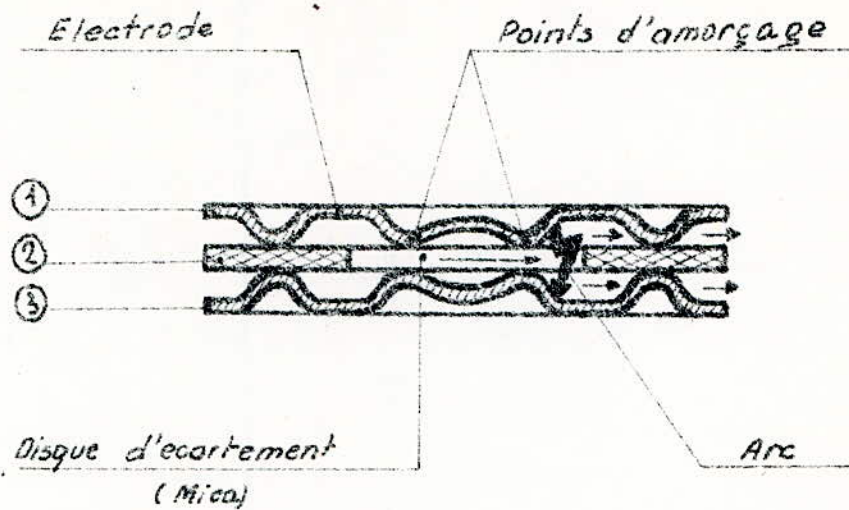
Protection externe.

- Contre les surtensions à fréquence élevée:

(Foudre ,manoeuvre de disjoncteurs).Elles sont dangereuses pour les transformateurs. Les ondes de surtensions viennent " frapper" les entrées de bobines; on protège le transformateur par l'un des procédés suivants:

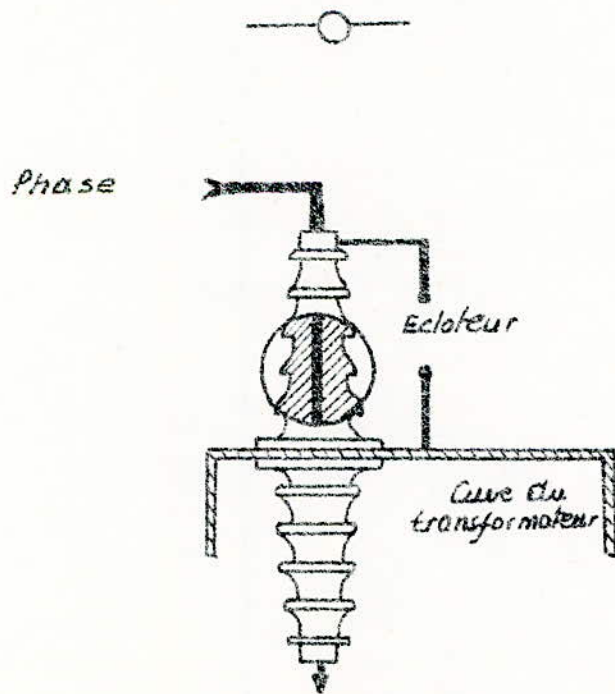
- a)- Disposition constructive interne,
- b)- Par les éclateurs généralement placés entre l'entrée des traversées isolantes du transformateur et la cuve ou aux bornes d'une chaîne d'isolateurs.

Un éclateur est constitué par deux (2) électrodes reliées l'une au conducteur sous tension, l'autre à la masse ou à la terre.



1-3-Electrodes embouties ; 2 : disque en mica.

Detail d'un eclateur élémentaire à buse de soufflage



Schema de position d'un eclateur

-Contre les surtensions à fréquence industrielle.

Il n'y a pas de protection spéciale mais le transformateur est conçu en conséquence.

Protection contre les surtensions au point neutre.

Les transformateurs principaux de centrales fonctionnant le plus souvent avec neutre isolé.

Le neutre peut se trouver porté à une tension supérieure à celle pour laquelle il a été isolé. La protection est assurée

- Par parafoudre placé sur le neutre et fonctionnant pour une tension un peu inférieure à la tension nominale d'isolation du neutre.
- Par éclateur placé sur la borne du neutre et faisant fonctionner la protection " cuve ".

Parafoudre.

Un parafoudre est un appareil qui établit une liaison provisoire entre l'installation protégée et la terre; un courant dérivé prend naissance et consomme une partie de l'énergie de la surtension.

Un parafoudre comporte lui même un système d'extinction du courant à la terre lorsque la surtension est passée .

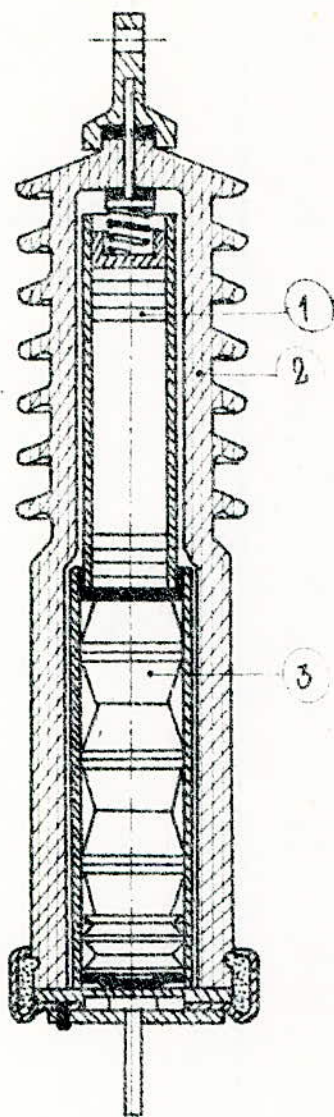
Protection contre les court-circuits extérieurs.

Un transformateur parcouru par une très forte surintensité verra sa température augmenter très vite et atteindre en quelques minutes une valeur très élevée sans que la température de l'huile ait beaucoup changé (à cause de l'inertie thermique de l'huile).

La protection est souvent assurée par des relais à maximum d'intensité. Le réglage de ces relais doit être convenablement choisi par rapport à ceux adoptés pour les autres relais à maximum d'intensité placés sur les différents circuits.

Protection interne des transformateurs.

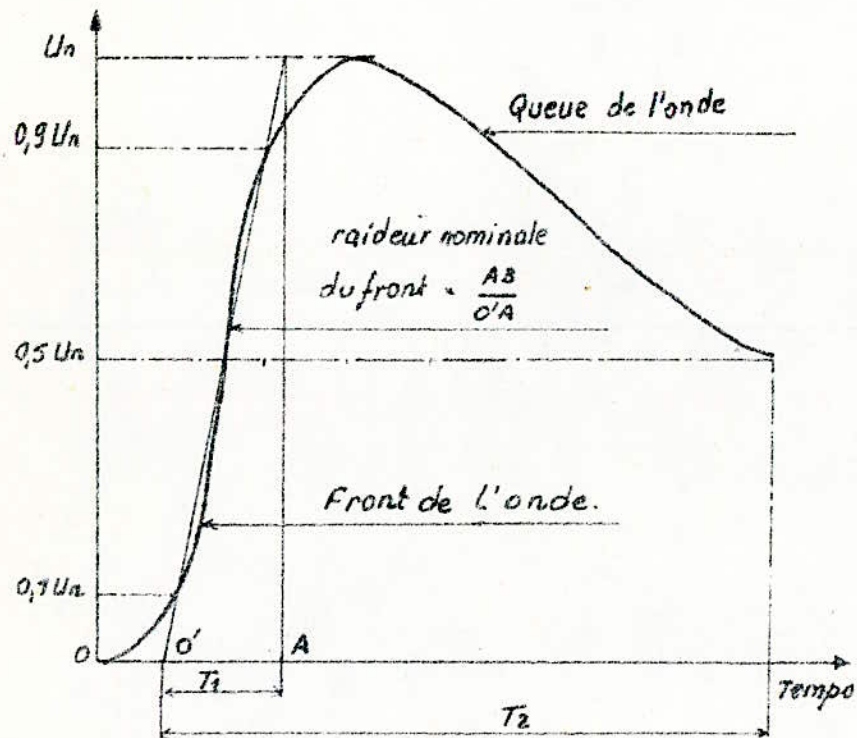
Le dispositif de protection interne n'est pas obliga-



- 1 - Suite d'éclateurs
- 2 - Isolateurs
- 3 - Suite non linéaire de résistances.

PARAFONDRE MT & HT

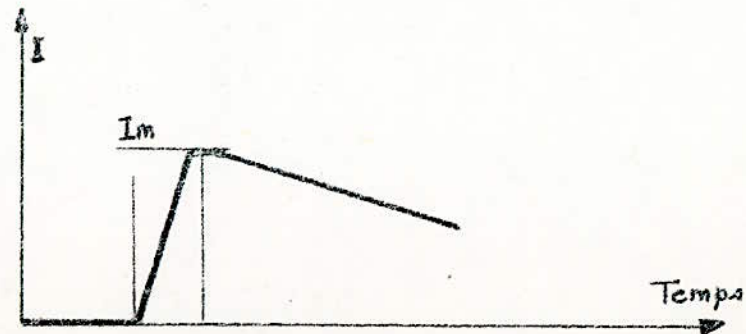
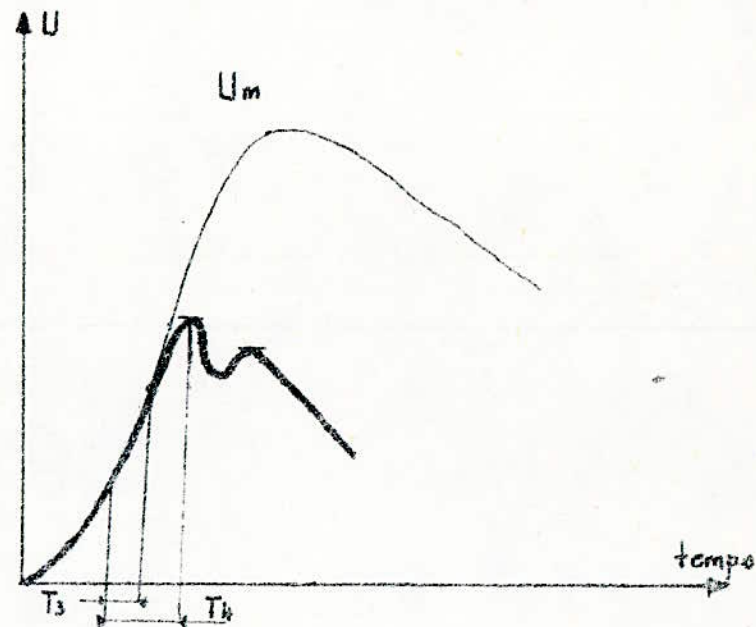
SIEMENS



ONDE DE CHOC NORMALISÉE

T_3 : retard dû à l'éclateur

T_4 : retard dû au fonctionnement.



Rôle du PARAFODRE

-toire sauf pour les installations particulières pour les transformateurs à isolation dans l'huile mais fortement recommandés pour des unités de forte puissance (vers 400 KVA.).

Dans les transformateurs à remplissage intégral; le relais BUCHHOLZ est remplacé par un manostat dont le rôle est identique.

Thermomètre de contact.

Le thermomètre de contact contrôle et permet une lecture directe de la température interne . Il commande une alarme ou éventuellement un déclenchement.

Thermostat.

Le thermostat contrôle la température interne et commande une alarme ou un déclenchement.

Ils sont tous deux sensibles à l'élévation de température due aux surcharges prolongées, thermostat et thermomètre agissent normalement sur la protection générale basse tension.

Protection contre les défauts entre phases.

Elle est obligatoire dans tous les postes de transformation si la puissance est :

P (KVA.)	315	500	800	1000
U (KV.)	5,5	10	15	20

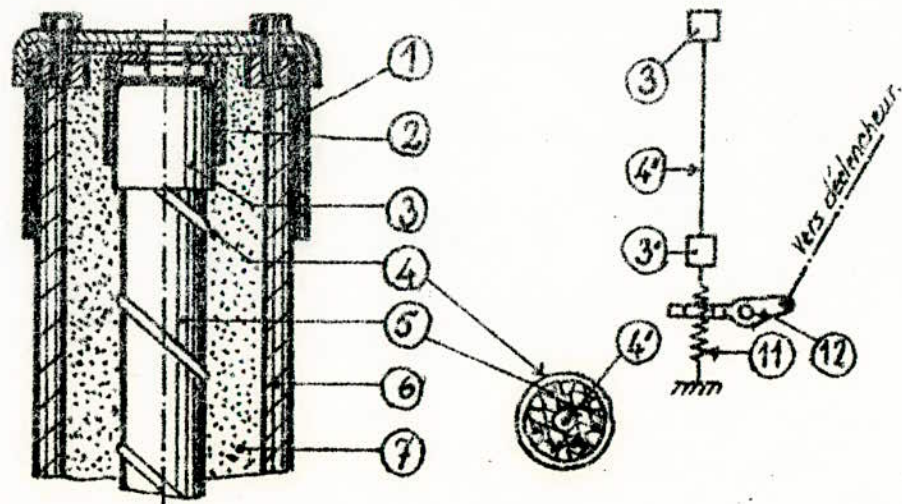
la protection peut être assurée:

- par interrupteur et coupe-circuit associés,
- par interrupteur et coupe-circuit combinés.

La combinaison d'un interrupteur et de coupe-circuit à percuter provoque l'ouverture de l'interrupteur en cas de fusion du fusible d'un seul coupe-circuit, évitant ainsi la marche en monophasé ou la réalisation d'un défaut par les deux autres phases.

Au delà de ces valeurs, la protection est obligatoirement assurée par un disjoncteur.

- | | | |
|----------------------------------|-----------------------------|-----------------|
| 1 - Calottes | 5 - tube isolant | 4' - Résistance |
| 2 - Contacts à fines | 6 - cartouche en porcelaine | 11 - Ressort |
| 3 - bouilles conductrices | 7 - quartz | 12 - levier |
| 4 - Fusible principal en argent. | 3' - percuteur | |



Coupe - circuit H.T

TABLEAU DES DEFAUTS SUCEPTIBLES DE SE PRODUIRE .

	COURT-CIRCUITS	SURTENSIONS	SURCHARGES	DESEQUILIBRES
N A T U R E	Suppression de l'isolement entre 2 ou 3 conducteurs ou entre conducteur et masse	Passage de la tension à une valeur supérieure à la valeur normale	Installation traversée par un courant supérieur à celui pour lequel elle a été construite.	Valeurs différentes entre les 3 tensions ou entre les 3 intensités.
C A U S E S	-Rupture de conducteurs -Coup de foudre -Contact intempestif entre conducteurs. -Claquage d'isolant -Fausse manœuvre	Manœuvres d'organes de coupure Arcs à la terre Défaillance de régulateurs de tension Contact avec une installation à tension plus élevée. Charges électrostatiques.	Court-circuit Appareil utilisé au delà de la puissance normale volontairement ou accidentellement.	Court-circuit. Rupture de phases (mauvais fonctionnement) de disjoncteur ou sectionneurs, rupture des conducteurs sans court-circuit).
C O N S E Q U E N C E S	Surintensité, surcharge Chute de tension Déséquilibre entre les 3 tensions, ou entre les 3 intensités. Echauffement. Déterioration par les arcs. Efforts électrodynamiques sur les conducteurs. Perturbations dans les circuits téléphoniques.	Contraintes sur les isolants et amorçages (court-circuits). Surcharges.	Echauffement (pour des surcharges importantes, mêmes conséquences qu'un court-circuit).	Echauffement Induction dans les lignes téléphoniques proches.

ooo- CONCLUSION -ooo

ooOoo

De part les différents problèmes rencontrés durant l'étude de construction de notre transformateur, nous avons pu constater que des choses sont faites et beaucoup reste à faire dans le domaine de la construction des transformateurs.

De ce fait, nous pouvons dire que la science n'est qu'un immense labyrinthe où toute solution demeure comme l'énoncé d'un nouveau problème posé!.

ooOoo

CALCUL ANNEXE

Relation entre le diamètre de la colonne et
la tension de court-circuit.

Valeur rapportée de la tension de court-circuit:

$$\mu_k = \frac{U_k}{U_{f1}} = \frac{\sqrt{\mu_{ka}^2 + \mu_{kr}^2}}{U_{f1}} = \frac{\sqrt{(RI_{f1})^2 + (X_{G1}I_{f1})^2}}{U_{f1}}$$

Composante réactive de la tension de court-circuit

$$\mu_{kr} = \frac{\sqrt{\mu_k^2 - \mu_{ka}^2}}{U_{f1}} = \frac{U_{kr}}{U_{f1}}$$

$$\mu_{kr} = \frac{X_{G1} \cdot I_{f1}}{U_{f1}} \quad ; \quad X_{G1} : \text{réactance de fuite.}$$

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

$$X_{G1} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot W_1^2 \cdot \beta \cdot a_r \cdot K_R}{U_{f1}} \cdot I_{f1}$$

or

$$U_{sp} = U_{f1}/W_1 = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot B_c \cdot S_{f.c.}$$

avec

$$S_{f.c.} = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot K_u}{4}$$

d'où

$$\mu_{kr} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot W_1 \cdot a_r \cdot \beta \cdot K_R \cdot I_{f1} \cdot 4}{\sqrt{2} \cdot \pi^2 \cdot K_u \cdot f \cdot B_c \cdot D^2}$$

$$\mu_{kr} = \frac{2 \cdot \mu_0 \cdot W_1 \cdot a_r \cdot \beta \cdot K_R \cdot I_{f1}}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot K_u \cdot B_c \cdot D^2} \quad (a)$$

d'autre part,

$$S_c = U_{f1} \cdot I_{f1} \quad (b)$$

$$U_{f1} = W_1; U_{sp} = W_1 \cdot \frac{\sqrt{2}}{4} \cdot \pi^2 \cdot f \cdot B_c \cdot K_u \cdot D^2$$

L'expression (a) donne:

$$I_{f1} = \frac{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot K_u \cdot B_c \cdot D^2}{8 \cdot \mu_0 \cdot W_1 \cdot a_r \cdot \beta \cdot K_R}$$

L'expression (b) devient:

$$S_c = \frac{\pi^3 \cdot f \cdot K_u^2 \cdot B_c^2 \cdot D^4}{16 \cdot \mu_0 \cdot a_r \cdot \beta \cdot K_R}$$

Finalement on a:

$$D = \sqrt[4]{\frac{16 \cdot \mu_0 \cdot a_r \cdot \beta \cdot K_R \cdot S_c}{\pi^3 \cdot f \cdot K_u^2 \cdot B_c^2 \cdot \mu_{kr}}}$$

Dans le cas général ou la fréquence est de 50Hertz, le diamètre de la colonne sera donné par:

$$D = 1,0674 \sqrt[4]{\frac{a_r \cdot \beta \cdot K_R \cdot S_c}{K_u^2 \cdot B_c^2 \cdot \mu_{kr}}}$$

avec:

$$D : (\text{ cm. }) \quad ; \quad a_r : (\text{ m. })$$

$$B_c : (\text{ T. }) \quad ; \quad S : (\text{ V.A. })$$

Relation de la densité de courant.

Pertes Joules Totales.

$$P_k = K_{pk} \cdot P_j = K_{pk} \cdot (P_{j1} + P_{j2})$$

$$P_{j1} = m \rho_1 \cdot J_1^2 V_1$$

$$P_{j2} = m \rho_2 \cdot J_2^2 V_2$$

V_1 ; V_2 : représentent les volumes du matériel actif des enroulements en (m^3)

J_1 ; J_2 : représentent les densités de courant en (A/m^2).

ρ_1 ; ρ_2 : représentent les résistivités en ($\Omega.m.$)

$$J_1 = I_{f1} / S_{w1} \quad ; \quad J_2 = I_{f2} / S_{w2}$$

S_w : représente la section de la spire en m^2

$$V_1 = W_1 \cdot S_{w1} \cdot L_{w1}$$

$$V_2 = W_2 \cdot S_{w2} \cdot L_{w2}$$

avec:

$$L_{w1} = \pi \cdot D_{m1}$$

$$L_{w2} = \pi \cdot D_{m2}$$

d'ou:

$$P_j = m (\rho_1 \cdot J_1^2 \cdot S_{w1} \cdot \pi \cdot D_{m1} \cdot W_1 + \rho_2 \cdot J_2^2 \cdot S_{w2} \cdot \pi \cdot D_{m2} \cdot W_2)$$

d'autre part on sait que les enroulements sont réalisés avec le même matériau, le cuivre de ce fait;

$$\rho_1 = \rho_2 = \rho$$

La densité de courant étant considérée la même pour les deux enroulements dans le calcul préliminaire, on a donc:

$$J_1 = J_2 = J_m.$$

$$\text{or } I_{f1} = S_{w1} \cdot J_1 \quad \text{et} \quad I_{f2} = S_{w2} \cdot J_2$$

$$W_1 = U_{f1} / U_{sp1} \quad \text{et} \quad W_2 = U_{f2} / U_{sp2}$$

avec:

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

on aura alors:

$$P_j = m \left(\rho \cdot J_m^2 \cdot S_{w1} \cdot \frac{U_{f1}}{U_{sp}} \cdot \pi \cdot D_{m1} + \rho \cdot J_m^2 \cdot S_{w2} \cdot \frac{U_{f2}}{U_{sp}} \cdot \pi \cdot D_{m2} \right)$$

$$P_j = \frac{\pi \cdot m \cdot \rho \cdot J_m}{U_{sp}} (I_{f1} \cdot U_{f1} \cdot D_{m1} + I_{f2} \cdot U_{f2} \cdot D_{m2})$$

or

$$S_c = U_{f1} \cdot I_{f1} = U_{f2} \cdot I_{f2}$$

$$S_n = m \cdot S_c$$

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

de ce fait il résulte que:

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

$$\text{d'ou } J_m = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \rho \cdot K_{pk}} \cdot \frac{P_k}{S_n} \cdot \frac{U_{sp}}{D_{12}}$$

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

$$P_k : (\text{KW}) \quad ; \quad U_{sp} : (\text{V}) \quad ; \quad D_{12} : (\text{m.})$$

$$S_n : (\text{KVA}) \quad ; \quad \rho : (\Omega \cdot \text{m.}) \quad ; \quad J_m : (\text{A/mm}^2)$$

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

-----oooOooo-----

- 1 - Nôtes du cours de construction des machines électriques,
- 2 - CUPCHOD : Mémento d'électrotéchnique
Tomes I et II .
- 3 - HEINY : Technologie d'électricité , Tome V .
- 4 - KOSTENKO : Machines électriques ,
Tomes I et II .
- 5 - LIWSCHITZ : Calcul des machines électriques ,
Tomes I et II .
- 6 - MERLIN-GERIN : Catalogue B ,
Appareillage et équipements.
- 7 - Revues S.D.F : Production et transport.
- 8 - Catalogues : B.B.C. , C.B.M. .
- 9 - NORMES françaises :
 - 52-100 : transformateurs de puissance.
 - 52-112 : transformateurs électriques.
 - 27-101 : huiles minérales isolantes.
 - 28-920 : tôles magnétiques laminées
à froid.

oooOooo

TABLE DES MATIERES

-----oo0oo-----

Introduction	01
- Calcul préliminaire	05
- Calcul des paramètres des enroulements..	26
- Calcul définitif du circuit magnétique..	31
- Calcul des pertes.....	36
- Calcul du rendement.....	43
- Calcul du courant de marche à vide.....	50
- Calcul thermique.....	55
- Calcul mécanique.....	75
ETUDE technologique.....	96
APPAREILLAGE auxiliaire	107
PROTECTION	115
CONCLUSION	125
CALCUL ANNEXE.....	126
BIBLIOGRAPHIE.....	130

oooo0oooo
oo
o