

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT : GENIE ELECTRIQUE

N° :



FILIERE : Electromécanique

OPTION : Electromécanique

Mémoire présenté pour l'obtention

Du diplôme de Master Académique

Par : Khalfa Abdelhak

Talhi Haidar

Intitulé

**ETUDE ET CONCEPTION D'UN
TRANSFORMATEUR INDUSTRIEL**

Soutenu devant le jury composé de :

Pr. BELKHIRI Salah
Dr. DEFDAF Mabrouk
Pr. GHEMARI ZINE

Université Mohamed Boudiaf de M'Sila
Université Mohamed Boudiaf de M'Sila
Université Mohamed Boudiaf de M'Sila

Président
Rapporteur
Examineur

Année universitaire : 2024/2025

Remerciement

Nous remercions LE BON DIEU de nous avoir donné la force pour accomplir ce travail. Nous tenons à remercier toutes les personnes qui nous ont aidés lors de la rédaction de ce mémoire.

Nous voulons dans un premier temps remercier, nos encadreurs de mémoire Dr. DEFDAF Mabrouk et Mr. Yassine MAHAMDI, pour la patience, la disponibilité et surtout les judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter notre réflexion,

Nous tenons également à adresser nos remerciements au Pr. BELKHIRI Salah, professeur à l'Université de M'sila pour avoir accepté de siéger et présidé le jury de notre mémoire. Nous remercions très vivement le Pr. GHEMARI ZINE, professeur à l'Université de M'sila, pour l'honneur qu'il nous a fait en acceptant de juger ce modeste travail.

Nous remercions également toute l'équipe pédagogique de département génie électrique de l'université m'sila.

Dédicaces

A nos parents,

A nos frères et nous sœurs

A tous nos Amis

À tous les professeurs, que ce soit du primaire, du collège, du lycée ou de l'enseignement supérieur, qui ont marqué notre vie par leur passion, leur savoir et leur pédagogie.

Nous dédions également ce mémoire à toutes les personnes qui nous ont soutenu et encouragé tout au long de notre vie. Avec tout notre amour et notre gratitude

Introduction générale.....	1
CHAPITRE I : Généralités sur les transformateurs	Erreur ! Signet non défini.
I.1. Introduction.....	4
I.2. Définition d'un transformateur	4
I.3. Principe de fonctionnement d'un transformateur	4
I.4. Composition et Structure d'un Transformateur	5
I.4.1. Partie active.....	5
I.4.2. Partie constructive	7
I.4.3. Isolation	10
I.5. Role des différents éléments constituent untransformateur	10
I.6. Systèmes de protection des transformateurs.....	12
I.6.1. Types défauts des transformateurs	12
I.6.2. Les différents types de la protection d'un transformateur	13
I.7. Classification et types de transformateur	15
I.7.1. Classification des transformateurs par source d'alimentation	15
I.7.2. Classification des transformateurs par construction	15
I.7.3. Classification des transformateurs par le niveau de tension	15
I.7.4. Classification des transformateurs selon fréquence	16
I.7.5. Classification des transformateurs selon type installation	16
I.7.6. Classification des transformateurs selon leur utilisation.....	16

I.8. Conclusion	16
CHAPITRE II : Introduction à la conception des transformateurs	17
II.1. Introduction.....	18
II.2. Importance et objectifs de la conception des transformateurs.....	18
II.2.1. Importance de la conception des transformateurs.....	18
II.2.2. objectifs de la conception des transformateurs	18
II.3. Couplage des transformateurs :	19
II.3.1. Les symboles des couplages	19
II.3.2. Le type du couplage	20
II.3.3. schémas de couplage	21
II.3.4. Choix du couplage.....	21
II.3.5. Déphasage et indice horaire	22
II.4. Essais réalisés sur les transformateur :	22
II.4.1. Essais de routine.....	22
II.4.2. Essai de type	23
II.4.3. Essais spéciaux.....	24
II.5. pertes dans les transformateurs :	24
II.5.1. perte de fer	24
II.5.2. Perte de cuive.....	25
II.5.3. réduire les Pertes	25
II.6. Schéma électrique d'un transformateur :	25
II.7. Calcul des paramètres fondamentaux :	25

II.7.1. Modèles d'étude des transformateurs	25
II.7.2. La Force électromotrice (FEM) induite	29
II.7.3. Calcul du rendement maximal.....	29
II.7.4. Sélection des matériaux utilisés	30
II.7.5. Détermination des sections des conducteurs	31
II.7.6. Calcul le nombre de spire.....	33
II.7.7. Determination du diamètre des bobines	34
II.7.8. Dimensionnement du noyau magnétique.....	35
II.7.9. Evaluation des resistance.....	36
II.7.10. Estimation des masses des matériaux actifs	38
II.7.11. Estimation de volume du diélectrique liquid.....	39
II.8. Conclusion	40
CHAPITRE III : Modélisation dimensionnelle des transformateurs	42
III.1. Introduction.....	42
III.2. L'importance de la Modélisation dans la Conception	42
III.3. Modélisation 3D des Transformateurs	41
III.4. Logiciels couramment utilisés dans la Modélisation 3D	42
III.5. Introduction de logiciels inventor autodesk	45
III.6. Avantages d'Autodesk Inventor	45
III.7. Schématisation d'un Transformateur Réel avec Autodesk Inventor	45
III.7.1. Étapes de conception	45
III.7.2. Intérêts et Avantages du Modèle 3D	48

III.7.3. Vue détaillée en 3D de chaque composant avec explications49

III.8. Conclusion49

CHAPITRE IV : Conception et réalisation d’un transformateur de distribution

160 KVA et 30/0,4 KV 55

IV.1. Introduction55

IV.2. Réalisation des calculs nécessaires à la construction d’un transformateur à partir d’un cahier des charges55

IV.2.1. Dimensionnement des bobines55

IV.2.2. Dimensionnement de la noyau64

IV.2.3. Dimensionnement de la cuve65

IV.2.4. les pertes à vide69

IV.1.1. Comparaison des résultats avec les transformateurs l’usine AZAZGA (160KVA et 30/0,4KV) et les normes sonelgaz69

IV.1.1. Elaboration du modèle 3D sur Autodesk inventor et fabrication du transformateur au sein de l’atelier WINDNG INDUSTRIE69

IV.5. Conclusion77

CONCLUSION GÉNÉRALE 79

BIBLIOGRAPHIE 80

LISTE DES FIGURES

Figure (I.1) : Transformateur triphasé	4
Figure (I.2) : Schéma de principe de fonctionnement d'un transformateur de puissance.....	5
Figure (I.3) : Vue intérieure d'un transformateur.....	5
Figure (I.4) : le noyau colonne	6
Figure (I.5) : le noyau cuirassé.....	6
Figure (I.6) : Enroulements	6
Figure (I.7) : La cuve d'un transformateur de puissance	8
Figure (I.8) : Le couvercle d'un transformateur de puissance	8
Figure (I.9) : Traversées isolantes.....	9
Figure (I.10) : conservateur d'huile de transformateur	9
Figure (I.11) : Le carton isolation	10
Figure (I.12) : Le papier isolation	10
Figure (II.1) : transformateur couplage triangle étoile	19
Figure (II.2) : couplage étoile	20
Figure (II.3) : couplage triangle	20
Figure (II.4) : couplage zig-zag	21
Figure (II.5) : couplage transformateur Yd11.....	22
Figure (II.6) : schema principe d'un transformateur	25
Figure (II.7) : Schéma de principe du transformateur parfait	26
Figure (II.8) : Schéma équivalent en ramené au primaire	28
Figure (II.9) : schema equivalent en ramené au secondaire.....	28

LISTE DES FIGURES

Figure (III.1) : logo de Logiciel SOLID WORKS	43
Figure (III.2) : la fenêtre de Logiciel CATIA	44
Figure (III.3) : logo de Logiciel inventor autodesk	44
Figure (III.4) : Modélisation des composants	46
Figure (III.5) : Assemblage.....	46
Figure (III.6) : Simulation et vérification	47
Figure (III.7) : Mise en plan	47
Figure (III.8) : le noyau	50
Figure (III.9) : la bobine secondaire	51
Figure (III.10) : la bobine primaire	51
Figure (III.11) : la cuve.....	51
Figure (III.12) : les ondulations	52
Figure (III.13) : le traverse.....	52
Figure (III.14) : la Couvercle	53
Figure (IV.1) : La forme de section de la colonne de fer	55
Figure (IV.2) : le noyau par Autodesk inventor	70
Figure (IV.3) : fabrication du noyau	70
Figure (IV.4) : la bobine primaire par Autodesk inventor.....	71
Figure (IV.5) : fabrication de la bobine primaire	71
Figure (IV.6) : la bobine secondaire par Autodesk inventor	72
Figure (IV.7) : fabrication du bobine secondaire.....	72

LISTE DES FIGURES

Figure (IV.8) : le partié active par Autodesk inventor	73
Figure (IV.9) : partié active.....	73
Figure (IV.10) : la cuve par Autodesk inventor	74
Figure (IV.11) : fabrication de la cuve	74
Figure (IV.12) : la covercule par Autodesk inventor	75
Figure (IV.13) : fabrication de la covercule.....	75
Figure (IV.14) : la transformateur par Autodesk inventor.....	76
Figure (IV.13) : fabrication de transformateur.....	76

LISTE DES TABLEAUX

Tableau (II.1) : les valeurs de distance entre la colonne et bobine basse tension.....	34
Tableau (II.2) : les valeurs de largeur du canal de fuit et distance entre deux bobines	35
Tableau (IV.1) : le donnée de Coefficient correcteur des pertes spécifiques.....	69
Tableau (IV.2) : Comparaison entre les trois résultats	69

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale :

L'une des raisons les plus importantes qui a aidé à développer le monde dans les domaines scientifiques et technologiques est l'électricité, l'électricité est donc un élément important de la vie quotidienne.

Cette énergie électrique est produite au niveau des centrales électriques (thermiques, hydrauliques ...etc.) puis transportées avec les réseaux électriques pour l'utilisation quotidienne domestique ou au niveau de l'industrie.

Les transformateurs sont largement utilisés dans le transport et la distribution de l'énergie électrique, car ils permettent de changer la tension de l'électricité pour la transmettre sur de longues distances avec une efficacité énergétique accrue. Ils sont également utilisés pour protéger les appareils électriques sensibles en isolant les circuits électriques et en empêchant les courants de court-circuit. Les transformateurs triphasés, qui sont constitués de trois bobinages primaires et secondaires, sont particulièrement utiles pour les applications de grande puissance. Ils peuvent être connectés de différentes manières pour fournir des tensions simples ou composées, et sont souvent utilisés dans les centrales électriques, les postes d'interconnexion et les réseaux de distribution d'électricité [1-2].

En effet le transformateur industriel qui a été inventé par Lucien Goulard et John-Dixon Gibbs en 1883 joue un grand rôle comme élévateur et abaisseur (généralement élévateur pour alimenter les réseaux de transport et abaisseur pour alimenter l'industrie et les urbains).

Le rendement et le coût du transformateur électrique sont l'un des plus grands défis auxquels est confronté le fabricant de transformateurs, il s'agit d'améliorer le rendement et de réduire le coût.

C'est dans ce cadre s'inscrit la problématique de ce travail, par une étude basée sur la conception d'un transformateur électrique immergé dans l'huile de puissance apparente de 160KVA et de tension primaire et secondaire 30/0.4 KV respectivement.

Ce mémoire comportera quatre chapitres structurés comme suit :

Le premier chapitre sera dévoué à une recherche bibliographique concernant les transformateurs, ainsi que leurs caractéristiques ; avantages, inconvénients et leurs domaines d'application.

INTRODUCTION GENERALE

Au deuxième chapitre, la partie sera dédiée à la conception du transformateur, les paramètres qui influent sur la conception, la mise en œuvre, c'est-à-dire aux différents types de couplage, leurs branchements électriques et leurs modes de contrôle.

Quant au troisième chapitre, on présentera une introduction au logiciel Autodesk Inventor avec la modélisation dimensionnelle du transformateur à l'aide de ce logiciel.

Le dernier chapitre comprend la conception et la réalisation d'un transformateur de distribution 160KVA et 30/0.4 KV. La réalisation se fait au niveau de l'usine WINDING INDUSTRIE située à la zone industrielle de Msila.

Nous terminerons par une conclusion générale qui englobera l'ensemble des travaux effectués.

CHAPITRE I :

Généralités sur les transformateurs

CHAPITRE I Généralités sur les transformateurs

I.1. Introduction :

Le transformateur électrique, malgré sa simplicité, est un élément essentiel du réseau électrique pour la transmission de l'énergie électrique en plus de la fonction d'augmentation et d'abaissement de la tension [3].

Le but de ce chapitre est de présenter une étude générale sur les transformateurs.

I.2. Définition d'un transformateur :

Le transformateur, également connu sous le nom de convertisseur statique à induction, est un appareil électrique statique. Il est constitué de deux ou plusieurs bobinages fixes et a pour fonction de convertir une tension et un courant alternatif une autre tension et un courant alternatif de la même fréquence, mais avec amplitudes qui peuvent varier en fonction des exigences d'utilisation.

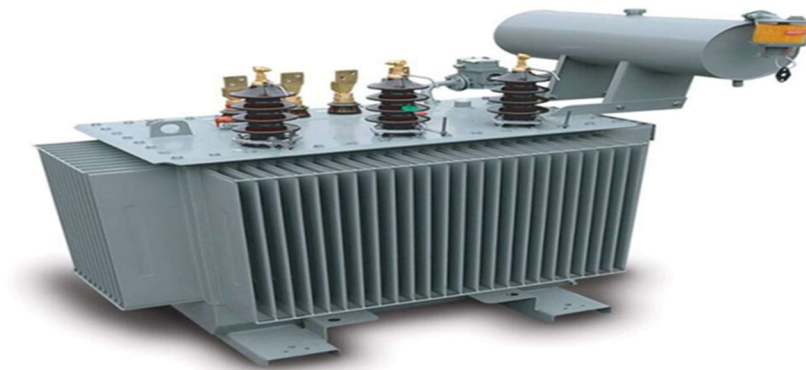


Figure (I.1) : Transformateur triphasé

I.3. Principe de fonctionnement d'un transformateur :

En vertu de la loi de Faraday, lorsqu'un flux d'induction magnétique variable (φ) circule dans le circuit magnétique, il induit dans chacun des enroulements une force électromotrice proportionnelle dans le temps au de changement ($\frac{\partial \varphi}{\partial t}$) et du nombre de spire que comporte cet enroulement.

Lorsque le primaire est alimenté par une source alternative, il circule dans le circuit magnétique un flux également alternatif dont l'amplitude dépend du nombre de spires du primaire et de la tension appliquée. Ce flux induit dans l'enroulement secondaire une tension proportionnelle au nombre de spires

CHAPITRE I Généralités sur les transformateurs

du secondaire. La fermeture du secondaire sur une charge provoque la circulation du courant secondaire [2].

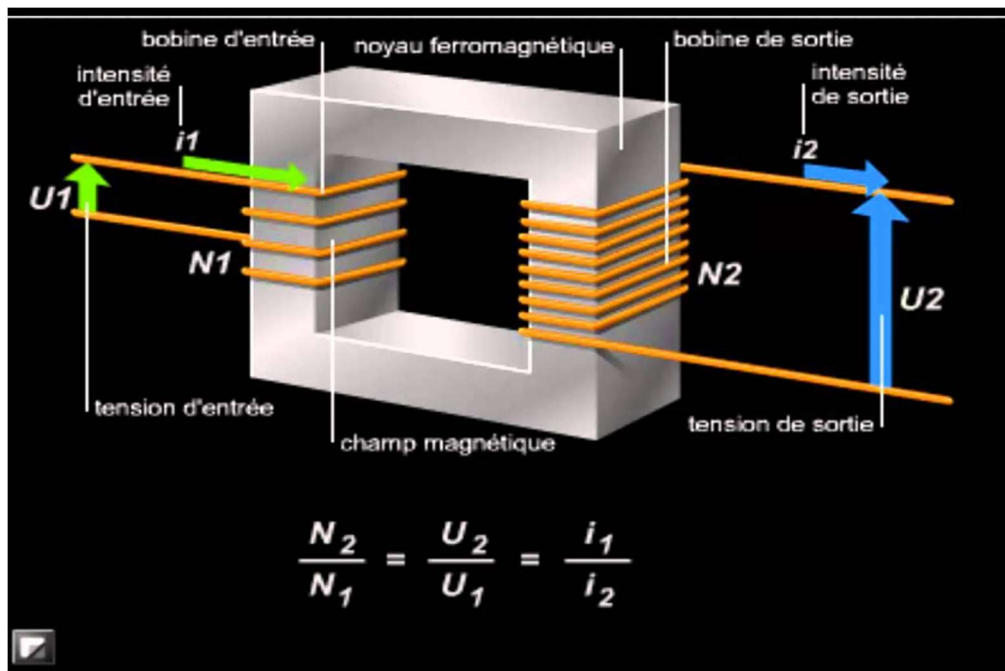


Figure (I.2) : Schéma de principe de fonctionnement d'un transformateur de puissance

I.4. Composition et Structure d'un Transformateur :

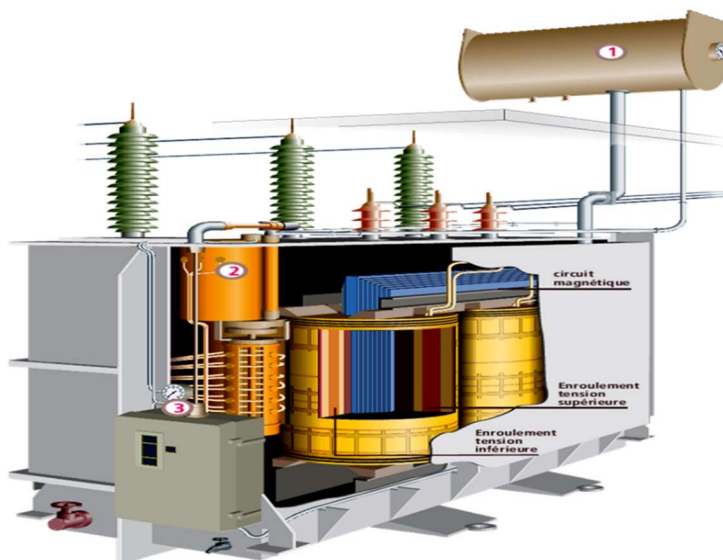


Figure (I.3) : Vue intérieure d'un transformateur

Un transformateur électrique est constitué de composants essentiels assurant ses fonctions de conversion d'énergie, d'isolation et de dissipation thermique. Et il est divisé en trois parties :

CHAPITRE I Généralités sur les transformateurs

I.4.1. Partie active :

I.4.1.a. Le Noyau (circuit magnétique) :

L'une des caractéristiques les plus importantes d'un circuit magnétique est le routage du flux magnétique provoqué l'induction de la bobine primaire [5].

Il est un tas de plaques d'acier haute qualité, ces plaques sont en acier doux et épaisse épaisse, et isolé dans le but de réduire : [6]

- ◆ la perte par courant de Foucault.
- ◆ la perte par hystérésis.

Il a deux formes différentes : type à colonne, et type cuirassé.

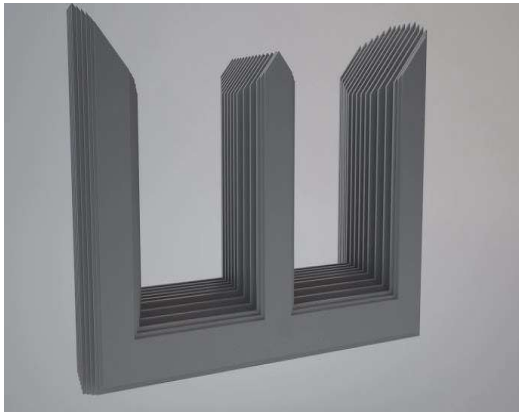


Figure (I.4) : le noyau colonne

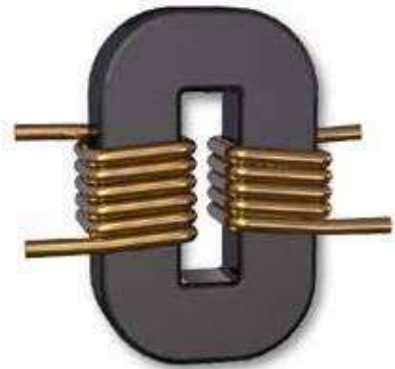


Figure (I.5) : le noyau cuirassé

I.4.1.b. Les Enroulements :

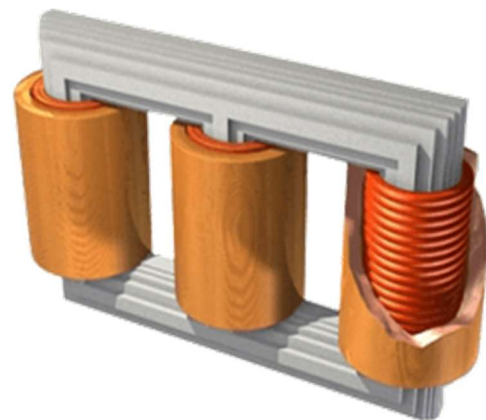


Figure (I.6) : Enroulements

CHAPITRE I Généralités sur les transformateurs

C'est un fil de métal enroulé (forme ronde ou rectangulaire) fait de cuivre et parfois c'est de l'aluminium, un isolement de papier isolante, transformateur, pour assurer la transmission de la puissance électrique du primaire le nombre de spires dépend du niveau de tension appliqué, la plus tensions a augmenté le nombre de spires, il y a deux types [7].

I.4.1.b.1. Enroulement primaire :

Le courant circulant dans la bobine est faible et la tension est élevée, ce qui impose :

- ◆ le nombre de spires est plus grande.
- ◆ une section faible.

La fonction de l'enroulement primaire consiste à générer le champ alternatif.

I.4.1.b.2. Enroulements secondaires :

Le courant se déplaçant à travers la bobine est élevé, ce qui exige :

- ◆ Une section des conducteurs relativement importante.
- ◆ Un nombre de spires limité.

La fonction de l'enroulement secondaire consiste à transporter le courant induit.

I.4.2. Partie constructive :

Son rôle est :

- ◆ la fixation de la partie active.
- ◆ assurer l'isolement.

I.4.2.a. La Cuve :

Il Est un réservoir en acier contient de l'huile isolante, pendant la fabrication il est soumis à des calculs thermiques [6].



Figure (I.7) : La cuve d'un transformateur de puissance

I.4.2.b. Le Couvercle :

Il est utilisé pour couvrir la cuve. Il fait également office de support pour des accessoires tels que : les isolateurs, le conservateur d'huile... [8].



Figure (I.8) : Le couvercle d'un transformateur de puissance

I.4.2.c. Les Traversées isolantes :

Une tige isolée qui est positionnée sur le couvercle du transformateur, garantit la bonne connexion de l'électricité entre les extrémités des enroulements secondaire et les lignes de la fin. De ses caractéristiques : [9]

- ◆ une bonne répartition du champ électrique.

CHAPITRE I Généralités sur les transformateurs

- ◆ l'isolement de la connexion par rapport à la cuve.
- ◆ la résistance aux efforts mécaniques.
- ◆ une fixation étanche et robuste sur le couvercle.

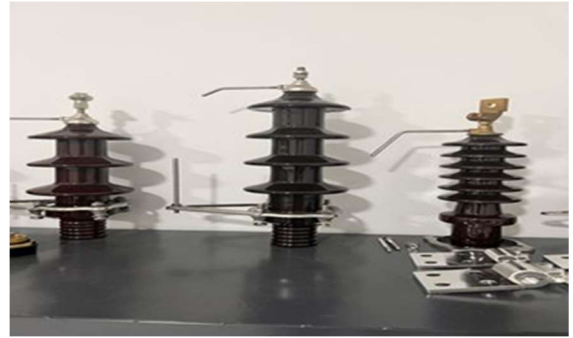


Figure (I.9) : Traversées isolantes

I.4.2.d. Le Conservateur d'huile :

On peut décrire le conservateur comme un dispositif de conservation situé au sommet du transformateur, conçu pour offrir une zone d'expansion adéquate à l'huile présente dans le transformateur [9].

Il agit donc en tant que réservoir d'huile pour séparer l'huile du transformateur, son travail principal ; augmentation du volume d'huile du transformateur avec l'augmentation de la température et de la charge du transformateur.



Figure (I.10) : conservateur d'huile de transformateur

CHAPITRE I Généralités sur les transformateurs

I.4.3. Isolation :

L'isolation fonctionne pour maintenir les parties de transformateur des dommages, à travers isolation les parties actives les uns des autres, un transformateur électrique a deux types d'isolation : liquide et solide [10].

I.4.3.a. Isolation liquide :

L'huile de transformateur est nécessaire pour assurer la longueur de vie des transformateurs électriques et bien fonctionner, c'est un lubrifiant qui isole et refroidit les transformateurs haute tension.

I.4.3.b. Isolation solide :

Elle se compose de cartons et de papiers. Le papier est utilisé pour isoler les bobinages, tandis que le carton est employé pour l'isolation entre les bobinages, ainsi qu'entre les bobinages et le noyau.

Le diélectrique liquide (huile) est utilisé pour imprégner les papiers et cartons, ce qui permet d'accroître leur la rigidité diélectrique réduit donc le risqué de décharges partielles.

On identifie trois catégories d'isolation solide : conventionnelle (cellulose), et haute température (aramide), et hybride (cellulose et aramide)



Figure (I.11) : Le carton isolation



Figure (I.12) : Le papier isolation

I.5. Rôle des différents éléments constituent un transformateur :

I.5.1. Le noyau :

- ◆ canaliser le flux magnétique.

CHAPITRE I Généralités sur les transformateurs

- ◆ présenter le minimum des pertes hystérésis et courant de Foucault.
- ◆ assurer le transfert de puissance entre l'enroulement primaire et le secondaire.

I.5.2. Les Enroulements :

- ◆ régulation de la tension et du courant.
- ◆ réguler l'énergie et améliorer l'efficacité des réseaux électriques.
- ◆ transfert d'énergie électrique entre différents niveaux de tension par induction électromagnétique.

I.5.3. La cuve :

- ◆ un support et protection mécanique à la partie active.
- ◆ servir de contenant au diélectrique liquide.
- ◆ permet élimination ou d'atténuer la chaleur par ventilation ou par huile.
- ◆ conservation de l'huile.

I.5.4. Le Couvercle :

- ◆ assurer la fermeture de la cuve.
- ◆ soutenir et installer des accessoires tels que les traverses, conservateur d'huile...

I.5.5. Les Traversées isolantes :

- ◆ La bonne répartition du champ électrique.
- ◆ La fixation étanche et robuste sur le couvercle.
- ◆ La résistance aux efforts mécanique.
- ◆ L'isolement de la connexion par rapport au couvercle.

I.5.6. Le conservateur d'huile :

CHAPITRE I Généralités sur les transformateurs

- ◆ compensation de la dilatation et de la contraction de l'huile.
- ◆ réduction de l'oxydation d'huile en limitant le contact direct de l'huile avec l'air.
- ◆ stockage d'huile.

I.5.7. Isolation :

I.5.7.a. Liquide :

- ◆ assurer l'isolation électrique entre les bobines et la cuve.
- ◆ maintien de la température de transformateur par refroidissement.

I.5.7.b. Solide :

- ◆ fournissent une isolation électrique entre les différentes parties du transformateur.
- ◆ résistance aux forces électromagnétiques.
- ◆ elles servent de barrière physique pour protéger les enroulements contre les dommages mécaniques.

I.6. Systèmes de protection des transformateurs :

Utiliser le type de protection basé sur:

- ◆ La puissance de transformateur.
- ◆ Type d'isolation.
- ◆ Type de transformateur.

I.6.1. Types de défauts des transformateurs :

I.6.1.a. Les surcharges :

Les surcharges se définissent comme des courants dépassant les intensités maximales autorisées. Si ces courants persistent trop longtemps, ils risquent d'une part de détériorer les matériaux isolants et

CHAPITRE I Généralités sur les transformateurs

d'autre part de provoquer la casse des conducteurs en raison de la dégradation de leur résistance mécanique [11].

I.6.1.b. Les surtensions :

la surtension dans un transformateur fait référence à une augmentation de la tension au-delà de la tension de fonctionnement maximale. Les surtensions sont des phénomènes électriques sous forme de courtes impulsions séparées, périodiques ou apériodiques, et elle est de courte durée [6].

I.6.1.c. Les courts-circuits :

Produit en raison de la connexion directe entre la bobine secondaire et la bobine primaire ou entre les mêmes rouleaux de bobine, entre phase et terre. Entraînant une augmentation significative de l'intensité du courant et de la diminution de l'impédance [6].

I.6.2. Les différents types de protection d'un transformateur :

I.6.2.a. Protection électrique :

Protections électriques principales sur le transformateur.

Protection différentielle :

Une protection différentielle est une mesure de sécurité électrique qui s'applique en comparant le courant qui entre et le courant qui sort d'un dispositif. Si une différence est détectée, la protection détermine qu'il y a eu une fuite à l'intérieur de l'appareil et ordonne son débranchement du réseau électrique, on parle alors de déclenchement [12].

Protection contre les surcharges :

La protection contre les surcharges est assurée par la coupure du circuit surchargé avant un échauffement anormal de la canalisation, C'est le rôle des déclencheurs thermiques qui peuvent détecter de faibles surcharges. Le principe de fonctionnement est analogue à celui du relais thermique. Il est basé sur la différence de dilatation de deux lames de métal, l'une ayant un coefficient de dilatation petit et l'autre très élevé. En cas de surcharge, le bilame se déforme et entraîne dans le sens de la flèche le système d'accrochage qui libère la partie pôle de coupure. Le ressort qui était comprimé se détend et provoque une coupure brusque du circuit électrique [13].

CHAPITRE I Généralités sur les transformateurs

Protection contre les surtensions :

La protection contre les surtensions a pour but de maintenir la continuité du service et réduire à un niveau acceptable les risques que courent les individus ainsi le matériel. Pour cela on utilise des protections comme les parafoudres, éclateurs [12].

Protection contre les courts-circuits :

C'est le rôle des déclencheurs électromagnétique, Ceux-ci interviennent au-delà des courants de surcharge et jusqu'à l'intensité maximale du courant de court-circuit, Le courant de court-circuit (I_{cc}) n'est limité que par l'impédance de la ligne.

Un courant de court-circuit peut atteindre des milliers d'ampères. Il est impératif que le disjoncteur coupe rapidement le circuit afin d'éviter toute détérioration. Dans tous les cas le temps de coupure doit être très court afin de limiter les effets néfastes court-circuit sur le matériel [14].

I.6.2.b. Protection mécanique :

Principales protections mécaniques sur le transformateur

Protection de gaz (buchholz) :

Il est l'un des accessoires de protection les plus importants du transformateur. Il permet de mettre hors tension l'appareil en cas de dégagement de gaz provenant de la combustion des isolants ou la décomposition de l'huile. Le principe est que l'accumulation de gaz dans le buchholz provoque automatiquement le fonctionnement d'un dispositif de protection. En cas de défaut interne le relais Buchholz joue 3 rôles : [14]

- ◆ Un premier rôle d'alarme sur dégagement de gaz peu important.
- ◆ Un deuxième rôle de déclenchement sur dégagement très important et brutal de gaz et/ou de mouvement d'huile violent.
- ◆ Un troisième rôle de détection du niveau d'huile en cas de fuite en aval.

Protection contre la pression :

CHAPITRE I Généralités sur les transformateurs

La protection contre la pression est la principale protection contre les défauts internes de la cuve du transformateur, avec libération de pression et protection contre les mutations de pression, utilisé pour refléter la pression de l'huile de transformateur.

Protection thermique :

Elle est utilisée pour protéger les transformateurs de puissance contre les surcharges, pour détecter l'existence d'une surcharge, elle fait une estimation de l'échauffement des bobines primaire et secondaire à protéger à partir de la mesure du courant [12].

I.7. Classification et types de transformateur :

La classification des transformateurs électriques est basée sur de nombreux critères :

- ◆ source d'alimentation.
- ◆ construction.
- ◆ niveau de tensions.
- ◆ fréquence.
- ◆ type installation.
- ◆ utilisation (application).

I.7.1. Classification des transformateurs par source d'alimentation :

- ◆ transformateurs monophasés.
- ◆ transformateurs triphasés.

I.7.2. Classification des transformateurs par construction : [15]

- ◆ transformateur à noyau.
- ◆ transformateur à coque.

I.7.3. Classification des transformateurs par le niveau de tension :

CHAPITRE I Généralités sur les transformateurs

- ◆ transformateurs abaisseurs.
- ◆ transformateurs éleveurs.

I.7.4. Classification des transformateurs selon fréquence :

- ◆ haut fréquence.
- ◆ base fréquence.

I.7.5. Classification des transformateurs selon type installation [15] :

- ◆ cabine (intérieur).
- ◆ sur Poteau (extérieur).

I.7.6. Classification des transformateurs selon leur utilisation :

- ◆ transformateur de puissance.
- ◆ transformateur distribution.
- ◆ transformateur de potentiel.
- ◆ transformateur de mesure (tension et courant).
- ◆ Autotransformateur.
- ◆ transformateur Isolation.
- ◆ transformateur convertisseur.
- ◆ transformateur Impédance.

I.8. Conclusion :

Les transformateurs sont des équipements indispensables pour assurer une distribution efficace de l'électricité. Ils favorisent la diminution des pertes énergétiques tout en adaptant la tension en fonction des exigences des équipements et des infrastructures.

CHAPITRE II :

Introduction à la conception des transformateurs

II.1. Introduction :

Une conception rigoureuse du transformateur constitue un élément déterminant de sa durabilité et de sa fiabilité à long terme. Afin de garantir un fonctionnement optimal et sécurisé, le transformateur doit être soumis à une série d'essais normalisés, notamment des essais de routine, permettant de vérifier sa conformité aux spécifications techniques et aux normes en vigueur. Ce chapitre est une introduction à la conception d'un transformateur.

II.2. Importance et objectifs de la conception des transformateurs :

II.2.1. Importance de la conception des transformateurs :

La conception d'un transformateur influence directement ses performances, son rendement énergétique et sa durée de vie. Bien étudiée permet :

- ◆ **une efficacité énergétique optimale** : minimisant les pertes fer et cuivre pour réduire e la consommation d'énergie.

- ◆ **une meilleure fiabilité et sécurité** : Assurant une isolation et un refroidissement adaptés pour éviter les surcharges et les défaillances.

- ◆ **Une adaptation aux conditions d'exploitation** : En tenant compte des contraintes spécifiques du réseau, comme les variations de charge et les perturbations électromagnétiques.

- ◆ **Une réduction des coûts d'exploitation et de maintenance** : En choisissant des matériaux et des technologies optimisant la durabilité du transformateur.

II.2.2. Objectifs de la conception des transformateurs :

La conception d'un transformateur repose sur plusieurs objectifs techniques et économiques :

- ◆ **Optimisation des performances électriques** : Assurer un rendement élevé en réduisant les pertes et en garantissant une régulation de tension adéquate.

- ◆ **Amélioration de la résistance thermique et mécanique** : Choisir des matériaux et des systèmes de refroidissement permettant une dissipation thermique efficace et une résistance aux contraintes mécaniques.

♦ **Sécurité et conformité aux normes** : Respecter les réglementations internationales (IEC, IEEE), pour garantir la sécurité des installations et des utilisateurs.

♦ **Intégration de Nouvelles technologies** : Inclure des innovations comme les matériaux à faible perte, les systèmes de surveillance intelligents et les techniques de refroidissement avancées.

II.3. Couplage des transformateurs :

Le primaire et le secondaire sont composés de trois enroulements chacun qui doivent être couplés, on désigne le couplage et les connexions des enroulements par des lettres et un nombre :

- ♦ enroulement primaire définit lettre majuscule.
- ♦ enroulement secondaire définit lettre minuscule.

II.3.1. Les symboles des couplages :

- ♦ D: pour un couplage primaire en triangle.
- ♦ Y: pour un couplage primaire en étoile.
- ♦ d: pour un couplage secondaire en triangle.
- ♦ y: pour un couplage secondaire en étoile.
- ♦ z: pour un couplage secondaire en zég-zag.

on retrouve (N) suivant la lettre qui indique le couplage primaire ou (n) qui suit la lettre qui indique le couplage secondaire.



Figure (II.1) : transformateur couplage triangle étoile

II.3.2. Le type du couplage :

II.3.2.a. Couplage étoile :

Il est possible d'utiliser le couplage étoile aussi bien au primaire qu'au secondaire, on retrouve la tension simple aux bornes d'un enroulement et la tension composée entre phases.

Transformateurs triphasés

- Couplages au primaire et au secondaire :

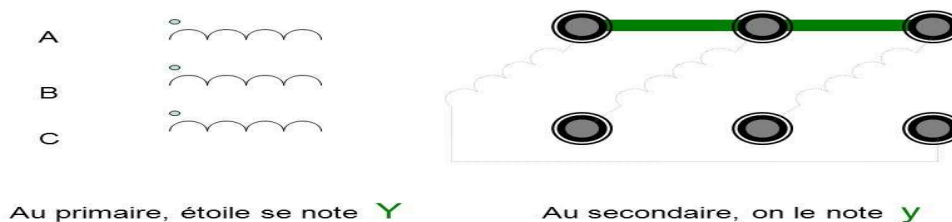


Figure (II.2) : couplage étoile

II.3.2.b. Couplage triangle :

Il est possible d'utiliser le couplage triangle au primaire ou au secondaire, on retrouve la tension composée entre phases et aux bornes d'un enroulement.

Transformateurs triphasés

- Couplages au primaire et au secondaire :

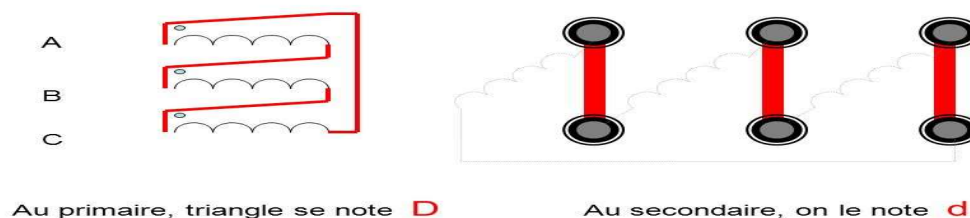


Figure (II.3) : couplage triangle

II.3.2.c. Couplage zigzag :

Le couplage zigzag est utilisé uniquement au secondaire du transformateur, il permet de diminuer la propagation du déséquilibre de phases sur le réseau HTA. Chaque secondaire est séparé en deux demi-enroulements, ce couplage permet de disposer d'un point neutre.

Transformateurs triphasés

- Couplages au primaire et au secondaire :

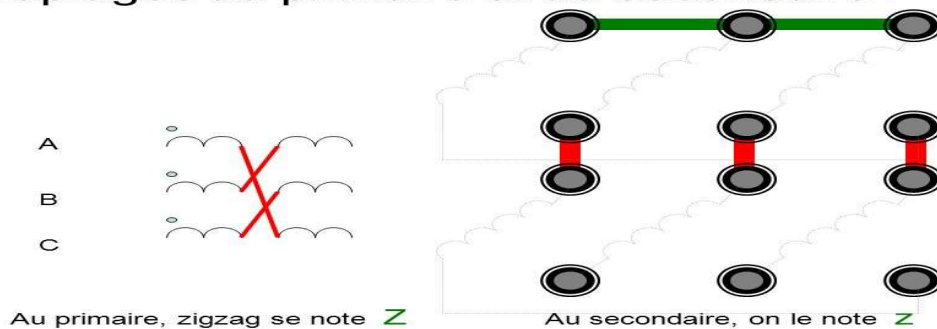


Figure (II.4) : couplage zig-zag

II.3.3. Schémas de couplage :

- ◆ étoile – étoile (Y-y).
- ◆ étoile – triangle (Y-d).
- ◆ étoile – zigzag (Y-z).
- ◆ triangle – étoile (D-y).
- ◆ triangle – triangle (D-d).
- ◆ triangle – zigzag (D-z).

II.3.4. Choix du couplage :

Plusieurs facteurs déterminent le choix du couplage :[16]

- ◆ La charge peut exiger l'utilisation du neutre (comme dans le cas d'un réseau BT), le secondaire doit être raccordé, soit de manière étoilée, soit en zigzag.

CHAPITRE II Introduction à la conception des transformateurs

- ◆ Le fonctionnement est déséquilibré (courant de déséquilibre dans le neutre I_n est VA Supérieur à 0.1 le courant nominal), le secondaire doit être couplé en zigzag.
- ◆ Coté haute tension, on a intérêt à choisir le couplage étoile (moins de spire à utiliser.
- ◆ Pour les forts courants, on préfère le couplage triangle.

II.3.5. Déphasage et indice horaire :

Selon les couplages choisis au primaire et au secondaire réseau secondaire par rapport aux tensions du réseau primaire. Ce déphasage est un angle multiple de 30° ou $\pi/6$ rad. A ce déphasage, on associe un nombre de 0 à 11 qui est l'indice horaire. Pour un déphasage nul, l'indice horaire est 0.

Pour un déphasage de 30° ou $\pi/6$ rad, c'est à dire lorsque les tensions secondaires sont en retard sur les tensions primaires de 30° ou $\pi/6$ rad, l'indice horaire est 1.

Exemple :

Le transformateur est couplé en étoile au primaire (Y), en triangle au secondaire (d), le déphasage entre tension simple primaire et tension simple secondaire est de 330° (11h), l'indice horaire complet est donc Yd11.

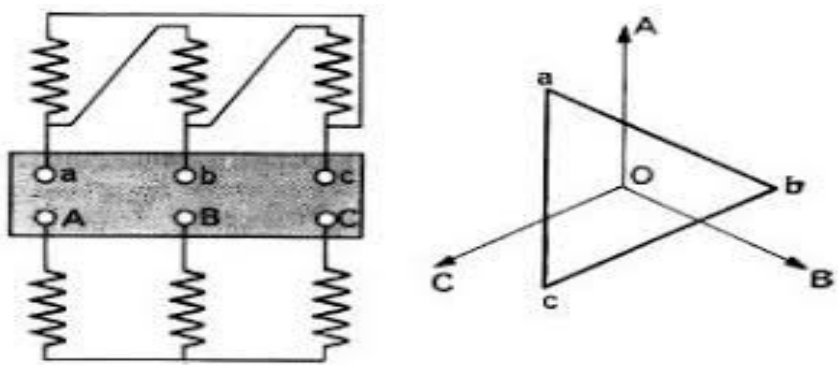


Figure (II.5) : couplage transformateur Yd11

II.4. Essais réalisés sur les transformateurs :

II.4.1. Essais de routine :

II.4.1.a. Mesure des pertes à vide et de courant à vide :

Le test à vide du transformateur consiste à appliquer la tension nominale de n'importe quel jeu de bobines du transformateur. Lorsque les autres bobines sont ouvertes, la perte à vide et le courant à vide du transformateur sont mesurés. Le courant à vide est exprimé en pourcentage de son courant nominal [17].

II.4.1.b. Mesure des pertes en charge et de l'impédance de court-circuit :

La mesure des pertes en charge et de l'impédance de court-circuit d'un transformateur permet d'évaluer son efficacité et son comportement en régime de défaut. Les pertes en charge, causées par l'échauffement des enroulements sous courant nominal, sont déterminées lors de l'essai en court-circuit. Cet essai permet également de mesurer l'impédance de court-circuit.

II.4.1.c. Mesure de la résistance des enroulements :

La résistance d'enroulement est mesurée pour vérifier l'absence de défaut de fabrication et calculer les pertes dans les conducteurs sur site ces mesures visent à évaluer les dommages éventuels tels que les courts circuits entre enroulement ou entre spires les circuit ver et les mauvais contacts ainsi que l'état du changeur de prise [17].

II.4.1.d. Rapport de transformation :

Il permet de vérifier que le rapport de transformation (tension primaire et tension secondaire) correspond bien aux valeurs nominales indiquées par le fabricant, un écart important pourrait indiquer un problème d'enroulement, un court-circuit partiel ou une erreur de bobinage [17].

II.4.1.e. Essai de résistance d'isolement :

La mesure de la résistance d'isolement du transformateur est une tâche importante qui doit être effectuée périodiquement pour garantir la sécurité et la fiabilité du transformateur. La résistance d'isolement du transformateur indique la qualité du matériau isolant utilisé et signifie le niveau d'efficacité du système isolant entourant l'enroulement.

II.4.2. Essai de type :

II.4.2.a. Essai de choc de foudre :

CHAPITRE II Introduction à la conception des transformateurs

Le test de choc de foudre est une méthode de test utilisée pour tester la capacité des équipements électriques à résister aux conditions de choc de foudre. Son principe est d'effectuer un test de compatibilité électromagnétique sur l'équipement électrique testé en simulant manuellement la tension d'impulsion de foudre réelle pour déterminer si l'équipement peut fonctionner normalement en présence de foudre [18].

II.4.2.b. Essai d'échauffement :

Un essai d'échauffement de transformateur est un essai effectué pour évaluer les performances d'un transformateur dans des conditions de fonctionnement normales en termes d'élévation et de stabilité de température sous charge. L'essai vise à simuler l'effet du fonctionnement continu sur les enroulements, le fer et les isolants, afin de vérifier leur capacité à résister aux températures sans affecter l'efficacité des performances ou la durée de vie du transformateur [18].

II.4.3. Essais spéciaux :

II.4.3.a. Essai de mesure des niveaux de bruit et vibration :

L'essai de mesure des niveaux de bruit et de vibration d'un transformateur est essentiel pour évaluer son impact acoustique et mécanique, notamment pour garantir la conformité aux normes et assurer un bon fonctionnement sans nuisances excessives [17].

II.5. Pertes dans les transformateurs :

Les pertes sont une cause directe affectant la performance et l'efficacité d'un transformateur, ces pertes comprennent deux catégories de base :

II.5.1. Perte de fer :

La perte de fer est générée dans le circuit magnétique du transformateur, il se divise en :

II.5.1.a. Perte par courant de Foucault :

L'énergie thermique découlant des courant de Foucault provoque des pertes, ces pertes sont proportionnelles avec :

- ◆ résistivité du matériau.

CHAPITRE II Introduction à la conception des transformateurs

- ♦ l'épaisseur du noyau.
- ♦ le champ magnétique.

II.5.1.b. Perte par hystérésis :

Il se produit en raison d'un délai entre l'induction et le champ magnétique appliqué aux matériaux dans le circuit magnétique, entraînant une perte d'énergie sous forme de chaleur.

II.5.2. Perte de cuivre :

La chaleur produite par la résistance d'enroulement conduit à des pertes de cuivre, connues sous le nom : perte effet joule.

II.5.3. Réduire les Pertes :

a. conception optimale, comprend :

- ♦ la sélection de matériaux appropriée (matériaux de haute qualité).
- ♦ une meilleure géométrie du noyau.
- ♦ technique de bobinage optimisées.

b. entretien régulier.

II.6. Schéma électrique d'un transformateur :

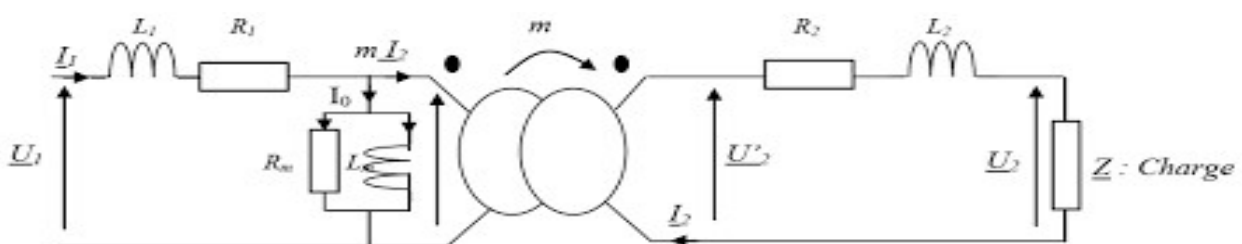


Figure (II.6) : Schéma principe d'un transformateur

II.7. Calcul des paramètres fondamentaux :

II.7.1. Modèles d'étude des transformateurs :

II.7.1.a. Modèle Transformateur parfait :

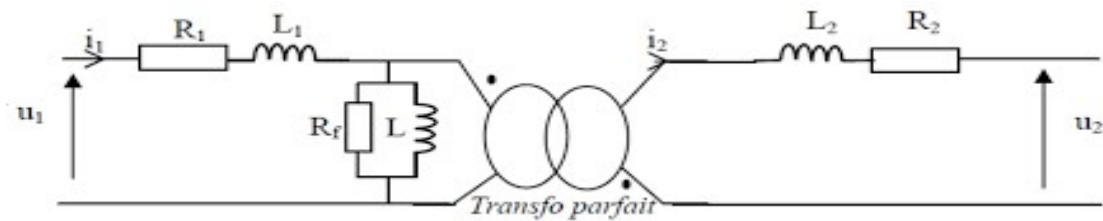


Figure (II.7) : Schéma de principe du transformateur parfait

Un transformateur parfait est caractérisé par: [19]

- ◆ les résistances des enroulements primaire et secondaire sont nulles: $R_1 = R_2 = 0$ (Pas de pertes joules).
- ◆ les inductances de fuites sont nulles, la reluctance du circuit magnétique est nulle: $L_1 = L_2 = 0$ (Pas de fuites du flux magnétique).
- ◆ Pas de pertes fer: $R_f = +\infty$.
- ◆ la puissance active au primaire P_1 égale la puissance active au secondaire P_2 .
- ◆ le rendement de transformateur 100% ($\eta = 1$).

Equation aux tensions :

- ◆ loi de Lenz :

$$V_1(t) = N_1 \cdot \frac{d\varphi}{dt}$$

$$V_2(t) = N_2 \cdot \frac{d\varphi}{dt}$$

$$\frac{V_1(t)}{V_2(t)} = \frac{N_1}{N_2}$$

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2}$$

Equation aux courants :

- ◆ loi d'ampère :

$$N_1 \cdot i_1(t) - N_2 \cdot i_2(t) \approx 0$$

$$\frac{i_1(t)}{i_2(t)} = \frac{I_1}{I_2}$$

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2}$$

Rapport de transformateur :

Le rapport est une relation entre la tension appliquée à la bobine primaire et secondaire et le nombre de spire ; plus le nombre de spire est élevé, plus la tension est élevée, ce qui produit un courant dont la valeur est opposée à la tension.

$$m = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

Puissance de transformateur parfait :

Les puissance apparente et active et réactive se conservent

◆ Apparente :

$$S = U \cdot I$$

$$S_1 = S_2$$

Active:

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$$

$$P_1 = P_2$$

◆ Réactive :

$$Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi$$

$$Q_1 = Q_2$$

II.7.1.b. Modèle du transformateur - hypothèse de kapp :

Le courant magnétique est négligeable dans les transformateurs de haute puissance; pour étudier le transformateur à fond, en devez enlever la branche de magnétisation, Le modèle obtenu s'appelle modèle de Kapp.

Modèle de Kapp Ramené au primaire :

Le schéma équivalent simplifié du transformateur devient :

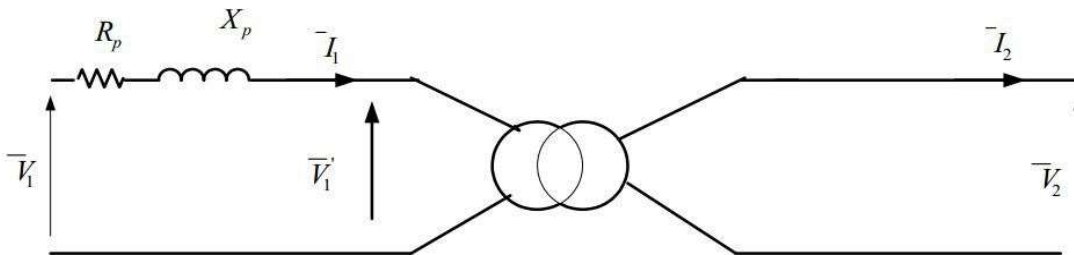


Figure (II.8) : Schéma équivalent en ramené au primaire

$$R_p = R_1 + m^2 \cdot R_2$$

$$X_p = X_1 + m^2 \cdot X_2$$

$$X = L \cdot w$$

◆ Impedance: $Z_p = \sqrt{R_p^2 + x_p^2}$

Modèle de Kapp Ramené au secondaire :

Le schéma équivalent simplifié du transformateur devient :

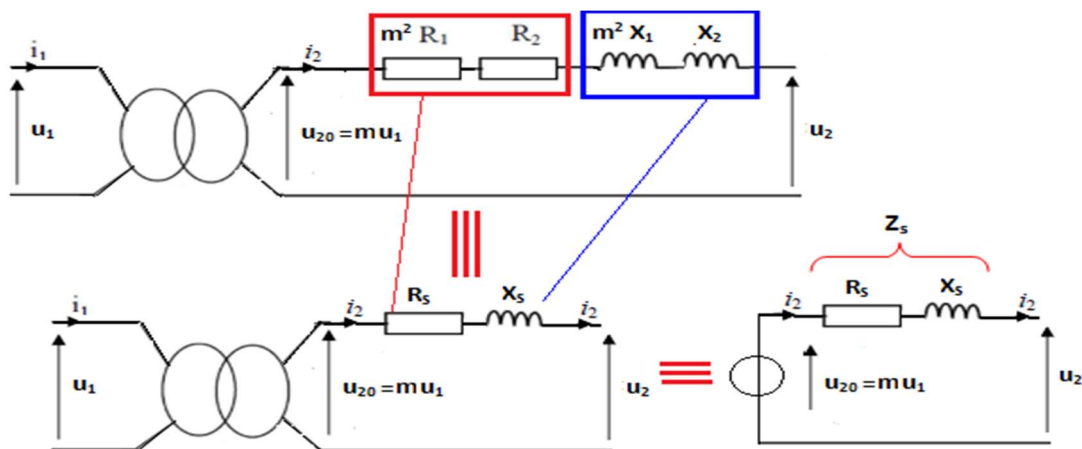


Figure (II.9) : schéma équivalent en ramené au secondaire

$$R_s = R_2 + m^2 \cdot R_1$$

$$X_s = X_2 + m^2 \cdot X_1$$

♦ L'impédance: $Z_s = \sqrt{R_s^2 + x_s^2}$

II.7.2. La Force électromotrice (FEM) induite :

$$e(t) = N \cdot \frac{d\varphi}{dt}$$

$$\varphi(t) = \hat{\varphi} \cdot \sin(\omega t)$$

$$e(t) = N \cdot W \cdot \hat{\varphi} \cdot \cos(\omega t)$$

♦ Avec: $\hat{\varphi} = \hat{B} \cdot S_{Fe}$ et $\omega = 2 \cdot \Pi \cdot f$

$$e(t) = N \cdot 2\Pi \cdot f \cdot \hat{B} \cdot S_{Fe} \cdot \cos(\omega t)$$

♦ En posant: $E = N \cdot 2\Pi \cdot f \cdot \hat{B} \cdot S_{Fe}$

on déduit la valeur efficace de la force électromotrice:

$$E = N \cdot \frac{2\Pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot \hat{B} \cdot S_{Fe}$$

$$E = 4,44 \cdot N \cdot f \cdot \hat{B} \cdot S_{Fe}$$

on déduit la valeur efficace de la force électromotrice:

$$E = N \cdot \frac{2\Pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot \hat{B} \cdot S_{Fe}$$

$$E = 4,44 \cdot N \cdot f \cdot \hat{B} \cdot S_{Fe}$$

II.7.3. Calcul du rendement maximal : [20]

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{P_2}{P_1}$$

$$\eta = \frac{U \cdot I \cdot \cos \varphi}{U \cdot I \cdot \cos \varphi + P_j + P_{Fe}}$$

CHAPITRE II Introduction à la conception des transformateurs

- ◆ la puissance utile: $P_u = P_2 = P_1 + P_j + P_{Fe}$
- ◆ la puissance absorbée: $P_a = P_1 = U \cdot I \cdot \cos \varphi$
- ◆ le perte effet joule totale: $P_j = P_{j_1} + P_{j_2} = R_p I_1^2 = R_s I_2^2$
- ◆ le perte effet joule aux primaire: $P_{j_1} = R_1 I_1^2$
- ◆ le perte effet joule aux secondaire: $P_{j_2} = R_2 I_2^2$
- ◆ le perte fer: $P_{Fe} = P_0 - R_1 I_{10}^2 \approx P_0$

II.7.4. Sélection des matériaux utilisés :

II.7.4.a. Les bobines :

La cuivre :

Avantages :

- ◆ excellente conductivité électrique.
- ◆ résistance mécanique élevée.
- ◆ bonne tenue à la chaleur.

Inconvénient :

- ◆ le cout élevé.

II.7.4.b. Matériaux du noyau magnétique :

Acier M5 :

L'acier M5 est un type d'acier électrique à grains orientés laminé à froid, contenant environ 3 à 3,3 % de silicium, il est spécialement conçu pour les applications électromagnétiques à haut efficacité, en particulier les noyaux de transformateurs de puissance et de distribution.

Avantages :

CHAPITRE II Introduction à la conception des transformateurs

- ◆ bonne résistivité électrique.
- ◆ faible hystérésis.
- ◆ haut perméabilité magnétique.
- ◆ faibles pertes fer.

Inconvénient :

- ◆ cout élevé.
- ◆ difficulté d'usinage.

II.7.4.c. Matériaux isolants :

Isolants solides :

Ses types et des utilisations principales :

- ◆ papiers pressé : isolation simple dans les transformateurs immergés.
- ◆ carton : support mécanique interne.
- ◆ les bois

Isolants liquides :

Huile minérale :

Généralement, l'huile minérale est le liquide d'isolation le plus utilisé dans les transformateurs de puissance. Le choix d'une d'huile minérale est guidé par la norme CEI 60296 [22]. L'évaluation des huiles minérales en service est définie par la norme CEI 60422 [23]. Cependant, l'utilisation de d'huile minérale est aussi soumise à des conditions supplémentaires. Les huiles minérales sont obtenues par le raffinage des bruts pétroliers selon les trois types de structures à savoir paraffiniques, naphténiques et aromatiques [21].

II.7.5. Détermination des sections des conducteurs : [24] [25] [26]

Le courant nominal simple de la bobine primaire (I_1) :

$$I_1 = \frac{S}{U_1} \quad [\text{A}]$$

S: la puissance nominale apparente [VA].

U_1 : la tension de la bobine primaire [V].

Calcul le courant du phase de la bobine primaire (I_{pH1}) :

$$I_{pH1} = \frac{I_1}{\sqrt{3}} \quad [\text{A}]$$

Le courant nominal simple de la bobine secondaire (I_2) :

$$I_2 = \frac{S}{U_2} \quad [\text{A}]$$

U_2 : la tension de la bobine secondaire.

Calcul le courant du phase de la bobine secondaire (I_{pH2}) :

$$I_{pH2} = \frac{I_2}{\sqrt{3}} \quad [\text{A}]$$

Calcul la section transversal du conducteur primaire (S_{c1}) :

$$S_{c1} = \frac{I_{pH1}}{j_n} \quad [\text{mm}^2]$$

Calcul la section transversal du conducteur secondaire (S_{c2}) :

$$S_{c2} = \frac{I_{pH2}}{j_n} \quad [\text{mm}^2]$$

j_n : la densité de courant.

$$j_n = \frac{U_{sp} \cdot P_j}{S_n \cdot D_{12}} \cdot \frac{1}{2\pi \cdot \rho_{tm} \cdot K_c} \quad [\text{A/mm}^2]$$

U_{sp} : tension de spire de la bobine [V].

P_j : Pertes joule [w].

S: Puissance apparente nominale du transformateur.

D_{12} : diamètre de canal de fuite [mm^2].

ρ_{tm} : Résistivité du cuivre à la température considérée.

K_c : facteur tenant compte des pertes supplémentaire en court-circuit, il donné en fonction de la puissance apparente.

II.7.6. Calcul le nombre du spire : [24] [25] [26]

Calcul Section du fer de la colonne :

$$S_{fer} = \frac{D^2 \cdot \Pi}{4} \cdot K_u$$

K_u : Facteur d'utilisation de la section du fer.

D: diamètre de colonne de la section du fer [mm^2].

Calcul la tension de spire :

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

B_c : induction magnétique de crête [T].

f = 50 Hz: la fréquence.

Calcul la tension du phase enroulement moyenne tension (U_{pH1}) :

$$U_{pH1} = \frac{U_1}{\sqrt{3}}$$

Calcul la tension du phase enroulement Basse Tension (U_{pH2}) :

$$U_{pH} = \frac{U_2}{\sqrt{3}}$$

Calcul le nombre du spire enroulement moyenne tension (N_1) :

$$N_1 = \frac{U_{PH1}}{U_{sp}}$$

Calcul le nombre de spire enroulement basse tension (N_2) :

$$N_2 = \frac{U_{PH2}}{U_{sp} \cdot \sqrt{3}}$$

II.7.7. Détermination du diamètre des bobines : [24] [25] [26]

II.7.7.a. Diamètre intérieur de l'enroulement Basse Tension ($D_{i_{20}}$) :

$$D_{i_{20}} = 2 \cdot a_{20} + D \quad [mm]$$

a_{20} : distance entre la colonne et l'enroulement basse tension.

U_n [KV]	1≤	3	6	10	15	20	35
a_{20} [mm]	5	12	12→15	18	18→20	21→23	3

Tableau (II.1) : les valeurs de distance entre la colonne et bobine basse tension

II.7.7.b. Diamètre extérieur de l'enroulement Basse Tension ($D_{ex_{20}}$) :

$$D_{ex_{20}} = 2 \cdot a_2 + D_{i_{20}} \quad [mm]$$

a_2 : Epaisseur de l'enroulement basse tension.

$$a_2 = K_t \cdot \sqrt[4]{S_{cl}}$$

K_t : Coefficient qui dépend de la tension nominale.

$K_t = 0,55$ pour $U_n \leq 35$ KV

S_{cl} : la puissance apparente par colonne.

$$S_{cl} = \frac{S}{3}$$

II.7.7.c. Diamètre intérieur de l'enroulement moyenne Tension ($D_{i_{10}}$) :

$$D_{i_{10}} = 2. a_{12} + D_{ex_{20}}$$

a_{12} : Largeur du canal de fuite (entre les deux enroulements).

U_n [KV]	10	20	30
a_{11} [mm]	8	11	17
a_{12} [mm]	8→12	12→18	21

Tableau (II.2) : les valeurs de largeur du canal de fuit et distance entre deux bobines

II.7.7.d. Diamètre extérieur de l'enroulement moyenne Tension ($D_{ex_{10}}$) :

$$D_{ex_{10}} = 2. a_1 + D_{i_{10}}$$

a_1 : Epaisseur de l'enroulement moyenne tension.

II.7.8. Dimensionnement du noyau magnétique : [24] [25] [26]

II.7.8.a. Longueur de la fenêtre (L_{fen}) :

$$L_{fen} = a_{11} + D_{ex1} - B_{s_1} \quad [mm]$$

D_{ex1} : Diamètre extérieur de l'enroulement primaire.

B_{s_1} : longueurs des gradins.

a_{11} : Distance latérale entre deux enroulements moyenne tension voisins.

II.7.8.b. Hauteur de la fenêtre (H_{fen}) :

$$H_{fen} = H_{m1} + (d_{ex} + d_{in}) \quad [mm]$$

$d_{ex} = 15mm$: Distance entre la bobine et la culasse supérieure.

$d_{in} = 15mm$: Distance entre la bobine et la culasse inférieure

II.7.8.c. La distance entre axe colonne: (E_{cl}) :

$$E_{cl} = L_{fen} + B_{s1}$$

II.7.8.d. Longueur du noyau (L_{no}) :

$$L_{no} = 2 \cdot E_{cl} + B_{s1} \quad [mm]$$

II.7.8.e. Hauteur du noyau (H_{no}) :

$$H_{no} = H_{fen} + 2 \cdot B_{s1} \quad [mm]$$

II.7.9. Evaluation des résistance : [24] [25] [26]**II.7.9.a calcul la résistance primaire (R_1) :****Calcul le Diamètre moyen du spire (D_{my1}) :**

$$D_{my} = D + 2 \cdot a_{20} + 2 \cdot a_{12} + 2 \cdot a_2 + a_1 \quad [mm]$$

Calcul la Longueur moyenne d'un enroulement primaire (L_{my1}) :

$$L_{my1} = \pi \cdot D_{my1} \quad [mm]$$

Calcul la Longueur totale d'un enroulement primaire (L_{t1}) :

$$L_{t1} = N_1 \cdot L_{my1} \quad [mm]$$

La résistance primaire :

$$R_1 = \frac{L_{t1}}{S_{c1}} \cdot \rho \quad [\Omega]$$

ρ : Résistance spécifique du matériau.

Le cuivre: $1,68 \cdot 10^{-8} m\Omega$.

II.7.9.b calcul la résistance secondaire (R_2) :

Calcul le Diamètre moyen du spire (D_{my2}):

$$D_{my2} = D + 2 \cdot a_{20} + 2 \cdot a_{12} + 2 \cdot a_2 + a_1$$

Calcul la Longueur moyenne d'un enroulement secondaire (L_{my2}):

$$L_{my2} = \pi \cdot D_{my2}$$

Calcul la Longueur totale d'un enroulement secondaire (L_{t2}):

$$L_{t2} = N_2 \cdot L_{my2}$$

La résistance secondaire :

$$R_2 = \frac{L_{t2}}{S_{c2}} \cdot \rho \quad [\Omega]$$

II.7.10. Estimation des masses des matériaux actifs : [24] [26]

II.7.10.a. Calcul la masse du circuit magnétique (G_{nt}) :

Calcul La masse total des coins (G_{n1}) :

$$G_{n1} = S_{fe} \cdot \gamma_e \cdot N_{co} \cdot B_{s1} \quad [\text{Kg}]$$

$\gamma_e = 7.65 \text{ Kg/dm}^3$: Masse volumique des tôles utilisées.

$N_{co} = 6$: Nombre de coins.

Calcul La masse total des culasses (G_{n2}) :

$$G_{n2} = S_{fe} \cdot \gamma_e \cdot N_{cu} \cdot L_{fen} \cdot 4 \quad [\text{Kg}]$$

$N_{cu} = 2$: Nombre des culasses.

Calcul La masse total des colonnes (G_{n3}) :

$$G_{n3} = S_{fe} \cdot \gamma_e \cdot N_{cl} \cdot H_{fen} \quad [\text{Kg}]$$

$N_{cl} = 3$: Nombre de colonne.

La masse du circuit magnétique :

$$G_{nt} = G_{n1} + G_{n2} + G_{n3} \text{ [Kg]}$$

II.7.10.b. Calcul La masse du cuivre (G_{cut}) :**Calcul la masse du cuivre primaire (G_{cu1}):**

$$G_{cu1} = S_{c1} \cdot \gamma_c \cdot L_{t1}$$

$\gamma_c = 8,9 \text{ Kg/dm}^3$: Densité volumique du cuivre.

Calcul la masse du cuivre secondaire (G_{cu2}):

$$G_{cu2} = S_{c2} \cdot \gamma_c \cdot L_{t2}$$

La masse du cuivre total :

$$G_{cut} = (G_{cu1} + G_{cu2}) \times m_p$$

$m_p = 3$: nombre des bobines.

II.7.11. Estimation de volume du diélectrique liquide : [24] [26]**II.7.11.a. Calcul de volume du partie décuvable (V_{pd}) :**

$$V_{pd} = \left(\frac{G_{nt}}{\gamma_e} + \frac{G_{cut}}{\gamma_c} \right) \cdot \alpha$$

$\alpha = 1,2$: Facteur de correction pour tenir compte des différentes parties qui rentrent en considération (papier, pièce métallique,).

II.7.11.b. Calcul de Volume du cuve sans ondulations (V_{sc}) :**Calcul la Longueur intérieure du cuve (L_{cv}) :**

$$L_{cv} = 2 \cdot E_{cl} + D_{ep1} + 2 \cdot e_1$$

D_{ep1} : petit diamètre extérieur de la bobine moyenne tension.

$e_1 = 25 \text{ mm}$: distance d'isolation de l'enroulement par rapport à la cuve

Calcul la Largeur intérieure du cuve (l_{cv}) :

$$l_{cv} = D_{eg1} + 2 \cdot e_1 + e_2$$

$e_2 = 25 \text{ mm}$: distance entre la cuve et les prises.

Calcul la Hauteur intérieure de la cuve (H_{cv}) :

$$H_{cv} = H_{no} + f_{sp} + d_{sp}$$

$f_{sp} = 155 \text{ mm}$: Espace pour le branchement.

$d_{sp} = 30 \text{ mm}$: largeur de la cale d'appui.

Volume du cuve sans ondulations :

$$V_{sc} = L_{cv} \cdot l_{cv} \cdot H_{cv} \quad [dm^3]$$

II.7.11.c. volume de la cuve des ondulations (V_{od}) :

Calcul du volume d'ondulation (V_{nd}) :

$$V_{nd} = L_{nd} \cdot l_{nd} \cdot h_{nd} \quad [dm^3]$$

$L_{nd} = 170 \text{ mm}$: longueur d'ondulation (valeur par le constructeur).

$l_{nd} = 4 \text{ mm}$: largeur d'ondulation (valeur par le constructeur).

$h_{nd} = 500 \text{ mm}$: hauteur d'ondulation (valeur par le constructeur).

Calcul le Nombre d'ondulation (N_{nd}) :

côté longueur de la cuve (N_{nd1}) :

$$N_{nd} = \frac{L_{cs} - 2e_{d1}}{40}$$

e_{d1} : la distance entre des ondulations égale 45 mm .

côté largeur de la cuve (N_{nd2}) :

$$N_{nd2} = \frac{l_{cs} - 2e_{d1}}{40}$$

II.7.11.d. Volume de l'huile (V_l) :

$$V_l = V_{sc} + V_{od} - V_{pd} \quad [dm^3]$$

Conclusion :

A la fin de ce chapitre nous avons clarifié l'importance et les avantages de la conception du transformateur, en plus d'ajuster les relations théoriques qui nous permettent de déterminer les caractéristiques les dimensions des différents composants du transformateur, ces dimensions sont nécessaires à la modélisation.

Chapitre III :

Modélisation dimensionnelle des transformateurs

III.1. Introduction :

Avant de procéder à la fabrication d'un transformateur en usine, il est essentiel de passer par une étape de modélisation dimensionnelle. Cette phase permet de concevoir et d'optimiser les différentes dimensions des composants du transformateur afin d'assurer sa performance et son efficacité.

III.2. L'importance de la Modélisation dans la Conception :

La simulation et la modélisation jouent un rôle fondamental dans la conception des transformateurs. Voici quelques raisons pour lesquelles elles sont indispensables :

◆ *Optimisation de la conception* : Elles permettent d'explorer différentes configurations et matériaux pour maximiser l'efficacité énergétique tout en réduisant les pertes.

◆ *Analyse des performances* : Grâce à la modélisation, il est possible de prévoir le comportement du transformateur dans diverses conditions, comme les variations de charge ou la température, assurant ainsi sa fiabilité.

◆ *Réduction des coûts et des délais* : La modélisation évite la nécessité de prototypes physiques coûteux, accélérant ainsi le processus de développement.

◆ *Validation des normes* : Elle permet de vérifier la conformité aux standards de sécurité et de performance avant la fabrication.

◆ *Innovation* : La modélisation facilite l'exploration de nouvelles technologies et concepts, favorisant l'émergence de produits plus performants et durables.

◆ *Gestion des risques* : En identifiant précocement les problèmes potentiels, elle contribue à minimiser les risques liés à la fabrication et à l'exploitation.

En somme, la simulation et la modélisation sont des outils essentiels pour optimiser la performance, réduire les coûts, assurer la conformité et encourager l'innovation.

III.3. Modélisation 3D des Transformateurs :

La modélisation 3D consiste à créer une représentation numérique tridimensionnelle du transformateur, intégrant tous ses composants : noyau, enroulements, isolants, boîtier, etc. Cette étape

Permet aux ingénieurs de visualiser, analyser et optimiser la conception avant la fabrication.

III.4. Logiciels couramment utilisés dans la Modélisation 3D :

- ♦ **SOLID WORKS** : apprécié pour sa puissance en conception et analyse.

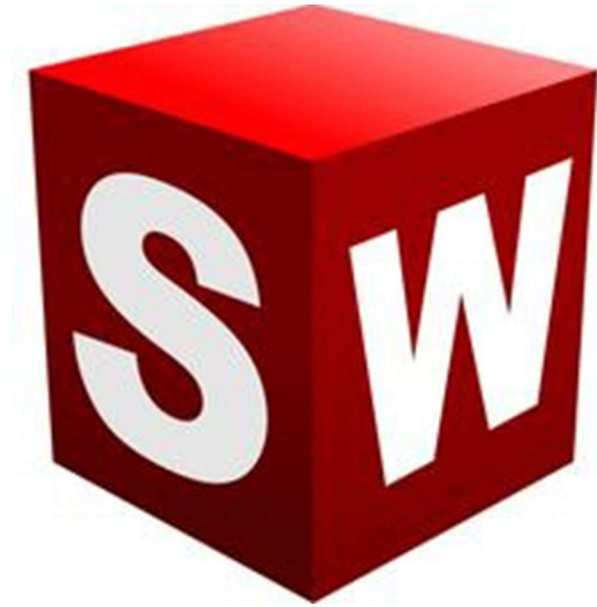


Figure (III.1) : logo de Logiciel SOLID WORKS

- ♦ **CATIA** : utilisé dans l'aéronautique, mais aussi adapté pour la conception de transformateurs.



Figure (III.2) : la fenêtre du Logiciel CATIA

♦ **ANSYS** : spécialisé dans la simulation électromagnétique et thermique.



Figure (III.3) : Logo du logiciel *ANSYS*

♦ **AUTODESK INVENTOR** : reconnu pour sa gestion des assemblages complexes et ses outils de simulation intégrés.



Figure (III.4) : logo de Logiciel *inventor autodesk*

III.5. Introduction de logiciels *inventor autodesk* :

Autodesk inventor est un logiciel professionnel de conception mécanique 3D développé par Autodesk Inc. il est destiné principalement aux ingénieurs mécaniciens, dessinateurs industriels et techniciens pour concevoir, visualiser, simuler et documenter des produits manufactures.

III.6. Avantages d'Autodesk Inventor :

◆ **Intégration avec d'autres logiciels Autodesk :** s'intègre facilement avec d'autres logiciels AUTODESK , comme AUTOCAD , Revit et Fusion 360.

◆ **Modélisation paramétrique avancée :** offre des outils de modélisation paramétrique qui permettent de créer des modèles adaptables.

◆ **Outils de simulation intégrés :** propose des outils de simulation intégrés qui permettent d'effectuer des analyses de contrainte, de mouvement et de dynamique.

◆ **Conception de tôlerie :** dispose d'outils dédiés pour la conception de tôlerie, ce qui facilite la création de pièces en tôle et leur développement pour la fabrication.

◆ **Gestion de données :** peut être utilisé avec Autodesk Vault pour la gestion des données de conception.

◆ **Assemblage complexe :** est particulièrement efficace pour gérer des assemblages complexes, ce qui est essentiel pour les projets d'ingénierie nécessitant une coordination précise entre de nombreux composants.

III.7. Schématisation d'un Transformateur Réel avec Autodesk Inventor :

III.7.1. Étapes de conception :

◆ **Etude préliminaire et cahier de charge :** définition du type (monophasé ou triphasé), caractéristiques électriques, dimensions approximatives, normes applicables.

◆ **Modélisation des composants :** Dans Inventor création séparée du noyau, des enroulements, de la cuve, des accessoires en utilisant l'environnement (Part .ipt)

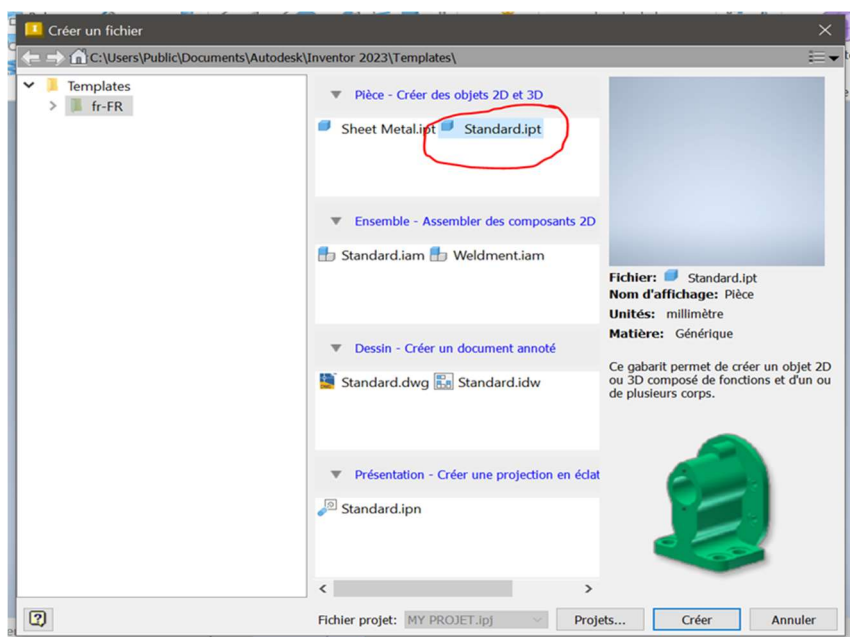


Figure (III.4) : Modélisation des composants

◆ **Assemblage** : insertion des pièces dans l’environnement d’assemblage, placement précis, vérification des interférences.

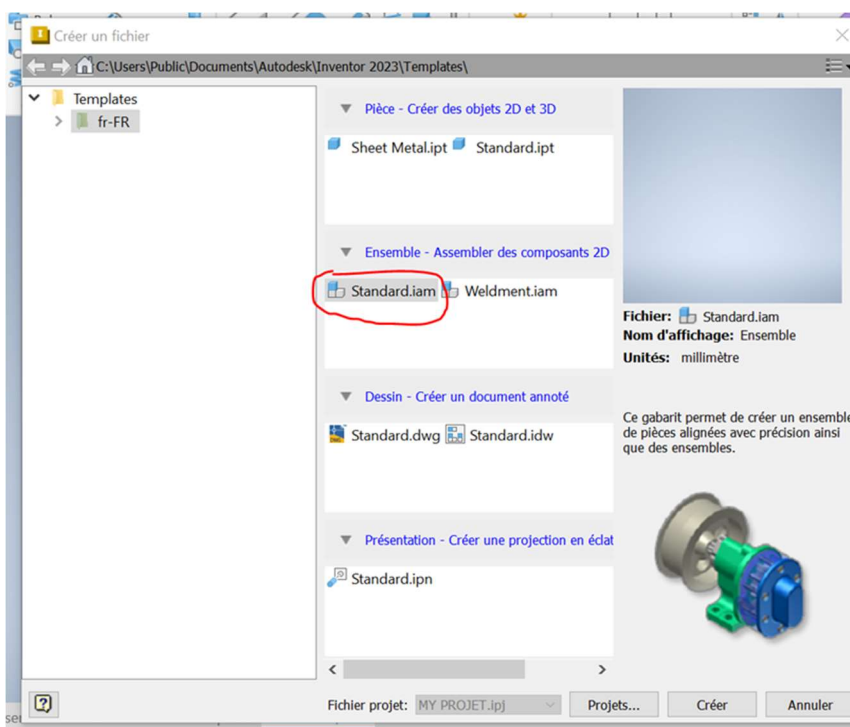


Figure (III.5) : Assemblage

◆ **Simulation et vérification (optionnel)** : analyses mécaniques, thermiques, d’assemblage.

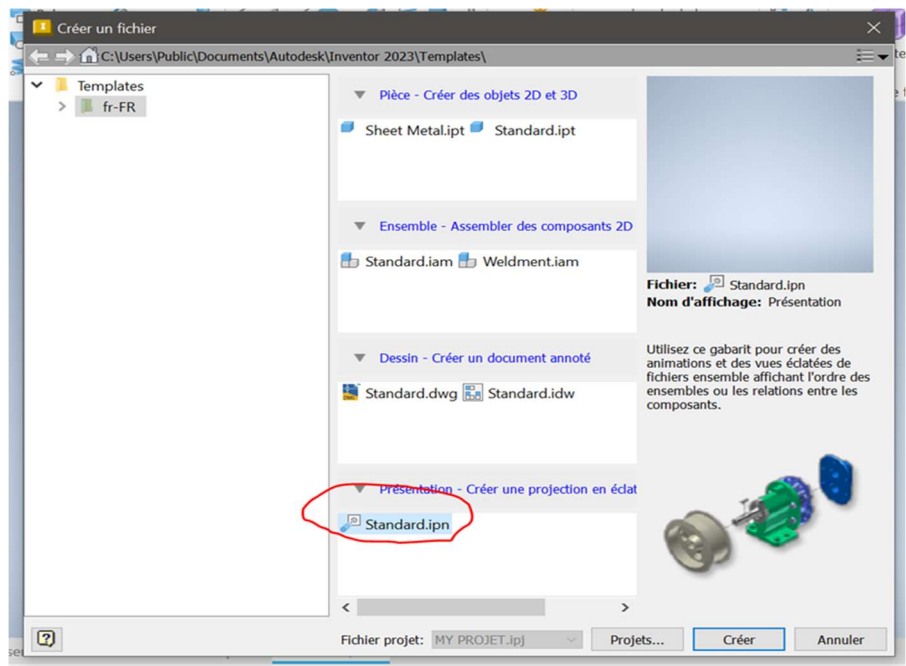


Figure (III.6) : Simulation et vérification

◆ Mise en plan : génération des vues 2D, annotations, nomenclature.

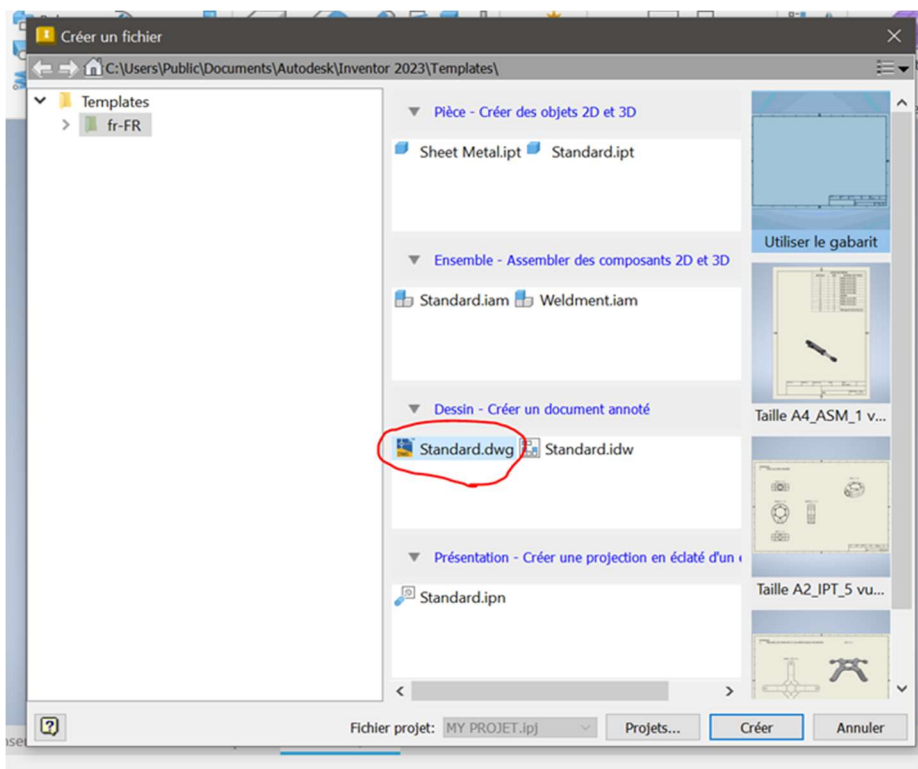


Figure (III.7) : Mise en plan

◆ Exportation : formats pour fabrication (STEP, IGES, STL).

III.7.2. Intérêts et Avantages du Modèle 3D :

Visualisation réaliste :

- ◆ Permet de voir virtuellement le transformateur sous tous les angles.
- ◆ Aide à valider le design avant fabrication (formes, dimensions, connexions...).
- ◆ Simule les assemblages complexes (noyau, enroulements, cuve, accessoires...).

Conception précise et personnalisable :

- ◆ Facilite l'intégration de caractéristiques spécifiques (puissance, tension, type de refroidissement...).
- ◆ Autorise des modifications rapides : ajustement des dimensions, remplacement de composants.

Vérification de l'assemblage :

- ◆ Identification des interférences mécaniques (entre noyau, enroulements, cuve...).
- ◆ Contrôle des jeux de montage, accès aux composants, maintenance possible.

Génération automatique de la documentation :

- ◆ Plans 2D avec cotation automatique, nomenclature (BOM).
- ◆ Export facile en formats standards : PDF, DWG, DXF.

Réutilisation des composants :

- ◆ Bibliothèques de pièces standards (vis, brides, bornes, etc.).
- ◆ Réutilisation d'un modèle d'enroulement ou d'un noyau dans plusieurs projets.

Aide à la maintenance et au montage :

- ◆ Vue éclatée pour identifier les pièces et faciliter l'assemblage.
- ◆ Création de manuels techniques illustrés à partir du modèle.

Simulation et analyse :

- ◆ Simulation d'efforts mécaniques (poids du noyau, vibrations...).
- ◆ Possibilité de faire des analyses thermiques avec des modules complémentaires.
- ◆ Contrôle de la résistance des fixations, tôles, cuve, etc.

III.7.3. Vue détaillée en 3D de chaque composant avec explications :

Voici une vue détaillée des principaux composants d'un transformateur réel, modélisables en 3D avec Autodesk Inventor, accompagnée d'une explication fonctionnelle pour chaque élément.

L'objectif est de comprendre quoi modéliser, comment le modéliser, et à quoi sert chaque pièce dans le fonctionnement du transformateur.

III.7.3.a. Le Circuit magnétique :**Modélisation dans Inventor :**

Créer une pièce en "E" ou noyau en colonne.

- ◆ Utiliser une extrusion de section de tôle (épaisseur fine, ex. 0,27 mm).
- ◆ Utiliser pattern pour simuler l'empilement des tôles magnétiques.
- ◆ Matériau : acier au silicium.

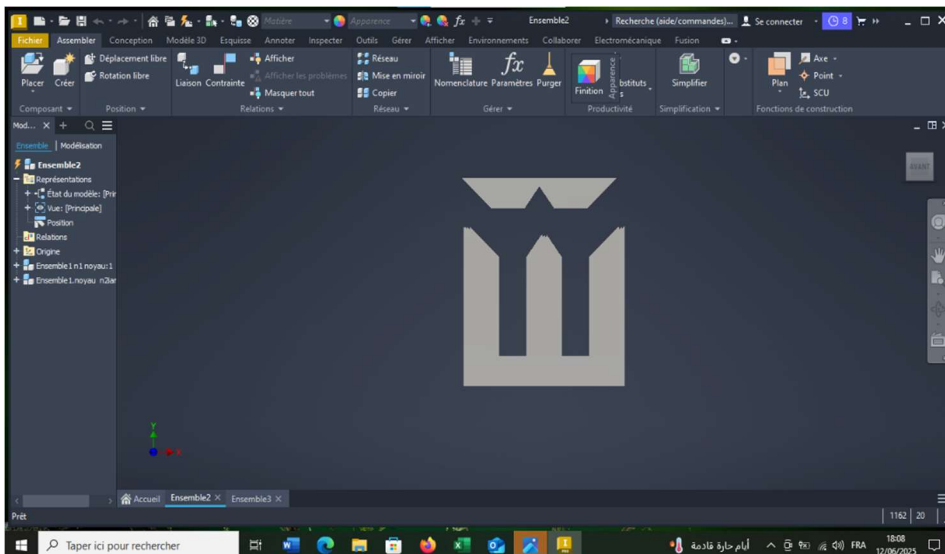


Figure (III.8) : le noyau

III.7.3.b. Les Enroulements :

Modélisation dans Inventor :

- ◆ Utiliser des tours hélicoïdaux ou des volumes pleins simulant les spires.
- ◆ Forme rectangulaire ou cylindrique selon le type de transformateur.
- ◆ Modéliser les spires ou la masse compacte, selon le niveau de détail.
- ◆ Matériau : cuivre (ou aluminium).

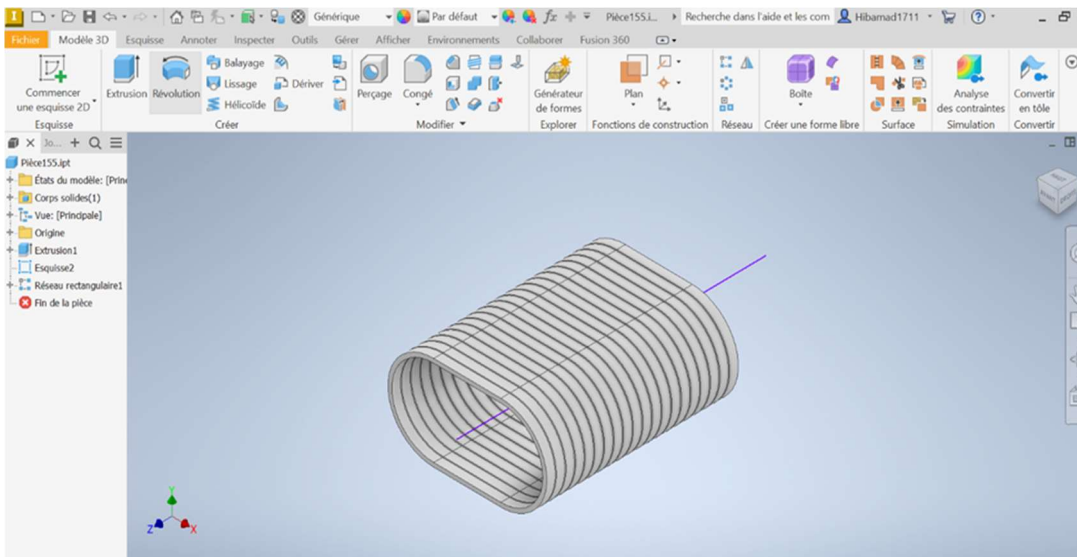


Figure (III.9) : la bobine secondaire

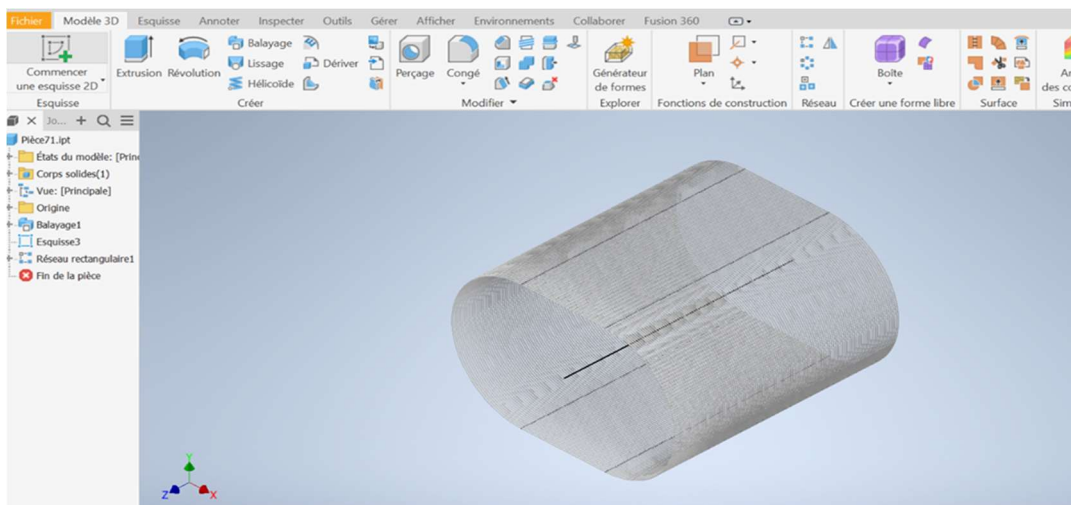


Figure (III.10) : la bobine primaire

III.7.3.c. La cuve :

Modélisation dans Inventor :

- ◆ Forme rectangulaire ou cylindrique.
- ◆ Ajouter les ouvertures : couvercle, entrées/sorties d'air ou d'huile.
- ◆ Ajouter les pattes de fixation, les joints, les soudures.
- ◆ Matériau : acier (souvent peint ou galvanisé).

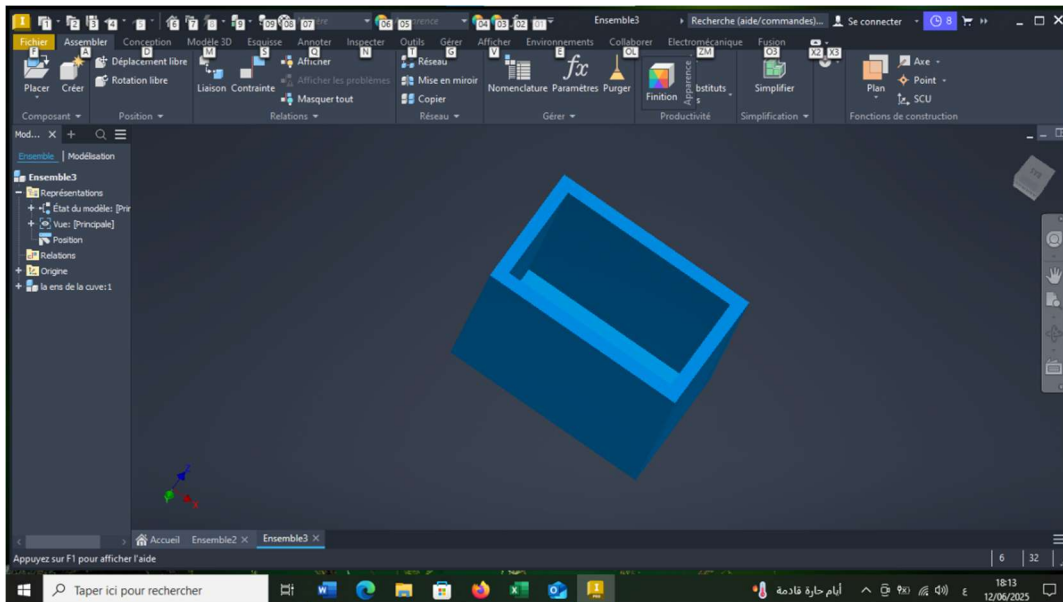


Figure (III.11) : la cuve

III.7.3.d. Les radiateurs ou ailettes de refroidissement :

Modélisation dans Inventor :

- ◆ Série d'ailettes parallèles fixées à la cuve.
- ◆ Utiliser pattern linéaire pour dupliquer les ailettes.
- ◆ Ajouter les tuyauteries de circulation d'huile si nécessaire.

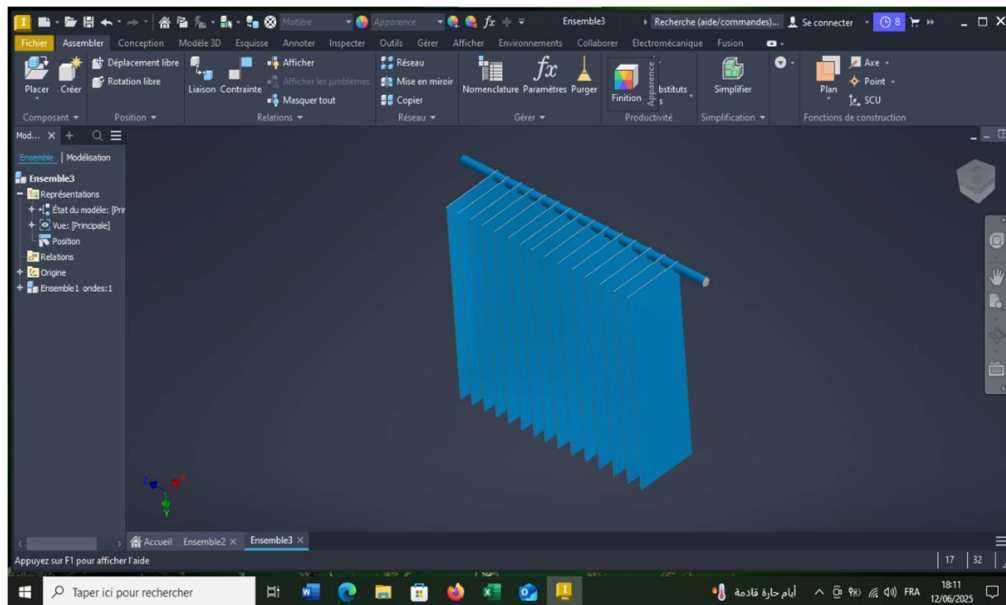


Figure (III.12) : les ondulations

III.7.3.e. Traversées isolantes :

Modélisation dans Inventor :

- ◆ Cylindres avec écrous, isolateurs (en céramique ou composite).
- ◆ nclure les connexions filetées si besoin.
- ◆ Disposer correctement sur le couvercle ou les parois de la cuve.

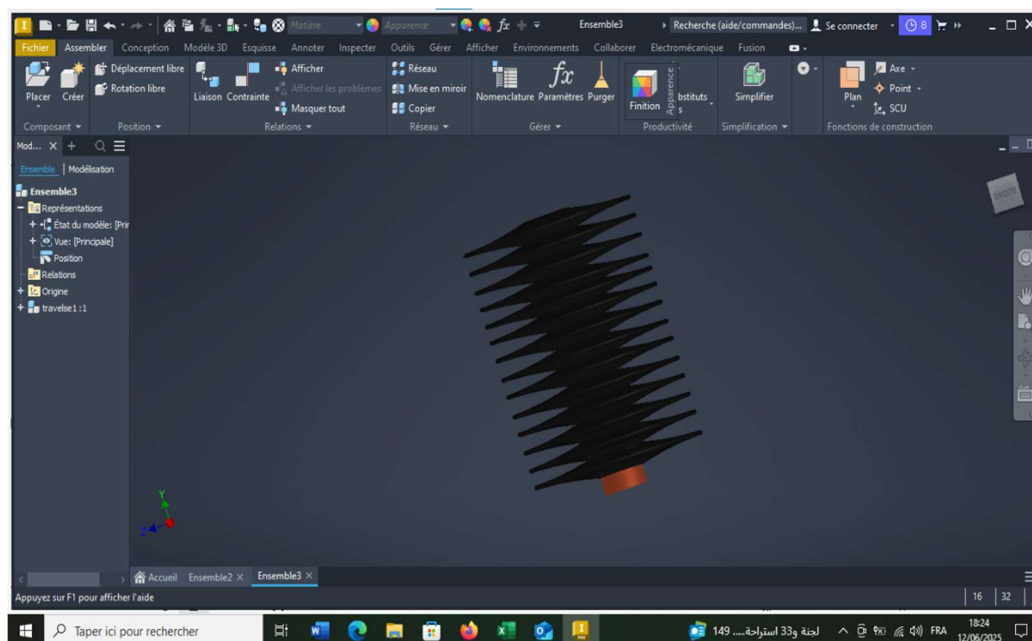


Figure (III.13) : le traverse

III.7.3.f. Le Couvercle :

Modélisation dans Inventor :

- ◆ Plaque rectangulaire ou circulaire, avec trous de fixation.
- ◆ Ajouter les orifices pour les accessoires

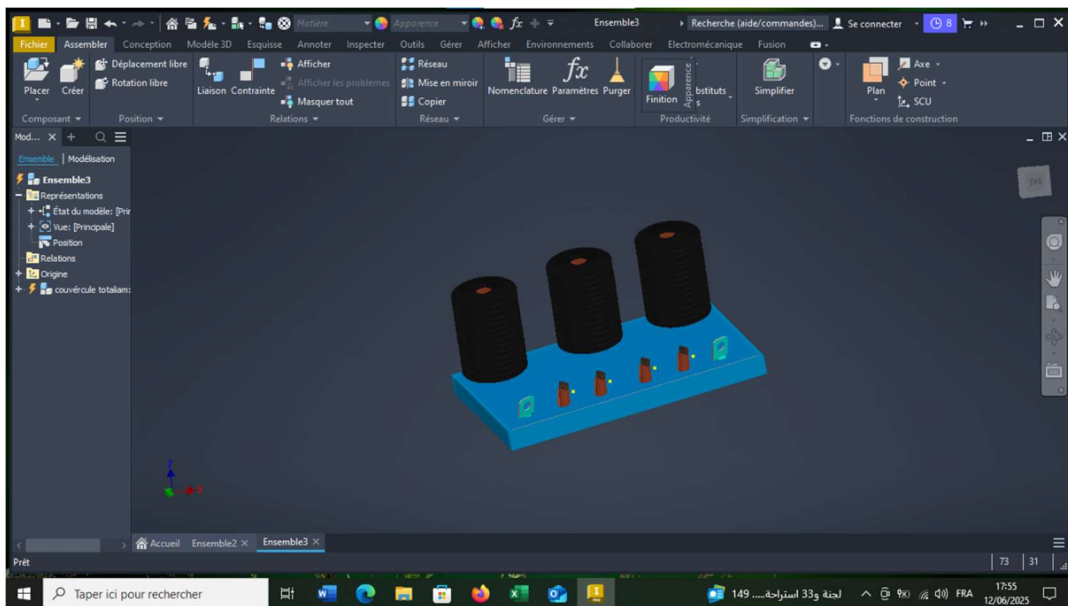


Figure (III.14) : la Couvercle

III.8. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons appris l'importance de la modélisation et ses avantages dans la conception, nous avons également appris les caractéristiques et les fonctionnalités du logiciel Autodesk Inventor qui nous ont fait choisir comme logiciel de modélisation et de savoir les différentes étapes de modélisation des différents composants du transformateur et l'assemblage entre ses composants et prendre des visualisations explicatives avant de procéder à la phase de fabrication.

Chapitre IV :

Conception et réalisation d'un transformateur de distribution

160 KVA et 30/0,4 KV

IV.1. Introduction :

La conception d'un transformateur électrique passe par plusieurs étapes fondamentales, allant du calcul théorique précis jusqu'à la modélisation 3D, puis à la fabrication. Dans ce chapitre, nous abordons trois points principaux : Réalisation des calculs nécessaires à la construction d'un transformateur à partir d'un cahier des charges. Conception de transformateur à l'aide d'autodesk inventor. fabrication du transformateur au sein de l'atelier WINDNG INDUSTRIE

IV.2. Réalisation des calculs nécessaires à la construction d'un transformateur à partir d'un cahier des charges :

- ◆ la puissance apparent $S = 160 \text{ KVA}$.
- ◆ la tension primaire $U_1 = 30 \text{ KV}$.
- ◆ la tension secondaire $U_2 = 0,4 \text{ KV}$.

IV.2.1 Dimensionnement des bobines :

La forme de bobine utilisée dans ce transformateur est la forme ovale.

La section de fer (S_{fer}) :

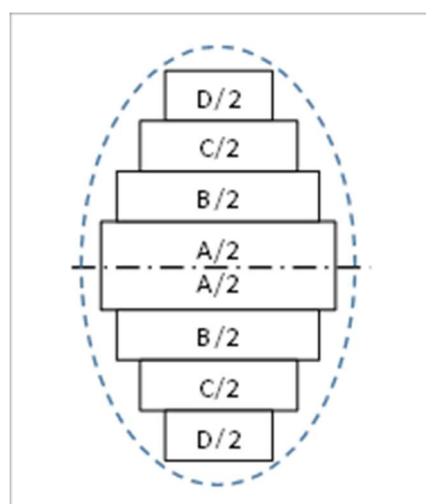


Figure (IV.1) : La forme de section de la colonne de fer

30/0,4 KV

$$\diamond S_{fer} = A+B+C+D+X_{AB}+X_{BC}+X_{CD}$$

$$\diamond A = l_{s1} \cdot L_{s1}$$

$$\diamond B = l_{s2} \cdot L_{s2}$$

$$\diamond C = l_{s3} \cdot L_{s3}$$

$$\diamond D = l_{s4} \cdot L_{s4}$$

$$\diamond X_{AB} = l_{s5} \cdot L_{s5}$$

$$\diamond X_{BC} = l_{s6} \cdot L_{s6}$$

$$\diamond X_{CD} = l_{s7} \cdot L_{s7}$$

A: section du premier gradin.

$l_{s1} = 82 \text{ mm}$: Largeur du premier gradin (valeur par le constructeur).

$L_{s1} = 100 \text{ mm}$: Longueur du premier gradin (valeur par le constructeur).

B: section du deuxième gradin.

$l_{s2} = 42 \text{ mm}$: Largeur du deuxième gradin (valeur par le constructeur).

$L_{s2} = 90 \text{ mm}$: Longueur du deuxième gradin (valeur par le constructeur).

C: section du troisième gradin.

$l_{s3} = 28 \text{ mm}$: Largeur du troisième gradin (valeur par le constructeur).

$L_{s3} = 70 \text{ mm}$: Longueur du troisième gradin (valeur par le constructeur).

D: section du quatrième gradin.

$l_{s4} = 16 \text{ mm}$: Largeur du quatrième gradin (valeur par le constructeur).

$L_{s4} = 50 \text{ mm}$: Longueur du quatrième gradin (valeur par le constructeur).

30/0,4 KV

X_{AB} : la distance supplémentaire entre la distance A et B.

$l_{s5} = 10 \text{ mm}$: Largeur supplémentaire entre la distance A et B.

$L_{s5} = 40 \text{ mm}$: Longueur supplémentaire entre la distance A et B.

X_{BC} : la distance supplémentaire entre la distance B et C.

$l_{s6} = 14 \text{ mm}$: Largeur supplémentaire entre la distance B et C.

$L_{s6} = 20 \text{ mm}$: Longueur supplémentaire entre la distance B et C.

X_{CD} : la distance supplémentaire entre la distance B et C.

$l_{s7} = 12 \text{ mm}$: Largeur supplémentaire entre la distance B et C.

$L_{s7} = 20 \text{ mm}$: Longueur supplémentaire entre la distance B et C.

$$A = 100 \times 82$$

$$A = 8200 \text{ mm}$$

$$B = 90 \times 42$$

$$B = 3780 \text{ mm}$$

$$C = 70 \times 28$$

$$C = 1960 \text{ mm}$$

$$D = 50 \times 16$$

$$D = 800 \text{ mm}$$

$$X_{AB} = 40 \times 10$$

$$X_{AB} = 400 \text{ mm}$$

$$X_{BC} = 20 \times 14$$

$$30/0,4 \text{ KV}$$

$$X_{BC} = 280 \text{ mm}$$

$$X_{CD} = 20 \times 12$$

$$X_{CD} = 240 \text{ mm}$$

IV.2.1.a. Calcul la section de fer (S_{fer}) :

$$S_{fer} = 2800 + 3780 + 1960 + 800 + 400 + 280 + 240$$

$$S_{fer} = 15660 \text{ mm}$$

IV.2.1.b. Calcul le nombre du spire primaire (N_1) :

Tension de phase primaire :

$$U_{pH} = \frac{30000}{\sqrt{3}}$$

$$U_{pH1} = 17320,5 \text{ V}$$

$$N_1 = \frac{17320,5}{6,018}$$

$$N_1 = 2879 \text{ spire}$$

IV.2.1.c. Calcul le nombre de spire secondaire (N_2) :

Tension de phase secondaire :

$$U_{pH2} = \frac{400}{\sqrt{3}}$$

$$U_{pH2} = 230,94 \text{ V}$$

$$N_2 = \frac{230,94}{6,018 \times \sqrt{3}}$$

$$N_2 = 23 \text{ spire}$$

IV.2.1.d. Calcul la Section du conducteur primaire (S_{c1}) :

30/0,4 KV

Le courant simple primaire :

$$I_1 = \frac{160000}{30000}$$

$$I_1 = 5,33 \text{ A}$$

Le courant du phase primaire :

$$I_{pH1} = \frac{5,33}{\sqrt{3}}$$

$$I_{pH1} = 3,08 \text{ A}$$

$j_d = 4.33 \text{ A/mm}^2$ (valeur de constructeur).

$$S_{c1} = \frac{3,08}{4,33}$$

$$S_{c1} = 0,711 \text{ mm}^2$$

IV.2.1.e. Calcul la Section du conducteur secondaire (S_{c2}) :**Le courant simple secondaire :**

$$I_2 = \frac{160000}{400}$$

$$I_2 = 400 \text{ A}$$

Le courant du phase secondaire :

$$I_{pH} = \frac{400}{\sqrt{3}}$$

$$I_{pH2} = 230,94 \text{ A}$$

$$S_{c2} = \frac{230,94}{4,33}$$

$$30/0,4 \text{ KV}$$

$$S_{c2} = 53,33 \text{ mm}^2$$

IV.2.1.f. Calcul la résistance du bobine primaire (R_1) :

Calcul la Diamètre moyen du spire primaire :

$$D_{my1} = 195,5 + (2 \times 2,5) + (2 \times 21) + (2 \times 14,86) + 23$$

$$D_{my1} = 295,22 \text{ mm}$$

Calcul la longueur moyenne du spire primaire :

$$L_{my1} = \pi \times 295,22$$

$$L_{my1} = 927,5 \text{ mm}$$

Calcul du longueur total du spire primaire :

$$L_{t1} = 2879 \times 927,5$$

$$L_{t1} = 2670 \text{ m}$$

la résistance primaire (R_1) :

$$R_1 = \frac{2670}{0,711} \times 1,86 \times 10^{-2}$$

$$R_1 = 69,84 \Omega$$

IV.2.1.i. Calcul la résistance de la bobine secondaire (R_2) :

Calcul le Diamètre moyen du spire secondaire :

$$D_{my2} = 195,5 + (2 \times 2,5) + 14,86$$

$$D_{my2} = 215,36 \text{ mm}$$

Calcul du longueur moyen du spire secondaire :

30/0,4 KV

$$L_{my2} = \pi \times 215,36$$

$$L_{my2} = 676,6 \text{ mm}$$

Calcul du longueur total du spire secondaire :

$$L_{t2} = 23 \times 676,6$$

$$L_{t2} = 15,562 \text{ m}$$

la résistance secondaire (R_2) :

$$R_2 = \frac{15,562}{53,33} \times 1,86 \times 10^{-2}$$

$$R_2 = 0,0054 \Omega$$

IV.2.1.j.1. Calcul du hauteur magnétique basse tension (H_{bt}) :

$$H_{bt} = N_2 \cdot L_{bc}$$

L_{bc} : longueur de la section du conducteur basse tension.

$$L_{bc} = \frac{S_{c2}}{l_{bc}} = \frac{53,33}{5} = 10,66 \text{ mm (sans isolations).}$$

longueur de la section du conducteur basse tension avec isolation égale **11 mm**.

$l_{bc} = 5 \text{ mm}$: largeur de la section du conducteur basse tension (valeur d'un constructeur).

$$H_{bt} = 23 \times 11$$

$$H_{bt} = 253 \text{ mm}$$

Calcul du hauteur de la bobine basse tension :

$$H_{b1} = (N_2 + 1) \cdot L_{bc}$$

$$H_{b1} = 24 \times 11$$

30/0,4 KV

$$H_{b1} = 264 \text{ mm}$$

IV.2.1.j.2. Calcul du Hauteur magnétique de la bobine Moyenne tension (H_{mt})

la hauteur de la bobine haute tension est inférieure à la basse tension de 0 jusqu'à 16 mm.

$$H_{mt} = H_{bt} = H_{b1} - 10$$

$$H_{mt} = 254 \text{ mm}$$

IV.2.1.j.3. Calcul Hauteur de montage des bobines (H_{m1}) :

$$H_{m1} = H_{mt} + 2 \cdot d_1$$

avec $d_1 = 25 \text{ mm}$ Pour une tension primaire de 30 kV.

$$H_{m1} = 254 + (2 \times 25)$$

$$H_{m1} = 304 \text{ mm}$$

IV.2.1.k.1. Calcul Diamètre intérieur du bobine basse tension (D_{i2}) :

Une forme rectangulaire à deux types de diamètre : grand diamètre et un petit diamètre (les bobines est un ovale).

Grand diamètre:

$$D_{ig2} = D_g + 2 \cdot a_{20}$$

$$D_g = 168 \text{ mm}$$

$$a_{20} = 5 \text{ mm}$$

$$D_{ig2} = 168 + (2 \times 5)$$

$$D_{ig2} = 178 \text{ mm}$$

Petit diamètre :

30/0,4 KV

$$D_{ip2} = D_p + 2 \cdot a_{20}$$

$$D_p = 100 \text{ mm}$$

$$D_{ip2} = 100 + (2 \times 5)$$

$$\mathbf{D_{ip2} = 110 \text{ mm}}$$

IV.2.1.k.2. Calcul Diamètre extérieur du bobine basse tension (D_{e2}) :

Grand diamètre:

$$D_{eg} = D_{ig2} + 2 \cdot a_2$$

$$a_2 = 0,55 \times \sqrt[4]{53,33}$$

$$\mathbf{a_2 = 14,86 \text{ mm}}$$

$$D_{eg2} = 178 + (2 \times 14,86)$$

$$\mathbf{D_{eg2} = 207,72 \text{ mm}}$$

Petit diamètre :

$$D_{ep2} = D_{ip2} + 2 \cdot a_2$$

$$D_{ep2} = 110 + (2 \times 14,86)$$

$$\mathbf{D_{ep2} = 139,72 \text{ mm}}$$

IV.2.1.k.3. Calcul Diamètre intérieur du bobine moyenne tension (D_{i1}) :

Grand diameter :

$$D_{ig1} = D_{eg2} + 2 \cdot a_{12}$$

$$a_{12} = 21 \text{ mm}$$

$$D_{ig1} = 207,72 + (2 \times 21)$$

30/0,4 KV

$$D_{ig1} = 249,72 \text{ mm}$$

petit diameter:

$$D_{ip} = D_{ep2} + 2a_{12}$$

$$D_{ip} = 139,72 + (2 \times 21)$$

$$D_{ip1} = 181,72 \text{ mm}$$

IV.2.1.k.4. Calcul Diamètre extérieur du bobine moyenne tension (D_{e1}) :

Grand diamètre :

$$D_{eg1} = D_{ig1} + 2 \cdot a_1$$

$$a_1 = 23 \text{ mm}$$

$$D_{eg1} = 249,72 + (2 \times 23)$$

$$D_{eg1} = 295,72 \text{ mm}$$

Petit diamètre :

$$D_{ep1} = D_{ip1} + 2 \cdot a_1$$

$$D_{ep1} = 181,72 + (2 \times 23)$$

$$D_{ep1} = 227,72 \text{ mm}$$

IV.2.2. Dimensionnement du noyau :

IV.2.2.a. Calcul la Longueur du fenêtre (L_{fen}) :

$$L_{fen} = D_{ep1} + a_{11} - B_{s1}$$

$$L_{fen} = 227,72 + 17 - 100$$

$$L_{fen} = 144,72 \text{ mm}$$

IV.2.2.b. Calcul la Hauteur du fenêtre (H_{fen}) :

$$H_{fen}=304+(15 + 15)$$

$$H_{fen}=334 \text{ mm}$$

IV.2.2.c. Calcul la distance entre axe colonne (E_{cl}) :

$$E_{cl}= 144,72 + 100$$

$$E_{cl}=244,72 \text{ mm}$$

IV.2.2.d. Calcul la Longueur du noyau (L_{no}) :

$$L_{no}= (244,72 \times 2) + 100$$

$$L_{no}=589,44 \text{ mm}$$

IV.2.2.d. Calcul la Hauteur du noyau (H_{no}) :

$$H_{no}= (100 \times 2) + 334$$

$$H_{no}=534 \text{ mm}$$

IV.2.3. Dimensionnement de la cuve :**IV.2.3.a.1 Calcul la masse du noyau (G_n) :****Calcul la masse total des coins (G_{n1}) :**

$$G_{n1}= 15660 \times 10^{-6} \times 7,65 \times 6 \times 100$$

$$G_{n1}=71,9 \text{ Kg}$$

Calcul la masse total des culasses (G_{n2}) :

$$G_{n2}= 15660 \times 10^{-6} \times 7,65 \times 2 \times 144,72 \times 4$$

30/0,4 KV

$$G_{n2}=138,71 \text{ Kg}$$

Calcul la masse total des colonnes (G_{n3}) :

$$G_{n3}= 15660 \times 10^{-6} \times 7,65 \times 3 \times 334$$

$$G_{n3}=120 \text{ Kg}$$

La masse totale du noyau :

$$G_n= 71,9 + 138,71 + 120$$

$$G_n=330,61 \text{ Kg}$$

IV.2.3.a.2 Calcul La masse du cuivre (G_{cut}) :

Calcul la masse de la cuivre primaire (G_{cu1}) :

$$G_{cu1}= 2670 \times 8,9 \times 0,711 \times 10^{-3}$$

$$G_{cu1}=16,9 \text{ Kg}$$

Calcul la masse de la cuivre secondaire (G_{cu2}) :

$$G_{cu2}= 15,562 \times 8,9 \times 53,33 \times 10^{-3}$$

$$G_{cu2}=7,4 \text{ Kg}$$

La masse totale du cuivre :

$$G_{cut}= (16,9 + 7,4) \times 3$$

$$G_{cut}=72,9 \text{ Kg}$$

IV.2.3.b. Calcul du volume de la partie décuvable (partie active) :

$$V_{pd}= \left(\frac{330,61}{7,65} + \frac{72,9}{8,9} \right) \times 1,2$$

$$30/0,4 \text{ KV}$$

$$V_{pd}=61,7 \text{ dm}^3$$

IV.2.3.c. Calcul la Volume de la cuve sans ondulations (V_{sc}) :

Calcul du longueur de la cuve (L_{cv}) :

$$L_{cv} = (2 \times 244,72) + 227,72 + (2 \times 25)$$

$$L_{cv} = 767 \text{ mm}$$

Calcul du longueur de la cuve (l_{cv}) :

$$l_{cv} = 295,72 + (2 \times 25) + 25$$

$$l_{cv} = 371 \text{ mm}$$

Calcul Hauteur du cuve (H_{cv}) :

$$H_{cv} = 534 + 155 + 30$$

$$H_{cv} = 719 \text{ mm}$$

Volume du cuve sans ondulations (V_{sc}) :

$$V_{sc} = 767 \times 371 \times 719 \times 10^{-6}$$

$$V_{sc} = 204,6 \text{ dm}^3$$

IV.2.3.d. Calcul la Volume de la cuve des ondulations (V_{od}) :

Calcul le Nombre d'ondulation côté longueur de la cuve (N_{nd1}) :

$$N_{nd1} = \frac{767 - (2 \times 45)}{40}$$

$$N_{nd1} = 16 \text{ ondes}$$

Calcul le Nombre d'ondulation côté largeur de la cuve (N_{nd2}) :

30/0,4 KV

$$N_{nd2} = \frac{371 \cdot (2 \times 45)}{40}$$

$$N_{nd2} = 8 \text{ ondes}$$

Calcul le nombre d'ondulation (N_{nd}) :

$$N_{nd} = (16 + 8) \times 2$$

$$N_{nd} = 48 \text{ ondes}$$

Volume d'ondulation (V_{nd}) :

$$V_{nd} = 170 \times 4 \times 500 \times 10^{-6}$$

$$V_{nd} = 0,34 \text{ dm}^3$$

Volume des ondulations de la cuve (V_{od}) :

$$V_{od} = 0,34 \times 48$$

$$V_{od} = 16,32 \text{ dm}^3$$

IV.2.3.e. Calcul du Volume de l'huile (V_l) :

$$V_l = 204,6 + 16,32 - 61,7$$

$$V_l = 159,22 \text{ dm}^3$$

IV.2.4. Les pertes à vide (P_{avid}) :

$$P_{avid} = k_{pv} \cdot G_n \cdot \sigma_{1,5}$$

$\sigma_{1,5}$: Pertes spécifiques pour une induction de 1,5T, sa valeur est évaluée de 0,97w/kg.

k_{pv} : Coefficient correcteur des pertes spécifique pour une induction différente de 1,5T. Sa valeur est donnée par le tableau suivant :

B_c [T]	k_{pv}
$0,5 \leq B_c \leq 1,1$	$0,413 \cdot B_c^2$
$1,1 \leq B_c \leq 1,5$	$0,0758 \cdot e^{1,72 \cdot B_c}$
$1,5 \leq B_c \leq 1,8$	$0,0536 \cdot e^{1,95 \cdot B_c}$
$1,8 \leq B_c \leq 2$	$0,01126 \cdot e^{2,81 \cdot B_c}$

Tableau (IV.1) : la donnée de Coefficient correcteur des pertes spécifiques.

$$k_{pv} = 0,0536 \cdot e^{1,95 \times 1,73}$$

$$k_{pv} = 1,56$$

Calcul les pertes à vide (P_{avid}) :

$$P_{avid} = 1,56 \times 330,61 \times 0,97$$

$$P_{avid} = 529,14 \text{ w}$$

IV.3. Comparaison des résultats avec les transformateurs l'usine AZAZGA (160KVA et 30/0,4KV) et les normes sonelgaz :

comparaison	Résultats	Transformateurs l'usine AZAZGA	Norms Sonelgaz
volume de l'huile	159,22 dm^3	205,85 dm^3	—
Perte a vide	529,14	530 w	530 w

Tableau (IV.2) : Comparaison entre les trois résultats

IV.4. Elaboration du modèle 3D sur Autodesk inventor et fabrication du transformateur au sein de l'atelier WINDNG INDUSTRIE :

IV.4.1. Circuit magnétique :

Modèle 3D sur Autodesk inventor :



Figure (IV.2) : le noyau par Autodesk inventor

Fabrication :



Figure (IV.3) : fabrication du noyau

IV.4.2. Les bobines :

Primaire :

Modèle 3D sur Autodesk inventor :

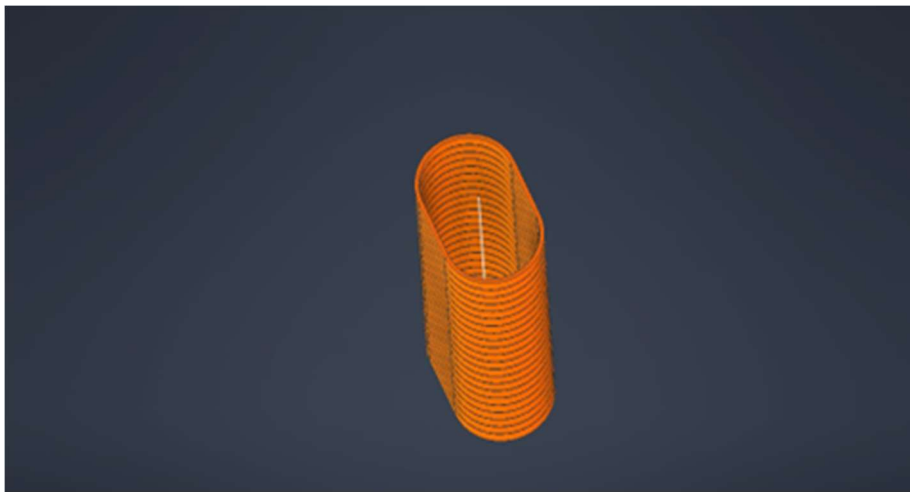


Figure (IV.4) : la bobine primaire par Autodesk inventor

Fabrication :



Figure (IV.5) : fabrication de la bobine primaire

Secondaire :

Modèle 3D sur Autodesk inventor :

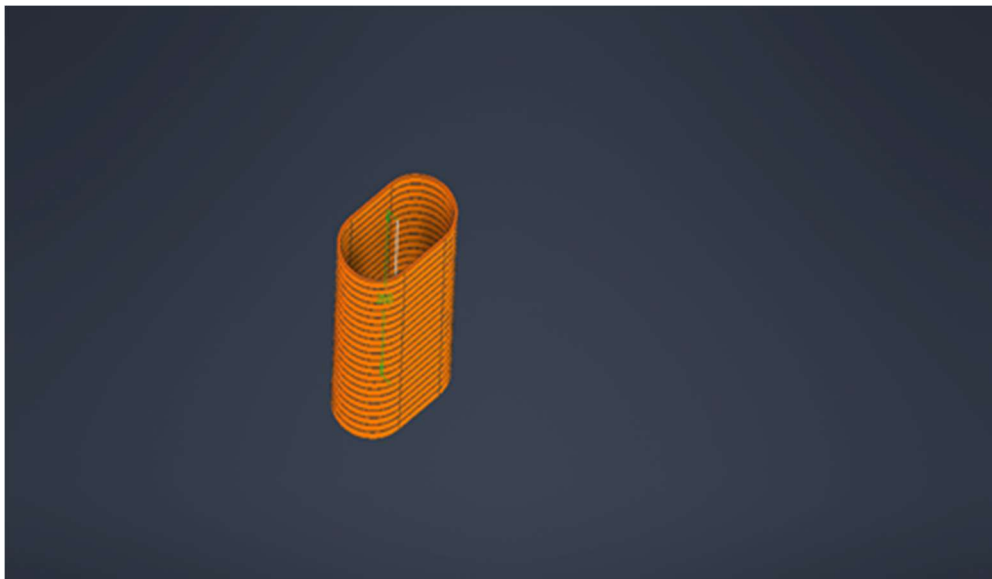


Figure (IV.6) : la bobine secondaire par Autodesk inventor

Fabrication :



Figure (IV.7) : fabrication de la bobine secondaire

IV.4.3. Partie active :

Modèle 3D sur Autodesk inventor :



Figure (IV.8) : la partie active par Autodesk inventor

Fabrication :



Figure (IV.9) : partié active

IV.4.4. la cuve :

Modèle 3D sur Autodesk inventor :

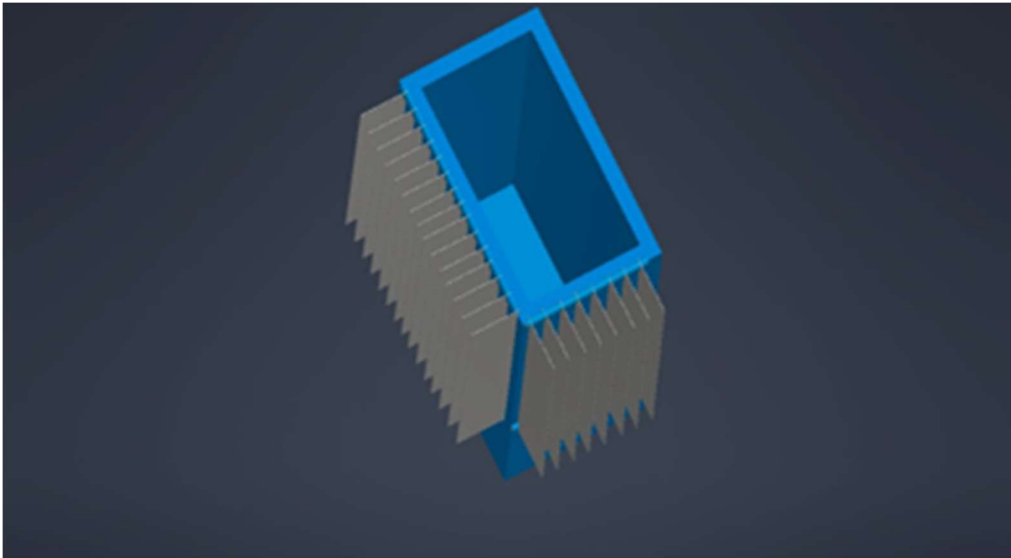


Figure (IV.10) : la cuve par Autodesk inventor

Fabrication :



Figure (IV.11) : fabrication de la cuve

IV.4.5. La covercule :

Modèle 3D sur Autodesk inventor :



Figure (IV.12) : la couvercle par Autodesk inventor

Fabrication:



Figure (IV.13) : fabrication de la covercule

IV.4.6. Transformateur complètement :

Modèle 3D sur Autodesk inventor :

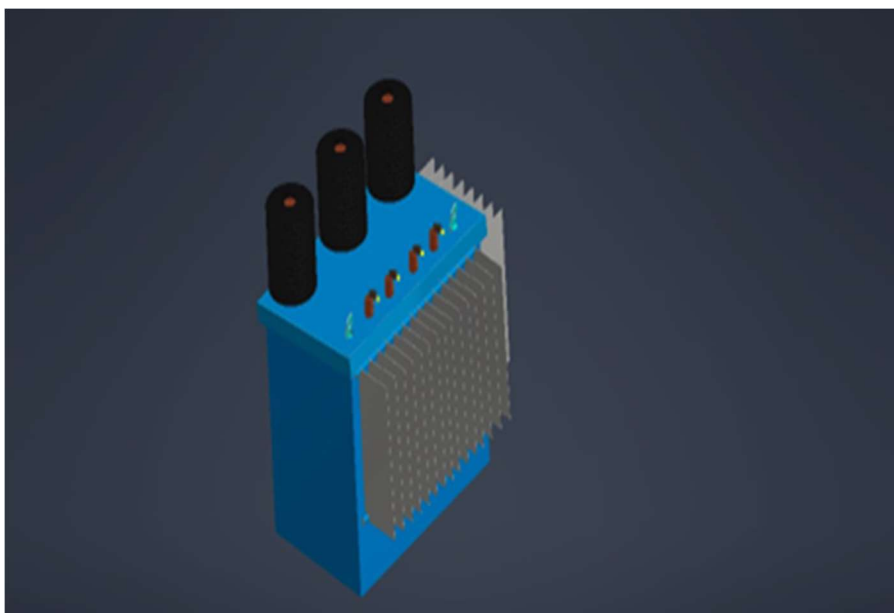


Figure (IV.14) : le transformateur par Autodesk inventor

Fabrication :



Figure (IV.13) : fabrication de transformateur

IV.5. Tests de performance et validation du modèle conçu :

	WINDING INDUSTRIE		ISO 9001 : 2015 Management System www.tuv.com ID 910865857
	PROCES-VERBAL DES ESSAIS DE TRANSFORMATEUR		

FQ03 Pr. TETN-11

Client	/	Marque	WINDING INDUSTRIE		
Code d'affaire	/	Type	160/30/0.4		
N° de série	/	Norme	CEI 76		
Année de fabrication	2025	Couplage	Yzn11	Mode de refroidissement	ONAN
Puissance (kVA)	160	Courant I ₁ (A)	3.08	Caractéristiques à 75°C (Garanties)	
Tension U ₁ (V)	30000	Courant I ₂ (A)	230.94	W ₀ (W)	530
Tension U ₂ (V)	400	Matière des enroulements	Cuivre	W _{cc} (W)	3330
U _{cc} (%) à 75°C	4.13			U _{cc} (%)	4.5

1- Rapport de transformation

Positions	1	2	3	4	5	
Valeurs théoriques	136.40	133.15	129.90	126.66	123.41	
Valeurs mesurées	Ph ₁	136.41	133.15	129.88	126.64	123.41
	Ph ₂	136.39	133.14	129.90	126.67	123.41
	Ph ₃	136.42	133.14	129.89	126.67	123.41

2- Mesure des résistances à une Temp. 32 °C

Enroulements	R (Ohm)	
BT	n-a	0.008122
	n-b	0.008122
	n-c	0.008122
MT	A-B	104.116924
	B-C	104.119900
	A-C	104.120938

3- Essai du diélectrique liquide

Type du diélectrique liquide	
Huile minérale NYNAS Nytro Libra	
Tension de claquage (kV)	66
Rigidité diélectrique (kV/cm)	264

4- Essais à vide

Position du commutateur	W ₀ garanti (W)	I ₀ garanti (%)	U (V)	I ₀ (A)	W ₀ (W)	I ₀ (%)
3	530	3.9	400	8.13	498	3.52

5- Essai de court circuit

Position du commutateur	U _{cc} garanti (%)	W _{cu} garanti (W)	T (°C)	U _{cc} (V)	I (A)	W _{cu} (W)	U _{cc} (%)
3	4.5	3330	32	1231	3.08	2887	4.10
Valeur ramenée à 75°C						2972	4.13

6- Essais diélectriques

Essai par tension induite	à	150 Hz	U (V)	800	t=	40 sec
Essai par tension appliqué coté MT	à	50 Hz	U (kV)	70	t=	60 sec
Essai par tension appliqué coté BT	à	50 Hz	U (kV)	10	t=	60 sec

Le Client

Visa R.CQ

La Direction

08/06/2025

IV.6. Conclusion :

Ce chapitre montre que la combinaison entre modélisation 3D et réalité industrielle constitue une voie incontournable pour concevoir des transformateurs modernes, répondant aux normes de qualité, de performance et d'optimisation énergétique exigées par l'industrie actuelle.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GÉNÉRALE

Le cout et l'efficacité sont deux facteurs clés dans un transformateur que tous les concepteurs des transformateurs recherchent, Ce travail a été réalisé dans le but de concevoir un transformateur 160 KVA et 30/0,4 KV avec le cout le plus bas et le rendement le plus élevé.

A la fin de cette étude, il a été constaté que la forme de la bobine affecte la forme de la cuve de transformateur, ce qui affecte le volume de l'huile, plus le volume de la cuve est grande, plus le volume de l'huile est grand, ainsi augmenté le cout du transformateur.

La transition d'une forme de bobine cylindrique à une forme ovale a contribué à une réduction du volume de la cuve, ce qui a entraîné une réduction du volume d'huile et donc une amélioration du cout du transformateur, ainsi que la bonne sélection des matériaux pour le noyau et la bobine a augmenté les performances du transformateur en réduisant les pertes.

Nous concluons que la bonne sélection des matériaux et la sélection de la forme appropriée de la bobine et du noyau contribuent à améliorer les performances et le cout du transformateur.

Ce travail nous a permis de comprendre les problèmes auxquels est confrontée le le constructeur, y compris les pertes de fer et la conception parfaite pour le noyau, la bobines et le cuve.

Ce dont nous avons besoin à l'avenir, c'est de trouver la relation mathématique entre la forme cylindrique et la forme ovale de la bobine.

Le stage pratique que nous avons fait à l'usine windng industrie, nous a permis d'avoir plus d'informations sur les transformateurs.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] ZEGHIB OKBA : "Etude et caractérisation d'un transformateur de puissance vis-à-vis aux signaux non sinusoïdaux et charges non linéaires", Mémoire de magister, département d'électrotechnique, Université de Mohamed Khider de Biskra, 03 Juin 2015.
- [2] REFFAS Omar : "Amélioration de l'efficacité d'une installation de compensation d'énergie réactive", Mémoire de Doctorat, département d'électromécanique, Université de Badji Mokhtar de Annaba, 23 décembre 2020.
- [3] MEZARI Naouel : "Diagnostic des transformateurs de puissances", Mémoire de magister, département d'électrotechnique, Université de Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, Juillet 2011.
- [4] AZIZI Houssem : "Conception des transformateurs Electriques chargeur de batterie 220V/ 12V – 24V", Mémoire de master, département de génie électrique, Mohamed Khider de Biskra, juin 2018.
- [5] Dintzer, Thierry : "Influence d'entrefer à base de ferrites sur l'effet self-inductif dans un circuit magnétique : Application à basse fréquence", Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur (Strasbourg) (1971-2008), 2002.
- [6] S. KHEMRI, L. BESSEGHIR : "Protection des transformateurs MT/BT contre les surtensions de foudre", Mémoire de master academique, département Génie Electrique, Université de Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou. 03 juillet 2014.
- [7] ZELLAGUI Mohamed : "Etude des protections des réseaux électriques MT (30 & 10 kv)", Mémoire de magister, département d'électrotechnique, université de Constantine, Juillet 2010.
- [8] L. Samiha, M. Djouher : "Modélisation dynamique d'un transformateur", Mémoire de Master Professionnel, Université de Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou. Juillet 2011.
- [9] BENABDELHADI Mohammed Ali : "Etude des protection des transformateurs de puissance", Mémoire de master, Université de Ghardaïa. Juillet 2021.
- [10] M. Maarouf, M. Benchorfi Fatima : "Optimisation du système d'isolation d'un transformateur électrique de traction", Mémoire de Master, département d'électrotechnique, Université de Ain Temouchent, Juillet 2021.

[11] Deck, Sébastien : "Simulation numérique des charges latérales instationnaires sur des configurations de lanceur", Thèse de doctorat, Diss. Orléans, 2002.

[12] M. Nassraddine, M. Hichem : "protection d'un transformateur de poste HT/BT", Mémoire de master, département Génie électrique, Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent, 2016.

[13] Daas, Abdelhakim : "amélioration de la protection contre les surcharges atmosphériques", Mémoire de magister, département d'électrotechnique, Université Badji Mokhtar de Annaba, 2004.

[14] G. Djebali, B. Khalid : "Etude du transformateur de puissance en régime impulsional", Mémoire de master, Génie électrique, Université de Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, septembre 2015.

[15] EKE. Samuel : "Stratégie d'Évaluation de l'état des transformateurs : Esquisse de Solutions pour la Gestion Intégrée des Transformateurs Vieillissants", these de doctorat, L'universite de lyon, Juillet 2018.

[16] R.Fethi, B. Mokhtar : "Etude d'un transformateur industriel", Mémoire de master, Département Maintenance en instrumentation, Université de Mohamed Ben Ahmed d'Oran 2, 2022.

[17] CH. SALMA, O.S. DJAFAR : "Modélisation 2-D par Eléments finis des transformateurs de distribution par couplage fort Magnétique-Circuit Electrique et Magnétique-Densité de courant", Mémoire de master, département d'électrotechnique, Université de Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, Juillet 2009.

[18] A. Beneddine, F. Ben Mamer : "Etude des essais normalisés des transformateurs de puissance MT/BT ", Mémoire de master professionnel, département d'électrotechnique, Université de Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, Juillet 2016.

[19] A. Mohamed, T. Ahmed : "Simulation d'un transformateur monophasé en régime transitoire par le logiciel COMSOL-Multiphysics", Mémoire de master, département d'électrotechnique, Université de Mohamed Khider de Biskra, juin 2022.

[20] Caron, Jean-Pierre, and Jean-Paul Hautier : "Systèmes électrotechniques: applications industrielles", boock, Vol. 11. Editions Technip, 1999.

[21] N. Berger : "Liquides isolants en électrotechnique – Caractéristiques des produits", Techniques de l'Ingénieur, Traité de génie électrique, D2471, Novembre 2002.

[22] Norme CEI 60296 : "Fluides pour applications électrotechniques – Huiles minérales isolantes neuves pour transformateurs et appareils de connexion", Novembre 2003.

[23] Norme CEI 60422 : "Lignes directives de la maintenance et de la surveillance des huiles minérales isolantes en service dans les matériels électriques", Octobre 2005.

[24] M.O. Ait Hamou, H. Adjoud : "Calcul d'un transformateur Leblanc 800 kVA, 10 kV / 2,73 kV", diplôme d'Ingénieur, département d'électrotechnique, Université de Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 2008.

[25] A.L. Chafaa, A. Samir : "Dimensionnement et calcul de courant de court circuit d'un transformateur triphasé 100kVA, 30kV/0.4kV", diplôme d'Ingénieur, département d'électrotechnique, Université de Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 2013.

[26] A. Sadi, S. Fodil : "Optimisation de la construction d'un transformateur de puissance triphasé moyenne tension-moyenne tension fabriqué par Electro-Industries", Mémoire de master professionnel, département d'électrotechnique, Université de Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, Juillet 2015.

ملخص

لا يقتصر دور المحول الكهربائي في نقل الطاقة الكهربائية فقط، بل يتعدى دوره الى تشغيل العديد من الأنظمة الكهربائية، وقد دفعت هذه المزايا التي يتمتع بها المحول الشركات المصنعة إلى إتخاذ المبادرة لتحسينه من حيث الأداء و التكلفة.

مهمتنا في هذا المشروع تحسين أداء وتكلفة محول طاقة بقدرة 160 كيلو فولت أمبير و بجهد 30/0,4 كيلو فولت، يتضمن هذا التحسين على وجه الخصوص الجزء النشط (النواة و الملف)

لقد قمنا بحساب الأبعاد المختلفة للمحول بالنسبة للنواة والملف و الخزان بناء على دفتر الشروط، وباستخدام برنامج أتوديسك أنفتر قمنا بتصميم المحول وفقا للحسابات، ثم قمنا بإنشاء المحول في مصنع ويندينق أندستري.

Résumé

Le rôle du transformateur électrique ne se limite pas à la transmission de l'énergie électrique, mais son rôle s'étend au fonctionnement de nombreux systèmes électriques, ces avantages du transformateur ont conduit les fabricants à prendre l'initiative de l'améliorer en termes de performances et de cout.

Notre mission dans ce projet était d'améliorer la performance et le cout d'un transformateur de puissance 160 KVA et de tension 30/0,4 KV, cette optimisation inclut en particulier l'active (noyau et bobine).

Dimensions du transformateur, pour le noyau, le bobine et la cuve, sur la base du cahier des charges, et en utilisant autodisk inventor, nous avons dessiné le transformateur selon nos calculs, puis nous avons fait le transformateur à l'usine de WINDNG INDUSTRIE.

Mots clés : Transformateur, autodisk inventor, WINDNG INDUSTRIE,...