

UNIVERSITÉ D'ALGER

10/78

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DÉPARTEMENT ÉLECTRICITÉ

2^{es}

PROJET DE FIN D'ETUDES



CONSTRUCTION D'UN TRANSFORMATEUR 650 KVA 10 KV / 0,4 KV

Proposé et dirigé par :

V. STIRBU

Professeur à l'ENP

المدرسة الوطنية للعلوم الهندسية
المكتبة

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
BIBLIOTHÈQUE

Etudié par :

H. LOUNIS

UNIVERSITÉ D'ALGER

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DÉPARTEMENT ÉLECTRICITÉ

PROJET DE FIN D'ETUDES

**CONSTRUCTION D'UN
TRANSFORMATEUR
650 KVA 10 KV / 0,4 KV**

Proposé et dirigé par :

V. STIRBU

Professeur à l'ENP

Étudié par :

H. LOUNIS

PROMOTION 1978

- Remerciements -

Je tiens à adresser mes plus vifs remerciements à tous les professeurs qui ont contribué à ma formation, en particulier à M^{re} V. STIRBU qui a bien voulu diriger ce projet.

Je remercie aussi tous les amis, en particulier M^{re} B. SEDKAOUI qui a bien voulu mettre cet ouvrage en plusieurs exemplaires.



Cahier des charges

construction d'un transformateur de 630 KVA
10/0,4 kV pour la distribution

Puissance nominale	$P_n = 630 \text{ KVA}$
Tension nominale primaire	$U_{2n} = 10 \text{ KV}$
Tension nominale secondaire	$U_{1n} = 0,4 \text{ KV}$
Réglage	$\pm 4\%$
Connexion	$\Delta y_0 5$
Tension de court-circuit	$U_k = 4\%$
Pertes dues à la charge	$P_k = 6,5 \text{ KW}$
Pertes à vide	$P_0 = 1,3 \text{ KW}$
Courant à vide	$I_0 = 1,8\%$
Nombre de phases	$m = 3$
Fréquence	$f = 50 \text{ Hz}$
Matériel des enroulements : cuivre	
Type intérieur avec refroidissement naturel à l'huile	

Les autres données nécessaires pour le calcul seront conformes aux normes en vigueur

Introduction

Lorsqu'on veut construire une machine électrique, on ne doit pas seulement tenir compte de ses propriétés électromagnétique, mais faire en sorte que sa construction et son exploitation soient économiques et rentables.

Le dimensionnement du transformateur pose quelques problèmes particuliers dont il faut tenir compte :

- 1- Réduction des pertes
- 2- Isolement des pièces sous tension
- 3- Réduction de l'échauffement
- 4- Résistance aux effets électrodynamiques
- 5- Résistance aux contraintes mécaniques
- 6- Résistance aux ondes de choc
- 7- Réduction de l'encombrement et du poids
- 8- Réglage de la tension
- 9- Problèmes économiques

I Généralités

I Fonction

Les transformateurs ont pour rôle de modifier la tension ou l'intensité d'un courant alternatif.

Ces appareils sont réversibles et permettent, soit l'élevation, soit l'abaissement de la tension.

II Principe et constitution

Dans tout transformateur, un courant alternatif primaire engendre dans un circuit magnétique un flux alternatif qui, à son tour, induit dans un bobinage secondaire une force électromotrice de même forme et de même période que le courant primaire.

Il faut donc assurer les fonctions suivantes :

1- Fonctions magnétiques

- 1.1- Production du courant induit : cette fonction est assurée par l'enroulement primaire
- 1.2- Canalisation du flux : c'est le rôle du circuit magnétique

2- Fonctions électriques

- 2.1- Production du courant induit : cette fonction est assurée par l'enroulement secondaire.
- 2.2- Réception du courant primaire et envoi du courant secondaire dans le circuit extérieur : c'est le rôle des bornes et des traversées isolantes
- 2.3- Réglage de la tension : à vide c'est le rôle de l'ajusteur de tension ; en charge, c'est le rôle du régulateur de tension

3- Fonctions mécaniques

- 3.1- Support de l'ensemble et protection des enroulements. C'est le rôle de la cuve et du couvercle.
- 3.2- Refroidissement
- 3.3- Fixation et manutention
- 3.4- Surveillance et entretien

II Circuit magnétique

I- Généralités

1- Fonction

La fonction principale du circuit magnétique est de canaliser le flux produit par l'enroulement

primaire ; d'où choix des matériaux et calcul de la section en vue d'obtenir l'induction désirée.
De plus, le circuit magnétique sert de support aux enroulements

2- Disposition

On utilise trois colonnes verticales recevant des bobinages, et deux culasses liées aux colonnes par enchevêtrement.

3- Conditions à remplir

3.1 - Réduire l'encombrement et le poids de fer :
d'où choix de tôles de haute perméabilité, et adoption d'une induction élevée ; réduire le foisonnement des tôles par un serrage énergétique.

3.2 Réduire les pertes

Pour réduire les pertes par courants de Foucault, on emploie des noyaux et des culasses feuilletés, le plan des tôles doit être parallèle à la direction du flux, les tôles doivent être isolées les unes des autres. Pour réduire les pertes par hysteresis on emploie des tôles à très faibles pertes.

4- Caractéristiques des tôles

Les tôles laminées à froid dites à cristaux orientés sont à peu près les seules utilisées actuellement.

Ces tôles sont isolées par traitement thermo-chimique de surface (Calcite) d'épaisseur négligeable.

Les caractéristiques des tôles sont :

$$\text{Pertes} = 0,55 \text{ W}$$

$$\text{Épaisseur} = 0,35 \text{ mm}$$

$$\text{Induction maximale élevée} = 2 \text{ Tesla}$$

Planéité et régularité d'épaisseur à peu près parfaite.

II Colonnes

Les colonnes sont les parties du circuit magnétique qui portent les bobinages, elles sont en général verticales

1-Section

La section circulaire étant celle qui résiste le mieux aux efforts électrodynamiques, on a été conduit à adopter des bobinages encoulés sur cylindre de révolution ; le problème est donc de loger la colonne à l'intérieur de ce cylindre, et de donner à la section une forme et des dimensions donnant une aire maximale (maximale de fer pour un encombrement donné). Pour avoir un emploi correct de la section circulaire on adopte des sections à gradins multiples.

2-Serrage

Le serrage est nécessaire pour faire occuper aux tôles un volume minimal et réduire le foisonnement ; on y parvient par collage

III Culasses

1-Section

Les culasses ne portant pas de bobines, il n'est pas nécessaire que la section soit inscrite dans un cercle ; on adopte en générale une section rectangulaire

2-Serrage

Il s'effectue habituellement aux moyens de boulons ; mais, en l'absence de bobines, il est possible de répartir le serrage sur toute la surface par interposition d'un profilé entre la culasse et les écrous.

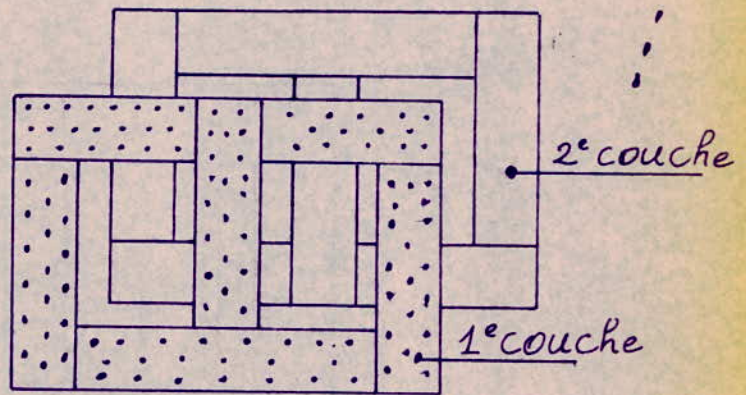
IV Construction du circuit magnétique

1- Travail des tôles

Les tôles à cristaux orientés, reçues en rouleaux, subissent d'abord une opération de planage, puis les opérations de découpage et de poinçonnage. Or, ces tôles sont extrêmement sensibles aux contraintes mécaniques ; une très faible contrainte de traction diminue les pertes de 20%, mais une très faible contrainte de compression

les augmente de 80% ; il convient donc de prendre beaucoup de précautions pour manipuler, travailler et monter les tôles. De plus, des contraintes apparaissent inévitablement au cours du découpage et du poinçonnage ; C'est pour les faire disparaître, et non pour agir sur la structure du métal, qu'on effectue un recuit, à la température de 810°C ; à cette température, dans l'air, l'oxydation est très rapide et, au bout de quelques heures, on aurait plus qu'un tas de rouille. C'est pour cela que le recuit s'effectue en atmosphère neutre (N_2 ou NH_3)

2- Assemblage du circuit magnétique.
Les noyaux sont réunis aux culasses par enchevêtrement (fig ci-dessous)

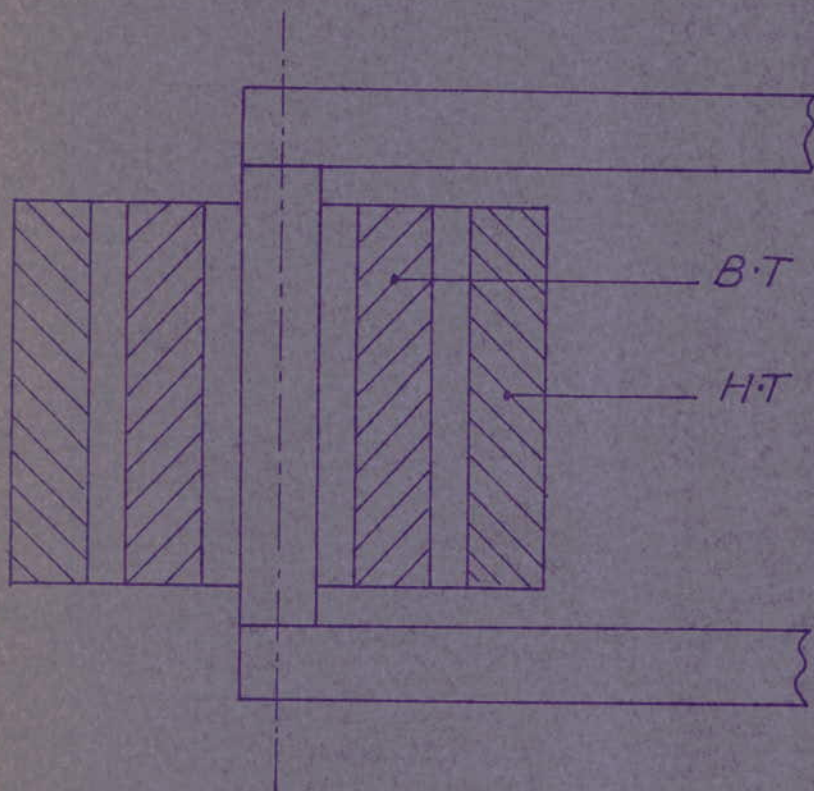


Pour le montage des bobines, la culasse supérieure est démontée tôle par tôle ; les bobinages sont mis en place, puis on remonte la culasse, tôle par tôle. Après remontage, on procède à l'étuvage et à l'imprégnation, puis à la mise en huile ; des opérations de maintenance sont donc inévitables.

III Enroulements

1 - Disposition

L'enroulement BT est placé autour de la colonne, l'enroulement HT à l'extérieur de la BT ; c'est la disposition la plus courante.



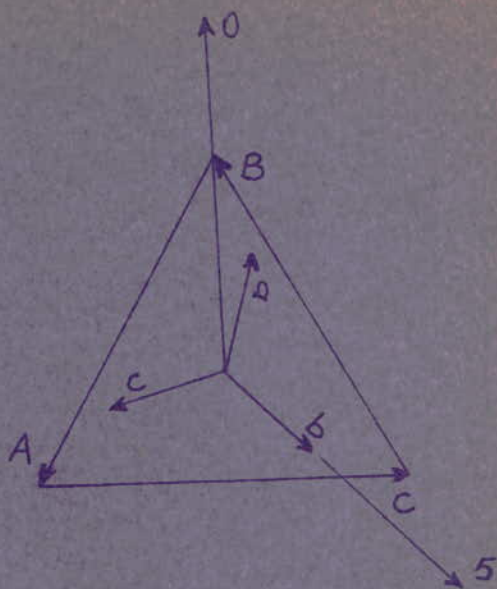
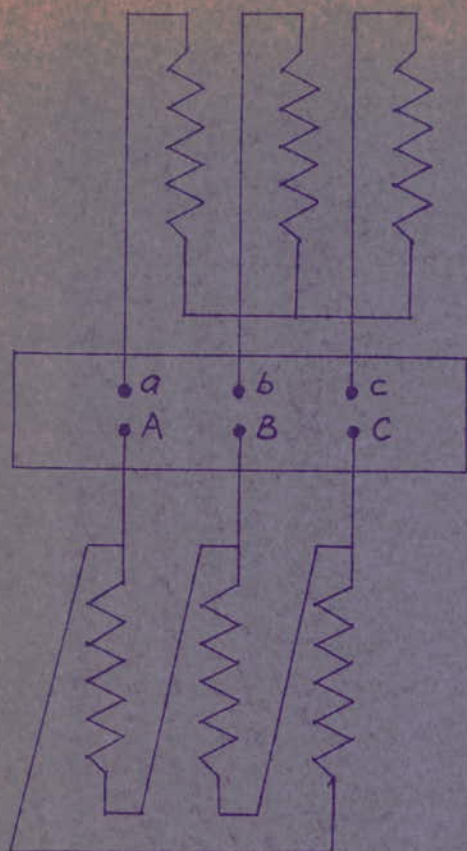
2 - Constitution des bobines

Le cuivre est à peu près exclusivement employé ; c'est le meilleur conducteur car il donne un faible encombrement et il se travaille facilement.

Pour la section du conducteur, jusqu'à 40 à 50 A, on utilise le fil rond de diamètre maximal 5 mm ; au-delà de 50 A, on utilise des conducteurs meplats, à section rectangulaire avec angles arrondis.

3 - Couplage : ΔY_05

On appelle couplage l'association des connexions des deux enroulements, enoncée dans l'ordre HT - BT.



4- Isolation

Il est nécessaire de réaliser l'isolement des conducteurs entre eux, et des bobinages et connexions par rapport à la masse, c'est à dire par rapport au circuit magnétique, à la cuve et au couvercle.

L'isolement des conducteurs entre eux est réalisé par l'isolement de chacun d'eux.

L'isolement des bobinages HT et BT entre eux et par rapport à la masse est obtenu par l'emploi d'écrans d'une part d'un diélectrique général d'autre part (huile).

L'isolement général est renforcé par étuvage et imprégnation.

L'isolement général obtenue est de classe A.

5- Diélectrique

L'ensemble des bobinages est plongé dans un fluide isolant dont la rigidité diélectrique conditionne les distances entre pièces sous tension; le fluide sert également d'agent de refroidissement, sa conductibilité thermique et sa chaleur massique doivent être aussi élevées que possible.

A l'heure actuelle, on utilise des huiles légères, fluides même à basse température, dont le point de congélation est aussi bas que possible, exemptes d'acidités et d'humidité stables sous l'action de l'air, de la chaleur, de l'électricité.

Pour éviter l'oxydation de l'huile, et l'absorption d'humidité, il faut la mettre autant que possible à l'abri de l'atmosphère.

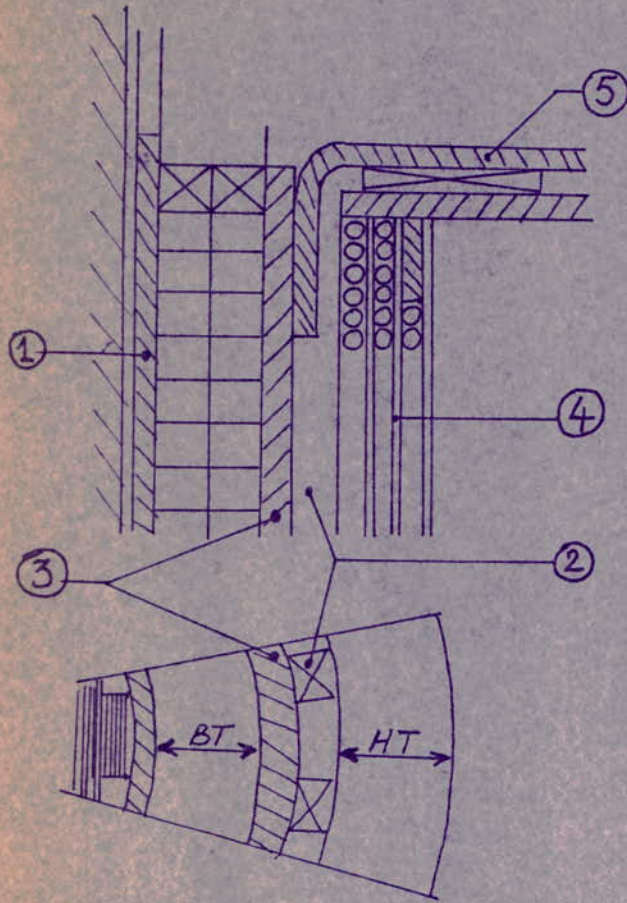


Schéma d'isolation

- 1- tube isolant en presspahn
- 2- cales
- 3 - tube écran en papier bakelisé
- 4 - feuilles de papier
- 5- cornières en presspahn

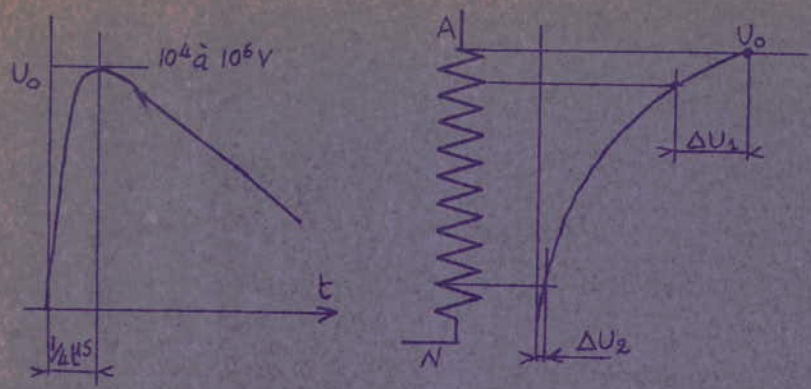
6 - Effet des suctions sur les enroulements

Ce sont les coups de foudre, directs ou indirects, qui sont dangereux pour les enroulements.

Lorsqu'une onde aborde un transformateur il se produit une répartition très inégale de la tension entre les différentes spires de l'enroulement; les spires d'entrée supportent une différence de potentiel ΔU_1 très supérieure à celle qui est supportée par les spires extrêmes (ΔU_2).

Il en résulte un risque d'amorçage, avec perforation d'isolant, court-circuit et avarie grave.

Dans notre cas, pour remédier à cet état de fait, on se contente de renforcer l'isolement des spires d'entrée de la bobine.



Effet des surtensions sur les enroulements

7- Effets électrodynamiques

7.1 - Effets radiaux

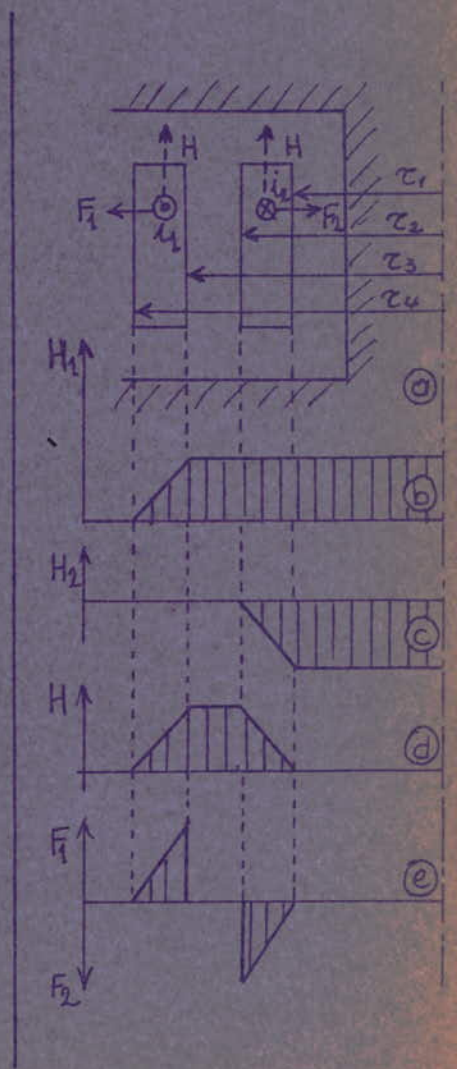
Considérons deux bobines circulaires, concentriques, ayant exactement la même hauteur (fig a).

A un instant donné le courant i_1 crée un champ H_1 dont la variation radiale est donnée par la fig b.

Au même instant, le courant i_2 tournant en sens inverse de i_1 , crée un champ H_2 de sens opposé à H_1 , et dont la variation radiale est donnée par la fig c.

L'action du champ H résultant de H_1 et H_2 sur i_1 donne des forces radiales telles que F_1 (Fig d), tandis que l'action de H sur i_2 donne des forces telles que F_2 (Fig e).

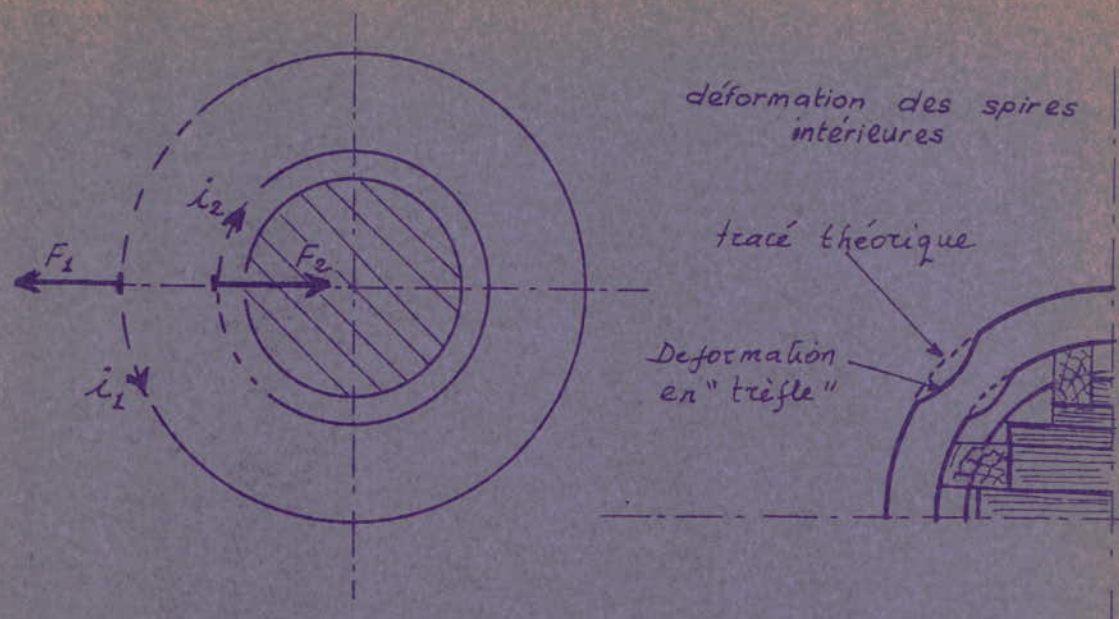
Ces forces, proportionnelles aux intensités, peuvent être très grandes en cas de court-circuit.



Le long d'un rayon, les forces F_1 et F_2 ne sont pas constantes puisque H est variable; d'où les effets suivants:

- Les forces F_1 dilatent le bobinage extérieur
- Les forces F_2 écrasent le bobinage intérieur qui se déforme en "craquelé"

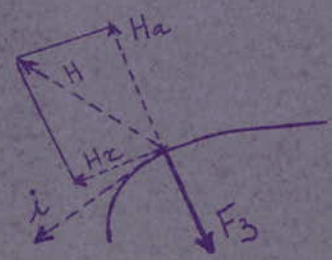
Efforts électrodynamiques



En conséquence, les bobinages doivent être maintenus par des cales s'appuyant sur le circuit magnétique. Le choix du nombre des cales, de leur matière constitutive, de leur disposition, doit être fait en tenant compte des effets F_1 et F_2 , de la tension de pose des conducteurs, de la résistance du cuivre à l'extension et à la flexion, de la résistance de l'isolant des conducteurs, de la nécessité de prévoir des canaux de circulation pour l'huile de refroidissement.

7-2 - Efforts axiaux

Lorsque les bobines sont coaxiales, ont la même hauteur, sont disposées de la même façon, et lorsque le champ est rigoureusement axial partout, il n'existe aucun effort axial sur les bobines; mais si l'une de ces conditions n'est pas remplie, un effort axial peut apparaître.



Par exemple, si le champ n'est pas partout axial, son incurvation vers les extrémités détermine une composante axiale H_a et une composante radiale H_r .

L'action de H_e a pour effet de provoquer sur i une force F_z , d'où compression ou extension de la bobine selon le sens du courant.

Donc les bobinages peuvent donc être soumis à des efforts axiaux d'extension ou de compression.

S'il y a compression, les efforts se repercutent de spire en spire, d'où risque d'écrasement des conducteurs et de leur isolement.

S'il y a extension, le bobinage soumet les cales d'extrémité à une contrainte de compression et les culasses à un effort d'arrachement.

En conséquence, il faut d'abord éviter toutes les causes qui peuvent créer des forces axiales; notamment il faut donner aux bobines exactement la même hauteur.

8- Bruit des transformateurs

On constate que tous les transformateurs font du bruit; on peut expliquer ce phénomène par les raisons suivantes:

- Effort d'attraction entre culasses et noyaux; l'annulation, cent fois par seconde, de l'attraction provoque des vibrations des tôles.
- Efforts électrodynamiques sur les bobinages
- Phénomène de magnéstriction: On constate que sous l'effet d'un champ inducteur, comme celui-ci est alternatif, il peut en résulter des vibrations.

Le bruit devenant un fléau de notre civilisation, on essaie d'y remédier en agissant sur toutes les causes de production et de propagation de celui-ci.

Les procédés employés en construction pour réduire le bruit sont:

- On réduit les vibrations du circuit magnétique par un serrage modéré et uniforme, et un recuit vers 830°C
- La vibration des bobines peut être annulée par un bon calage.

IV Traversées isolantes

Les Traversées isolantes ont pour but d'assurer la liaison électrique entre les extrémités des enroulements primaire et secondaire d'une part, et les lignes d'arrivée et de départ, d'autre part, à travers le couvercle.

Les traversées doivent remplir les conditions suivantes :

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

1 - Isolement

Le conducteur en cuivre est monté à l'intérieur d'un isolateur en porcelaine ; celui-ci traverse la cuve et son extrémité inférieure trempe dans l'huile ; le conducteur est serré en haut et en bas sur l'isolateur.

L'isolateur doit résister à la perforation, pour une tension donnée, elle est fonction de l'épaisseur de la porcelaine, de la distance entre la tige conductrice et la paroi interne de la porcelaine, de la nature du diélectrique qui existe dans la traversée ; pour assurer une bonne répartition du potentiel le long de la tige, on entoure celle-ci d'un condensateur, constitué par un enroulement de feuilles de papier et de feuilles d'aluminium alternées.

L'isolateur doit résister aussi au contournement, extérieurement, donc dans l'air, cette résistance est fonction de la hauteur de l'isolateur de la forme et du nombre de jupes ; la hauteur est proportionnée à la tension ; la forme dépend du lieu d'utilisation : extérieur ou intérieur ; le nombre de jupes est proportionné à la tension, donc à la hauteur.

A l'intérieur de la cuve, donc dans l'huile, l'isolateur se continue par une partie cylindro-conique, lisse, plus courte que la partie extérieure.

2 - Résistance aux efforts mécaniques

Les isolateurs sont soumis à des efforts de flexion, provenant de la traction des câbles d'arrivée et de départ, et il peut en résulter des contraintes d'extension et de compression importantes.

Il y a donc lieu d'évaluer avec assez de précision les efforts de flexion, afin de vérifier que ces efforts ne dépassent pas les valeurs limites fixées par le fabricant.

3 - fixation au couvercle

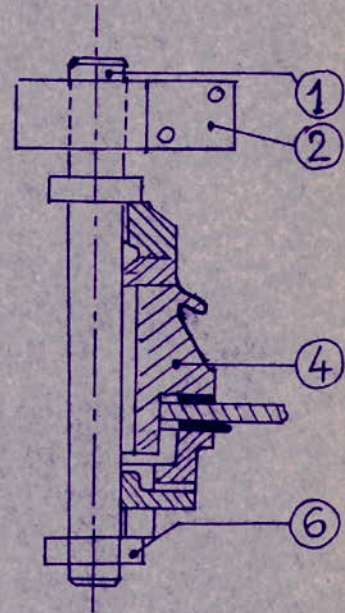
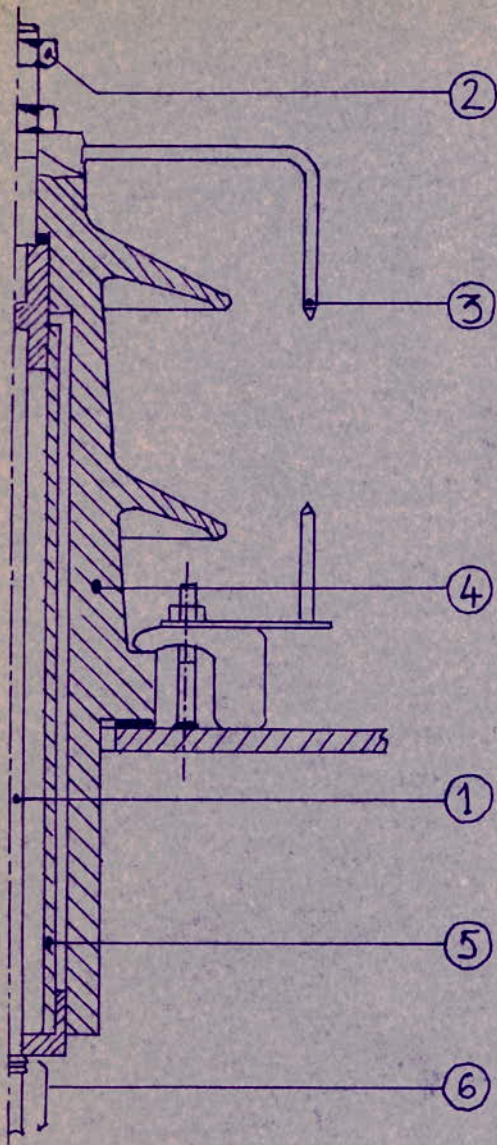
La fixation doit remplir les conditions suivantes :

- Une bonne résistance mécanique
- Une bonne étanchéité
- Éviter l'ionisation par une bonne répartition du champ électrique.

4 - Protection contre les coups de foudre

Pour assurer la protection contre les coups de foudre les isolateurs sont munis d'éclateurs.

TRAVERSÉES ISOLANTES



- ① Conducteur en cuivre
- ② Pièces de connexion
- ③ éclateurs
- ④ corps isolant (Porcelaine)
- ⑤ condensateur
- ⑥ Pièces de connexion

V Refroidissement

L'échauffement dans les transformateurs est causé par, les pertes par effet joule dans les enroulements, par pertes par courant de Foucault et par hysteresis dans le circuit magnétique.

L'échauffement a pour inconvénient la diminution du rendement, la diminution des qualités diélectriques et vieillissement prématuré des isolants.

1 - Echauffement limite

Pour les transformateurs immergés avec refroidissement naturel

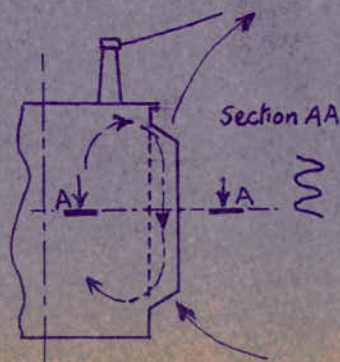
- Enroulements : 60°C
- Tôles magnétiques : 70°C
- Huile isolante : 55°C

2 - Mode de refroidissement

Pour diminuer l'échauffement des transformateurs on emploie des circuits magnétiques feuilletés, et on choisit des tôles à très faibles pertes.

Malgré ces précautions, l'échauffement reste important, donc il faut refroidir le transformateur pour permettre l'utilisation de la puissance maximale de l'appareil.

Le refroidissement s'effectue au moyen d'un fluide liquide dans lequel la partie active du transformateur est immergée. Le liquide sert de diélectrique et de fluide de refroidissement et il circule en circuit fermé; sur son parcours, il rencontre une source chaude: la partie active du transformateur à laquelle il prend des calories, et une source froide à laquelle il abandonne des calories; cette source froide est un échangeur de chaleur entre le liquide de refroidissement et un fluide extérieur froid: l'air. La circulation de l'huile est du type naturel, elle est réalisée grâce aux courants de convection.



VI Cuve et couvercle

1- Fonction de la cuve

- Elle sert de contenant au diélectrique
- Elle sert de support au circuit magnétique et aux bobinages par l'intermédiaire du couvercle
- Elle doit permettre l'évacuation de la chaleur
- Elle assure la protection mécanique de la partie active
- Elle est équipée de dispositifs de manutention : galets, crochets

2- Fonction du couvercle

- Il sert à fermer la cuve, d'où nécessité d'un joint étanche à l'huile chaude
- Il porte les traversées HT et BT, il porte également le circuit magnétique et les bobinages, de façon à faciliter le décuivage
- Il porte des anneaux de levage, pour la manutention et le décuivage.

3- Constitution de la cuve

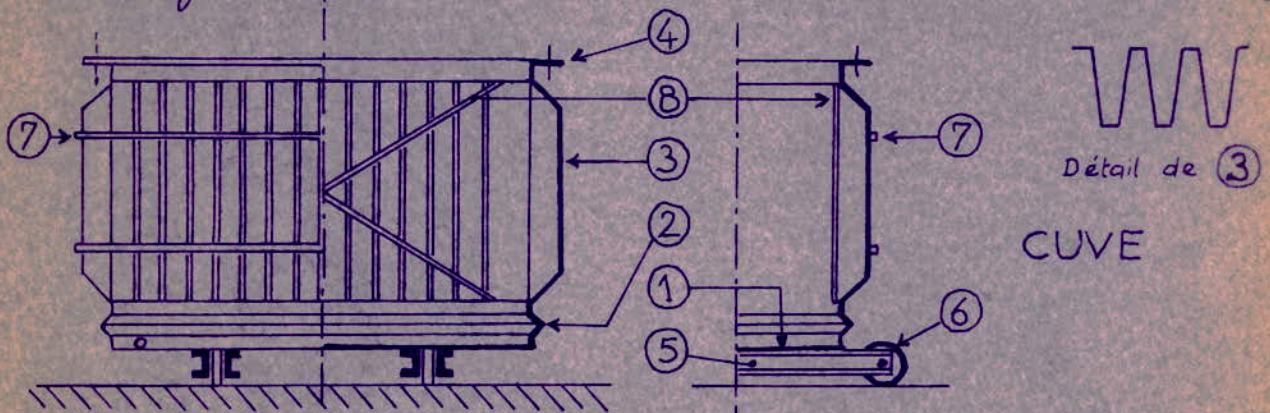
Les cuves diffèrent par le mode de refroidissement utilisé et par les dimensions qui sont fonction de la puissance.

Pour les transformateurs dont la puissance n'excède pas 1600 KVA on emploie des cuves à ailettes. (Fig ci-dessous)

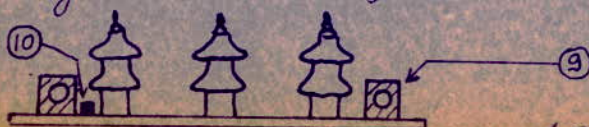
4- Constitution du couvercle

Le couvercle est constitué par une tôle plane épaisse ; il repose sur la cornière d'appui de la cuve par l'intermédiaire d'un joint, résistant à l'huile chaude.

Le couvercle porte des ouvertures pour le montage des bornes, des fuyauteries d'huile ; il est muni d'anneaux de levage.

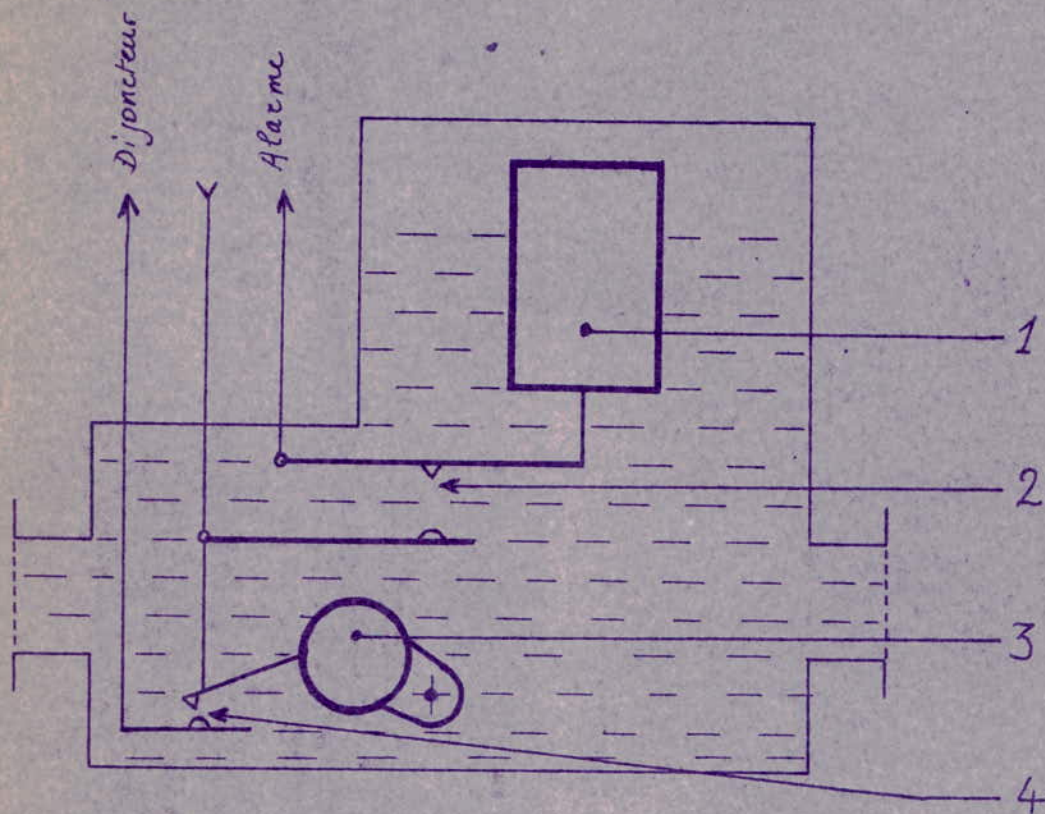


- (1) : fond ; (2) : soubassement en tôle plié ; (3) : paroi ondulée ;
 (4) : cornière d'appui du couvercle ; (5) : poutre en U ;
 (6) : galets ; (7) : frettes extérieures ; (8) : bannes à l'intérieur



- (9) anneau de levage
 (10) bouchon de remplissage

VII Protection Buchholz



1- Principe

Dans un transformateur, comme dans tout appareil 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 de l'isolant liquide sous l'action de la chaleur.

Le relais Buchholz utilise cette propriété ; étant monté au-dessus de la cuve pleine d'huile, tous les gaz dégagés le traversent ; si le dégagement est faible, les quelques bulles se localisent vers le flotteur (1) qui descend, ce qui provoque la fermeture du contact de première alarme (2).

En cas d'incident grave, les nombreuses bulles dégagées provoquent une expulsion d'huile et le flotteur (3) bascule, le contact de deuxième alarme (4) se ferme alors et l'ouverture des disjoncteurs est immédiate.

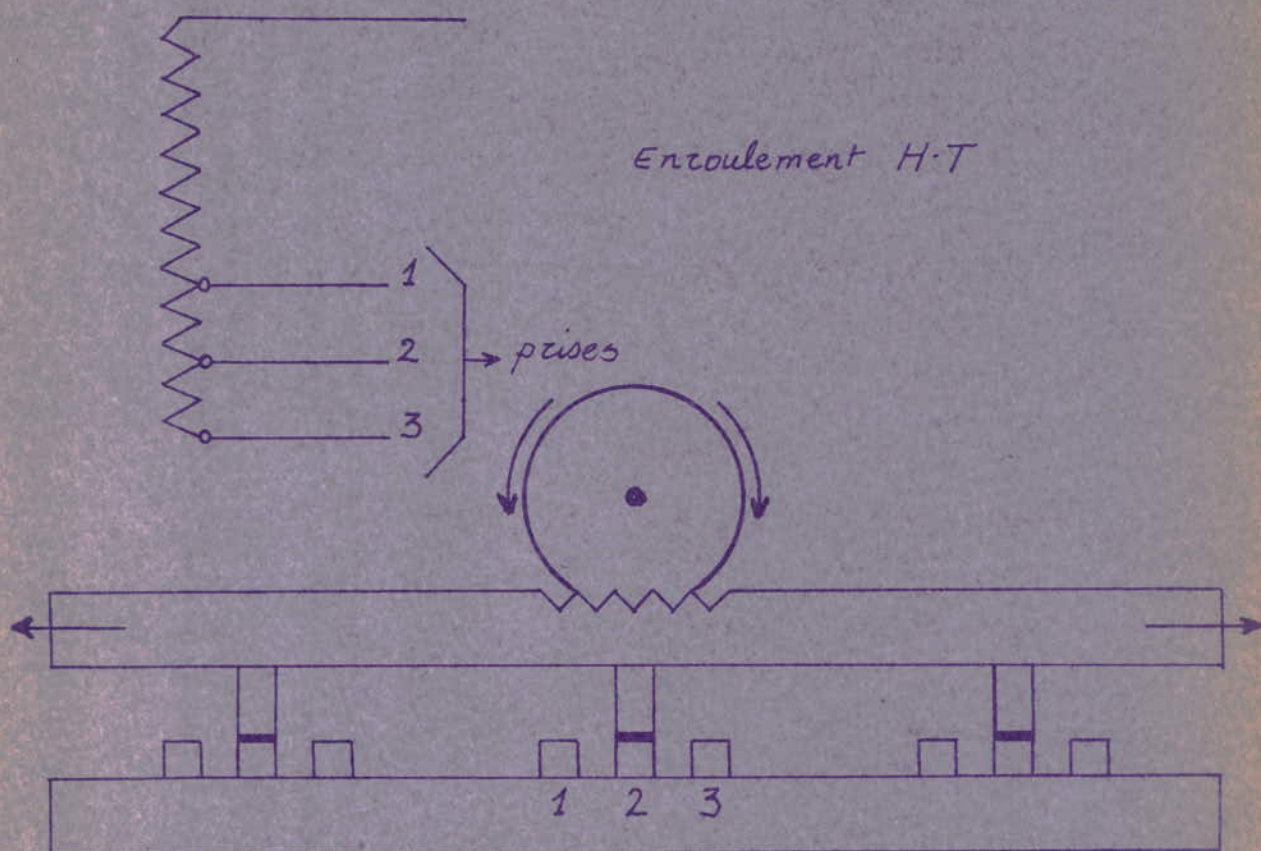
2- Critique :

- Cet appareil présente trois gros avantages :
- Il englobe la totalité des défauts internes
 - Il détecte les défauts, même petits, dès le début.
 - Il déclenche instantanément et automatiquement les disjoncteurs.

VIII Réglage de la tension

1 - Réglage à vide

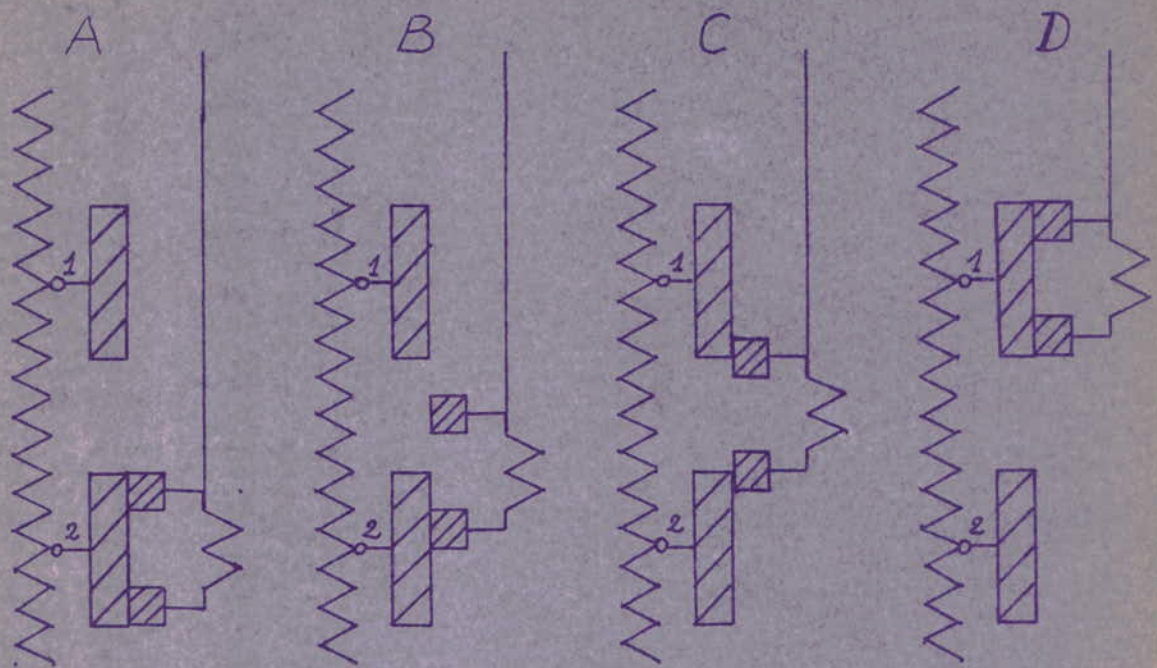
L'enroulement H.T est muni de prises supplémentaires qui permettent, en ajoutant ou en retranchant des spires, de faire varier le rapport de transformation ; les prises sont reliées à un commutateur, appelé ajusteur de tension, qui n'a pas de pouvoir de coupure et qui ne doit être manœuvré qu'à vide.



2 - Réglage en charge

Le réglage précédent ne suffit pas, car la continuité de l'exploitation exige que le réglage puisse s'effectuer en charge. La solution consiste encore à faire varier le rapport de transformation en ajoutant ou en retranchant des spires sur l'un des enroulements du transformateur, comme dans le réglage à vide ; mais cette opération doit être faite sans interrompre le courant ; la liaison doit être donc établie avec la prise suivante avant d'être abandonnée sur la prise précédente ; des spires vont être alors momentanément en court-circuit : afin de limiter le courant à une valeur qui ne soit pas dangereuse, on insère une résistance ou

une réactance entre les spires en court-circuit. (Fig. ci-dessous)



I Calcul électromagnétique du dimensionnement

Le calcul du transformateur comporte deux étapes :

- Un calcul préliminaire permettant de déterminer, à partir des données du cahier des charges et d'un nombre de résultats obtenus par l'expérience de construction, les dimensions principales.
- Un calcul définitif qui, à partir des résultats du calcul préliminaire, permet de déterminer toutes les caractéristiques géométriques et électromagnétiques et de les comparer à celles du cahier des charges.

I.1 - Calcul préliminaire des dimensions principales

Les dimensions principales d'un transformateur sont :

- Le diamètre de la colonne
- La hauteur des bobines

Les données nécessaires au calcul des dimensions principales sont :

1.1 - Puissance apparente par colonne :

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

S_n : puissance nominale = 630 KVA
 m_c : nombre de colonnes = 3
 S_c : puissance par colonne

$$S_c = \frac{630}{3}$$

$$S_c = 210 \text{ KVA}$$

1.2 - Tension nominale d'un enroulement :

C'est la tension spécifiée sur la plaque signalétique pour être appliquée ou développée en fonctionnement à vide entre les bornes de ligne d'un enroulement du transformateur.

La tension de phase dépend du mode de couplage :

- En BT, les enroulements sont connectés en étoile :

$$U_{f1} = \frac{U_{1n}}{\sqrt{3}}$$

$$U_{1n} = \text{tension nominale} = 0,4 \text{ KV}$$

$$U_{f1} = \text{tension de phase}$$

$$U_{f1} = \frac{0,4}{\sqrt{3}}$$

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

- En HT, la connexion est faite en triangle

$$U_{f2} = U_{2n}$$

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

1.3 Courant nominal

- Courant nominal de phase circulant dans l'enroulement basse tension (BT)

$$I_{f1} = \frac{S_c}{U_{f1}} = \frac{210 \cdot 10^3}{230,95} \quad \underline{I_{f1} = 909,3 A}$$

- Courant nominal de phase circulant dans l'enroulement haute tension (HT)

$$I_{f2} = \frac{S_c}{U_{f2}} = \frac{210}{10} \quad \underline{I_{f2} = 21 A}$$

1.4 - Tension de court-circuit

La tension de court-circuit a deux composantes :

- Une composante active U_{ka} due à la résistance
 - Une composante réactive U_{kr} due à l'inductance
- Les deux composantes active et réactive sont liées par la relation

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

Cette relation peut être exprimée en grandeurs réduites ou en grandeurs réelles

La composante active U_{ka} est tirée du cahier des charges par la relation suivante

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

P_k : pertes dues à la charge [kW]

S_n : [KVA]

U_{ka} : [%]

$$U_{ka} = \frac{6,5}{630} \cdot 100$$

$$\underline{U_{ka} = 1,03\%}$$

Enfin, la valeur de U_{kr} est :

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

$$U_{kr} = (4^2 - 1,03^2)^{1/2}$$

$$\underline{U_{kr} = 3,87\%}$$

1.5 - Diamètre de la colonne

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

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

$$\begin{aligned}
 a_c &: [m] \\
 S_c &: [VA] \\
 \beta_c &: [T] \\
 U_{K2} &: [\%] \\
 D &: [m]
 \end{aligned}$$

Les valeurs de S_c et U_{K2} sont déduites du cahier des charges ; tandis que les autres paramètres feront l'objet d'un choix à partir des paramètres des transformateurs déjà construits.

Nous allons indiquer la manière de faire le choix pour le calcul préliminaire.

- Coefficient de sveltesse :

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

D_{12} : diamètre du canal de fuite [m]

h_B : hauteur des bobines [m]

Le choix du coefficient de sveltesse implique le choix de la géométrie du transformateur.

La valeur du coefficient de sveltesse dépend de la puissance par colonne, de la tension la plus grande et du type de matériau utilisé pour les bobinages.

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

D'après le tableau ci-dessus on choisit

$$\beta = 2,1$$

- Épaisseur rapportée (ou équivalente) du canal de fuite

Pour les enroulements concentriques, elle est donnée par :

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

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

Pour une tension de 10KV, $a_{12} = (0,8 \div 1,2)$ cm

on choisit

$$\underline{a_{12} = 1,2 \text{ cm}}$$

a_1 : épaisseur de l'enroulement B.T

a_2 : épaisseur de l'enroulement H.T

D'une manière générale, le terme $\frac{a_1 + a_2}{3}$ est fonction de la puissance par colonne.

$$\frac{a_1 + a_2}{3} = K \sqrt[4]{S_c} \quad ; \quad \begin{array}{l} \frac{a_1 + a_2}{3} : [\text{cm}] \\ S_c : [\text{KVA}] \end{array}$$

K : est un facteur dépendant de la puissance par colonne et de la tension la plus grande

Pour $S_c = 210$ KVA et $U = 10$ KV on a $K = (0,48 \div 0,6)$

on choisit

$$\underline{K = 0,5}$$

$$\frac{a_1 + a_2}{3} = 0,5 \sqrt[4]{210}$$

$$\underline{\frac{a_1 + a_2}{3} = 1,9 \text{ cm}}$$

• Valeur de l'épaisseur rapportée du canal de fuite

$$a_2 = 1,2 \text{ cm} + 1,9 \text{ cm}$$

$$\underline{a_2 = 3,1 \text{ cm}}$$

• Coefficient de Rogowski : K_R

Le coefficient de Rogowski tient compte du fait que les lignes du champ dans le canal de fuite ne sont pas parallèles mais incurvées.

Dans ce premier calcul on prend $K_R = 0,95$

$$\underline{K_R = 0,95}$$

• Facteur d'utilisation de la section de fer :

$$K_u = K_z \cdot K_g$$

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

Pour des tôles d'épaisseur 0,35 mm avec isolation à la carlite, $K_z = (0,94 \div 0,95)$

on choisit

$$\underline{K_z = 0,94}$$

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

Pour, $S_c = 210 \text{ kVA}$ et $n_g = 6$ on a $K_g = 0,93$

$$\underline{K_g = 0,93}$$

$$\underline{n_g = 6}$$

• finalement

$$K_u = K_z \cdot K_g$$

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

$$\underline{K_u = 0,874}$$

• Induction magnétique de crête \hat{B}_c

L'induction magnétique de crête dépend de la puissance par colonne et du type de tôles utilisées.

\hat{B}_c peut être choisi à partir du tableau suivant :

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

En optant pour des tôles laminées à froid on choisit : $\hat{B}_c = 1,67$

Valeur numérique du diamètre de la colonne

$$D = 1,0674 \sqrt[4]{\frac{3,1 \cdot 10^{-2} \cdot 2,1 \cdot 0,95 \cdot 210 \cdot 10^3}{0,874^2 \cdot 1,6^2 \cdot 3,87 \cdot 10^2}}$$

$$D = 21,75 \text{ cm}$$

1.6 - Diamètre du canal de fuite (Fig: 1)

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

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

Pour une tension de 230,95 V , a_{10} est : $a_{10} = 0,5 \text{ cm}$

a_1 : épaisseur de l'enroulement BT , elle est estimée par la formule suivante :

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

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

L'épaisseur de l'enroulement BT sera

$$a_1 = 0,55 \sqrt[4]{210} \quad a_1 = 2,09 \text{ cm}$$

Valeur numérique du diamètre moyen du canal de fuite

$$D_{12} = (21,75 + 1 + 4,18 + 1,2) \text{ cm}$$

$$D_{12} = 28,13 \text{ cm}$$

1.7 - Hauteur des enroulements

Si on considère que les deux enroulements ont la même hauteur, celle-ci sera donnée par la formule suivante :

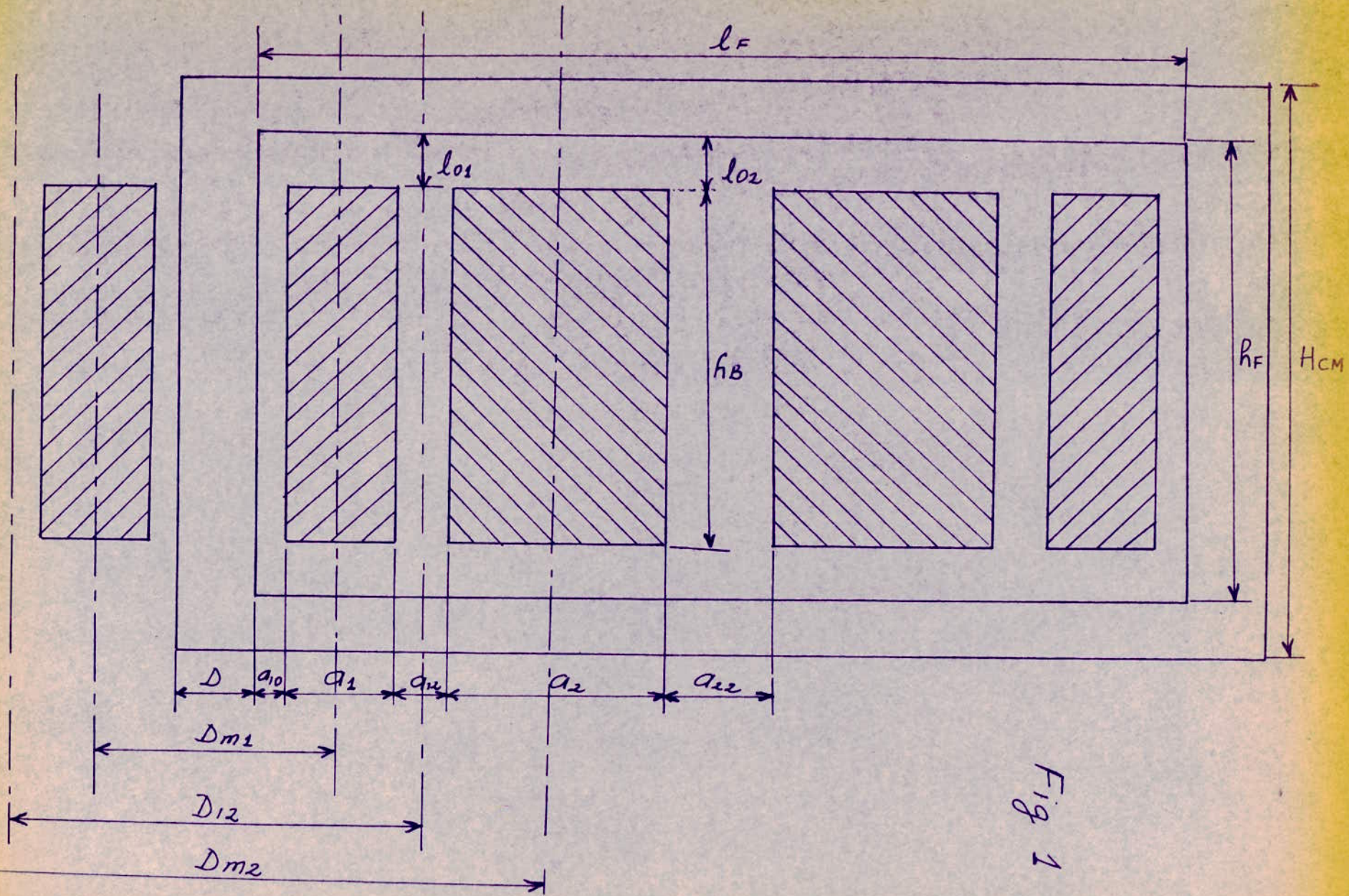


Fig 1

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

$$h_B = \pi \frac{28,13}{2,1}$$

$$h_B = 42,08 \text{ cm}$$

Cette valeur de la hauteur peut être modifiée par la suite, mais elle est en liaison avec le coefficient de sveltesse.

I.2. Calcul des enroulements :

2.01 - Section du fer de la colonne

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

$$D : [\text{cm}]$$

$$S_{\text{fer col}} : [\text{cm}]^2$$

$$S_{\text{fer col}} = \pi \frac{21,75^2}{4} \cdot 0,874$$

$$S_{\text{fer col}} = 324,73 \text{ cm}^2$$

2.2 Tension de spire

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

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

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

$$S_{\text{fer col}} : [\text{m}]^2$$

$$U_{\text{sp}} = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot 50 \cdot 1,6 \cdot 324,73 \cdot 10^{-4}$$

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

Nombre de spires de l'enroulement B.T

$$W_1 = \frac{U_1 f}{U_{\text{sp}}}$$

$$W_1 = \frac{230,95}{11,55}$$

$$W_1 = 20 \text{ sp}$$

Nombre de spires de l'enroulement H.T

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{W_2}{W_1} \implies W_2 = W_1 \frac{U_2}{U_1}$$

$$W_2 = 20 \frac{10}{230,95 \cdot 10^{-3}}$$

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

2.3 - Calcul des sections des conducteurs :

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

$I_f : [A]$
 $J_m : [A/mm^2]$
 $S_w : [mm^2]$

La densité moyenne de courant est calculée à partir de la formule

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

$P_k : [kW]$
 $S_n : [kVA]$
 $U_{sp} : [V]$
 $D_{12} : [m]$
 $J_m : [A/mm^2]$

k_{pk} est un facteur qui tient compte des pertes supplémentaires il est fonction de la puissance du transformateur

Pour une puissance de 630 kVA \rightarrow $k_{pk} = 1,05$

$$J_m = 7,34 \frac{1}{1,05} \frac{6,5 \cdot 11,55}{28,13 \cdot 10^2 \cdot 630}$$

$J_m = 2,96 A/mm^2$

Cette valeur obtenue de la densité moyenne peut être changée lors du calcul des dimensions des enroulements.

2.3.1 Choix des conducteurs et du type d'enroulements:

a) Enroulement B.T

$$S_{w1} = \frac{I_{f1}}{J_m}$$

$$S_{w1} = \frac{909,3}{2,96}$$

$S_{w1} = 307,20 mm^2$

S_{w1} est supérieure à $50 mm^2$, on utilise donc plusieurs conducteurs méplats en parallèle, chacun de section inférieure à $50 mm^2$

On prend 8 conducteurs élémentaires en parallèle, chacun de section :

$$S_w = \frac{307,20}{8}$$

$S_w = 38,40 mm^2$

Les conducteurs étant normalisés, on choisit des conducteurs dont la section est proche de $38,40 mm^2$

Notre choix de conducteurs sera :

$$S_{W_n} = 39,5 \text{ mm}^2$$

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

$$b = 8,6 \text{ mm}$$

La valeur réelle de la densité de courant :

$$J_{r2} = \frac{909,3}{8 \times 39,5}$$

$$J_{r2} = 2,88 \text{ A/mm}^2$$

Nous remarquons que la densité recalculée ne diffère pas de plus de 5% de la densité moyenne.

Le choix du type d'enroulement est fonction de la valeur du courant, du nombre de conducteurs en parallèle, du nombre de spires et de la tension nominale.

Dans notre cas, on choisit un enroulement cylindrique avec deux fils de commencement de quatre conducteurs élémentaires chacun avec une seule couche.

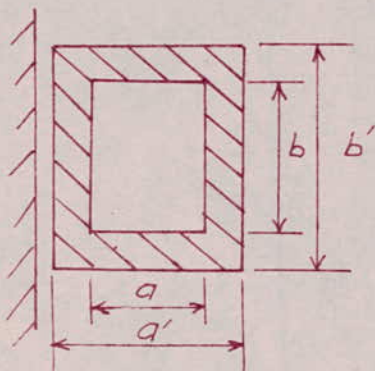
— Dimensions géométriques de la bobine B.T

• Hauteur de la bobine

$$h_B = (W_1 + 1) h_{sp} + 2 h_{sp}$$

$2 h_{sp}$ est l'espace nécessaire à la permutation des conducteurs et à la stabilisation de la bobine

Nous adoptons la disposition à plat des conducteurs.



$$a' = a + S_{is}$$

$$b' = b + S_{is}$$

S_{is} : épaisseur d'isolation réalisée avec :

- 2 rubans de 0,05 mm enroulés avec recouvrement de 1/2
 $2 \times 2 \times 0,05 \text{ mm} = 0,20 \text{ mm}$
- 1 ruban de 0,12 mm enroulé sans recouvrement

$$S_{is} = (0,20 \text{ mm} + 0,12 \text{ mm}) \cdot 2 =$$

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

$$b' = 8,6 \text{ mm} + 0,64 \text{ mm}$$

$$b' = 9,24 \text{ mm}$$

$$h_{sp} = 2b' = 2 \times 9,24 \text{ mm}$$

$$h_{sp} = 18,48 \text{ mm}$$

$$a' = 4,7 \text{ mm} + 0,64 \text{ mm}$$

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

Valeur numérique de la hauteur de la bobine

$$h_B = (20+1) 1,848 + 2 \times 1,848$$

$$h_B = 42,60 \text{ cm}$$

Épaisseur de la bobine

$$a_1 = 4a' = 4 \times 5,34$$

$$a_1 = 21,36 \text{ cm}$$

Valeur recalculée du diamètre du canal de fuite

$$D_{12c} = 21,75 + 1 + 4,27 + 1,2 =$$

$$D_{12c} = 28,22 \text{ cm}$$

coefficient de sveltesse recalculé

$$\beta = \pi \frac{28,22}{42,60}$$

$$\beta = 2,08$$

La valeur du coefficient de sveltesse recalculé est presque identique à la valeur du coefficient choisi auparavant

b - Enroulement HT

La section du conducteur est :

$$S_{w2} = \frac{I_{f2}}{J_m} = \frac{21}{2,96}$$

$$S_{w2} = 7,09 \text{ mm}^2$$

On choisit 2 conducteurs élémentaires normalisés de section ronde égale à $3,598 \text{ mm}^2$

$$\text{section des 2 conducteurs} = 2 \times 3,598 \text{ mm}^2 = 7,196 \text{ mm}^2$$

$$\text{diamètre d'un conducteur élémentaire} \quad d = 2,12 \text{ mm}$$

Les conducteurs sont isolés avec des émaux ou bien avec du vernis synthétique avec une épaisseur d'isolation bilatérale de :

$$d' = d + \delta_{is} = (2,12 + 0,3) \text{ mm}$$

$$\delta_{is} = 0,30 \text{ mm}$$

$$d' = 2,42 \text{ mm}$$

Du fait du changement de la section, on doit recalculer la valeur de la densité

$$J_{2r} = \frac{21}{7,196}$$

$$J_{2r} = 2,92 \text{ A/mm}^2$$

De même que pour la B.T, la valeur de la densité recalculée ne diffère pas de plus de 5% de la valeur de la densité moyenne

Pour la HT, vu les courants relativement plus petits et les tensions plus grandes, on choisit un enroulement du type stratifié avec 2 fils élémentaires ronds et plusieurs couches.

Pour une raison de réglage de la tension de $\pm 4\%$, on détermine tout d'abord le nombre total de spires de l'enroulement

$$W_2' = 1,04 W_2 = 1,04 \cdot 866$$

$$W_2' = 901 \text{ sp}$$

$$W_2'' = 0,96 W_2 = 0,96 \cdot 866$$

$$W_2'' = 831 \text{ sp}$$

Le nombre de spires de réglage est :

$$W_r = W_2' - W_2'' = 901 - 831$$

$$W_r = 70 \text{ sp}$$

Les spires de réglage sont placées dans la dernière couche.

Nombre de spires par couche

$$W_s = \frac{h_{B2} - (0,5 \div 1,5) \text{ cm}}{2 d'}$$

où h_{B2} peut être égale à h_B ou légèrement inférieure

on prend $h_{B2} = 41,6 \text{ cm}$.

$$\text{d'où } W_s = \frac{41,6 - 1,5}{0,484} =$$

$$W_s = 83 \text{ sp}$$

- Nombre de couches

$$\eta_s = \frac{W_2'}{W_s} = \frac{901}{83} = 10,86$$

$$\eta_s = 11 \text{ couches}$$

$$\eta_s = 11 \text{ couches} \left\{ \begin{array}{l} 10 \text{ couches} \times 83 \text{ spires} \\ 1 \text{ couche} \times 71 \text{ spires} \end{array} \right.$$

- Dimensions géométriques de la bobine HT

. Hauteur de la bobine

$$h_B = d' (W_s + 1) + (0,5 \div 2) \text{ cm}$$

$(0,5 \div 2) \text{ cm}$: espace nécessaire pour la stabilisation de la bobine

$$h_B = 0,484 (83 + 1) + 2 \text{ cm}$$

$$h_B = 42,6 \text{ cm}$$

. Epaisseur de la bobine

$$a_2 = n_s d' + S_s (n_s - 1) + S_c$$

S_s = isolation entre couche, elle est choisie d'après la tension $U = 2 U_{sp} W_s = 2 \times 11,55 \times 83 = 1,91 \text{ kV}$

$$\rightarrow S_s = 0,36 \text{ mm}$$

$$S_c = \text{largeur du canal de refroidissement} = 5 \text{ mm}$$

$$a_2 = 11 \times 0,242 + 10 \times 0,036 + 0,5$$

$$a_2 = 3,52 \text{ cm}$$

2.4 Vérification de la tension de court-circuit :

. Pour faire la vérification de la tension de court-circuit, il est nécessaire de déterminer les valeurs définitives du canal de fuite et du coefficient de Rogowski.

- Largeur du canal de fuite

$$a_c = a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3} = 1,2 + \frac{3,52 + 2,136}{3}$$

$$a_c = 3,09 \text{ cm}$$

- Le coefficient de Rogowski :

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

$$K_R = 1 - \frac{1}{2\pi} \frac{2,4 + 3,52 + 2,136}{42,60}$$

$$K_R = 0,97$$

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

$$U_{kr} = \frac{2\pi f \cdot \mu_0 \cdot W_1^2 \cdot a_2 \cdot \beta \cdot K_R \cdot I_{f1} \cdot 100}{U_{f1}}$$

$$\begin{aligned} a_2 &: [\text{m}] \\ I_{f1} &: [\text{A}] \\ U_{f1} &: [\text{V}] \\ U_{kr} &: [\%] \\ \mu_0 &: 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m} \end{aligned}$$

$$U_{kr} = \frac{2\pi \cdot 50 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 20^2 \cdot 3,09 \cdot 10^{-2} \cdot 2,08 \cdot 0,97 \cdot 909,3}{230,95} \cdot 100$$

$$U_{kr} = 3,88\%$$

• Valeur de la tension de court-circuit

$$U_k = (1,03^2 + 3,88^2)^{1/2}$$

$$U_k = 4,01\%$$

La valeur de U_k est acceptable car elle ^{est} très peu différente de celle donnée par le cahier des charges.

2.5 Caractéristiques des enroulements :

- Résistance
- Poids

a) Enroulement B.T

- Calcul de la résistance :

• Diamètre moyen de la spire

$$D_{m1} = D + 2a_{10} + a_1 = 21,75 + 1 + 2,136$$

$$D_{m1} = 24,89 \text{ cm}$$

• Longueur moyenne de la spire

$$l_{w1} = \pi \cdot D_{m1} = \pi \cdot 24,89 \text{ cm}$$

$$l_{w1} = 78,18 \text{ cm}$$

• Longueur Totale du conducteur

$$l_{t1} = W_1 \cdot l_{w1} = 20 \cdot 78,18$$

$$l_{t1} = 15,64 \text{ m}$$

Résistance de l'enroulement

$$R_1 = \rho \frac{l_{t1}}{S_{W1}} \quad \text{avec } \rho_{75^\circ} = 0,021 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$$

$$R_1 = 0,021 \frac{15,64}{8 \times 39,5}$$

- Poids du matériel actif

$$G_1 = \delta_1 \cdot l_{t1} \cdot S_{w1} \cdot 10^{-3}$$

$$\delta_1 = \text{poids spécifique} = 8,9 \text{ kg/dm}^3$$

$$l_{t1} : [\text{m}]$$

$$S_{w1} : [\text{mm}]^2$$

$$G_1 : [\text{kg}]$$

$$G_1 = 8,9 \cdot 15,64 \cdot 8 \cdot 39,5 \cdot 10^{-3}$$

$$R_1 = 1,04 \cdot 10^{-3} \Omega$$

$$G_1 = 44 \text{ kg}$$

b) - Enroulement HT

- Calcul de la résistance

. Diamètre moyen de la spire

$$\begin{aligned} D_{m2} &= D + 2a_{10} + 2a_{12} + 2a_1 + a_2 \\ &= 21,75 + 1 + 2,4 + 4,27 + 3,52 = \end{aligned}$$

$$D_{m2} = 32,94 \text{ cm}$$

. Longueur moyenne de la spire

$$lw_2 = \pi D_{m2} = \pi \cdot 32,94$$

$$lw_2 = 103,5 \text{ cm}$$

Longueur totale du conducteur

$$l_{t2} = W_2' \cdot lw_2 = 901 \cdot 103,5 \text{ cm}$$

$$l_{t2} = 932,54 \text{ m}$$

Résistance de l'enroulement

$$R_2 = \rho \cdot \frac{l_{t2}}{S_{w2}} = 0,021 \frac{932,54}{7,196}$$

$$R_2 = 2,72 \Omega$$

- Poids du matériel actif

$$G_2 = \delta_1 \cdot l_{t2} \cdot S_{w2} \cdot 10^{-3} = 8,9 \cdot 932,54 \cdot 7,196 \cdot 10^{-3}$$

$$G_2 = 59,72 \text{ kg}$$

. Poids Total du matériel actif

$$G = 3(G_1 + G_2) = 3(44 + 59,72) \text{ kg}$$

$$G = 311,2 \text{ kg}$$

I.3 - Calcul définitif du circuit magnétique

dimensionnement de :

- : la culasse
- : la fenêtre
- : la hauteur totale
- : le poids

— Longueur de la fenêtre

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

a_{22} : distance séparant deux bobines HT ; elle est fonction de la tension nominale

Pour $U_n = 10 \text{ kV}$, on a $a_{22} = 1,4 \text{ cm}$

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

$$l_F = 2(0,5 + 2,136 + 1,2 + 3,52) \text{ cm} + 1,4 \text{ cm}$$

$$l_F = 16,11 \text{ cm}$$

— Hauteur de la fenêtre

$$h_F = h_3 + 2l_{02}$$

l_{02} : dépend de la tension nominale ; Pour $U_n = 10 \text{ kV} \rightarrow l_{02} = 4 \text{ cm}$

$$h_F = 42,6 + 8$$

$$h_F = 50,6 \text{ cm}$$

— Longueur entre axes des colonnes

$$l_{cc} = l_F + D = 16,11 \text{ cm} + 21,75 \text{ cm}$$

$$l_{cc} = 37,86 \text{ cm}$$

— Section de la culasse :

La section de la culasse doit être supérieure de 15 à 20% de celle de la colonne

$$S_j = 1,15 S_{fucol} = 1,15 \cdot 324,73$$

$$S_j = 373,44 \text{ cm}^2$$

— Induction magnétique dans la culasse :

La loi de la conservation du flux, nous permet d'écrire :

$$\hat{B}_j S_j = S_{fucol} \hat{B}_c$$

$$\Rightarrow \hat{B}_j = \frac{S_{fucol}}{S_j} \hat{B}_c = \frac{\hat{B}_c}{1,15} = \frac{1,6}{1,15}$$

$$\hat{B}_j = 1,39 \text{ T}$$

— Pour la culasse, on choisit une section rectangulaire dont la largeur est égale à la largeur de la tôle la plus large du noyau

— Détermination des dimensions des gradins formant la colonne :
Pour un noyau à six gradins, les normes donnent :

$$lg_1 = 0,96 D = 0,96 \cdot 21,75 \text{ cm}$$

$$lg_1 = 20,88 \text{ cm}$$

$$lg_2 = 0,885 D = 0,885 \cdot 21,75 \text{ cm}$$

$$lg_2 = 19,25 \text{ cm}$$

$$lg_3 = 0,775 D = 0,775 \cdot 21,75 \text{ cm}$$

$$lg_3 = 16,86 \text{ cm}$$

$$lg_4 = 0,631 D = 0,631 \cdot 21,75 \text{ cm}$$

$$lg_4 = 13,72 \text{ cm}$$

$$lg_5 = 0,465 D = 0,465 \cdot 21,75 \text{ cm}$$

$$lg_5 = 10,11 \text{ cm}$$

$$lg_6 = 0,28 D = 0,28 \cdot 21,75 \text{ cm}$$

$$lg_6 = 6,09 \text{ cm}$$

— Pour déterminer les hauteurs des gradins, on applique le théorème de Pythagore.

$$h_{gi} = (D^2 - l_{gi})^{1/2}$$

$$\begin{aligned} h_{g1} &= (21,75^2 - 20,88^2)^{1/2} \\ h_{g2} &= (21,75^2 - 19,25^2)^{1/2} \\ h_{g3} &= (21,75^2 - 16,86^2)^{1/2} \\ h_{g4} &= (21,75^2 - 13,72^2)^{1/2} \\ h_{g5} &= (21,75^2 - 10,11^2)^{1/2} \\ h_{g6} &= (21,75^2 - 6,09^2)^{1/2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} h_{g1} &= 6,09 \text{ cm} \\ h_{g2} &= 10,12 \text{ cm} \\ h_{g3} &= 13,74 \text{ cm} \\ h_{g4} &= 16,88 \text{ cm} \\ h_{g5} &= 19,26 \text{ cm} \\ h_{g6} &= 20,88 \text{ cm} \end{aligned}$$

- La largeur de la culasse est donc :

- On déduit la hauteur de la culasse :

$$l_j = 20,88 \text{ cm}$$

$$h_j = \frac{S_j}{l_j} = \frac{373,44}{20,88}$$

$$h_j = 17,89 \text{ cm}$$

- Hauteur totale du circuit magnétique

$$H_{c.m} = h_f + 2h_j = 50,6 \text{ cm} + 2 \cdot 17,89 \text{ cm}$$

$$H_{c.m} = 86,38 \text{ cm}$$

- Poids du circuit magnétique

coin	culasse			
colonne				

- Poids des colonnes : $G_{col} = 3 \cdot \delta_2 \cdot V_{col}$; avec $\delta_2 = 7,65 \text{ kg/dm}^3$
 volume de la colonne : $V_{col} = S_{col} \cdot h_{col}$
 $V_{col} = 324,73 \times 50,6$

$$V_{col} = 16,43 \text{ dm}^3$$

$$G_{col} = 3 \times 7,65 \times 16,43$$

$$G_{col} = 377,07 \text{ kg}$$

- Poids des culasses : $G_j = 4 \cdot \delta_2 \cdot V_j$
 volume de la culasse : $V_j = S_j \cdot L_F = 373,44 \times 16,11$; $V_j = 6,02 \text{ dm}^3$

$$G_j = 4 \times 7,65 \times 6,02$$

$$G_j = 184,21 \text{ kg}$$

- Poids des coins : $G_c = 6 \cdot \delta_2 \cdot V_c$
 volume du coin : $V_c = S_j \cdot D = 373,44 \times 21,75$; $V_c = 8,12 \text{ dm}^3$

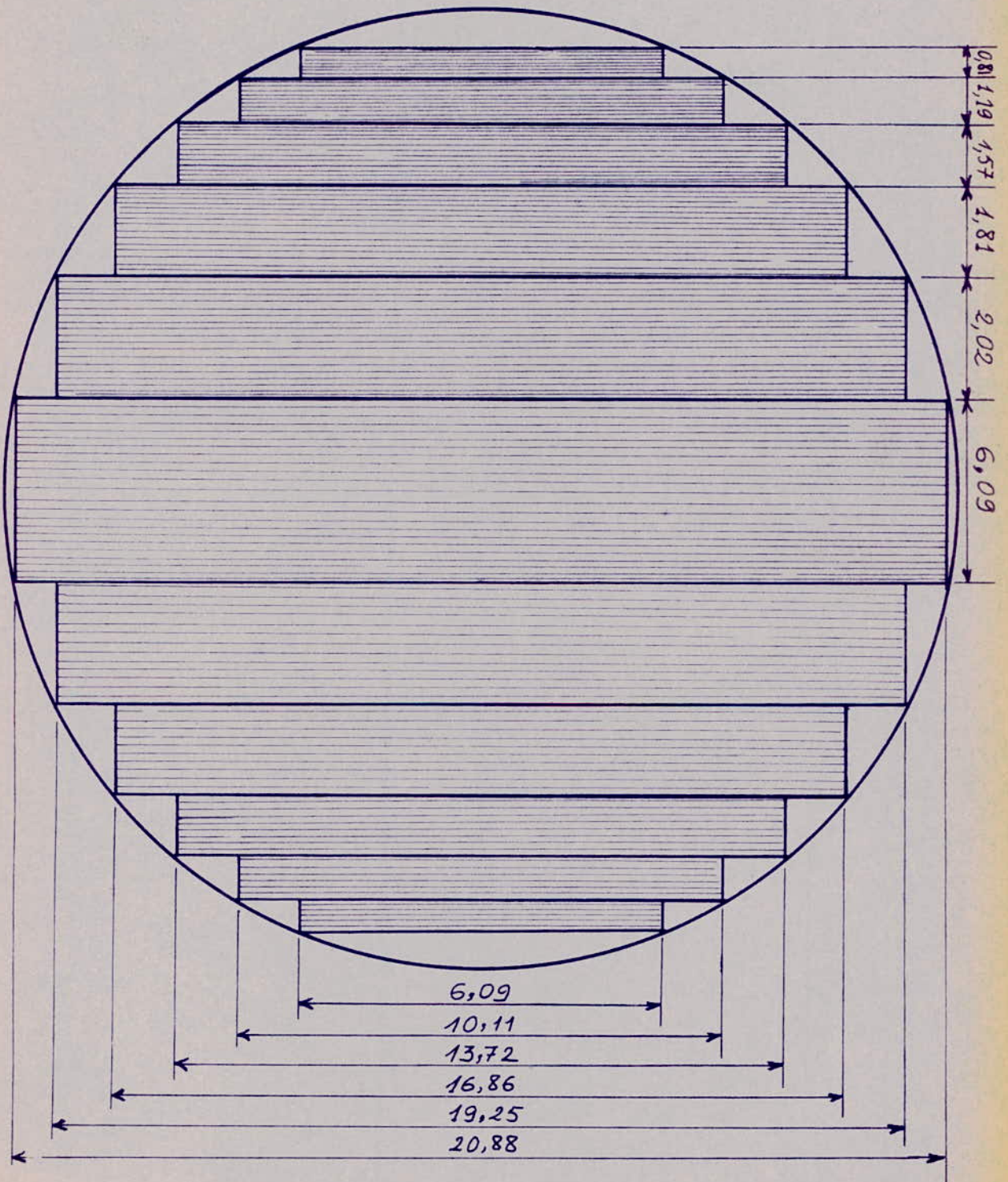
$$G_c = 6 \times 7,65 \times 8,12$$

$$G_c = 372,71 \text{ kg}$$

- Poids total du circuit magnétique : $G' = G_{col} + G_j + G_c$
 $G' = 377,07 + 184,21 + 372,71$

$$G' = 934 \text{ kg}$$

Section de la colonne
en cm



I.4 Calcul des pertes et du rendement

A - Pertes Joule

a) Basse tension

— Enroulements : $P_{j1} = 3 \cdot R_1 \cdot I_{f1}^2 = 3 \times 1,04 \cdot 10^{-3} \cdot 909,3^2$

$P_{j1} = 2554,9 \text{ W}$

— Connexions :

Longueur de la connexion dans le couplage étoile

$$l_{\text{conx}} = 7,5 h_B = 7,5 \times 42,6 \text{ cm}$$

$l_{\text{conx}} = 3,2 \text{ cm}$

Section du conducteur de connexion : $S_{W_{\text{conx}}} = S_{W_1}$; $S_{W_{\text{conx}}} = 316 \text{ mm}^2$

Résistance du fil de connexion :

$$R_{\text{conx}} = 0,021 \frac{3,2}{316}$$

$R_{\text{conx}} = 2,12 \cdot 10^{-4}$

$$P'_{j1} = R_{\text{conx}} \cdot I_{n1}^2 = 2,12 \cdot 10^{-4} \cdot 909,3^2$$

$P'_{j1} = 175,3 \text{ W}$

— Pertes supplémentaires dues à l'effet pelliculaire :

$$P_{\text{sup1}} = (K_{mR1} - 1) m \cdot R_1 \cdot I_{f1}^2$$

K_{mR1} = coefficient de majoration de la résistance en courant alternatif

$$K_{mR1} = 1 + \frac{m^2 - 0,2}{9} (\alpha a)^4; \text{ (conducteurs méplat)}$$

m = nombre de couche = 4

a = largeur du conducteur méplat = 4,7 mm

$$\alpha = \left(\frac{\eta \cdot b}{h_F} \cdot \frac{\omega \mu_0}{2 \rho} \right)^{1/2}$$

b : mm

h_F : mm

ρ : $\Omega \text{ mm}^2 / \text{m}$

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

α : m^{-1}

n = nombre de conducteurs par couche = 40

b = longueur du conducteur nu = 8,6 mm

$$\alpha = \left(\frac{40 \times 8,6 \times 314 \times 4\pi \cdot 10^{-7}}{506 \times 2 \times 2,1 \cdot 10^8} \right)^{1/2} = 79,92 \text{ m}^{-1}$$

$$(\alpha a)^4 = (79,92 \times 4,7 \cdot 10^{-3})^4 = 0,02$$

$$K_{mR1} = 1 + \frac{4^2 - 0,2}{9} 0,02 = 1,04$$

$$P_{\text{sup1}} = (1,04 - 1) 3 \times 1,04 \cdot 10^{-3} \times 909,3^2$$

$P_{\text{sup1}} = 103,2 \text{ W}$

b) Haute tension

— Enroulement : $P_{j2} = 3 \cdot R_2 \cdot I_{f2}^2 = 3 \times 2,72 \times 21^2$; $P_{j2} = 3598,56 \text{ W}$

— Connexions

longueur de la connexion dans le couplage triangle

$$l_{\text{conx}} = 14 \text{ hb} = 14 \times 42,6 = 5,96 \text{ m}$$

section du conducteur de connexion $S_{W_{\text{conx}}} = \sqrt{3} S_{W_2} =$

$$S_{W_{\text{conx}}} = \sqrt{3} \times 7,196 = 12,46 \text{ mm}^2$$

Resistance de la connexion : $R_{\text{conx}} = 0,021 \frac{5,96}{12,46} = 10^{-2} \Omega$

Pertes joule dans les connexions

$$P'_{j2} = 10^{-2} \cdot 21^2$$

$$P'_{j2} = 4,41 \text{ W}$$

Pertes supplémentaires dues à l'effet pelliculaire

$$P_{\text{sup}2} = (K_{mR_2} - 1) m \cdot R_2 I_{f2}^2$$

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

$m' =$ nombre de couches = 11

$d =$ diamètre du conducteur = 2,12 mm

$$\alpha = \left(\frac{n d \omega \mu_0}{2 h f} \right)^{1/2} \text{ avec } n = \text{nombre de conducteurs / couche}$$

$n = 166$

$$\alpha = \left(\frac{166 \times 2,12 \times 314 \times 4\pi \cdot 10^{-7}}{506 \times 2 \times 2,1 \times 10^8} \right)^{1/2} = 80,83 \text{ m}^{-1}$$

$$(\alpha d)^4 = (80,83 \times 2,12 \times 10^{-3})^4 = 8,62 \cdot 10^{-4}$$

$$K_{mR_2} = 1 + \frac{11^2 - 0,2}{15,25} 8,62 \cdot 10^{-4} = 1,01$$

$$P_{\text{sup}2} = (1,01 - 1) 3 \times 2,72 \times 21^2$$

$$P_{\text{sup}2} = 36 \text{ W}$$

Dans les enroulements HT et BT, existent des pertes qu'on désigne par pertes ^{dans les parties} mécaniques, elles sont approximées par un coefficient K_{pk} qui est fonction de la puissance nominale.

Pertes joule Totales dues à la charge

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

$$P_{cu1} = P_{j1} + P'_{j1} + P_{\text{sup}1} = 2554,9 + 175,3 + 103,2$$

$$P_{cu1} = 2833,4 \text{ W}$$

$$P_{cu2} = P_{j2} + P'_{j2} + P_{\text{sup}2} = 3598,56 + 4,41 + 36$$

$$P_{cu2} = 3638,97 \text{ W}$$

$$P_K = 1,05 (2833,4 + 3638,97)$$

$$P_K = 6,795 \text{ kW}$$

Erreur sur P_K : $\frac{\Delta P_K}{P_K} = \frac{6,795 - 6,5}{6,795} \cdot 100$; $\frac{\Delta P_K}{P_K} = 4,34\%$

L'erreur relative sur P_K n'excede pas 10%, donc les pertes joule totales dues à la charge sont admissibles.

B - Pertes fer :

Les pertes fer comprennent les pertes principales P_{fo} et les pertes supplémentaires P_{so} .

Pour calculer les pertes principales, on dispose des courbes donnant les pertes spécifiques en fonction de l'induction.

Le type d'acier utilisé est MG ARMCO

épaisseur des tôles : 0,35 mm
sens du laminage : $\alpha = 0^\circ$

— Calcul des pertes

• Pertes dans les colonnes

Pour une induction magnétique de 1,6 T, correspond une valeur des pertes spécifiques $P_{s1} = 1,3 \text{ W/kg}$

$$P_{fer\ col} = P_{s1} \cdot G_{col} = 1,3 \times 377,07 ; \quad P_{fer\ col} = 490,2$$

• Pertes dans les culasses

Pour une induction de 1,39 T correspond $P_{s2} = 0,9 \text{ W/kg}$

$$P_{fer\ j} = P_{s2} \cdot G_j = 0,9 \times 184,21 \quad P_{fer\ j} = 165,79$$

• Pertes principales de l'ensemble colonnes-culasses :

$$P_{fo} = P_{fer\ col} + P_{fer\ j} = 490,2 + 165,79 ; \quad P_{fo} = 656 \text{ W}$$

• Pertes supplémentaires :

Les pertes supplémentaires sont évaluées de 15 à 20% des pertes principales.

$$P_{so} = 0,16 \cdot P_{fo} = 0,16 \cdot 656 \quad P_{so} = 105 \text{ W}$$

• Pertes dans les coins

On suppose que dans les coins, existe une induction de transition entre la colonne et la culasse dont la valeur est égale à la valeur moyenne des deux inductions

$$\hat{B}_m = \frac{\hat{B}_j + \hat{B}_c}{2} = \frac{1,39 + 1,6}{2} \quad \hat{B}_m = 1,50 \text{ T}$$

A cette induction de 1,50T, correspond des pertes spécifiques
 $P_{sc} = 1,1 \text{ W/kg}$

$$P_{fenc} = P_{sc} \cdot G_c = 1,1 \times 372,71$$

$$P_{fenc} = 410 \text{ W}$$

- Pertes supplémentaires dues à la distorsion du flux dans les coins
 La valeur de ces pertes est estimée à 50% des pertes principales dans les coins

$$P_{soc} = P_{fenc} \cdot 0,50 = 410 \times 0,50; \quad P_{soc} = 205 \text{ W}$$

- Pertes Totales dans le fer

$$P_o = 656 + 105 + 410 + 205 \quad ; \quad P_o = 1376 \text{ W}$$

- Calcul du Rendement

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

P_2 : puissance fournie
 P_1 : puissance absorbée

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

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

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

avec $P_{cu} = RI^2 = RI_{cc}^2 \left(\frac{I}{I_{cc}} \right)^2$; on pose $\frac{I}{I_{cc}} = \alpha$: coefficient de charge

$$RI_{cc}^2 = P_K$$

On aura $P_{cu} = \alpha^2 P_K$

$$P_2 = (S_n \cos \varphi) \cdot \alpha$$

Finalement, le rendement s'exprime par :

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

Le rendement est maximal lorsque les pertes Joule sont égales aux pertes à vide :

$$P_o = \alpha^2 P_K$$

On déduit le coefficient de charge : $\alpha = \left(\frac{P_o}{P_K} \right)^{1/2}$

$$\alpha = \left(\frac{1,376}{6,795} \right)^{1/2}$$

$$\alpha = 0,45$$

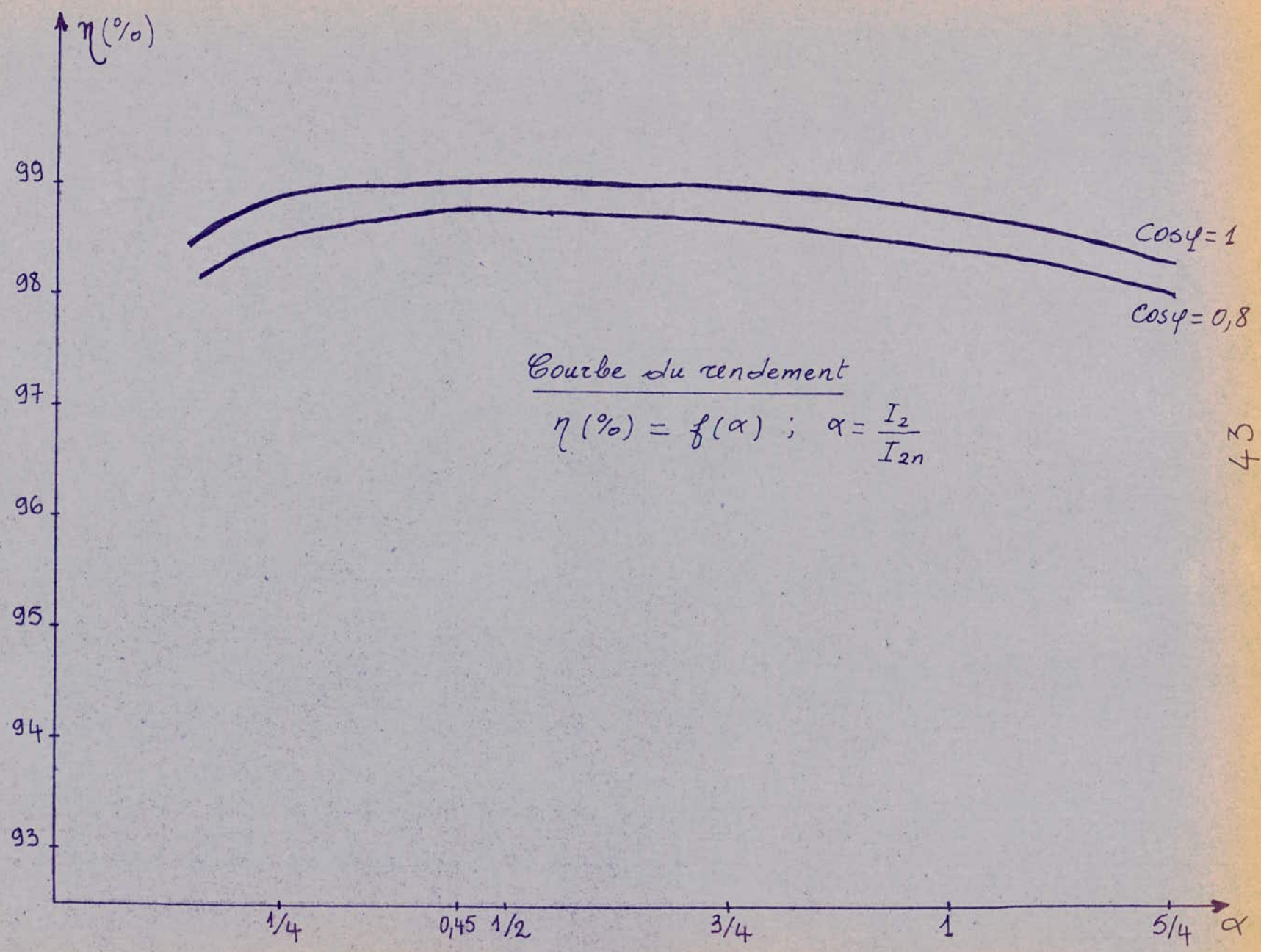
- Caractéristiques du rendement en fonction de la charge

* charge résistive : $\cos\varphi = 1$

α	$\alpha^2 P_n$ KW	$\alpha S_n \cos\varphi$ KW	$P_0 + \alpha^2 P_n$ KW	$\alpha S_n \cos\varphi + P_0 + \alpha^2 P_n$ KW	η (%)
1/4	0,42	157,5	1,8	159,3	98,87
0,45	1,38	283,5	2,75	286,25	99,04
1/2	1,70	315	3,07	318,07	99,03
3/4	3,82	472,5	5,20	477,7	98,91
1	6,79	630	8,17	638,17	98,72
5/4	10,62	587,5	11,99	599,49	98,05

* charge $\tilde{\alpha}$ $\cos\varphi = 0,8$

α	$\alpha^2 P_n$ KW	$P_0 + \alpha^2 P_n$ KW	$\alpha S_n \cos\varphi$ KW	$\alpha S_n \cos\varphi + P_0 + \alpha^2 P_n$ KW	η (%)
1/4	0,42	1,8	126	127,8	98,59
0,45	1,38	2,75	226,8	229,55	98,8
1/2	1,7	3,07	252	255,07	98,8
3/4	3,82	5,20	378	383,20	98,64
1	6,795	8,17	504	512,17	98,40
5/4	10,62	11,99	630	641,99	98,13



Courbe du rendement

$$\eta (\%) = f(\alpha) ; \alpha = \frac{I_2}{I_{2n}}$$

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

Une charge est définie par le rapport de sa puissance sur la puissance nominale.

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

La chute de tension au secondaire est définie par :

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

$$\Delta U (\%) = \frac{U'_{2n} - U'_2}{U'_{2n}} \cdot 100 \quad (1)$$

U_2 = Tension secondaire pour une charge et un facteur de puissance donnés

U_{2n} = Tension secondaire nominale

U'_2 et U'_{2n} : Tensions secondaires ramenées au primaire

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

La relation (1) devient

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

On peut approximer cette chute de tension par :

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

U_{ka} : chute de tension active = 1,03 %

U_{kr} : chute de tension réactive = 3,88 %

- Cas d'une charge résistive : $\cos \varphi_2 = 1$, $\sin \varphi_2 = 0$

$$\Delta U = \alpha U_{ka} (\%) = 1,03 \alpha$$

α	$\Delta U (\%)$	$\Delta U' (V)$	$U'_2 (V)$	$U_2 (V)$	U_2/U_{2n}	I_2/I_{2n}	$I_2 (A)$
1/4	0,257	25,7	9974,3	398,97	0,997	0,25	227,33
1/2	0,515	51,5	9948,25	397,93	0,994	0,503	457,38
3/4	0,772	77,2	9922,8	396,91	0,992	0,756	687,43
1	1,03	103	9899,7	399,59	0,998	1	909,3
5/4	1,287	123,7	9866	394,64	0,986	1,267	1152

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

$$\Delta U = -1,5 \cdot \alpha$$

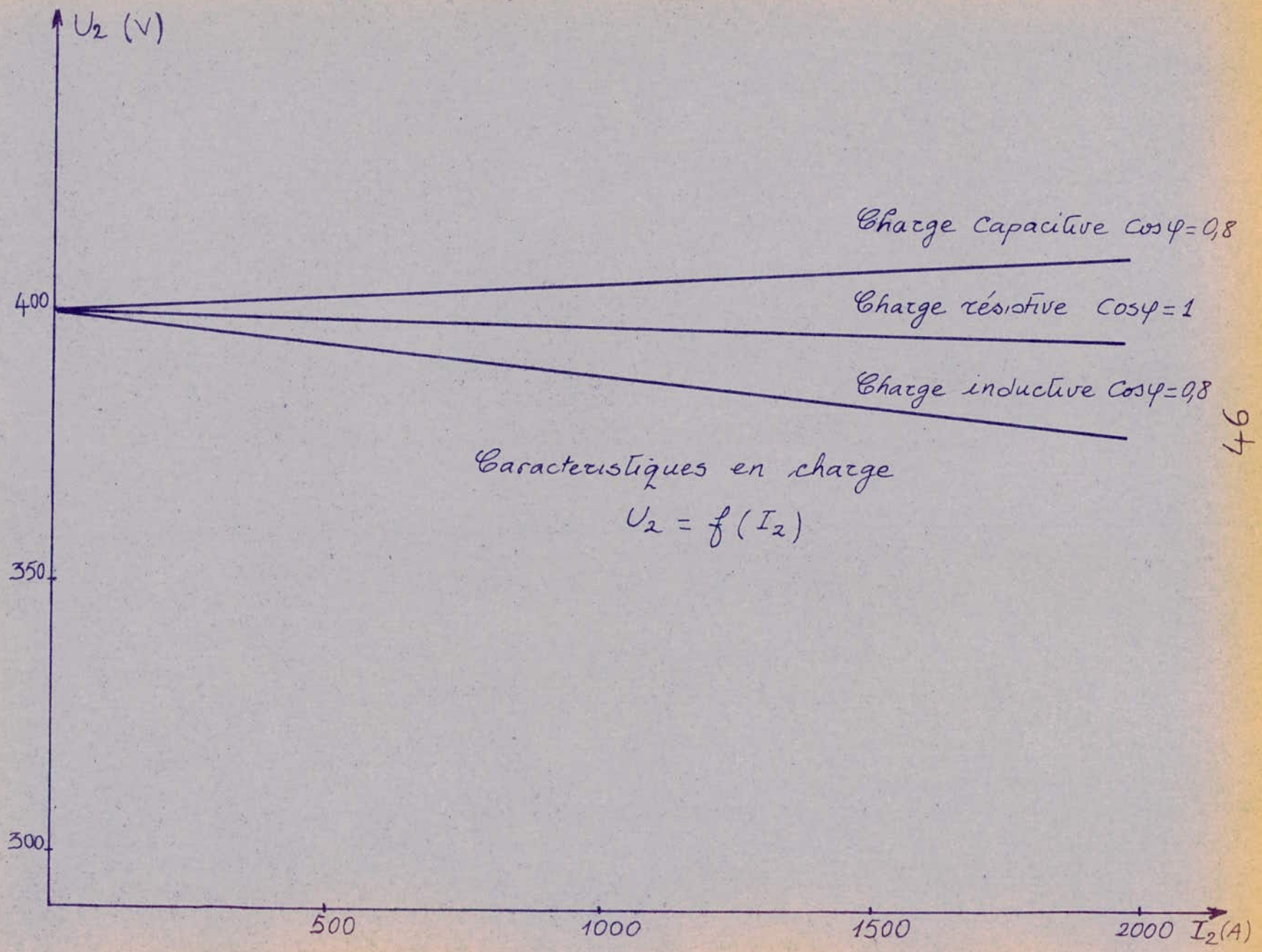
α	$\Delta U (\%)$	$\Delta U' (V)$	$U_2' (V)$	$U_2 (V)$	U_2 / U_{2n}	I_2 / I_{2n}	$I_2 (A)$
1/4	-0,38	-38	10038	401,52	1,004	0,311	282,79
1/2	-0,75	-75	10075	403	1,007	0,620	563,77
3/4	-1,13	-113	10113	404,52	1,011	0,927	842,92
1	-1,5	-150	10150	406	1,015	1,231	1119,35
5/4	-1,88	-188	10188	407,52	1,018	1,534	1394,87

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

$$\Delta U = (1,03 \cdot 0,8 + 3,88 \cdot 0,6) \alpha$$

$$\Delta U = 3,15 \alpha$$

α	$\Delta U (\%)$	$\Delta U' (V)$	$U_2' (V)$	$U_2 (V)$	U_2 / U_{2n}	I_2 / I_{2n}	$I_2 (A)$
1/4	0,79	79	9921	396,84	0,992	0,315	286,5
1/2	1,58	158	9842	393,68	0,984	0,635	577,5
3/4	2,36	236	9764	390,56	0,976	0,960	873
1	3,15	315	9685	387,4	0,968	1,291	1174
5/4	3,94	394	9606	384,24	0,960	1,627	1479,5



I.5 Calcul du courant de marche à vide

Le courant de marche à vide a 2 composantes :

- Une composante active : I_{oa}
- Une composante réactive : $I_{o\mu}$

- Calcul de la composante active : I_{oa}

$$P_o = \sqrt{3} \cdot U_1 \cdot I_{oa} \Rightarrow I_{oa} = \frac{P_o}{\sqrt{3} \cdot U_1} = \frac{1376}{\sqrt{3} \cdot 10^4} ; \underline{I_{oa} = 0,08 A}$$

- Calcul de la composante réactive : $I_{o\mu}$

Pour cela, on calcule la puissance réactive dans le fer et dans l'entrefer

- Pertes dans les colonnes : $Q_{col} = q_{col} \cdot G_{col}$
 Pour une induction de 1,6T, correspond des pertes spécifique de $q_{col} = 2,5 \text{ VAR/kg}$

$$Q_{col} = 2,5 \times 377,07$$

$$\underline{Q_{col} = 942,68 \text{ VAR}}$$

- Pertes dans les culasses : $Q_j = q_{oj} \cdot G_j$

Pour une induction de 1,39T correspond $q_{oj} = 1,3 \text{ VAR/kg}$

$$Q_j = 1,3 \times 184,21$$

$$\underline{Q_j = 239,47 \text{ VAR}}$$

- Pertes dans les coins : $Q_c = q_{oc} \cdot G_c$

Pour une induction de 1,5T, correspond $q_{oc} = 1,7 \text{ VAR/kg}$

$$Q_c = 1,7 \times 372,71$$

$$\underline{Q_c = 633,61 \text{ VAR}}$$

- Pertes dans les entrefers : $Q_s = q_{os} \cdot n_s \cdot S_s$

on choisit 6 entrefers, et on considère que l'induction magnétique circulant dans l'entrefer est la même que celle qui circule dans la colonne.

La valeur des pertes par unité de surface est estimée à $q_{os} = 0,95 q_{col} = 2,38 \text{ VAR/cm}^2$

$$Q_s = q_{os} \cdot n_s \cdot S_s = 2,38 \cdot 6 \cdot 324,73 ; \underline{Q_s = 4637,14 \text{ VAR}}$$

Puissance magnétisante totale $Q = Q_{col} + Q_j + Q_c + Q_s$

$$Q = (942,68 + 239,47 + 633,61 + 4637,14)$$

$$\underline{Q = 6452,9 \text{ VAR}}$$

Valeur du courant magnétisant : $I_{o\mu} = \frac{Q}{\sqrt{3} \cdot U_1}$

$$I_{o\mu} = \frac{6452,9}{\sqrt{3} \cdot 10^4}$$

$$\underline{I_{o\mu} = 0,37 A}$$

$$I_o = \sqrt{I_{oa}^2 + I_{o\mu}^2} = \sqrt{0,08^2 + 0,37^2}^{1/2}$$

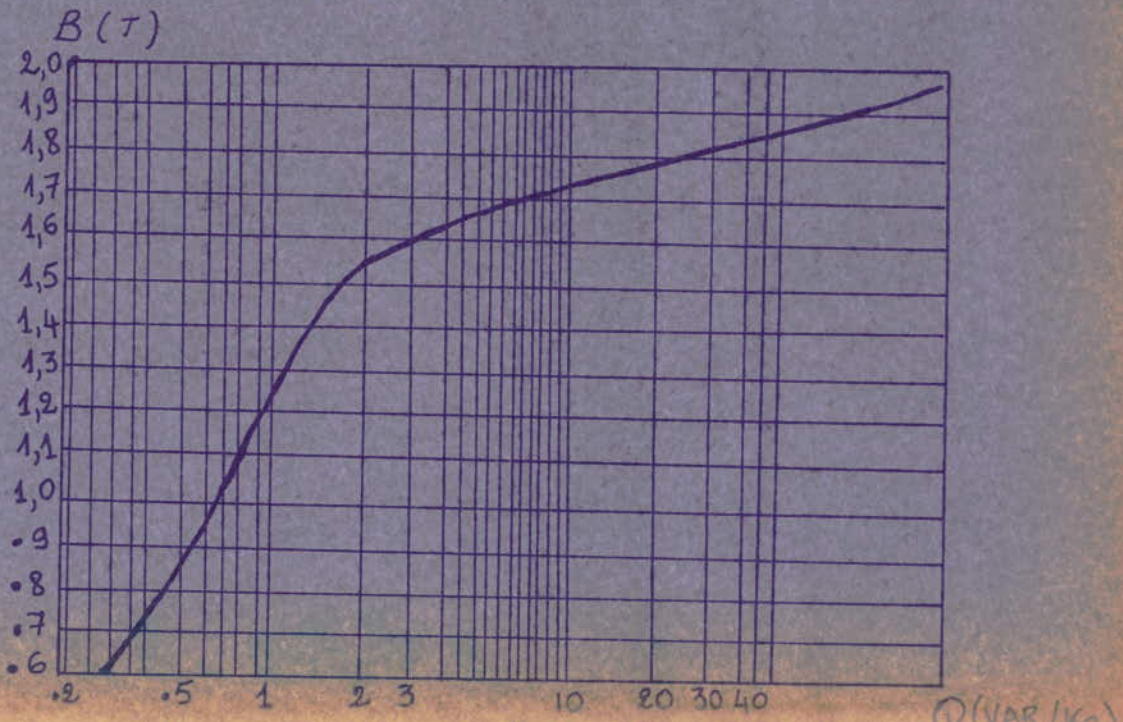
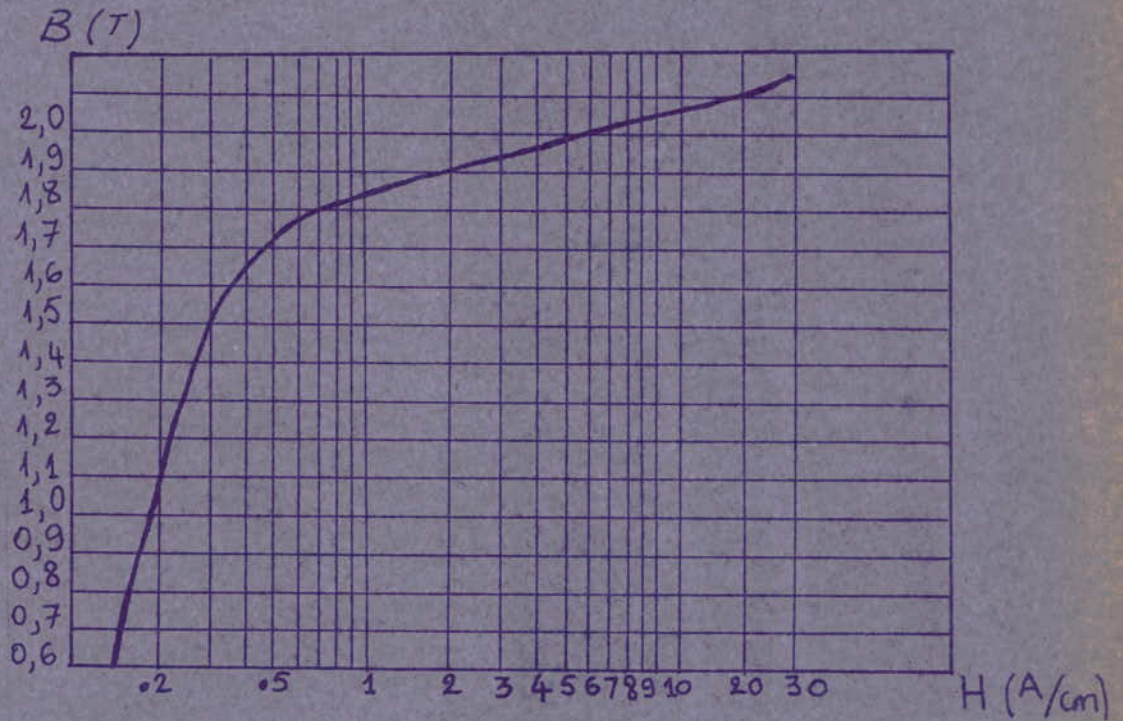
$$\underline{I_o = 0,378 A}$$

$$i_o = \frac{I_o}{I_n} \cdot 100 = \frac{0,378}{21} \cdot 100$$

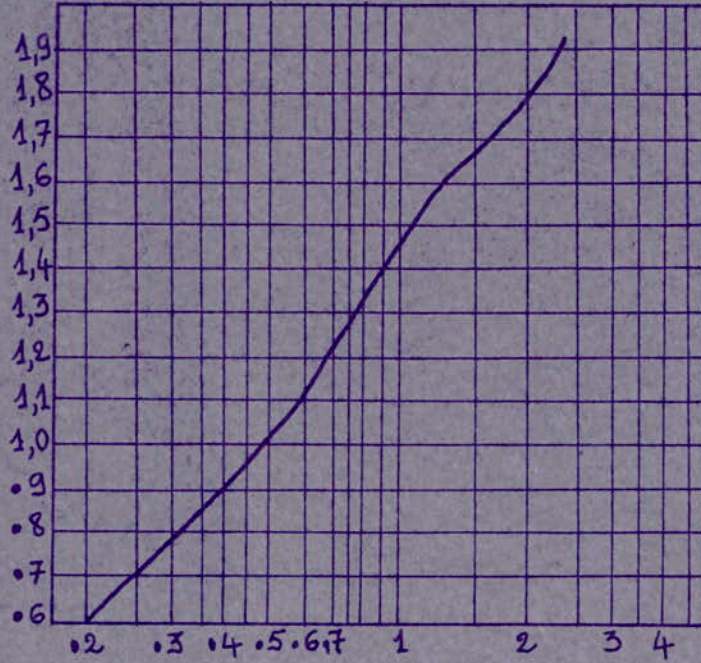
$$\underline{i_o = 1,80\%}$$

Courbe d'aimantation de l'acier
ARMCO M6

Sens du laminage : $\alpha = 0^\circ$



B (T)

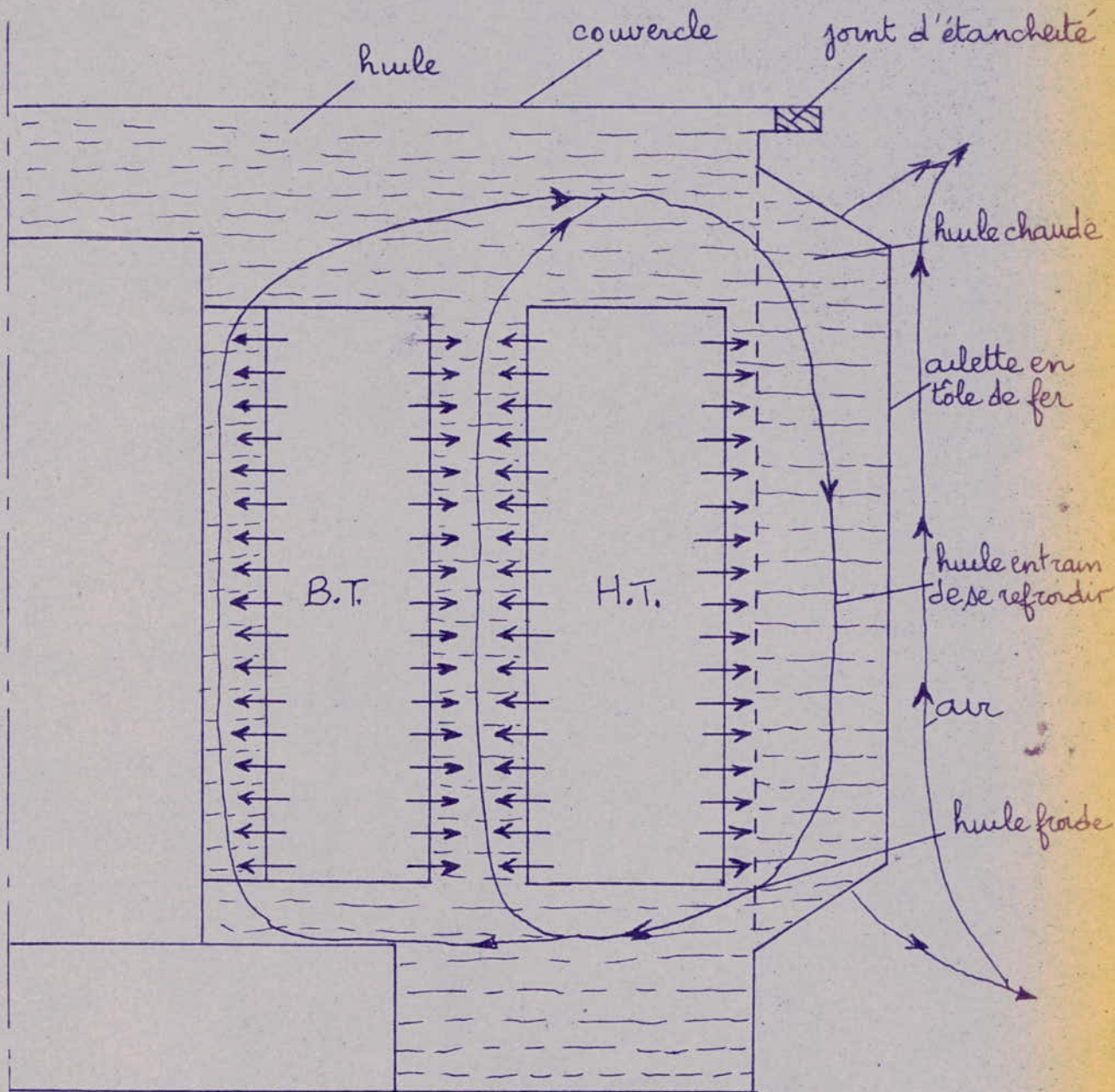


P (w/kg)

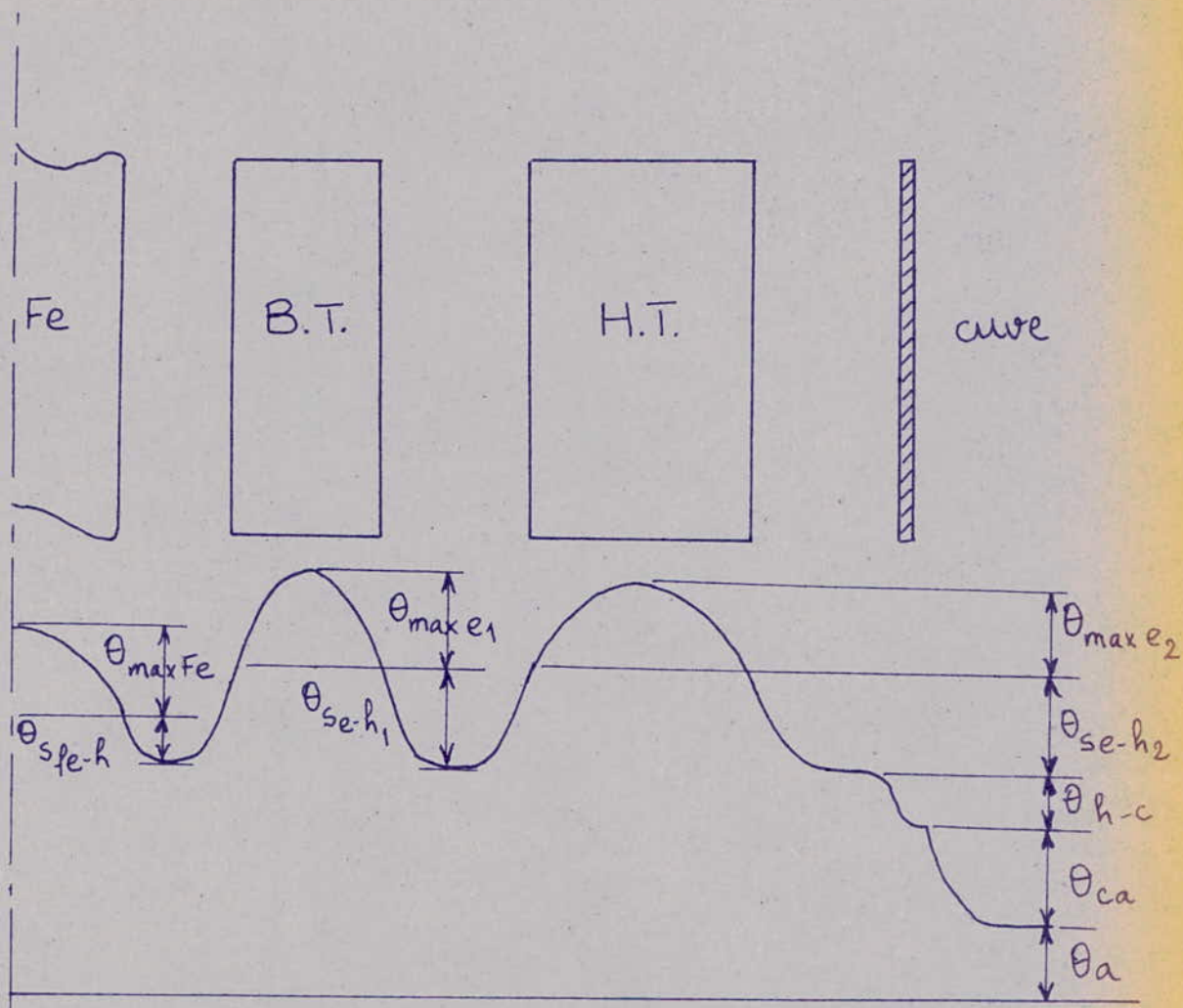
I6 - Calcul thermique

Le calcul thermique consiste en la vérification des échauffements lors du fonctionnement en pleine charge.

Schéma de principe des phénomènes thermiques



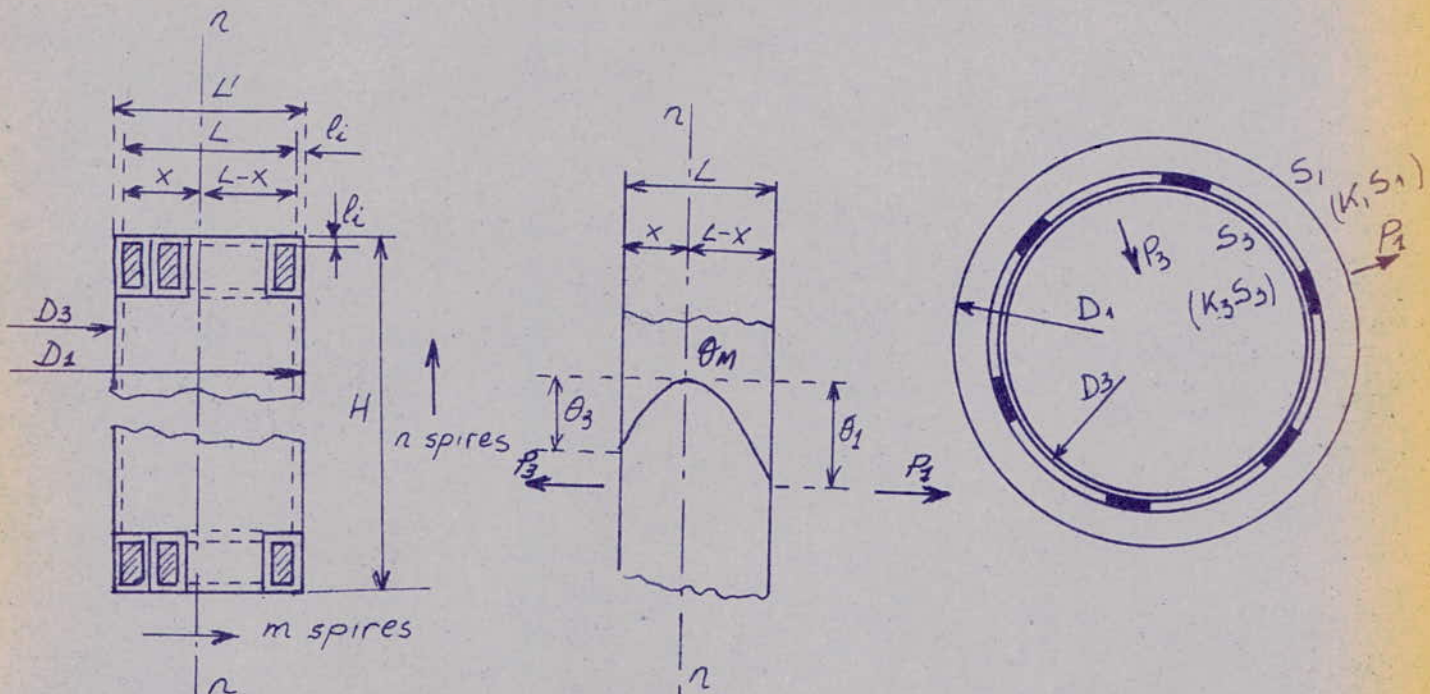
Différents échauffements dans les parties du transformateur :



- θ_a : température de l'air ambiant
- θ_{ca} : échauffement Cuve - air
- θ_{hc} : échauffement huile - Cuve
- θ_{se-h_2} : échauffement surface enroulement HT - huile
- $\theta_{max e_2}$: échauffement enroulement HT - surface
- $\theta_{s Fe-h}$: échauffement surface fer - huile
- $\theta_{max Fe}$: échauffement fer - surface
- θ_{se-h_1} : échauffement surface enroulement BT - huile
- $\theta_{max e_1}$: échauffement enroulement BT - surface

Dans ce qui suit, on doit calculer les différents échauffements à partir des données du transformateur

6-1 Échauffement moyen de l'enroulement BT par rapport à l'huile

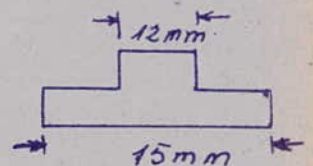


$$m = 4$$

$$n = 40$$

- Diamètre intérieur : $D_3 = D + 2a_{10} = (21,75 + 1) \text{ cm} = 22,75 \cdot 10^{-2} \text{ m}$
- Diamètre extérieur : $D_1 = D_3 + 2a_1 = (22,75 + 2 \cdot 2,136) \text{ cm} = 0,27 \text{ m}$
- épaisseur d'isolation : $l_i = 0,32 \cdot 10^{-3} \text{ m}$
 $L' = a_1 = 2,136 \cdot 10^{-2} \text{ m}$
- hauteur de la bobine = $H = 0,426 \text{ m}$

- On utilise 8 cônes axiaux de dimension :



Calcul des surfaces en contact avec l'huile

$$k_3 = \frac{\pi D_3 - n_{\text{cal}} l_{\text{cal}}}{\pi \cdot D_3} = \frac{\pi \cdot 227,5 - 8 \cdot 15}{\pi \cdot 227,5} = 0,83$$

$$S_3 = \pi \cdot D_3 \cdot H = \pi \cdot 0,2275 \cdot 0,426 = 0,30 \text{ m}^2$$

surface en contact direct avec l'huile
 $k_3 S_3 = 0,83 \times 0,30 = 0,25 \text{ m}^2$

$$k_1 = \frac{\pi D_1 - n_{\text{cal}} l_{\text{cal}}}{\pi D_1} = \frac{\pi \cdot 270 - 8 \cdot 12}{\pi \cdot 270} = 0,89$$

$S_1 = \pi D_1 H = 0,27 \cdot \pi \cdot 0,426 = 0,36 \text{ m}^2$
 surface en contact avec l'huile
 $k_1 S_1 = 0,89 \times 0,36 = 0,32 \text{ m}^2$

conductivité résultante de l'enroulement :

$$\lambda_{res} = \frac{\lambda_i L}{2l_i(m-2)} ; \lambda_i = 0,2 \text{ W m}^{-1}\text{°C}^{-1}$$

λ_i = conductivité thermique propre du papier

$$\lambda_{res} = \frac{0,2 \times 2,072}{0,64 \times 2 \cdot 10^{-3}} = 3,3 \text{ W m}^{-1}\text{°C}^{-1}$$

calcul des résistances thermiques de l'isolant périphérique

$$R_1 = \frac{l_i}{\lambda_i k_1 S_1} + \frac{1}{\alpha_h k_1 S_1}$$

$\alpha_h = 110 \text{ W m}^{-2}\text{°C}^{-1}$ = facteur de convection de l'huile

$$R_1 = \frac{0,32 \cdot 10^{-3}}{0,2 \cdot 0,32} + \frac{1}{110 \times 0,32} = 3,34 \cdot 10^{-2} \text{ W}^{-1}\text{°C}$$

$$R_3 = \frac{l_i}{\lambda_i k_3 S_3} + \frac{1}{\alpha_h k_3 S_3} = \frac{0,32 \cdot 10^{-3}}{0,2 \times 0,25} + \frac{1}{110 \times 0,25} = 4,27 \cdot 10^{-2} \text{ W}^{-1}\text{°C}$$

$$x = L \frac{R_1 S_1 + \frac{L}{2\lambda_{res}}}{R_1 S_1 + R_3 S_3 + \frac{L}{\lambda_{res}}} = 2,072 \cdot 10^{-2} \frac{3,34 \cdot 10^{-2} \times 0,36 + \frac{2,072 \cdot 10^{-2}}{2 \times 3,3}}{3,34 \cdot 10^{-2} \times 0,36 + 4,27 \cdot 10^{-2} \times 0,3 + \frac{2,072 \cdot 10^{-2}}{3,3}}$$

$$x = 1,02 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

$$L-x = (2,072 - 1,02) \cdot 10^{-2} \text{ m} = 1,052 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

$$i = \frac{P_1}{P_3} ; P_1 \text{ et } P_3 \text{ sont les flux thermiques passant à travers les surfaces } k_1 S_1 \text{ et } k_3 S_3$$

$$i = \frac{(L-x) S_1}{x S_3} = \frac{1,052 \cdot 10^{-2} \times 0,36}{1,02 \cdot 10^{-2} \times 0,3} = 1,24$$

$$P_1 = \frac{P_{cu}}{1 + \frac{1}{i}} = \frac{886,03}{1 + \frac{1}{1,24}} = 490,48 \text{ W}$$

$$P_3 = \frac{P_{cu}}{1 + i} = \frac{886,03}{1 + 1,24} = 395,55 \text{ W}$$

Calcul des résistances internes

$$R_{i1} = \frac{1}{2} \frac{L-x}{\lambda_{res} S_1} = \frac{1,052 \cdot 10^{-2}}{2 \times 3,3 \times 0,36} = 0,44 \cdot 10^{-2} \text{ W}^{-1}\text{°C}$$

$$R_{i3} = \frac{1}{2} \frac{x}{\lambda_{\text{cu}} S_3} = \frac{1,02 \cdot 10^{-2}}{2 \times 3,3 \times 0,3} = 0,52 \cdot 10^{-2} \text{ W}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}$$

Température maximale de l'encoulement :

$$\Theta_M = P_1 (R_1 + R_{i1}) = (3,34 + 0,44) \cdot 10^{-2} \cdot 490,48 = 18,54^\circ\text{C}$$

$$\Theta_M = P_3 (R_3 + R_{i3}) = (4,27 + 0,52) \cdot 10^{-2} \cdot 395,55 = 18,95^\circ\text{C}$$

Calcul de Θ_1 et Θ_3 .

$$\Theta_1 = R_{i1} \cdot P_1 = 490,48 \times 0,44 \cdot 10^{-2} = 2,16^\circ\text{C}$$

$$\Theta_3 = R_{i3} \cdot P_3 = 395,55 \times 0,52 \cdot 10^{-2} = 2,06^\circ\text{C}$$

$$\Theta_{\text{moy-h}_1} = \Theta_M - \frac{i\Theta_1 + \Theta_3}{3(i+1)} = 18,95 - \frac{2,16 \times 1,24 + 2,06}{3(1,24+1)}$$

$$\underline{\Theta_{\text{moy-h}_1} = 18,24^\circ\text{C}}$$

6-2 Échauffement moyen de l'encoulement HT par rapport à l'huile

L'encoulement HT est divisé en deux parties par un canal axial de refroidissement de 5 mm de largeur ; pour chaque partie de cet encoulement, on applique un même calcul thermique que celui appliqué pour la basse tension.

1^{er} partie de l'encoulement HT

$$D_3 = D + 2a_{10} + 2a_1 + 2a_{12} = 21,75 + 1 + 4,272 + 2,4 = 29,42 \text{ cm}$$

$$D_1 = D_3 + a_2 = 29,42 + 3,52 = 32,94 \text{ cm}$$

$$l_i = \frac{d' - 0,886d}{2} = \frac{2,42 - 0,886 \cdot 2,12}{2} = 0,27 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$L = 1,76 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

$$H = 42,6 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

$$k_3 = \frac{\pi D_3 - \eta_{\text{cal}} l_{\text{cal}}}{\pi D_3} = \frac{\pi \cdot 294,2 - 8 \times 12}{\pi \cdot 294,2} = 0,90$$

$$S_3 = \pi D_3 H = \pi \cdot 0,2942 \cdot 0,426 = 0,39 \text{ m}^2$$

$$k_3 S_3 = 0,39 \text{ m}^2 \cdot 0,9 = 0,35 \text{ m}^2$$

$$k_1 = \frac{\pi D_1 - n_{\text{cal}} l_{\text{cal}}}{329,4 \pi} = \frac{\pi \cdot 329,4 - 8 \times 15}{329,4 \pi} = 0,88$$

$$S_1 = \pi D_1 H = \pi \cdot 0,3294 \times 0,426 = 0,44 \text{ m}^2$$

$$k_1 S_1 = 0,44 \times 0,88 = 0,39 \text{ m}^2$$

$$\lambda_{\text{res}} = \lambda_i \frac{L}{2l_i(m-1) + (m-1)t}$$

$t = \text{épaisseur d'isolation d'intercouches} = 0,36 \text{ mm}$.

$$\lambda_{\text{res}} = 0,2 \frac{1,76 \cdot 10^{-2}}{0,54 \cdot 10^3 \times 4 + 4 \times 0,36 \cdot 10^{-3}} = 0,98 \text{ W m}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$R_1 = \frac{1}{k_1 S_1} \left(\frac{l_i + t}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_h} \right) = \frac{1}{0,39} \left(\frac{0,27 \cdot 10^{-3} + 0,36 \cdot 10^{-3}}{0,2} + \frac{1}{110} \right) =$$

$$R_1 = 3,14 \cdot 10^{-2} \text{ W}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$R_3 = \frac{1}{k_3 S_3} \left(\frac{l_i + t}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_h} \right) = \frac{1}{0,35} \left(\frac{0,27 \cdot 10^{-3} + 0,36 \cdot 10^{-3}}{0,2} + \frac{1}{110} \right) =$$

$$R_3 = 3,50 \cdot 10^{-2} \text{ W}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$x = L \frac{R_1 S_1 + \frac{L}{2\lambda_{\text{res}}}}{R_1 S_1 + R_3 S_3 + \frac{L}{\lambda_{\text{res}}}} = 1,76 \cdot 10^{-2} \frac{0,39 \times 3,14 \cdot 10^{-2} + \frac{1,76 \cdot 10^{-2}}{2 \times 0,98}}{0,39 \times 3,14 \cdot 10^{-2} + 0,39 \times 3,5 \cdot 10^{-2} + \frac{1,76 \cdot 10^{-2}}{0,98}}$$

$$x = 0,85 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

$$L - x = (1,76 - 0,85) 10^{-2} = 0,91 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

$$i = \frac{(L-x) S_1}{x S_3} = \frac{0,91 \cdot 10^{-2} \times 0,44}{0,85 \times 0,39 \cdot 10^{-2}} = 1,21$$

$$R_{i1} = \frac{1}{2} (L-x) \frac{1}{\lambda_{\text{res}} S_1} = \frac{0,91 \cdot 10^{-2}}{2 \times 0,98 \times 0,44} = 1,06 \cdot 10^{-2} \text{ W}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$R_{i3} = \frac{1}{2} x \frac{1}{\lambda_{\text{res}} S_3} = \frac{0,85 \cdot 10^{-2}}{2 \times 0,98 \times 0,39} = 1,11 \cdot 10^{-2} \text{ W}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$P_1 = \frac{P_{cu}}{1 + \frac{1}{i}} = \frac{605,76}{1 + \frac{1}{1,21}} = 331,66 \text{ W}$$

$$P_3 = \frac{P_{cu}}{1 + i} = \frac{605,76}{1 + 1,21} = 274,10 \text{ W}$$

Température maximale :

$$\Theta_m = P_1 (R_1 + R_{i1}) = 331,6 (1,06 + 3,14) \cdot 10^{-2} = 13,93^\circ\text{C}$$

$$\Theta_m = P_3 (R_3 + R_{i3}) = 274,10 (1,11 + 3,50) \cdot 10^{-2} = 12,64^\circ\text{C}$$

$$\Theta_1 = P_1 R_{i1} = 331,66 \times 1,06 \cdot 10^{-2} = 3,52^\circ\text{C}$$

$$\Theta_3 = P_3 R_{i3} = 274,10 \times 1,11 \cdot 10^{-2} = 3,04^\circ\text{C}$$

$$\Theta_{\text{moy-}h_2} = \Theta_m - \frac{i\Theta_1 + \Theta_3}{3(i+1)} = 13,93 - \frac{1,21 \times 3,52 + 3,04}{3(1,21+1)}$$

$$\underline{\Theta_{\text{moy-}h_2} = 12,83^\circ\text{C}}$$

2^or Partie de l'encoulement HT

$$D_3 = D + 2a_{10} + 2a_1 + 2a_{12} + a_2 = 32,94 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

$$D_1 = D_3 + a_2 + a_5 = (32,94 + 0,5 + 3,52) \text{ cm} = 36,96 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

$$li = \frac{d' - 0,886d}{2} = \frac{2,42 - 0,886 \times 2,12}{2} = 0,27 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$L = 1,76 \cdot 10^{-2} \text{ m} \quad ; \quad H = 42,6 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

$$S_3 = \pi \times 0,3294 \times 0,426 = 0,44 \text{ m}^2$$

$$k_3 = \frac{\pi \cdot 329,4 - 8 \times 18}{\pi \cdot 329,4} = 0,86$$

$$k_3 S_3 = 0,44 \times 0,86 = 0,38 \text{ m}^2$$

$$S_1 = 0,3696 \cdot \pi \cdot 0,426 = 0,49 \text{ m}^2$$

$$k_1 = 1 \quad ; \quad k_1 S_1 = 0,49 \text{ m}^2$$

$$\lambda_{\text{res}} = \lambda_i \frac{L}{2l_i(m-1) + t(m-1)} = 0,2 \frac{1,76 \cdot 10^{-2}}{0,54 \cdot 10^{-3} \times 5 + 0,36 \cdot 10^{-3} \times 5}$$

$$\lambda_{\text{res}} = 0,78 \text{ W m}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$R_1 = \frac{1}{k_1 S_1} \left(\frac{l_i + t}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_h} \right) = \frac{1}{0,49} \left(\frac{0,27 \cdot 10^{-3} + 0,36 \cdot 10^{-3}}{0,2} + \frac{1}{110} \right)$$

$$R_1 = 2,50 \cdot 10^{-2} \text{ W}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$R_3 = \frac{1}{k_3 S_3} \left(\frac{l_i + t}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_h} \right) = \frac{1}{0,38} \left(\frac{0,27 \cdot 10^{-3} + 0,36 \cdot 10^{-3}}{0,2} + \frac{1}{110} \right) = 3,22 \cdot 10^{-2} \text{ W}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$x = L \frac{R_1 S_1 + \frac{L}{2\lambda_{\text{res}}}}{R_1 S_1 + R_3 S_3 + \frac{L}{\lambda_{\text{res}}}} = 1,76 \cdot 10^{-2} \frac{2,5 \cdot 0,49 \cdot 10^{-2} + \frac{1,76 \cdot 10^{-2}}{2 \times 0,78}}{2,5 \cdot 0,49 \cdot 10^{-2} + 3,22 \times 0,44 \cdot 10^{-2} + \frac{1,76 \cdot 10^{-2}}{0,78}}$$

$$x = 0,85 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

$$L - x = (1,76 - 0,85) \cdot 10^{-2} = 0,91 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

$$i = \frac{(L-x) S_1}{x S_3} = \frac{0,91 \cdot 10^{-2} \times 0,49}{0,85 \times 0,44 \cdot 10^{-2}} = 1,19$$

$$R_{i1} = \frac{1}{2} (L-x) \frac{1}{\lambda_{\text{res}} S_1} = \frac{0,91 \cdot 10^{-2}}{2 \times 0,78 \times 0,49} = 1,19 \cdot 10^{-2} \text{ W}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$R_{i3} = \frac{1}{2} x \frac{1}{\lambda_{\text{res}} S_3} = \frac{0,85 \cdot 10^{-2}}{2 \times 0,78 \times 0,44 \cdot 10^{-2}} = 1,24 \cdot 10^{-2} \text{ W}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$P_1 = \frac{P_{\text{cu}}}{1 + \frac{1}{i}} = \frac{605,76}{1 + \frac{1}{1,19}} = 329,16 \text{ W}$$

$$P_3 = \frac{P_{\text{cu}}}{1 + i} = \frac{605,76}{1 + 1,19} = 276,6 \text{ W}$$

$$\theta_M = P_1 (R_1 + R_{i1}) = 329,16 (1,19 + 2,5) \cdot 10^{-2} = 12,15 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\theta_n = P_3 (R_3 + R_{i3}) = 276,6 (1,24 + 3,22) \cdot 10^{-2} = 12,34 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\theta_1 = P_1 R_{i1} = 329,16 \times 1,19 \cdot 10^{-2} = 3,92 \text{ } ^\circ\text{C}$$

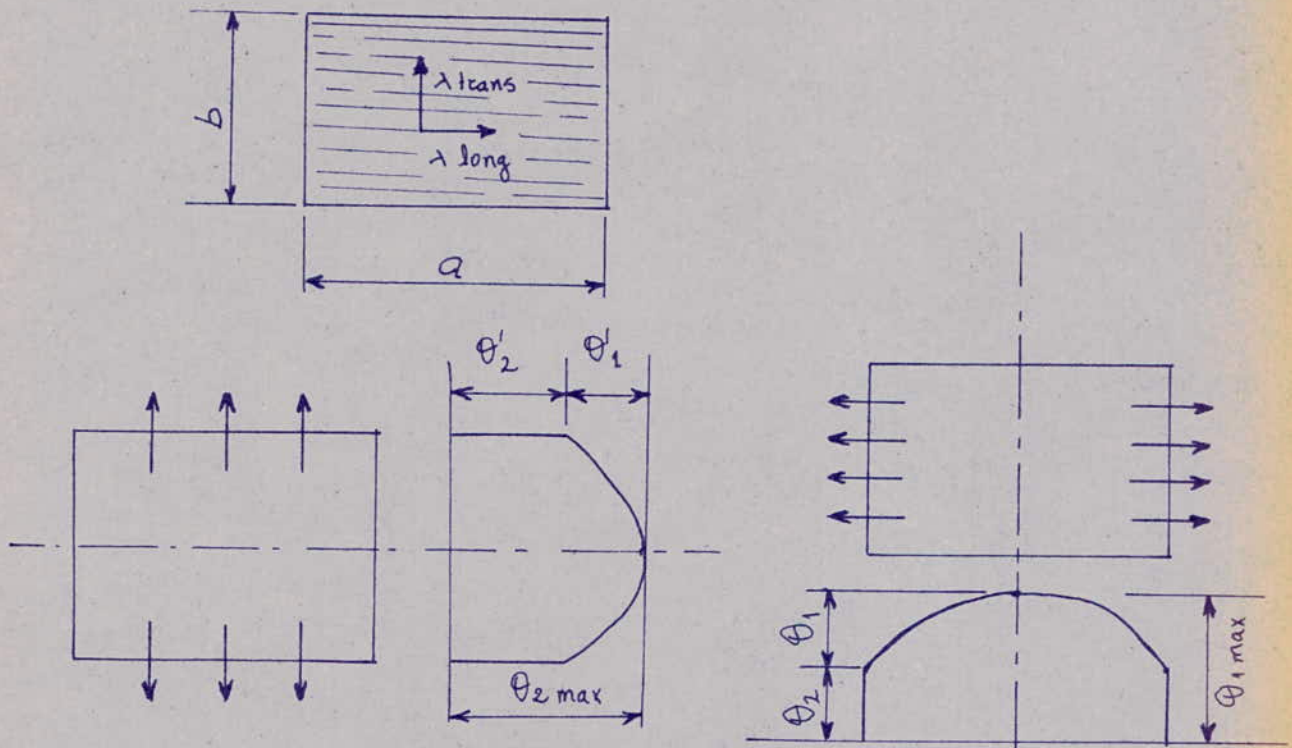
$$\theta_3 = P_3 R_{i3} = 276,6 \times 1,24 \cdot 10^{-2} = 3,43 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\theta_{\text{moy-h}_2} = \theta_m - \frac{i\theta_1 + \theta_3}{3(i+1)} = 12,34 - \frac{1,19 \times 3,92 + 3,43}{3(1,19+1)}$$

$$\theta_{\text{moy-h}_2} = 11,11^\circ\text{C}$$

6-3 - Échauffement du circuit magnétique

Le calcul d'échauffement du circuit magnétique est simplifié en faisant l'équivalence de la section de la colonne par un rectangle inscrit dans le même cercle de la colonne



λ_l : coefficient de transmission longitudinale

λ_t : coefficient de transmission transversale

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

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

La section de la colonne est assimilée à un rectangle de dimensions :

$$a = 0,9 \cdot D = 0,9 \times 21,75 = 19,58 \text{ cm}$$

$$b = \frac{S_{\text{col}}}{a} = \frac{324,73}{19,58} = 16,58 \text{ cm}$$

Pertes spécifiques par unité de volume :

$$P = P_{\text{sp}} \cdot \gamma = 1,3 \text{ W/kg} \cdot 7,65 \text{ Kg/dm}^3 \cdot 10^3 = 9,95 \cdot 10^3 \text{ W/m}^3$$

Valeurs des différents échauffements :

$$\theta_1 = \frac{P a^2}{8 \lambda l} = \frac{9,95 \cdot 10^3 \times 0,1958^2}{8 \times 20} = 2,38^\circ\text{C}$$

$$\theta_2 = \frac{P \cdot a}{2 \alpha_{\text{con}}} = \frac{9,95 \cdot 10^3 \times 0,1958}{2 \times 110} = 8,86^\circ\text{C}$$

$$\theta'_1 = \frac{P b^2}{8 \lambda t} = \frac{9,95 \cdot 10^3 \times 0,1658^2}{3 \times 8} = 11,40^\circ\text{C}$$

$$\theta'_2 = \frac{P b}{2 \alpha_{\text{con}}} = \frac{9,95 \cdot 10^3 \times 0,1658}{2 \times 110} = 7,50^\circ\text{C}$$

$$\theta_{1, \text{max}} = \theta_1 + \theta_2 = 2,38 + 8,86 = 11,24^\circ\text{C}$$

$$\theta_{2, \text{max}} = \theta'_1 + \theta'_2 = 11,40 + 7,50 = 18,90^\circ\text{C}$$

L'échauffement résultant du circuit magnétique :

$$\theta_{\text{max. CM \grave{a} h}} = \theta_{\text{max}} \frac{\theta'_2 + 1,5 \theta'_1}{\theta_{2, \text{max}} + \theta'_2 + 1,5 \theta'_1} = 18,9 \frac{7,5 + 1,5 \times 11,4}{18,9 + 7,5 + 1,5 \times 11,4}$$

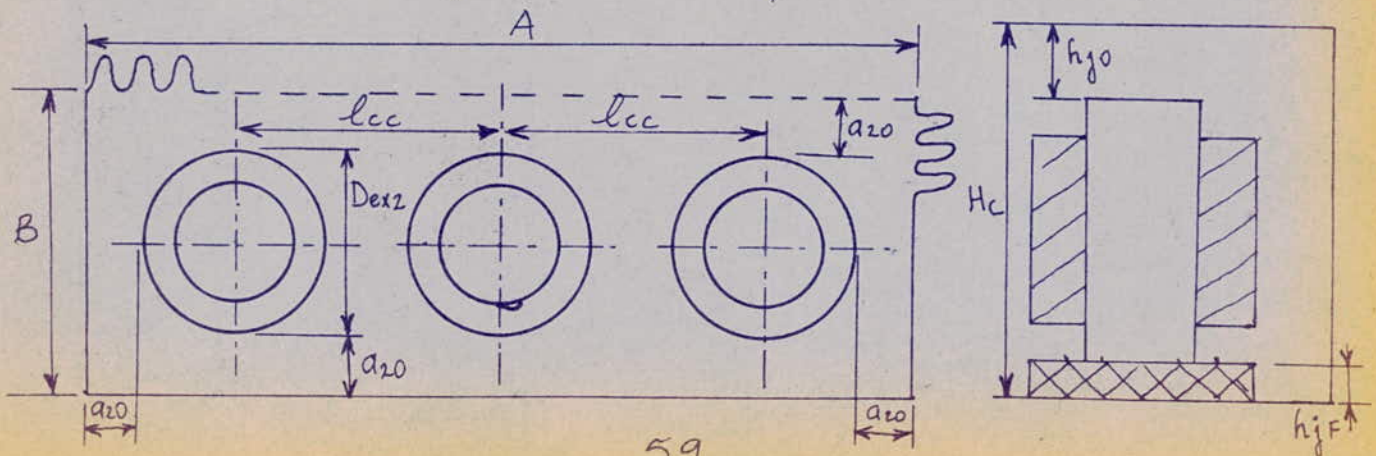
$$\theta_{\text{max. CM \grave{a} h}} = 10,69^\circ\text{C}$$

Cette valeur d'échauffement trouvée a seulement un caractère indicatif ; elle indique que le circuit magnétique n'est pas chauffé d'une façon excessive.

6.4 - Échauffement de l'huile

6.4.1 - Dimension de la cuve

La cuve a une section rectangulaire avec des parois en tôles ondulées afin de permettre le refroidissement de l'huile



Les différentes dimensions de la cuve dépendent de la tension nominale et de la puissance

Pour $U_n = 10 \text{ KV}$ et $S_n = 630 \text{ KVA}$ on a :

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

$$D_{i2} = (21,75 + 1 + 4,27 + 2,4) \text{ cm}$$

$$D_{ex2} = D_{i2} + 2a_2 = (29,42 + 7,04) \text{ cm}$$

$$h_m = h_F + 2h_j = (50,6 + 2 \times 17,89) \text{ cm}$$

$$A = 2l_{cc} + D_{ex2} + 2a_{20} = (2 \times 37,86 + 36,46 + 2 \times 6,5) \text{ cm}$$

$$A = 125 \text{ cm}$$

$$B = D_{ex2} + 2a_{20} = (36,46 + 2 \times 6,5) =$$

$$B = 50 \text{ cm}$$

$$H_c = h_m + h_{j0} + h_{jF} = (86,38 + 20 + 4) \text{ cm} =$$

$$H_c = 111 \text{ cm}$$

Les épaisseurs des tôles d'acier utilisées pour la construction de la cuve dépendent de la puissance nominale

Pour une puissance de 630 KVA on a :

épaisseur du fond $\Delta f_{mm} = 6$

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

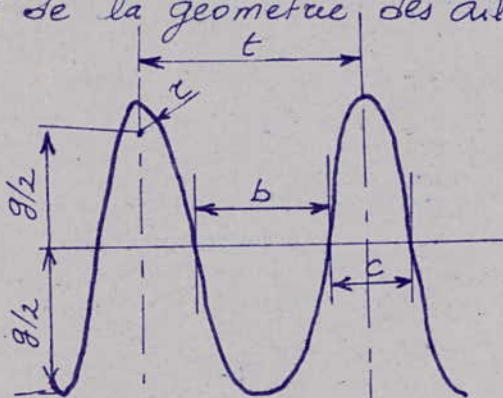
épaisseur du couvercle $\Delta c_{mm} = 8$

$$\Delta c = 8 \text{ mm}$$

épaisseur des parois latérales $\Delta p_{mm} = 1,5$

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

Definition de la géométrie des ailettes de refroidissement :



$$t = 50 \text{ mm}$$

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

$$b = 37 \text{ mm}$$

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

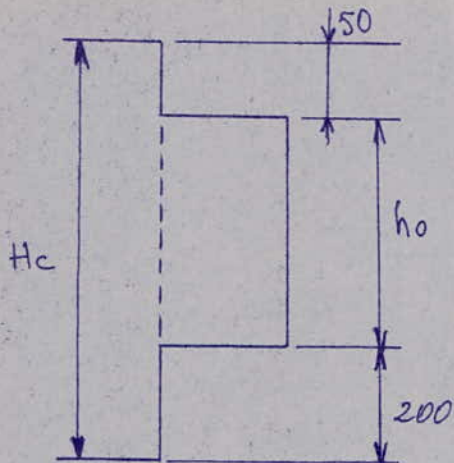
$$z = 5 \text{ mm}$$

Le périmètre d'une ondule : $P_{ond} \approx b + 2g + \pi z$

$$= 37 + 2 \times 200 + \pi \times 5$$

$$P_{on} = 452,7 \text{ mm}$$

hauteur des ondules :



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

$$h_o = 1110 - 250$$

$$h_o = 860 \text{ mm}$$

Détermination du nombre d'ondules sur les parois

- Nombre d'ondules sur la longueur A

$$n_1 + 1 = \frac{A}{t} = \frac{1250}{50} = 25$$

$$n_1 = 24$$

- Nombre d'ondules sur la largeur B

$$n_2 + 1 = \frac{B}{t} = \frac{500}{50} = 10$$

$$n_2 = 9$$

Dimension de la cuve en tenant compte des ondules.

La cuve peut être inscrite dans un rectangle de dimension :

$$A' = A + 2g + r = 125 + 40 + 0,5 = 165,5 \text{ cm}$$

$$B' = B + 2g + r = 50 + 40 + 0,5 = 90,5 \text{ cm}$$

6-4-2 Échauffement de l'huile par rapport à la cuve :

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

$$\theta_{hc} = 0,165 \left(\frac{1,05 (P_o + P_r)}{S_c} \right)^{0,6}$$

S_c = surface de contact avec l'huile

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

$$S_{co} = \text{surface des ondules} = n_0 \cdot p_{on} \cdot h_0 = 2(24+9)0,4527 \cdot 0,86$$

$$S_{co} = 25,7 \text{ m}^2$$

$S_{cc} = \text{surface du couvercle}$

$$S_{cc} = A \cdot B = 1,25 \times 0,5 =$$

$$S_{cc} = 0,625 \text{ m}^2$$

Donc , $S_c = 25,7 + 0,625 =$

$$S_c = 26,325 \text{ m}^2$$

finalement , $\theta_{hc} = 0,165 \left[\frac{1,05 (1376 + 6795)}{26,325} \right]^{0,6}$

$$\theta_{hc} = 5,31^\circ\text{C}$$

6.4.3 Échauffement de la cuve par rapport à l'air :
La cuve transmet la chaleur à l'air environnant par convection et par radiation.

L'échauffement la cuve par rapport à l'air est donné par la relation

$$\theta_{c-a} = \left[\frac{1,05 (P_o + P_r)}{2,8 S_r + 2,5 S_c} \right]^{0,8}$$

$S_r = \text{surface radiante de la cuve en m}^2$

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

$$= 2(1,66 + 0,91)0,86 + 0,625$$

$$S_r = 5,05 \text{ m}^2$$

$$\theta_{c-a} = \left[\frac{1,05 (1376 + 6795)}{2,8 \times 5,05 + 2,5 \times 26,325} \right]^{0,8}$$

$$\theta_{c-a} = 42,12^\circ\text{C}$$

- La température des bobinages B.T est :

$$t_{e1} = \theta_{eh1} + \theta_{hc} + \theta_{ca} + t_a$$

$$t_{e1} = 18,24 + 5,31 + 42,12 + 40 = t_{e1} = 105,67^\circ\text{C}$$

Cette température dépasse légèrement la température imposée par les normes ($t_n = 105^\circ\text{C}$) ; mais la différence reste très petite, elle peut être acceptable.

- La température des bobinages HT est :

$$t_{e2} = \theta_{eh2} + \theta_{hc} + \theta_{ca} + t_a$$

Pour θ_{eh2} , on considère la valeur de la partie de l'enroulement dont l'échauffement est élevé

$$t_{e2} = 12,83 + 5,31 + 42,12 + 40 = t_{e2} = 100,26^\circ\text{C}$$

Cette température est acceptable car elle est inférieure à la température imposée par les normes ($t_n = 105^\circ\text{C}$)

- La température du circuit magnétique sera :

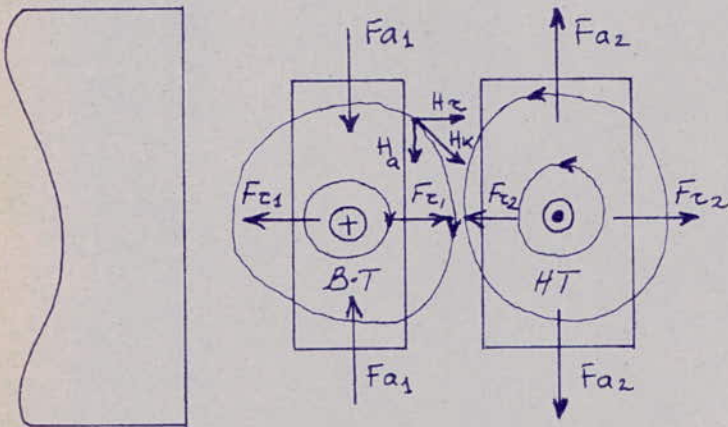
$$t_{cm} = \theta_{cmh} + \theta_{hc} + \theta_{ca} + t_a$$

$$t_{cm} = 10,69 + 5,31 + 42,12 + 40 = t_{cm} = 98,12^\circ\text{C}$$

Cette température est acceptable pour les tôles.

I.7 Calcul mécanique :

7.1 Efforts mécaniques pendant un court-circuit brusque :
 Les forces électrodynamiques qui apparaissent lors d'un court-circuit peuvent atteindre des valeurs considérables.
 Les forces de court-circuit peuvent être classées d'après leur direction d'action en forces radiales et forces axiales.



Le champ de fuite se décompose en deux composantes :

- H_{rz} : composante radiale
- H_{ka} : composante axiale

La composante radiale crée une force axiale et la composante axiale une force radiale

Dans cette partie, on vérifie que les efforts électrodynamiques lors d'un court-circuit sont inférieurs aux efforts admissibles, pour cela on considère le cas du court-circuit triphasé symétrique qui est le plus défavorable des court-circuits

Si on suppose que la puissance du réseau qui alimente le transformateur est infinie, la valeur maximale du courant de court-circuit triphasé symétrique est donnée par la relation suivante :

$$I_{kmax} = \sqrt{2} \cdot K_m \cdot I_{rdin}$$

- K_m : coefficient de crête donné par :

$$K_m = 1 + e^{-\pi \frac{U_{ka}}{U_{kr}}} = 1 + e^{-\pi \frac{1,03}{3,88}} = 1,434$$

- I_{rdin} = courant stationnaire de court-circuit :

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

Courant stationnaire de court-circuit dans l'enroulement BT

$$I_{Kdin1} = 909,3 \cdot \frac{100}{4,01} = 22675,81 \text{ A}$$

Courant stationnaire de court-circuit dans l'enroulement HT

$$I_{Kdin2} = 21 \cdot \frac{100}{4,01} = 523,7 \text{ A}$$

Valeur numérique maximale du courant de court-circuit dans l'enroulement B.T

$$\hat{I}_{Kmax1} = \sqrt{2} \times 1,434 \times 22675,81 = 45986,14 \text{ A}$$

Valeur numérique maximale du courant de court-circuit dans l'enroulement H.T

$$\hat{I}_{Kmax2} = \sqrt{2} \times 1,434 \times 523,7 = 1062 \text{ A}$$

Calcul des forces radiales :

Les forces radiales sont données par :

$$F_r = \frac{6,4 (W \cdot \hat{I}_{Kmax})^2 l_{moy} \cdot K_R \cdot 10^{-8}}{h_B} \quad [\text{kgf}]$$

K_R : coefficient de Rogowski

l_{moy} : longueur moyenne de la spire = L_w

W : nombre de spire

h_B : hauteur de la bobine

La force radiale dans l'enroulement B.T :

$$F_{r1} = 6,4 \frac{(20 \times 45986,14)^2 \cdot 0,78 \times 0,97 \cdot 10^{-8}}{0,426}$$

$$F_{r1} = 9,61 \cdot 10^4 \text{ kgf}$$

La force radiale dans l'enroulement H.T

$$F_{r2} = 6,4 \frac{(866 \times 1062)^2 \cdot 1,03 \times 0,97 \cdot 10^{-8}}{0,426}$$

$$F_{r2} = 1,26 \cdot 10^5 \text{ kgf}$$

Calcul des forces axiales :

$$F_a = F_z \cdot \frac{a_z}{2h_B} \quad ; \quad a_z = \text{largeur du canal de fuite}$$

La force axiale dans l'enroulement B.T :

$$F_{a1} = F_{c1} \frac{a_z}{2h_B} = 9,61 \cdot 10^4 \frac{3,09}{2 \times 42,6} =$$

$$F_{a1} = 34,85 \cdot 10^2 \text{ kgf}$$

La force axiale dans l'enroulement H.T :

$$F_{a2} = F_{c2} \frac{a_z}{2h_B} = 1,26 \cdot 10^5 \frac{3,09}{2 \times 42,6} =$$

$$F_{a2} = 4,57 \cdot 10^3 \text{ kgf}$$

Calcul d'efforts radiaux

- Effort unitaire produit dans l'enroulement BT :

$$\sigma_{r1} = \frac{F_{c1} \cdot 10^2}{2\pi \cdot \eta_{el} \cdot W_1 \cdot S_{w1}} = \frac{9,61 \cdot 10^4 \cdot 10^2}{2\pi \cdot 8 \cdot 20 \cdot 39,5}$$

- Effort unitaire produit dans l'enroulement H.T :

$$\sigma_{r2} = \frac{F_{c2} \cdot 10^2}{2\pi \cdot S_{w2} \cdot W_2 \cdot \eta_{el}} = \frac{1,26 \cdot 10^5 \cdot 10^2}{2\pi \cdot 2 \cdot 866 \cdot 3,598}$$

$$\sigma_{r2} = 321,8 \text{ kgf/cm}^2$$

Ces efforts calculés sont admissibles pour le cuivre, car celui-ci présente un effort admissible $\sigma_{ad} = 700 \text{ kgf/cm}^2$

- Efforts unitaires dus aux forces axiales dans les enroulements B.T et H.T nous ont respectivement pour valeurs :

$$\sigma_{a1} = \frac{F_{a1}}{S_1} = \frac{F_{a1}}{\pi \cdot D_{m1} \cdot a_1} = \frac{34,85 \cdot 10^2}{\pi \cdot 24,89 \cdot 2,136}$$

$$\sigma_{a1} = 20,87 \text{ kgf/cm}^2$$

$$\sigma_{a2} = \frac{F_{a2}}{S_2} = \frac{F_{a2}}{\pi \cdot D_{moy} \cdot a_2} = \frac{4,57 \cdot 10^3}{\pi \cdot 32,94 \cdot 3,52}$$

$$\sigma_{a2} = 12,54 \text{ kgf/cm}^2$$

G_{a1} et G_{a2} sont inférieurs à G_{ad} , donc les enroulements ont une bonne tenue aux efforts électrodynamiques lors d'un court-circuit.

Pour pouvoir faire le calcul mécanique de la cuve, on détermine les différents volumes et poids suivants :

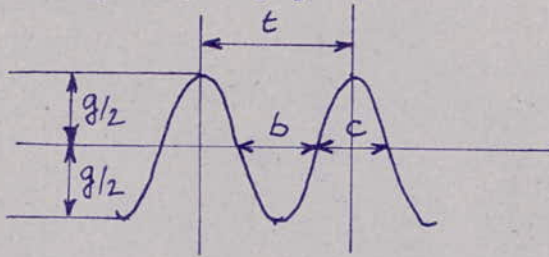
- Volume occupé par les enroulements BT : $V_1 = l_{t1} \cdot S_{W1} \cdot 10^3 \cdot 3$
 $V_1 = 15,64 \times 8 \times 39,5 \times 3 \cdot 10^3$; $V_1 = 14,83 \text{ dm}^3$
- Volume occupé par les enroulements HT : $V_2 = l_{t2} \cdot S_{W2} \cdot 10^3 \cdot 3$
 $V_2 = 932,54 \times 7,196 \times 3 \cdot 10^3$; $V_2 = 20,13 \text{ dm}^3$
- Volume occupé par les colonnes : $V_{col} = 3 S_{col} \cdot h_{col}$
 $V_{col} = 3 \times 324,73 \times 50,6$; $V_{col} = 49,30 \text{ dm}^3$
- Volume occupé par les culasses : $V_j = 2 S_j (3D + 2l_f)$
 $V_j = 2 \times 573,44 (3 \times 21,75 + 2 \times 16,11)$; $V_j = 12,8 \text{ dm}^3$
- Volume occupé par le cuivre : $V_{cu} = V_1 + V_2$
 $V_{cu} = 14,83 + 20,13$; $V_{cu} = 34,96 \text{ dm}^3$
- Volume occupé par le circuit magnétique : $V_{CM} = V_{col} + V_j$
 $V_{CM} = 49,30 + 12,80$; $V_{CM} = 122,10 \text{ dm}^3$
- Volume de la masse decuvable :
 On estime le volume du matériel de serrage à 20% du volume du cuivre et du circuit magnétique.
 $V_{decu} = 1,20 (V_{CM} + V_{cu}) = 1,20 (122,10 + 34,96)$

$$V_{decu} = 188,47 \text{ dm}^3$$

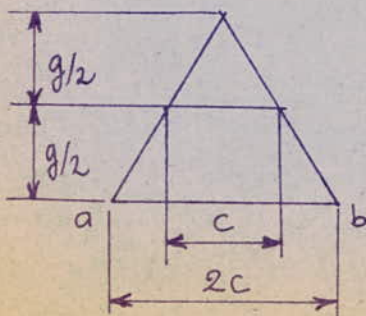
- Volume de la cuve : $V_{cu} = A \cdot B \cdot H_c$
 $V_{cu} = 125 \cdot 50 \cdot 111$

$$V_{cu} = 693,75 \text{ dm}^3$$

- Volume des ondules :



On assimile la surface de base de l'ondule à un triangle :



par homothétie, on déduit

$$ab = 2c$$

Surface d'une onde : $S_{ond} = \frac{g \times 2c}{2} = g \cdot c = (200 \cdot 10) \text{ mm}^2 = 200 \text{ cm}^2$

- Volume d'une onde $V_{ond_1} = 20 \times 86 \text{ cm}^3$ $V_{ond_1} = 1,72 \text{ dm}^3$

- Volume Total des ondules :
 $V_{ond} = 2(n_1 + n_2) V_{ond_1} = 2(24 + 9) 1,72$; $V_{ond} = 113,52 \text{ dm}^3$

- Volume Total de la cuve :
 $V_{cut} = V_{cu} + V_{ond} = 693,75 + 113,52$ $V_{cut} = 807,27 \text{ dm}^3$

- Volume de l'huile :
 $V_h = V_{cut} - V_{decu} = 807,27 - 188,47$ $V_h = 618,8 \text{ dm}^3$

- Poids de l'huile
 $P_h = \delta_h \cdot V_h$; $\delta_h = 0,9 \text{ Kgf/dm}^3$
 $P_h = 0,9 \cdot 618,8$ $P_h = 557 \text{ Kgf}$

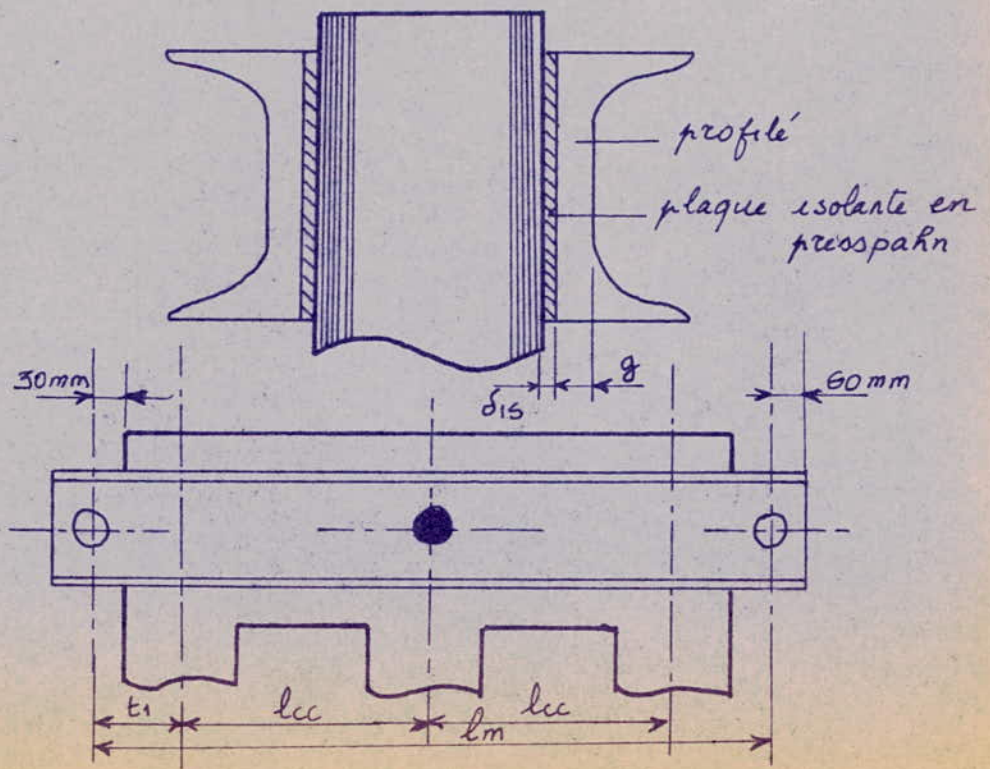
- Poids du circuit magnétique
 $G_{cm} = \delta_{fer} \cdot V_{cm} =$; $\delta_{fer} = 7,65 \text{ Kgf/dm}^3$
 $G_{cm} = 7,65 \cdot 122,10$ $G_{cm} = 934 \text{ Kgf}$

- Poids du cuivre
 $G_{cu} = \delta_{cu} \cdot V_{cu}$; $\delta_{cu} = 8,9 \text{ Kgf/dm}^3$
 $G_{cu} = 8,9 \times 34,96$ $G_{cu} = 311,2 \text{ Kgf}$

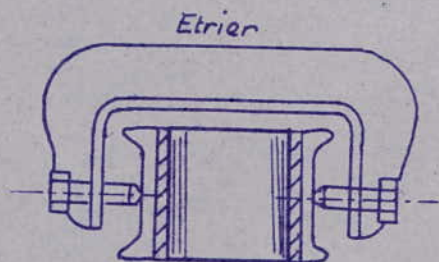
7.2 Calcul mécanique des parties constructives :

7.2.1 Poutres et boulons de serrage des culasses :

Les culasses sont serrées par deux profilés U comme le montre la figure ci-dessous :



Le serrage se fait à l'aide de deux boulons situés aux extrémités du profilé et un étrier au centre du profilé ; les deux boulons ne traversent pas le culot magnétique.



La pression exercée par les boulons et l'étrier se transmet aux profilés, lesquels assurent une répartition de la force de serrage le long des tôles de la culasse

La force totale de serrage est donnée par la formule suivante :

$$P = p \cdot h_j \cdot l_m$$

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

Cette pression est variable entre les limites 2-6 kgf/cm^2 dans notre cas on choisit $p = 2 \text{ kgf/cm}^2$

h_j : hauteur des tôles de la culasse

l_m : longueur de la culasse

finalement $P = 2 \times 17,89 \times 97,47$

$$P = 3487,5 \text{ kgf}$$

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

$$M_{\max} = \frac{p \cdot h_j (l_{cc} + t_1)^2}{8}$$

avec $t_1 = \frac{D}{2} + 3 \text{ cm} = \left(\frac{21,75}{2} + 3 \right) = 13,88 \text{ cm}$

$$M_{\max} = \frac{2 \times 17,89 (37,86 + 13,88)^2}{8}$$

$$M_{\max} = 11,98 \cdot 10^3 \text{ kgf cm}$$

Modale de résistance du profilé en U sur l'axe y

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

σ_a : effort unitaire admissible

Pour un acier de nuance A33 avec une charge minimale de rupture de 3300 kgf/cm^2 : $\sigma_a = 1200 \text{ kgf/cm}^2$

Le module de résistance aura pour valeur :

$$W_y = \frac{11,98 \cdot 10^3}{1,2 \cdot 10^3}$$

$$W_y = 9,98 \text{ cm}^3$$

On choisit un profilé dont le moment de résistance est légèrement supérieur à celui qui est calculé.

Le profilé choisi sera UPN 140 (NFA 45-202 et 45-210)

La longueur de la poutre est : $l_p = 2(l_{cc} + t_1 + 6)$

$$l_p = 2(37,86 + 13,88 + 6)$$

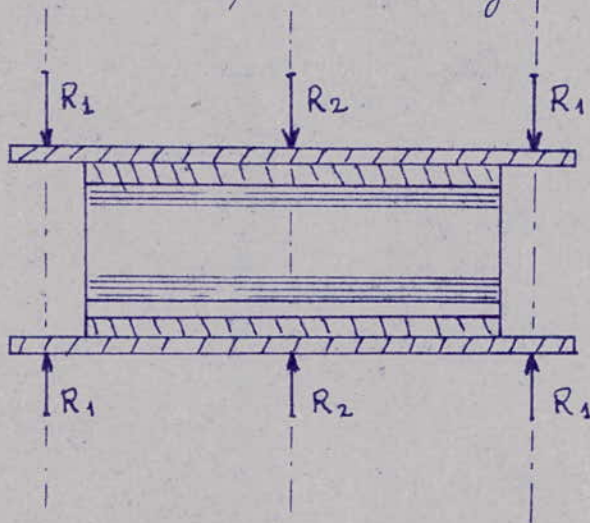
$$l_p = 115,48 \text{ cm}$$

7.2.2 Boulons de serrage et étrier

Les forces qui s'exercent sur les boulons et étriers sont :

- les forces de réaction des tôles serrées
- le poids de la partie décuivable

Modèle de calcul des forces de serrage :



$$R_1 = \frac{3}{16} P = \frac{3}{16} (3487,5)$$

$$R_1 = 653,91 \text{ kgf}$$

$$R_2 = \frac{5}{8} P = \frac{5}{8} (3487,5)$$

$$R_2 = 2179,69 \text{ kgf}$$

On remarque que l'étrier placé au milieu est le plus sollicité.

Si les deux boulons sont réalisés en acier A48 avec une résistance minimale de rupture de 4800 kgf/cm^2 et une contrainte admissible $\sigma_{at} = 1000 \text{ kgf/cm}^2$, le diamètre du boulon sera :

$$d_1 = \sqrt{\frac{4R_1}{\pi \sigma_{at}}} = \sqrt{\frac{4 \times 653,91}{\pi \cdot 1000}} = 0,91 \text{ cm}$$

7.2.3 Les Tirants

La partie décurable est attachée au couvercle par quatre Tirants

Chaque Tirant supporte le quart du poids de la partie décurable

Poids de la partie décurable : $G_{\text{decu}} = G_{\text{cu}} + G_{\text{c.m}} + G_{\text{poutres}}$

avec $G_{\text{poutres}} = 4 \text{ poutres} \cdot G_{\text{unitaire}} = 4 \cdot 16 \cdot 1,155 = 73,92 \text{ Kgff}$

$$G_{\text{decu}} = 934 + 311,2 + 73,92 = 1319,12 \text{ Kgff.}$$

Le diamètre du Tirant est donné par

$$d_{\text{tir}} = \left(\frac{4 G_{\text{decu}}}{4\pi \cdot \sigma_{\text{at}}} \right)^{1/2}$$

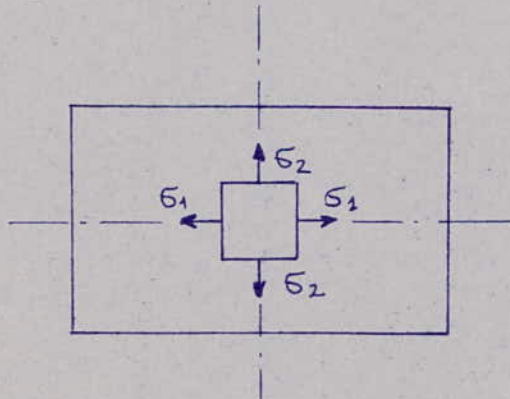
Si le tirant est réalisé en acier A48, sa contrainte admissible est de $\sigma_{\text{at}} = 1000 \text{ Kgff/cm}^2$

$$d_{\text{tirant}} = \left(\frac{4 \times 1319,12}{4\pi \cdot 1000} \right)^{1/2} = 0,42 \text{ cm}$$

On choisit des Tirants de diamètre = 5 mm.

7.2.4 Calcul mécanique de la cuve :

La partie la plus sollicitée de la cuve est le fond de la cuve



La pression due au poids de l'huile, au poids de la partie décurable et au poids propre du fond de la cuve sera considérée uniforme sur toute la surface du fond.

Calcul de la flèche au milieu du fond de la cuve :

- surface du fond de la cuve : $S = A \cdot B = 125 \times 50 = 6250 \text{ cm}^2$
- l'épaisseur du fond de la cuve réalisé en acier A33 à pour valeur :

Poids propre du fond de la cuve

$$- G_f = \delta_{\text{fer}} \cdot S \cdot \Delta f = 7,65 \cdot 6250 \cdot 0,6 \cdot 10^{-3} = 28,69 \text{ Kgf}$$

Force exercée sur le fond de la cuve

$$- G_t = G_{\text{deu}} + G_h + G_f = 1319,12 + 557 + 28,69 = 1904,81 \text{ Kgf}$$

Pression exercée sur le fond de la cuve

$$P_f = \frac{G_t}{S} = \frac{1904,81}{6250} = 0,30 \text{ Kgf/cm}^2$$

La flèche au milieu du fond de la cuve est donnée par :

$$f_1 = \alpha \frac{P_f \cdot B^4}{E (\Delta f)^3}$$

$$- E = 2,1 \cdot 10^6 \text{ Kgf/cm}^2 = \text{module de young}$$

$$- \alpha : \text{est fonction de } A/B ; \text{ pour } A/B = \frac{1250}{500} = 2,5, \alpha = 0,0277$$

$$f_1 = 0,0277 \cdot \frac{0,3 \cdot 50^4}{2,1 \cdot 10^6 \cdot (0,6)^3} = 0,11 \text{ cm}$$

Poids Total du Transformateur

$$- \text{Poids du couvercle} : G_{\text{cou}} = \delta_{\text{fer}} \cdot S_c \cdot \Delta c$$

$$G_{\text{cou}} = 7,65 \cdot 6250 \cdot 0,8 \cdot 10^{-3} = 38,25 \text{ Kgf}$$

$$- \text{Poids des parois} : G_{\text{parois}} = \delta_{\text{fer}} \cdot S_{\text{parois}} \cdot \Delta_{\text{parois}}$$

$$S_{\text{parois}} = 10c_0 + 25 \times 2 (A+B) = 257000 + 25 \times 2 (125 + 50)$$

$$S_{\text{parois}} = 265750 \text{ cm}^2$$

$$G_{\text{parois}} = 7,65 \cdot 265750 \cdot 0,15 \cdot 10^{-3} = 304,95 \text{ Kgf}$$

Poids Total du Transformateur :

$$P_{\text{Total}} = G_t + G_{\text{cou}} + G_{\text{parois}}$$

$$P_{\text{Total}} = 1904,81 + 38,25 + 304,95 = 2248 \text{ Kgf}$$

Conclusion

Compte tenu des données du cahier des charges et des résultats obtenus en général par les constructeurs, les valeurs que nous avons obtenues par le calcul sont satisfaisantes.

Pour la réalisation pratique du transformateur, le résultat obtenu dans ce projet n'est certes pas parfait, il y a certainement de nombreuses mises au point à effectuer en particulier dans le domaine technico-économique.

Pour terminer, on peut dire que le projet présente l'énorme avantage d'obliger l'étudiant à assimiler plusieurs cours et, plus encore, à les amener à faire l'œuvre de synthèse.

Bibliographie

- 1 - Notes du cours de construction de machines électriques
- 2 - LIWSCHITZ : Calcul des machines électriques Tomes I et II
- 3 - Revue générale de l'électricité Tome 74
- 4 - M. KOSTENKO , Machines électriques Tome 1
- 6 - Normes françaises

NFC . 52 . 100 : Transformateurs de puissance
NFC . 52 . 112 : Transformateurs électriques
NFC . 27 . 101 : Boules minérales isolantes
N.F.C 28 . 920 : Tôles magnétiques laminées à froid