

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Abderrahmane Mira de Béjaïa
Faculté de Technologie
Département d'Electrotechnique



Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme Master en électrotechnique
Option : Machines électriques

Thème

**Modélisation thermique et calcul analytique de
l'échauffement d'un transformateur électrique**

Réalisé par :

BECHROUNE Kousseila

CHABI Fkir

Encadré par :

Mr. ALITOUCHE K

Promotion 2022/2023

Remerciements

Avant tout, nous remercions le dieu tout puissant de nous avoir donnée la santé, la volonté, le courage, et la patience afin d'effectuer ce modeste travail.

Aux termes d'un semestre de travail, nous sommes heureux de pouvoir exprimer toute notre gratitude envers notre promoteur **Mr. ALITOUCHE K**, enseignant à université de Bejaia A/Mira, d'avoir bien voulu nous encadrer et pour son aide et les conseils qu'elle n'a cessé de nous prodiguer pour l'aboutissement de ce travail, qu'elle trouve ici notre profonde gratitude et toute notre reconnaissance.

Nous remercions chaleureusement (dames ou monsieur), les membres de jury d'avoir accepté de consacré de leurs temps pour juger ce travail.

Que tous les enseignants ayant contribué et participé à notre formation trouvent ici notre profonde gratitude.

Mes remerciements et mon respect s'dressent a tous ceux qui mon soutenu tout au long de ce travail.

Merci à vous tous.

Dédicace

Mes très chers parents, dont le sacrifice, l'amour, la patience, le soutien, l'encouragement et les prières sont l'essence de ma réussite. Merci d'être si fiers de moi.

A toute ma famille

A mes chers frères et sœurs

A la mémoire de mes grands-parents

A mes chers amis

A mon binôme et toute sa famille

Bechroune Kousseila.

Dédicace

Je tiens avec un grand plaisir à dédier ce modeste travail :

A la mémoire de ma mère

A mon cher père qui m'a aidé au long de mes études

A la mémoire de mes grands-parents

A mes chères frères et sœurs

A tous mes amis

Chabi Fkir.

sommaire

Introduction générale

Le phénomène de propagation de la chaleur existe dans les milieux naturels ou les systèmes industriels. La propagation de la chaleur est obtenue par la différence de température entre deux milieux dans un système industriel. Pour sa modélisation, sa quantification et son optimisation, la science s'est penchée sur l'étude de la transmission d'énergie en minimisant les pertes dans les systèmes électriques. De nos jours, il est devenu nécessaire à tout technicien d'avoir des connaissances sur les lois fondamentales de transfert d'énergie notamment dans les machines électriques.

Le transformateur est l'appareil qui a joué le rôle le plus décisif dans le développement de l'électrotechnique, depuis son invention par L. Goulard aux alentours des années 1880. Il n'est pas du tout surprenant de voir qu'il fait encore l'objet de nombreux travaux de recherche visant à améliorer sa conception et ses performances [6]

Nous nous proposons dans ce travail d'étudier la répartition bidimensionnelle de la température dans un transformateur en utilisant une méthode analytique facile à mettre en œuvre.

Ce travail est constitué de trois chapitres, le premier est consacré à la présentation des notions de bases sur le transformateur et les différents types de ce dernier. Il sera aussi question de son échauffement et son refroidissement ainsi que de sa protection.

Dans le deuxième chapitre, il sera question des différents modes de transfert thermique dans les transformateurs et des équations régissant le transfert de la chaleur, et l'analogie thermique - électrique.

Le dernier chapitre propose la modélisation thermique et le calcul analytique dans un transformateur avec la méthode RTN (Réseau Thermique Nodal). Et les résultats de diverses simulations numériques menées sous l'environnement Matlab.

Nous terminerons notre travail par une conclusion générale.

Chapitre I

Généralités sur les transformateurs

I-1 INTRODUCTION :

Les transformateurs sont des machines statiques à induction électromagnétique généralement utilisés pour modifier les caractéristiques de l'énergie électrique alternative afin de la rendre aussi commodes que possible à tous les stades, de la production, du transport de la distribution et de l'utilisation. Cet appareil est d'un emploi absolument universel, en effet il transforme les signaux des sources de tensions et de courants sinusoïdaux en signaux de même fréquence mais de valeurs efficaces généralement différentes.

Dans ce chapitre, nous avons présentés généralement le transformateur et leur constitution aussi leurs différents types, et l'étude d'échauffement et leurs modes de refroidissements.

I-2 Principe de fonctionnement :

Le fonctionnement d'un transformateur est basé sur le principe de l'induction électromagnétique. En effet, lorsque l'enroulement primaire est alimenté par une source alternative, il engendre un flux alternatif qui circule dans le circuit magnétique. Ce flux induit une f.e.m dans le deuxième bobinage (le secondaire) du transformateur ; celle-ci pourra alimenter les récepteurs d'énergie électrique reliés au secondaire.

Remarque :

De par son principe, le transformateur ne peut pas fonctionner en régime de tension continue puisque les f.e.m dans les bobinages sont induites par les variations du flux.

Le transformateur est réversible : chaque bobinage peut jouer le rôle du primaire ou du secondaire. [4]

I-3 Constitution :

Le transformateur est constitué de deux parties essentielles qui sont :

- La partie active : elle est destinée à assurer la conversion de l'énergie.
- La partie constructive : son rôle est d'assurer la protection, la fixation et le refroidissement de la première partie.

I-3-1 Partie active :

Elle est constituée des parties suivantes :

I-3-1-1 Circuit magnétique :

Le circuit magnétique ou noyau comporte deux culasses et trois colonnes de même section. Il est feuilleté, c'est-à-dire formé par un empilage de tôles ferromagnétiques isolées entre elles afin de réduire les pertes par courant de Foucault.

Le circuit magnétique est soumis à un champ magnétique, il permet de canaliser le flux magnétique produit par l'enroulement primaire vers l'enroulement secondaire.

I-3-1-2 Les enroulements :

Les enroulements du transformateur sont les parties qui assurent, grâce aux phénomènes l'induction de électromagnétiques, le transfert de puissance entre l'enroulement primaire et l'enroulement secondaire.

- Il faut diminuer les intervalles entre les enroulements pour diminuer le champ de dispersion magnétique, ce qui a pour effet de réduire la consommation de la puissance réactive.
- Les résistances des enroulements doivent être suffisamment faibles pour réduire les pertes d'énergie qui se dégage sous forme calorifique
- Les enroulements doivent résister à l'élévation de température, les courts circuits et les surtensions lors du fonctionnement du transformateur.

Il existe trois types d'enroulements, qui sont déterminés en fonction de la puissance et la tensions imposées par le cahier des charges à s'avoir :

- Enroulements concentriques en couche en fil rond en vernis ;
- Enroulements concentriques en méplat isolé au papier ;
- Enroulements concentriques alternés en méplat isolé au papier ;
- Enroulements concentriques à galettes en fil rond isolé au papier.

La réalisation des bobinages s'effectue sous plusieurs formes, on trouve :

- ***Les bobinages concentriques :***

Les enroulements sont constitués de deux bobines cylindriques concentriques.

- ***Les bobinages en galettes :***

Les enroulements sont constitués de galettes superposées et alternées appartenant successivement au primaire et au secondaire, et séparées les unes des autres par une rondelle isolante.

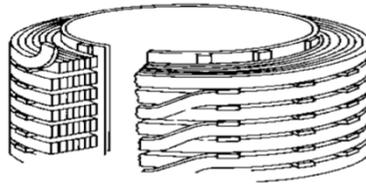
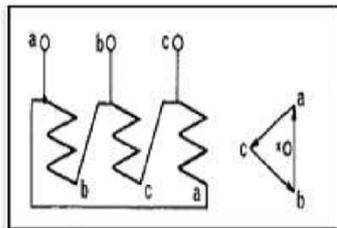


Figure I.1 Bobinages en galettes

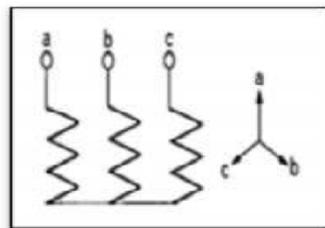
- **Les bobinages mixtes :**

C'est un mélange entre les deux premiers bobinages (galette et concentrique), le bobinage est concentrique mais l'enroulement de HT est en galette.

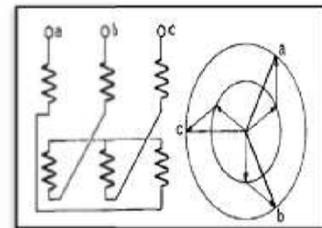
Le concept de système triphasé permet d'envisager trois modes de couplage des enroulements primaires et secondaires (figure I.2).



Couplage triangle.



Couplage étoile.



Couplage zig-zig.

Figure I.2 : les modes de couplages.

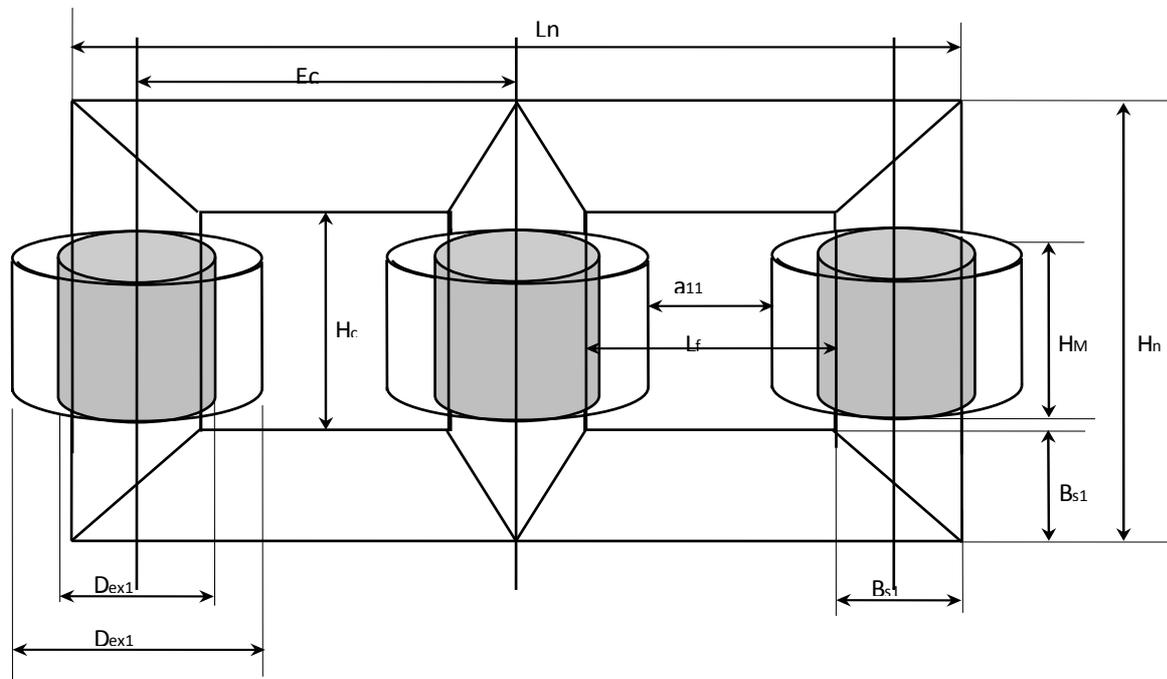


Figure I.3 : Représentation de la partie active

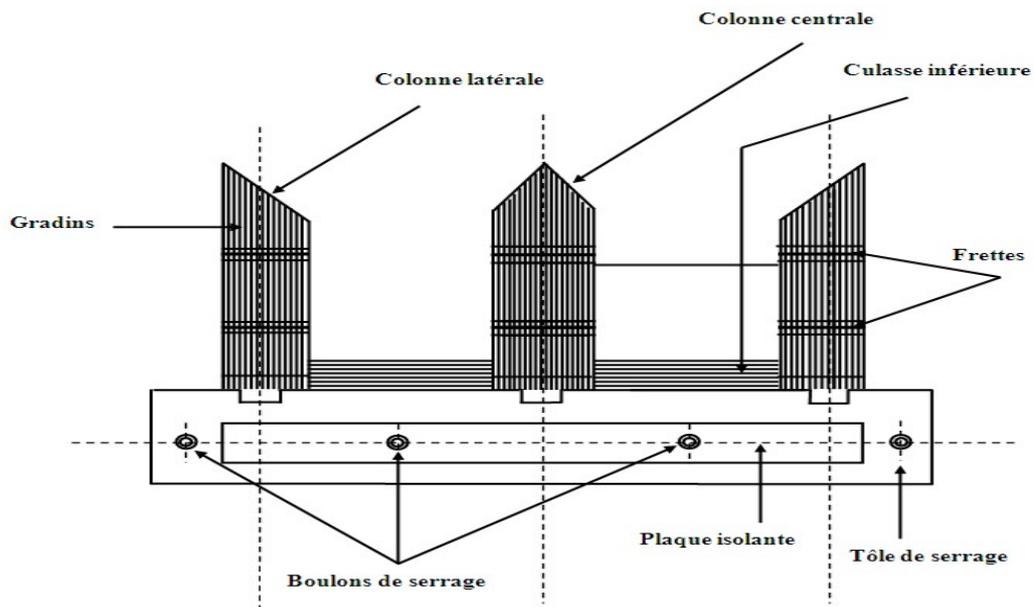


Figure I.4 : Schéma de montage du noyau

I-3-2 Partie constructive :

Comme il est montré la figure I.5, cette partie comporte les éléments mécaniques suivants :

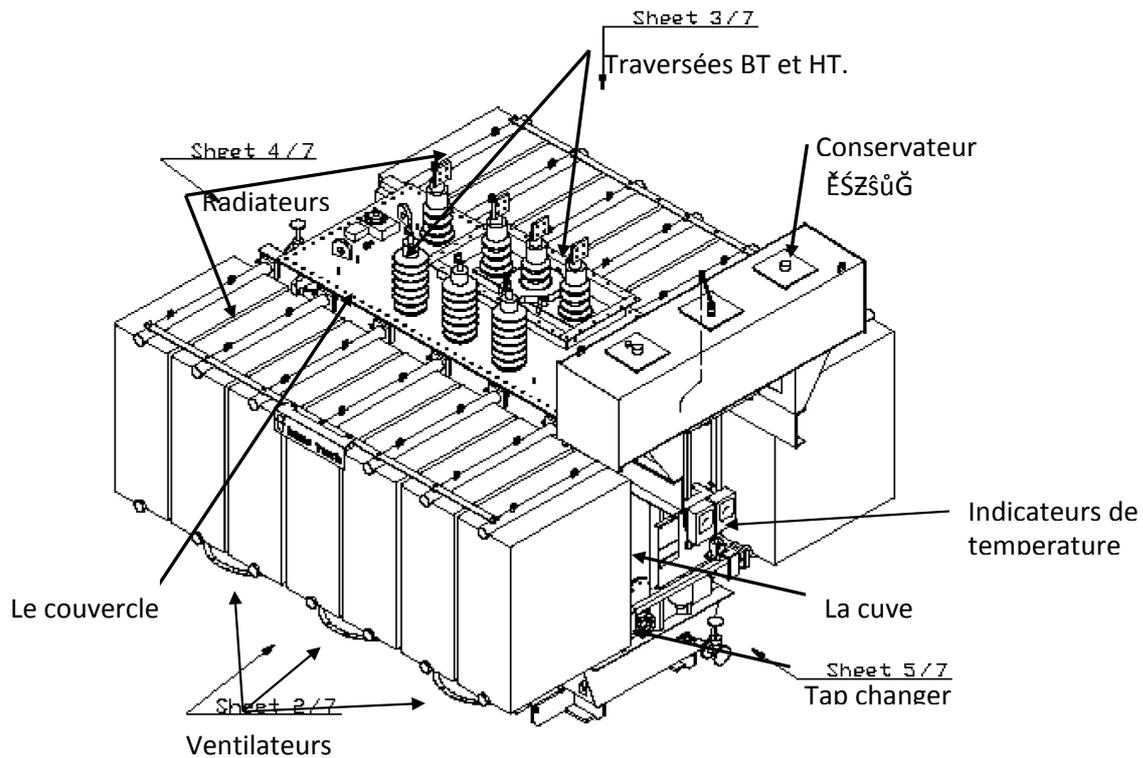


Fig I.5 : représentation de la partie constructive.

I-3-2-1 La cuve :

La cuve constitue l'enveloppe protectrice de la partie active ; elle doit :

- Avoir une bonne résistance mécanique pour éviter toute déformation sous l'effet du poids de la partie active et de l'huile de refroidissement.
- Etre réalisée avec une grande surface d'échange de chaleur avec l'extérieure (cuve en tôle avec ailettes)

I-3-2-2 Le couvercle :

Son rôle est de fermer la cuve, il représente la partie supérieure du transformateur, sur laquelle sont disposés les éléments suivants :

- Traversées basse et haute tension,

- conservateur d'huile,
- Collerette B.T,
- Diapositive d'accrochage pour décuvage,
- Soupape de sécurité contre la surpression de la cuve,
- Thermostat de mise en marche de ventilation,
- Poche des thermomètres.

I-3-2-3 Le conservateur d'huile :

Il s'agit d'un réservoir qui communique à la fois avec la cuve du transformateur et l'atmosphère. Ce réservoir permet des variations de volume d'huile suivant la température inférieure à celle du transformateur, ce qui réduit le risque d'oxydation.

L'huile est un alliage d'hydrocarbures provenant de la distillation du pétrole brut contenu dans la cuve. Il joue un double rôle : caloporteur et diélectrique.

I-3-2-4 Isolateurs de traversées :

Ils sont fixés sur le couvercle. Ils sont en porcelaine et remplis d'huile. Leur rôle est d'assurer la liaison entre les enroulements et la ligne du réseau. Ceux de la BT sont soumis à une contrainte de courant, mais ceux de la HT sont soumis à une contrainte de tension.

I-3-2-5 Radiateur de refroidissement d'huile :

Ces radiateurs sont indépendants de la cuve, ils sont liés avec le transformateur par des tuyaux qui assurent la circulation d'huile dans le radiateur vers le transformateur et vice versa.

La circulation de l'huile froide dans le radiateur vers le transformateur refroidit la partie intérieure du transformateur.

I-3-2-6 Changeur de prise (tap changers) :

Le tap changers du transformateur (changeur de prise) est un dispositif monté sur des transformateurs de puissance pour la régulation de la tension de sortie. Ceci est normalement obtenu en modifiant les rapports de transformation sur le système c'est à dire en modifiant le nombre de spires dans un enroulement approprié du transformateur.

I-3-2-7 Assécher d'air (le dessiccateur d'air) :

Le dessiccateur d'air est un appareil à travers lequel se font les échanges avec l'extérieur. Il comprend du gel de silice (silicagel), qui change de couleur lorsqu'il est chargé d'humidité.

I-3-3 Le liquide diélectrique :

L'huile utilisée dans le transformateur est la BORAK 22, c'est une huile minérale provenant de la distillation du pétrole brut, après extraction des produits volatiles.

On obtient ainsi l'huile pour transformateurs, qui est un liquide dont l'immersion de la partie active présente non seulement l'avantage d'une meilleure isolation, mais aussi celui de la facilité de refroidissement par circulation naturelle de l'huile.

I-4 Les différents types de transformateurs :

Ces distinctions sont souvent liées aux très nombreuses applications possibles des transformateurs.

I-4-1 Autotransformateur :

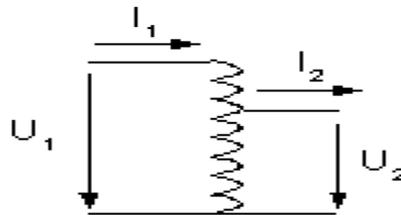


Fig I.6 : Symbole d'un autotransformateur

1 indique le primaire ; 2 le secondaire.

Il s'agit d'un transformateur sans isolement entre le primaire et le secondaire. Dans cette structure, le secondaire est une partie de l'enroulement primaire. Le courant alimentant le transformateur parcourt le primaire en totalité et une dérivation à un point donné de celui-ci détermine la sortie du secondaire. Le rapport entre la tension d'entrée et la tension de sortie est identique à celui du type isolé.

À puissance égale, un autotransformateur occupe moins de place qu'un transformateur, cela est dû au fait qu'il n'y a qu'un seul bobinage, et que la partie commune du bobinage unique est parcourue par la somme algébrique des courants primaire et secondaire. L'autotransformateur n'est intéressant que lorsque les tensions d'entrée et de sortie sont du même ordre de grandeur : par exemple, 230V/115V, plus le rapport de la tension d'entrée sur la tension de sortie se rapproche de 1 plus l'autotransformateur sera de faible importance en termes de masse et encombrement. Une de ses principales applications est pour utiliser dans un pays un matériel électronique prévu pour un pays où la tension du secteur est différente (États-Unis, Japon...). Il présente cependant l'inconvénient de ne pas présenter d'isolation

galvanique entre le primaire et le secondaire (c'est-à-dire que le primaire et le secondaire sont directement connectés), ce qui peut présenter des risques du point de vue de la sécurité des personnes.

En France, l'autotransformateur est systématiquement utilisé pour le raccordement entre le réseau 225kV et 400kV.

Un type particulier d'autotransformateur triphasé est utilisé pour le démarrage des moteurs asynchrones en permettant de limiter la pointe d'intensité et le couple au démarrage.

De même on utilise un autotransformateur appelé "diviseur de tension" pour créer un neutre artificiel dans un réseau triphasé.

I-4-2 Transformateur variable :

Il s'agit d'une variété d'autotransformateur, puisqu'il ne comporte qu'un seul bobinage. La dérivation de sortie du secondaire peut se déplacer grâce à un contact glissant sur les spires du primaire.

I-4-3 Transformateur d'isolement :

Le transformateur d'isolement est uniquement destiné à créer un isolement électrique entre plusieurs circuits pour des raisons bien souvent de sécurité ou de résolution de problèmes techniques. Tous les transformateurs à enroulement primaire isolé du (des) secondaire(s) devraient être considérés comme des transformateurs d'isolement ; toutefois, en pratique, ce nom désigne des transformateurs dont la tension de sortie a la même valeur efficace que celle de l'entrée.

Le transformateur d'isolement comporte deux enroulements presque identiques au primaire et au secondaire :

- le nombre de spires du secondaire est souvent très légèrement supérieur au nombre de spires du primaire afin de compenser la faible chute de tension en fonctionnement,
- en théorie les sections de fil au primaire et au secondaire sont identiques car l'intensité des courants est la même, mais en pratique l'enroulement intérieur (ou près du noyau)

sera de section plus importante pour minimiser les pertes Joule car cet enroulement dissipe moins bien les calories, emprisonné qu'il est entre le noyau et l'enroulement extérieur.

Ils sont, par exemple, largement utilisés dans les blocs opératoires : chaque salle du bloc est équipée de son propre transformateur d'isolement, pour éviter qu'un défaut qui y apparaîtrait n'engendre des dysfonctionnements dans une autre salle.

Un autre intérêt est de pouvoir changer de régime de neutre (cas d'utilisation de matériel informatique et/ou d'équipements électroniques sensibles dans une installation IT).

I-4-4 Transformateur d'impédances :

Le transformateur est toujours un transformateur d'impédance, mais les électroniciens donnent ce nom aux transformateurs qui ne sont pas utilisés dans des circuits d'alimentation. Le transformateur d'impédance est principalement destiné à adapter l'impédance de sortie d'un amplificateur à sa charge.

Ce genre de transformateur était en particulier employé dans la restitution sonore, pour adapter la sortie d'un amplificateur audio à lampes (haute impédance), avec les hautparleurs destinés à la restitution du son et caractérisés par une impédance basse.

En électronique audio professionnelle, on utilise toujours des transformateurs pour les entrées et sorties d'appareils haut de gamme, ou bien dans la fabrication de « Di-box » ou boîte de direct. Le transformateur est alors utilisé, non seulement pour adapter l'impédance et le niveau de sortie des appareils (synthétiseurs, basse électrique, etc.) aux entrées micro de la console de mixage mais en outre pour symétriser la sortie des appareils connectés.

En technique des hautes fréquences, on utilise également des transformateurs dont le circuit magnétique est en ferrite ou sans circuit magnétique (aussi appelé *transformateur sans noyau*) pour adapter les impédances de sortie d'un amplificateur, d'une ligne de transmission et d'une antenne. En effet, pour un transfert optimal de puissance de l'amplificateur vers l'antenne, il faut que le taux d'ondes stationnaires (TOS) soit égal à 1.

De tels montages présentent en outre l'avantage de rendre les appareils connectés beaucoup plus résistants aux perturbations électromagnétiques par une augmentation

significative du CMRR (*Common Mode Rejection Ratio*) ou taux de réjection du mode commun. [5]

I-4-5 Transformateur de mesure :



Fig I.7 : Un ancien transformateur électrique dans une usine reconvertie.

Les transformateurs de mesure font l'interface entre le réseau électrique et un appareil de mesure. La puissance disponible au secondaire est définie en fonction des besoins de l'appareil de mesure.

a- Transformateur d'intensité :

Ce type de transformateur, appelé aussi transformateur de courant, est dédié à l'adaptation des courants mis en jeu dans des circuits différents mais fonctionnellement interdépendants.

Un tel transformateur autorise la mesure des courants alternatifs élevés. Il possède une spire au primaire, et plusieurs spires secondaires : le rapport de transformation permet l'usage d'un ampèremètre classique pour mesurer l'intensité au secondaire, image de l'intensité au primaire pouvant atteindre plusieurs kilos Ampères (kA).

b-Transformateur de tension :

Ce transformateur est l'un des moyens pour mesurer des tensions alternatives élevées. Il s'agit d'un transformateur qui a la particularité d'avoir un rapport de transformation étalonné avec précision, mais prévu pour ne délivrer qu'une très faible charge au secondaire,

correspondant à un voltmètre. Le rapport de transformation permet de mesurer des tensions primaires s'exprimant en kilovolts (kV). On le rencontre en HTA et HTB. D'autres technologies existent, comme celle du diviseur capacitif.

I-5 Transformateur haute fréquence :

I- 5-1 Circuit magnétique des transformateurs HF :

Les pertes par courants de Foucault au sein du circuit magnétique sont directement proportionnelles au carré de la fréquence mais inversement proportionnelles à la résistivité du matériau qui le constitue. Afin de limiter ces pertes, le circuit magnétique des transformateurs HF est réalisé à l'aide de matériaux ferromagnétiques isolants :

- les ferrites douces : oxydes mixtes de fer et de cuivre ou de zinc ;
- les matériaux nanocristallins.

I-5-2 Transformateur d'impulsions :

Ce type de transformateur est utilisé pour la commande des thyristors, triacs et des transistors. Il présente, par rapport à l'opto-coupleur, les avantages suivants : fonctionnement possible à fréquence élevée, simplification du montage, possibilité de fournir un courant important, bonne tenue en tension.

I-6 Transformateur triphasé :

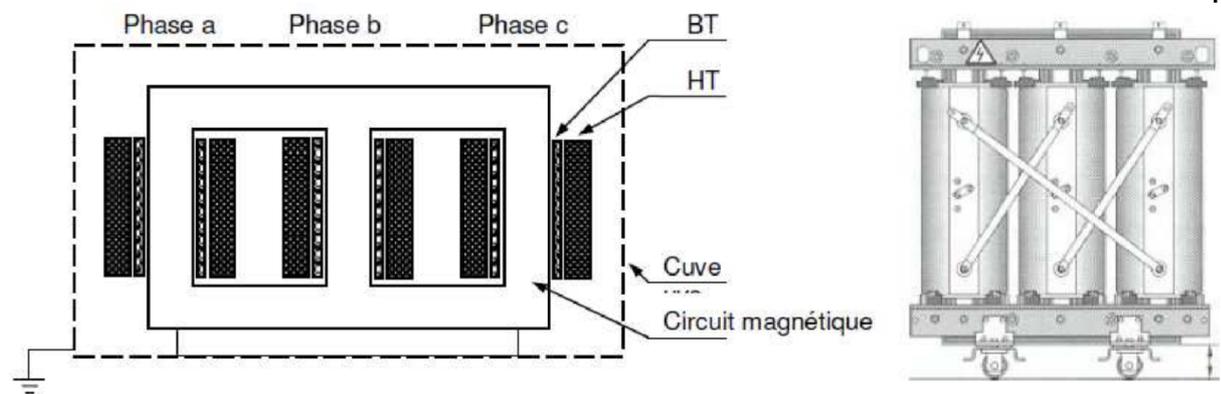


Fig. I.8 : Exemple d'un transformateur triphasé

Dans les réseaux électriques triphasés, on pourrait parfaitement envisager d'utiliser 3 transformateurs, un par phase. Dans la pratique, l'utilisation de transformateurs triphasés (un seul appareil regroupe les 3 phases) est généralisée : cette solution permet la conception de transformateurs bien moins coûteux, avec en particulier des économies au niveau du circuit magnétique. Les transformateurs monophasés ne sont en fait guère utilisés, sauf pour de très grosses puissances apparentes (typiquement supérieures à 500 MVA), où le transport d'un gros transformateur triphasé est problématique et incite à l'utilisation de 3 unités physiquement indépendantes.

I-7 Les transformateurs (hautes tensions) :

Il existe deux technologies de transformateur utilisées dans la haute tension : la technologie «colonne» et la technologie «cuirassé».

I-7-1 Transformateur à colonnes :

Le transformateur à colonnes est constitué de deux enroulements concentriques par phase. Ces enroulements sont montés sur un noyau ferromagnétique qui se referme à ses extrémités via des culasses afin d'assurer une bonne canalisation du flux magnétique. Dans cette technologie, ce sont les enroulements qui entourent le circuit magnétique de manière à maximiser le couplage tout en minimisant le volume des conducteurs. Les conducteurs sont de dimensions variables et de topologies multiples, selon les puissances mises en jeux.

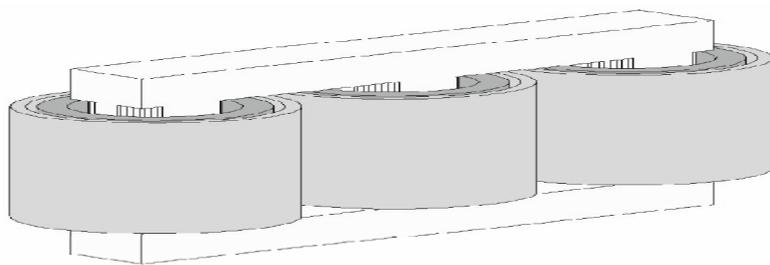


Fig I.9: Transformateur à colonnes à flux forcé.

Le transformateur triphasé ainsi constitué est donc composé de trois paires de bobinages indépendantes et par la suite connectées entre elles selon différents schémas

récurrents. Ces couplages permettent notamment l'adaptation des niveaux de courant et de tension aux caractéristiques nominales du transformateur au sein de son réseau. On retrouve ainsi des couplages dits en "étoile", en "triangle", ou en "zig-zig", voire d'autres, dérivés de ceux-ci et permettant la compensation de certains courants harmoniques.

I-7-2 Transformateur cuirassé :

Pour ce type de transformateur, le circuit magnétique entoure complètement le bobinage, ce qui lui confère un fonctionnement à "flux libre". La cuve assure le serrage de l'ensemble et le transformateur ainsi constitué est alors assuré d'une excellente rigidité mécanique associée à une grande compacité. En contrepartie, le confinement résultant rend plus difficile le refroidissement de l'ensemble.

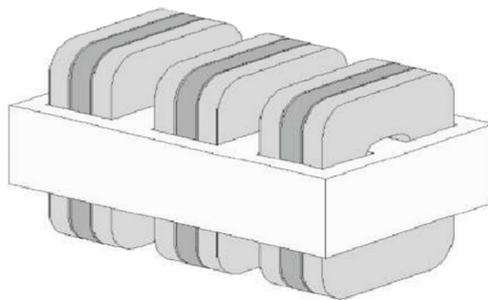


Fig I.10 : Transformateur cuirassé.

Ces transformateurs sont utilisés principalement au sein des réseaux de transport et de répartition, où les surtensions transitoires sont fréquentes. Dans cet environnement, ils doivent se prémunir des effets néfastes, voire dévastateurs de ces surtensions sur les enroulements. Pour cela des écrans sont utilisés afin de réduire les contraintes liées aux champs électriques dans les bobinages.

a- Les bobinages

Les enroulements sont répartis en plusieurs sous-groupes de bobines. Ces bobines sont appelées "galettes" ou "disques" à cause de leur géométrie en forme de

spires concentriques et de faibles hauteurs. Les galettes sont alternées entre la haute et la basse tension afin de diminuer les fuites magnétiques et le gradient de tension. En outre cette topologie offre l'avantage d'engendrer des forces en opposition entre chaque galette lors du court-circuit. [5]

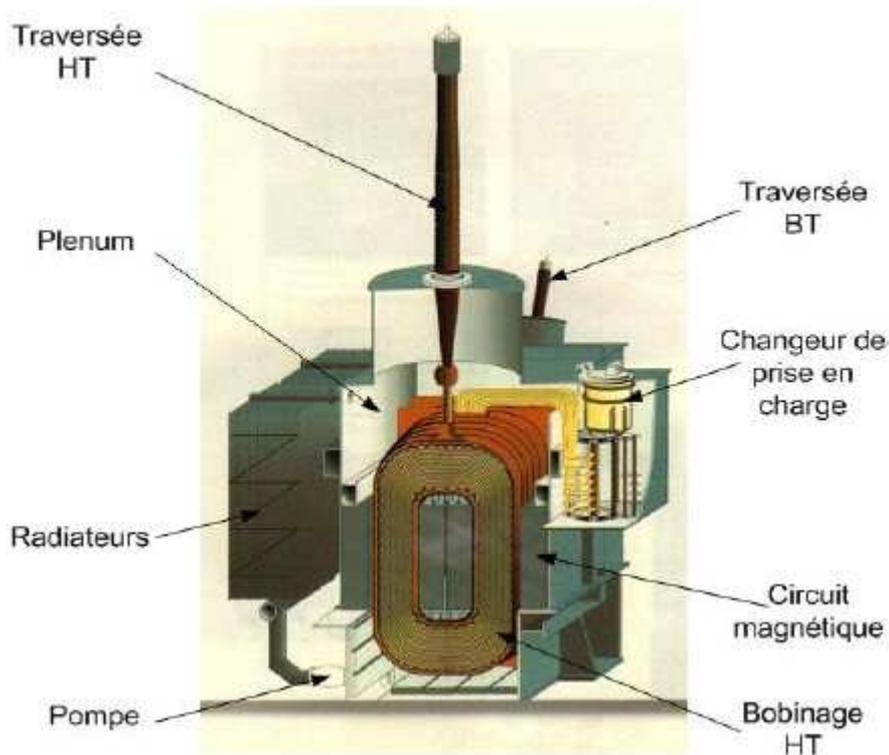


Fig I.11: Constitution du Transformateur cuirassé.

I-8 Pertes dans le transformateur :

I-8-1 Les pertes électriques :

Ce sont les pertes par effet Joule qui se produisent dans les enroulements ; elles dépendent de la résistance de c'est enroulement et de l'intensité du courant qui les traverse.

I-8-2 Les pertes fer :

Ce sont des pertes dans les tôles du circuit magnétique, elles comportent les pertes par **hystérésis** et par **courant de Foucault**. Ces pertes dépendent de la fréquence et de l'induction maximale. Comme ces deux grandeurs sont constantes, ils résultent que les pertes fer sont indépendantes de la charge.

I-8-2-1 Les pertes par hystérésis :

Le phénomène d'hystérésis s'explique par un retard de l'induction sur le champ magnétique appliqué au matériau du circuit magnétique. Ce retard provoque une perte d'énergie sous forme de chaleur, à chaque cycle du courant alternatif.

I-8-2-2 Les pertes par courant de Foucault :

Le circuit magnétique qui est le siège de l'induction alternative, est parcouru par des courants induits appelés « **Courant de Foucault** ». Ils produisent par effet Joule un dégagement de chaleur au sein du circuit magnétique. Pour les réduire, on feuillette et on empile les tôles, puis on les isole entre elles.

I-9 Echauffement et refroidissement des transformateurs :

I-9-1 L'échauffement :

L'échauffement se produit par les pertes d'énergie électrique dans la partie active du transformateur pendant son fonctionnement, ce qui nécessite le refroidissement de ce dernier.

I-9-2 Le refroidissement :

Lors de son fonctionnement, un transformateur est le siège de pertes, dont la plus grande partie est localisée dans deux éléments principaux :

- Le circuit magnétique. Ces pertes dépendent de l'induction c'est-à-dire de la tension appliquée.
- Les enroulements. Les pertes cuivre qui dépendent du courant de charge. En dernier lieu les flux de fuites sont susceptibles d'induire dans les pièces avoisinantes non actives (pièces de serrage, cuve, couvercle) des courants de Foucault qui entraînent des pertes parasites.

Toutes ces pertes ont pour conséquence un échauffement du transformateur, ce qui nécessite la mise en œuvre de moyens de réfrigération adéquate.

➤ **Modes de Refroidissement :**

Le mode de refroidissement est désigné par le constructeur au moyen de quatre lettres, le tableau suivant indique la disposition des symboles :

1^{ère} lettre	2^{ème} lettre	3^{ème} lettre	4^{ème} lettre
Nature du diélectrique	Mode de circulation du diélectrique	Fluide de	Mode de

		refroidissement	circulation de fluide
O : Huile minérale	N : Naturel	Mêmes symboles que pour la 1 ^{ère} lettre.	Mêmes symboles que pour la 2 ^{ème} lettre.
L : Diélectrique chloré	F : Forcée		
G : Gaz	D : Forcée et dirigée dans les enroulements		
A : Air			
S : Isolant solide			

Tableau.I.1 Disposition des symboles

Il existe différents modes de refroidissement d'huile à savoir : **ONAN, ONAF, OFAF, ODAF**.

Dans notre cas le transformateur est équipé par deux modes de refroidissement (ONAN et ONAF).

Comme la montre la fig I.12 :

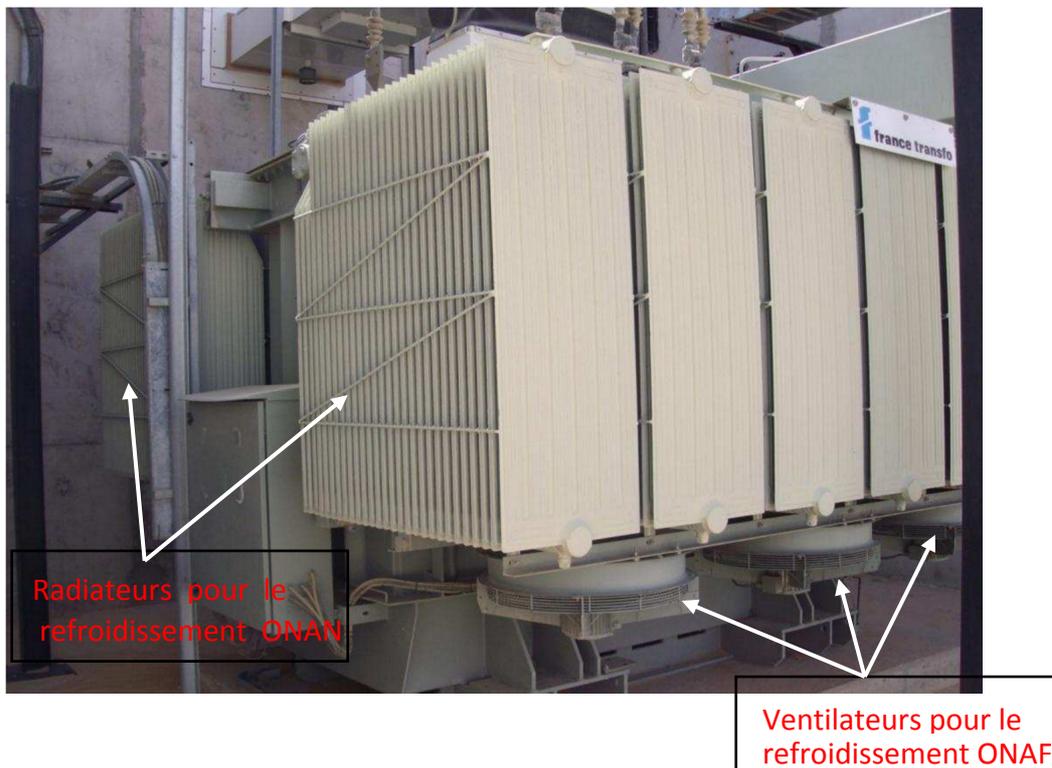


Fig.I.12: Les modes de refroidissement de transformateur.

I-9-2-1 Le système de refroidissement naturel (ONAN) :

Ce système de refroidissement est assuré par l'huile qui est dans la cuve, les radiateurs munis d'ailettes pour augmenter la surface d'échange avec le milieu extérieur. Le courant entre l'huile et les parois provoque le refroidissement de cette huile qui permet à son tour de refroidir la partie active du transformateur.

I-9-2-2 Le système de refroidissement à l'air forcé (ONAF) :

Ce système de refroidissement est assuré par l'huile qui est dans la cuve, les radiateurs munis d'ailettes et le système de ventilation forcée d'un important flux d'air.

Ces ventilateurs sont couplés à un système de capteurs de température faisant office de thermostat (commande automatique de la mise en route de la ventilation). [4]

I-10 Protection de transformateur :

Le transformateur peut être confronté à de nombreux défauts qui peuvent produire un vieillissement rapide, ou une détérioration immédiate de son matériel. Alors, des mesures de sécurité doivent être mises en place pour assurer le contrôle ainsi que le meilleur fonctionnement.

Le transformateur triphasé de puissance 25/30 MVA (TR-8-003 A/B) est équipé des éléments de protection suivants :

I-10-1 Le relais Buchholz :



Le relais Buchholz est un dispositif mécanique, placé dans la conduite d'huile qui relie la cuve du transformateur. (Figure I.13)

Fig I.13: Le Relais Buchholz.

Il sert à détecter les anomalies internes (court-circuit, détérioration de l'isolation, mauvais contact dans les connexions...etc.). Lors d'un dysfonctionnement, un jet d'huile vers le conservateur entraîne le déplacement d'un flotteur qui coupe la liaison entre le transformateur et le réseau.

Le schéma de principe du relais Buchholz

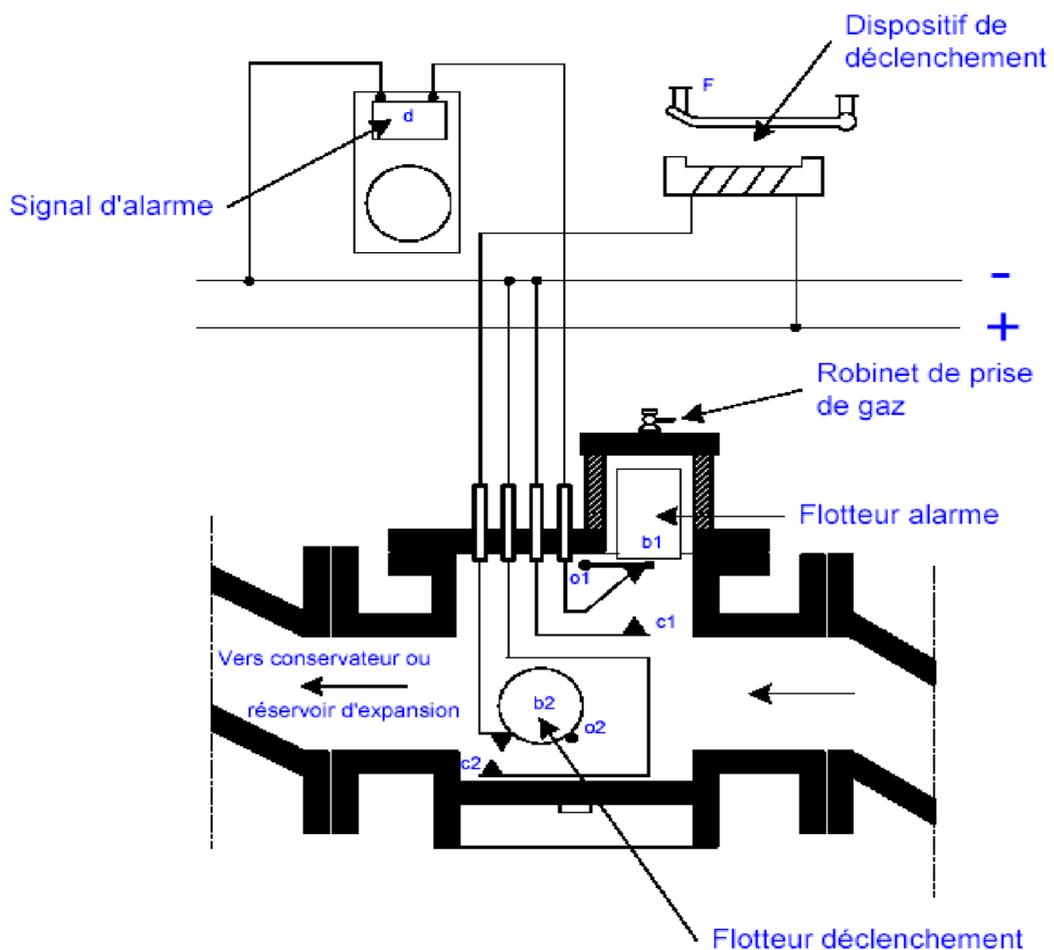


Fig.I.14 : Le schéma de principe

➤ **Le fonctionnement de relais Buchholz :**

Le corps du relais (voir figure I.8) renferme deux flotteurs b1 et b2 qui peuvent pivoter respectivement autour des axes 01 et 02 et commander ainsi les contacts à mercure c1 et c2. Ces deux contacts ferment (ou ouvrent sur demande) chacun un circuit. Le circuit du contact c1 actionne un signal d'alarme. Le circuit du contact c2 actionne le dispositif de déclenchement. Le relais Buchholz protège toujours le transformateur en cas de fuite de diélectrique à condition toutefois qu'elle se manifeste au-dessous du relais.

I-10-2 Les indicateurs de température :

Il est équipé de deux indicateurs de température. (Fig.I.15) :



Fig.I.15: Les indicateurs de température du transformateur de puissance 25/30 MVA (TR-8-003A).

➤ **Indicateur de température de l'huile :**

Il sert à surveiller l'échauffement de l'huile dans la cuve. Pour une température de l'huile qui atteint 90°C qui donne l'alarme, et pour 100°C on aura un déclenchement.

➤ **Indicateur de température des enroulements :**

Il sert à surveiller l'échauffement des enroulements. Pour une température à l'intérieur des enroulements qui atteint 90°C , il donne l'alarme, et pour 95°C on aura un déclenchement.

[4]

I-11 conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté des généralités sur les transformateurs tels que leur constitution (partie active et partie constructive) et les différents types utilisés dans les réseaux et aussi les moyens de protection des transformateurs. Dans les réseaux d'exploitation, les transformateurs de puissance sont soumis à de nombreuses contraintes naturelles lors de leur fonctionnement, Le prochain chapitre sera consacré aux les différents modes de transfert thermique dans un transformateur.

Chapitre II

Modes de transfert de chaleur

II-1 Introduction :

Un transfert thermique est un transfert d'énergie microscopique désordonnée. Cela correspond en réalité à un transfert d'agitation thermique entre particules, au gré des chocs aléatoires qui se produisent à l'échelle microscopique.

L'exemple le plus courant de situation mettant en jeu un transfert thermique est le système constitué de deux corps en contact et ayant des températures différentes. Le corps le plus chaud cède de l'énergie sous forme de chaleur au corps le plus froid. On dit qu'il y a transfert thermique entre les deux corps.

L'étude de ces transferts s'effectue dans le cadre de la discipline thermodynamique en s'appuyant sur les deux premiers principes. [2]

A la différence de la thermodynamique, la thermocinétique fournit des informations sur le mode de transfert en situation de non équilibre ainsi que sur les valeurs de flux de chaleur.

II-2 Définitions des grandeurs :

Plusieurs grandeurs interviennent dans l'étude des transferts thermiques :

- **La quantité de chaleur (q) :** est l'énergie thermique transférée pendant un échange thermique. Son unité est le Joule [J].

- **Le flux de chaleur (ϕ) :** est la quantité d'énergie transférée par unité de temps (II.1). Ce flux thermique ϕ correspond à une puissance et s'exprime en Watt [W].

II.1

- **La densité de flux de chaleur (φ) :** correspond au taux de chaleur (énergie thermique) qui traverse une surface donnée S par unité de temps (2.2). Son unité est le [$W.m^{-2}$]

II.2

- **La conductivité thermique (λ) :** est la grandeur caractérisant l'aptitude d'un matériau à conduire la chaleur. Plus elle est grande, meilleure est la conduction de la chaleur par ce matériau. Son unité est le [$Wm^{-1}K^{-1}$].

- **Résistance thermique :**

La résistance thermique d'un élément, exprime sa résistance au passage d'un flux de chaleur; elle est donnée en [K/W]. Cette notion n'est valable qu'en régime stationnaire, le régime transitoire faisant appel à la notion de quadripôle thermique [1].

La résistance thermique de conduction d'une plaque d'épaisseur e et de surface S est donnée par :

Où λ est la conductivité thermique du matériau.

La résistance thermique de convection d'un élément exprime sa résistance au passage d'un flux de chaleur d'origine convective.

Où :

h est le coefficient de convection thermique

S est la surface de convection en m^2

R_{cv} est la résistance thermique de convection [K/W].

Contrairement à la résistance thermique de conduction, celle-ci ne dépend pas de l'épaisseur de la paroi considérée. Elle dépend uniquement de la surface, et du fluide.

II-3 Modes du transfert de la chaleur :

Lorsque deux systèmes sont à des températures différentes, le système le plus chaud cède de la chaleur au plus froid. Il y a échange thermique ou encore transfert thermique entre ces deux systèmes. Cette situation se rencontre dans de nombreuses situations industrielles (moteurs thermiques ou même électriques, centrales électriques au fuel au gaz, etc...., électronique) ou domestique (chauffage de l'habitat). Un transfert d'énergie donne lieu à un flux de chaleur qui correspond à un déplacement de l'énergie du plus chaud vers le plus froid.

Comme on le verra par la suite, le flux de chaleur dont la densité locale est notée Φ est une grandeur vectorielle, ce qui signifie qu'un flux de chaleur est caractérisé non seulement par son intensité mais aussi par sa direction. Il est défini en chaque point de l'espace et a l'unité d'une densité surfacique de puissance (W/m^2). Il existe trois modes essentiels de transferts de chaleur : la conduction, le rayonnement et la convection. [3]

II-3-1 La conduction :

La conduction est définie comme étant le mode de transmission de la chaleur au sein d'un milieu opaque (solide, liquide ou gazeux), sans déplacement de la matière, en présence d'un gradient de température. Elle s'effectue selon deux mécanismes différents, une transmission par vibration des molécules ou atomes et une transmission par les électrons libres. Ce mode se produit au sein d'une même phase au repos ou mobile, en présence d'un gradient de température. Dans ce cas, le transfert de chaleur résulte d'un transfert d'énergie cinétique d'une molécule à une autre molécule adjacente. Ce mode de transfert est le seul à exister dans un solide opaque (qui absorbe tous les rayons). Pour les solides transparents, une partie de

l'énergie peut être transmise par rayonnement. Avec les fluides (gaz ou liquides), la convection et le rayonnement peuvent se superposer à la conduction.

II-3-2 La convection :

La convection consiste essentiellement en la transmission de l'énergie par le mouvement ou le déplacement macroscopique d'une parcelle (grand nombre de molécules), généralement d'un fluide d'une région à autre. Ce mécanisme est accompagné toujours par le transfert d'énergie dû au mouvement moléculaire et qui représente le côté conductif de ce mode. On distingue deux types de convection :

La convection naturelle (convection libre) où le mouvement des particules est dû aux différences de température qui sont imposées au fluide. La différence de température implique une différence de masses volumiques (déplacement des particules, dilatation), exemple (chauffage de l'air pour une montgolfière, chauffage de l'eau dans un récipient).

La convection forcée où le mouvement des particules résulte de la pression appliquée au fluide par l'intermédiaire des moyens mécaniques, (d'une pompe par exemple). Le transfert de la chaleur par convection, se produit entre deux phases dont l'une est généralement au repos et l'autre en mouvement, en présence d'un gradient de température. Le mouvement du fluide peut résulter de la différence de masses volumiques due aux différences de températures. [3]

II-3-3 Coefficient d'échange de chaleur par convection :

Dans tous les cas, la résolution d'un problème de convection consiste à déterminer le coefficient de transfert par convection. D'une manière analogue à la loi de Fourier pour la conduction de la chaleur, Newton a proposé une relation linéaire entre la densité du flux de chaleur ϕ et la différence de température $\Delta T = T_p - T_f$ entre le corps solide dont la paroi est à température T_p et le fluide à la température T_f .

II.3

Où h représente le coefficient de transfert thermique par convection [W/m^2K].

En introduisant la résistance thermique de convection R_{cv} rapportée à une surface unitaire de transfert qui est définie par:

=

L'équation (II.3) peut s'écrire sous la forme:

II.4

Lorsque h est connu la relation (II.4) permet de calculer la quantité de chaleur traversant une surface donnée pendant un intervalle de temps quelconque.

Le coefficient de convection h dépend des conditions expérimentales et tout particulièrement:

- Des caractéristiques géométriques de la paroi.
- Des caractéristiques du fluide : masse volumique, viscosité, chaleur spécifique
- De l'écoulement de fluide : vitesse, régime laminaire ou turbulent.
- De la définition de la température extérieure T .

Le calcul de ce coefficient peut être effectué en recourant à différentes méthodes:

- a) L'analyse dimensionnelle combinée avec des résultats expérimentaux,
- b) La recherche de solution analytique ou numérique des équations de conservation utilisée pour le régime laminaire,
- c) La formulation d'analogie entre le transfert de quantité de chaleur et le transfert de quantité de mouvement utilisée essentiellement dans le cas de régime turbulent

II-3-3 Le rayonnement :

Le rayonnement est le transfert d'énergie électromagnétique d'un milieu à haute température vers un autre milieu à basse température sans aucun support matériel (il peut s'effectuer dans le vide). En général, tout corps opaque ou partiellement opaque porté à une température supérieure à zéro Kelvin rayonne de l'énergie dans toutes les directions. Cette énergie est transportée sous forme d'une onde électromagnétique dont la propagation n'exige pas de support matériel. Ce type de transport de chaleur est analogue à la propagation de la lumière et il ne nécessite aucun support matériel, contrairement aux écoulements. Les gaz, les liquides et les solides sont capables d'émettre et d'absorber les rayonnements thermiques.

II-3-3-1 lois du rayonnement :

Le rayonnement est un mode de transfert particulièrement important dans de nombreuses situations industrielles à hautes températures (fours par exemple) mais aussi géophysiques (refroidissement nocturne de la Terre).

Le rayonnement est à la base de nombreuses méthodes de mesures de température (caméra infra-rouge, pyromètre à filament) qui sont non-intrusives et permettent d'opérer à distance, d'où l'importance d'étudier soigneusement le rayonnement.

Le rayonnement thermique est de nature électromagnétique en raison de l'agitation de la matière sous l'effet de la température. Une onde électromagnétique consiste en un champ électrique \vec{E} , un champ magnétique \vec{B} et un vecteur d'onde \vec{k} , tous trois perpendiculaires. L'onde se propage dans la direction du vecteur d'onde avec une vitesse c qui varie selon le milieu qu'elle traverse. Cette vitesse vaut $c = \frac{c_0}{n}$ où c_0 est la vitesse de la lumière dans le vide et n l'indice

du milieu. La fréquence d'une onde électromagnétique ne varie pas avec le milieu qu'elle traverse. Elle est liée à c par la relation :

II.5

où $\nu = 1/T$ est la fréquence de l'onde électromagnétique. On voit donc que la longueur d'onde sera fonction du milieu traversé.

Une onde transporte avec elle de l'énergie. Lorsqu'elle est émise par un corps radiant, celui-ci perd donc un certain flux d'énergie Φ (Watt). De même, un corps frappé par une onde électromagnétique reçoit de l'énergie. La distribution énergétique d'un rayonnement polychromatique (large gamme de λ) varie avec λ .

On définit ainsi le flux monochromatique Φ_λ ($W.m^{-1}$) qui caractérise la contribution de chaque longueur d'onde. On a, bien sûr :

II.6

Seules les longueurs d'onde comprises entre $0.4\mu m$ et $0.8\mu m$ sont visibles par l'oeil.

Les rayons lumineux interagissent avec la matière de sorte que si certains corps la laissent passer (corps transparents) certains autres l'absorbent en partie ou en totalité (corps opaques).

Pour un flux incident Φ_i , on définit les quantités suivantes figure II.3.

- Flux réfléchi Φ_r
- Flux absorbé Φ_a
- Flux transmis Φ_t on appelle :
- Réflectivité:
- Absorptivité:
- Transmissivité

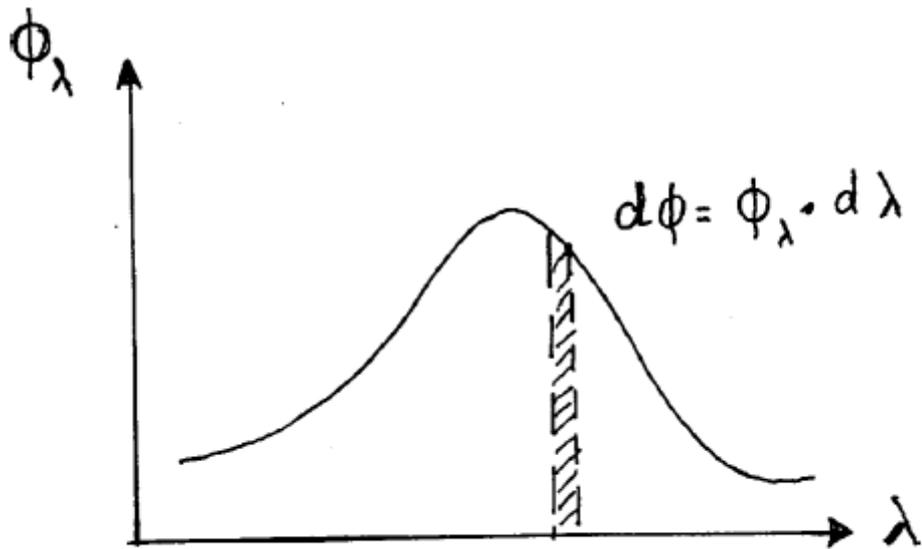


Fig.II.1 Spectre d'un rayonnement électromagnétique.

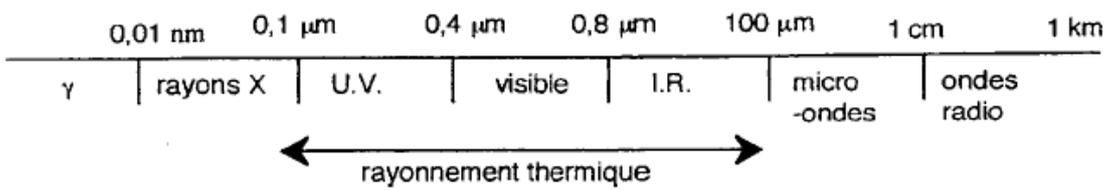


Fig.II.2 Divers rayonnements électromagnétiques classés selon leur longueur d'onde.

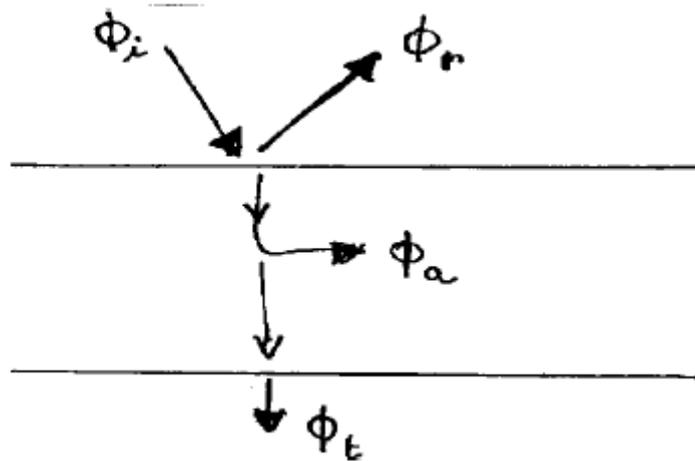


Fig.II.3 Définition des flux réfléchis, absorbés, transmis

La conservation de l'énergie impose :

II.7

Ces grandeurs varient selon la valeur de λ , Ainsi le verre laisse passer les UV et est opaque aux Infra-rouges. On doit donc définir r_λ , a_λ , t_λ , qui sont les réflectivités, absorptivités et transmittivités monochromatiques. Elles dépendent aussi de la direction d'émission. [3]

Remarque :

Dans de nombreux problèmes de transformation d'énergie thermique, les trois modes de transfert de la chaleur coexistent mais, généralement, au moins une des trois formes pourra être négligée, ce qui simplifiera le traitement mathématique du processus de transfert.

Considérons le cas de forgeage d'un outil par le feu, où peut être visualisé les trois modes de transfert de chaleur en même temps.

II-4 Comparaison des modes de transfert :

Mode de transfert	Matière de transfert	Milieu de transfert	Transport de matière
conduction	Solides et fluides	Au sein d'un seul corps ou par contact entre deux corps	Non
convection	Fluides	Au sein d'un seul fluide ou au contact entre un solide et un fluide	Oui
rayonnement	Solides, fluides et vide	A partir d'un corps rayonnant vers un autre	Non

Tableau II.1 Méthode de transfert [3]

II-4-1 Combinaison des différents modes de transferts :

Dans beaucoup de situations, il y a coexistence de 2 ou même 3 des modes de transferts thermiques décrits précédemment.

Fort heureusement, il est fréquent qu'un mode soit prépondérant et simplifie l'analyse. Avant de finir ce paragraphe, signalons que certains échanges de chaleur s'accompagnent d'un changement d'état (vaporisation, condensation, fusion, congélation).

Ces phénomènes se comportent alors comme une source (ex. de la condensation) ou un puits de chaleur (ex. de la vaporisation).

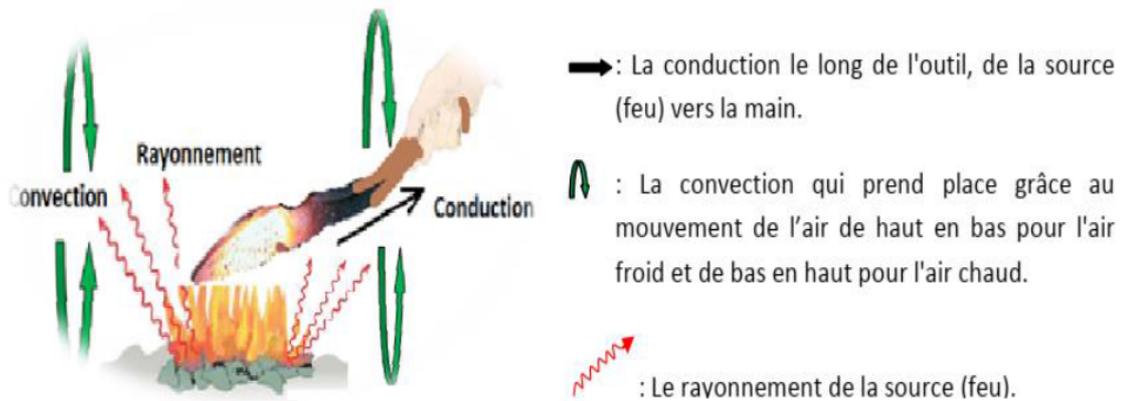


Fig. II.4 illustration des trois modes du transfert de la chaleur [3]

II-5 Lois fondamentales du transfert de la chaleur :

II-5-1 Loi fondamentale de la conduction (loi de J. Fourier) :

Rappelons que la conduction est le seul mode de transfert de chaleur possible dans un solide (sauf pour quelques solides transparents comme le verre qui laissent passer un rayonnement électromagnétique). C'est un mode de transfert sans transport de matière.

La loi fondamentale de la transmission de la chaleur par conduction, a été proposée par le et physicien Français, Jean Baptiste Joseph Fourier en 1822.

Considérons une plaque plane (D), de surface (S) et d'épaisseur (e) (voir Fig.II-2).

Soit dQ , la quantité de chaleur échangée entre la plaque et l'air ambiant pendant le temps dt .

On définit le flux de chaleur (flux thermique; Φ) comme la puissance échangée entre la surface S de

la plaque et le milieu extérieur.

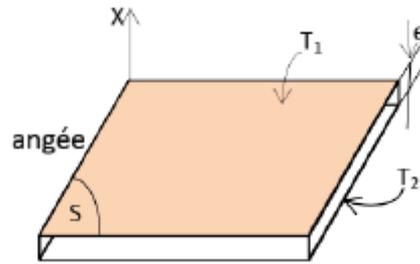


Fig. II.5 Plaque plane

On définit la densité de flux thermique comme la puissance échangée par unité de surface de la plaque:

$$q = \frac{Q}{S} \quad \text{II-9}$$

Les principes fondamentaux de la thermodynamique nous font savoir que: L'énergie est conservée en l'absence d'une source de chaleur; La chaleur transmise passe toujours du corps chaud vers le corps froid dans notre cas : $(T_1 - T_2)$.

On peut vérifier expérimentalement que :

$$Q = -K \cdot S \cdot \frac{dT}{dx} \quad \text{II-10}$$

Tels que ;

Q : la quantité de chaleur échangée à travers la surface (S) ; K : le facteur de proportionnalité appelé conductivité thermique qui est une caractéristique du matériau, son unité de mesure est [W/m.K] ou [Kcal/ h.m.C] ; Pour un élément infinitésimal, ds, la relation II -6 :

$$dQ = -K \cdot ds \cdot \frac{dT}{dx} \quad \text{II-11}$$

Le signe (-) : pour tenir compte du sens de flux thermique, le gradient qui va de la plus grande grandeur à la plus petite est négative.

L'équation (II-4) est attribuée au mathématicien et physicien Français J. B. Fourier qui en 1822 énonça sa loi et qui peut se traduire comme suit : « En tout point d'un milieu isotrope, la densité de flux thermique instantané, est proportionnelle à la conductivité thermique du milieu et au gradient de température»

La forme vectorielle de cette loi qui exprime la densité de flux thermique est définie comme étant la quantité de chaleur transmise par unité de surface, soit :

$$\vec{q} = -K \cdot \vec{\nabla} T \quad \text{II-12}$$

Remarque

Par convention, est compté positivement dans le sens d'écoulement de la chaleur, c'est-à-dire vers les températures décroissantes. est un vecteur porté par le même axe mais de sens contraire à (de petites valeurs vers les grandes valeurs) d'où le signe négatif de la loi de Fourier. [3]

II-6 L'équation de la chaleur en conduction :

II-6-1 Equation de la chaleur en régime permanent :

En régime permanent et dans un matériau isotrope, l'équation de la chaleur est une équation de Poisson :

II-13

L'expression développée varie avec le système de coordonnées :

• Cartésiennes :

II-14

• Cylindriques :

II-15

• Sphériques :

II-16

Les problèmes 1D peuvent souvent se résoudre analytiquement. Les problèmes 3D nécessitent souvent l'emploi de méthodes numériques traitées par ordinateur. En 1D, les équations ci-dessus deviennent : [3]

En cartésien :

II-17

En cylindrique :

II-18

En sphérique :

II-19

II-7 Exemples de résolution de l'équation de la chaleur en conduction :

II-7-1 Cas d'un mur plan :

Des températures T_1 et T_2 sont imposées aux bornes d'un mur d'épaisseur e et de conductivité thermique λ . L'équation de la chaleur 1D cartésienne : $\nabla^2 T = 0$ admet la solution $T = Ax+B$. Les conditions aux limites en $x = 0$ et en $x = e$ permettent d'éliminer A et B pour donner :

II-20

La distribution de température est donc linéaire et les isothermes sont régulièrement distribuées de $x = 0$ à $x = e$. La densité de flux en tout point vaut :

II-21

et est bien positive si $T_1 > T_2$ (flux allant du chaud vers le froid). Le flux Φ traversant une surface S vaut donc de sorte que la résistance thermique R définie par $T_1 - T_2 = R\Phi$ vaut:

II-22

Notons enfin que le flux de chaleur Φ est le même quelle que soit l'abscisse à laquelle on le calcule (de 0 jusqu'à e). Ceci est garanti par la pente constante de la distribution de température.

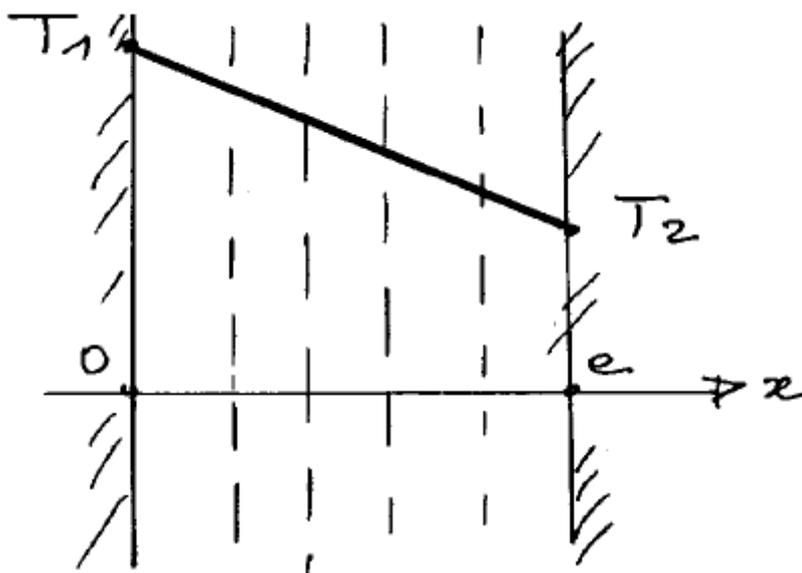


Fig.II.6 Mur plan

II-7-2 Association de murs en série ou en parallèle :

Lorsque plusieurs murs sont en série, la résistance totale, R_t du tube de flux ainsi formé vaut :

$$\text{II-23}$$

Leur mise en parallèle amène à l'expression suivante de R_t , analogue de celle obtenue en électricité

$$\text{II-24}$$

Cette méthode s'applique à des résistances de sections différentes à condition que l'on raisonne sur un tube de flux. C'est le cas par exemple sur la figure II.13 sur laquelle les frontières latérales des 5 résistances sont isolées. [3]

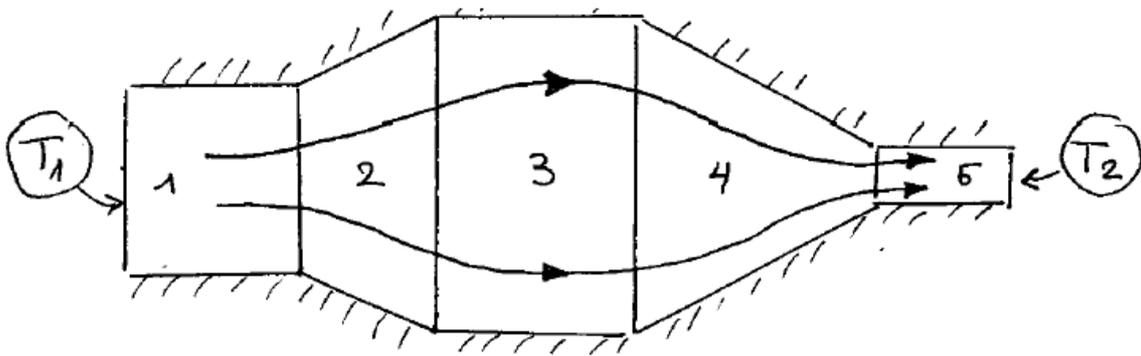


Fig.II.7 Mise en série de résistances thermiques.

II-8 Mur avec conditions de convection aux parois

La température au loin de l'air qui entoure le mur vaut T_1 à gauche et T_2 à droite. Appelons h le coefficient d'échange aux parois. La solution générale de l'équation de la chaleur est inchangée : $T=AX+B$. Les conditions aux limites se traduisent par :

$$\text{en } x=0 : \quad \text{II-25}$$

$$\text{en } x=e : \quad \text{II-26}$$

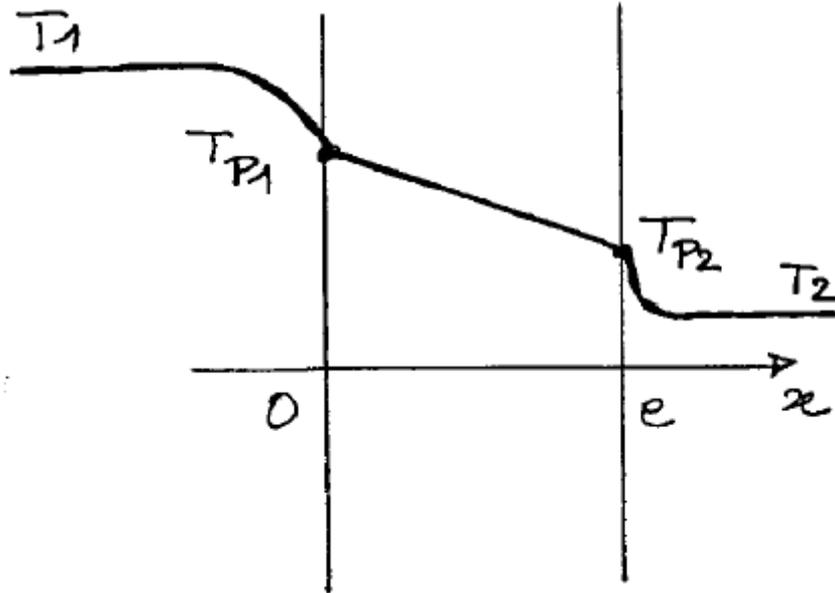


Fig.II.8 Mur avec conditions de convection aux extrémités.

On peut éliminer A et B de ces deux équations et obtenir la solution finale. On peut aussi utiliser la notion de résistance thermique (cf. figure II.12). La résistance convective R_{cv} est telle que $\Phi = hS.(T_1 - T_{P1})$ d'où :=

Tandis que :=



Fig.II.9 Résistances thermiques équivalente dans le cas d'un mur avec convection.

La résistance totale entre T_1 et T_2 vaut donc :

$$=+= \quad \text{II-27}$$

d'où le flux Φ qui circulera à travers le mur. On en déduit les températures de paroi:

$$= \quad \text{II-28}$$

$$= \quad \text{II-29}$$

à l'intérieur du mur la solution linéaire s'écrit :

$$T= \quad \text{II-30}$$

II-9 Résolution numérique d'un problème de conduction :

La résolution d'un problème industriel de conduction nécessite souvent d'avoir recours à un outil numérique. Il existe un grand nombre de logiciels de conduction de la chaleur fonctionnant sur PC ou sur stations de travail.

II-10 Loi fondamentale de la convection (loi de I. Newton)

La loi fondamentale de la convection est la loi d'**Isaac Newton (1643-1727)**, traduite par la relation expérimentale de flux de chaleur échangé par convection entre un fluide et une paroi solide.

II-31

II-32

: représente l'épaisseur d'un film mince du fluide adhérent à la paroi solide K fluide

h: représente le coefficient du transfert de chaleur par convection [$\text{W/m}^2\cdot\text{K}$] ou [$\text{kcal/h}\cdot\text{m}^2\cdot\text{C}$]

II-11 Analogique thermique /électrique :

La loi de Fourier peut être considérée comme complètement analogue à la loi d'Ohm comme le montre le tableau suivant : [3]

Thermique				électricité
Loi de Fourier	$\Delta T = -(L/\lambda S) \cdot P$	\leftrightarrow	$\Delta V = R \cdot I$	Loi d'Ohm
Conductivité thermique	$\lambda(T)$	\leftrightarrow	$\sigma(T)$	Conductivité électrique
Température	T	\leftrightarrow	V	Potentiel électrique
Puissance thermique	P	\leftrightarrow	I	Intensité de courant
Résistance thermique	$L/\lambda S$	\leftrightarrow	R	Résistance électrique

Tableau .II.3 : Analogie entre la loi de Fourier et la loi d'Ohm

II-12 Conclusion :

Nous avons détaillé dans ce chapitre à la fois les différents modes de transfert thermique (la conduction, la convection, le rayonnement) et les lois fondamentales régissant le transfert de chaleur ainsi l'analogie thermique-électrique. Les connaissances des bases de ce domaine, sont donc indispensables pour comprendre et maîtriser l'utilisation pratique de ces phénomènes dans l'optique d'une optimisation des systèmes. Le troisième chapitre sera consacré à la modélisation thermique avec la méthode RTN, et les calculs analytiques dans un transformateur seront menés.

Chapitre III

Modélisation thermique et calcul analytique d'un transformateur électrique

III-1 Introduction :

Ce chapitre présente une application de modèle thermique nodale pour la modélisation thermique et les calculs analytiques de l'échauffement d'un transformateur. On va effectuer une résolution de problème thermique (problème d'échauffement dans toutes les régions de transformateur). Dans cette étude, on utilise la méthode RTN à deux dimensions (selon x et y) et un programme MATLAB sera mise en œuvre. Cette méthode est moins précise et fine qu'une méthode numérique mais elle reste avantageuse car plus économique en temps termes de temps de résolution.

L'objectif est de réduire le nombre d'éléments du modèle tout en gardant une précision suffisante. Ceci nécessite généralement un recalage à partir des résultats expérimentaux ou à partir de simulations numérique intensives.

III-2 Principe de ce modèle RTN :

L'établissement d'un modèle RTN peut se décomposer en quatre étapes :

- Le composant est découpé en blocs élémentaires
- Les éléments du modèle relatifs à chaque élément sont calculés
- Le problème est mis en équations
- Le problème est résolu en tenant compte des différentes conditions aux limites du système.

Il convient de définir les différents types possibles, à savoir modèle comportemental ou modèle structurel.

III-3 Type du modèle thermique : comportemental ou structurel :

Le découpage d'un composant en vue de sa modélisation thermique nodale peut se faire de plusieurs manières, selon l'objectif recherché de la modélisation ou encore la précision voulue. Ce découpage peut être plutôt global, on parle alors de modèle comportemental ou plus fortement lié à la géométrie du composant, on parle alors de modèle structurel.

III-3-1 Modèle thermique comportemental :

Ce modèle représente le composant d'une manière globale. Il peut se référer aux différentes parties du composant (exemple : noyaux magnétique, enroulements...) pour établir les éléments du modèle thermique, avec finalement peu de lien entre le modèle et la géométrie du composant. En général ce type de modèle présente un nombre de nœuds très réduit et ne donne qu'un nombre limité de valeurs de température pour une ou plusieurs parties du composant. Un exemple typique de ce genre de modèle est la représentation du transformateur par une résistance thermique unique. La Figure 1 présente un autre exemple de modèle comportemental pour un composant d'une inductance [2], dans lequel l'enroulement et le noyau magnétique sont sources de pertes tandis que leurs températures sont reliées entre elles et vis-à-vis de la température ambiante par seulement trois résistances thermiques. En général pour ce type de modèle, les résistances thermiques sont identifiées à partir des essais expérimentaux.

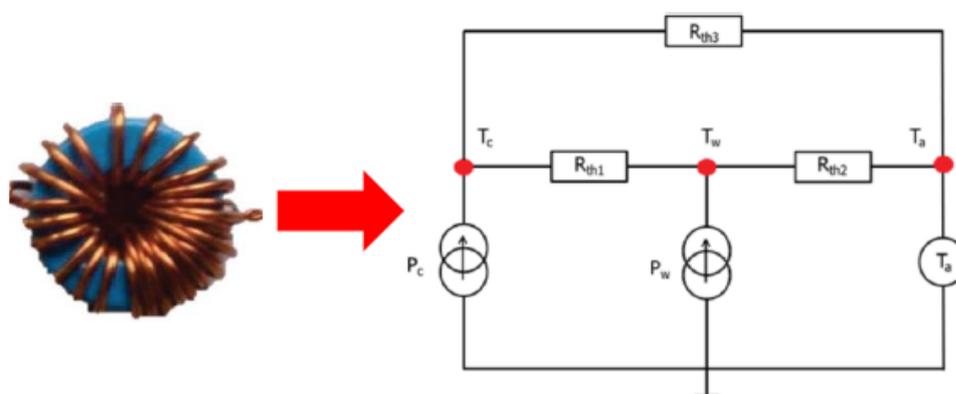


Fig. 1 Exemple de réseau thermique comportemental pour une inductance de convertisseur DC/DC [2]

III-3-2 Modèle thermique structurel (géométrique) :

Pour un modèle dit « structurel », le découpage est basé sur la géométrie du composant pour définir ses différents éléments. Ainsi, la correspondance entre le réseau thermique et la géométrie du composant est identifiée facilement. Ce type de modèle présente généralement un grand nombre d'éléments, permettant d'obtenir des valeurs de températures en de nombreux points du

Composant.

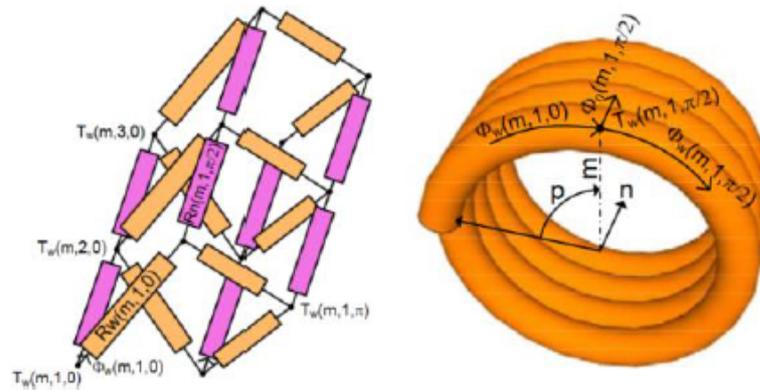


Fig.2 Exemple de réseau thermique structurel pour une couche du bobinage d'un composant magnétique [2]

Le découpage du composant en éléments de géométries simples permet d'avoir recours à des expressions assez simples pour le calcul des différentes résistances thermiques correspondant à chacun de ces éléments.

Pour le développement d'un modèle RTN de transformateur planar, la solution structurelle a été préférée. En effet, comme mentionné précédemment, l'objectif est de pouvoir obtenir la distribution de température à l'intérieur d'un CMP. Seul un modèle type structurel peut répondre à cette problématique.

Nous allons maintenant détailler les différentes étapes de conception d'un modèle RTN avant de l'appliquer aux composants magnétiques planar.

Le modèle mathématique d'un problème RTN le suivant :

III.1

En posant G_{ij} .

L'équation

III.1 peut être mise sous la forme :

III.2

Cette dernière peut s'écrire sous forme matricielle (III.3), ce qui permet d'extraire le vecteur des températures via (III.4).

III.3

Ce qui permet sous la forme :

III.4

A : représente la matrice admittance

B : représente le vecteur perte q_i et conditions limites

T : le vecteur colonne de température à évaluer

Avec :

A=

III.5

B=

III.6

III.7

T=

III.8

III-3 Description du modèle mathématique :

Pour un nœud i donné, siège de perte q_i et lié à plusieurs nœuds j (fig.1), l'équilibre thermique à ce point se traduit par la relation (1)

III.9

Avec R_{ij} les résistances thermique liant i aux nœuds j .

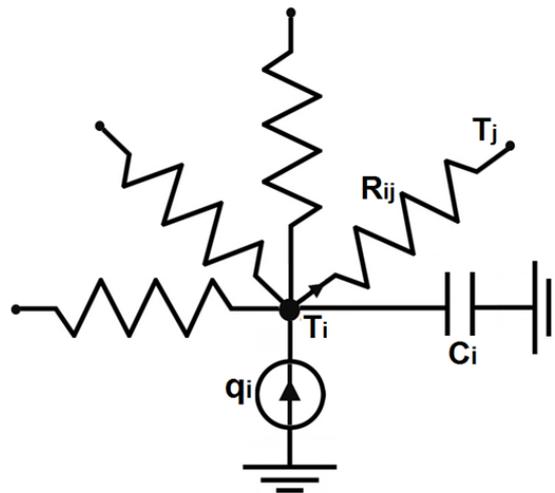


Fig.3 Exemple de nœud du RTN [2]

III-4 Conditions aux limites et coefficients d'échange :

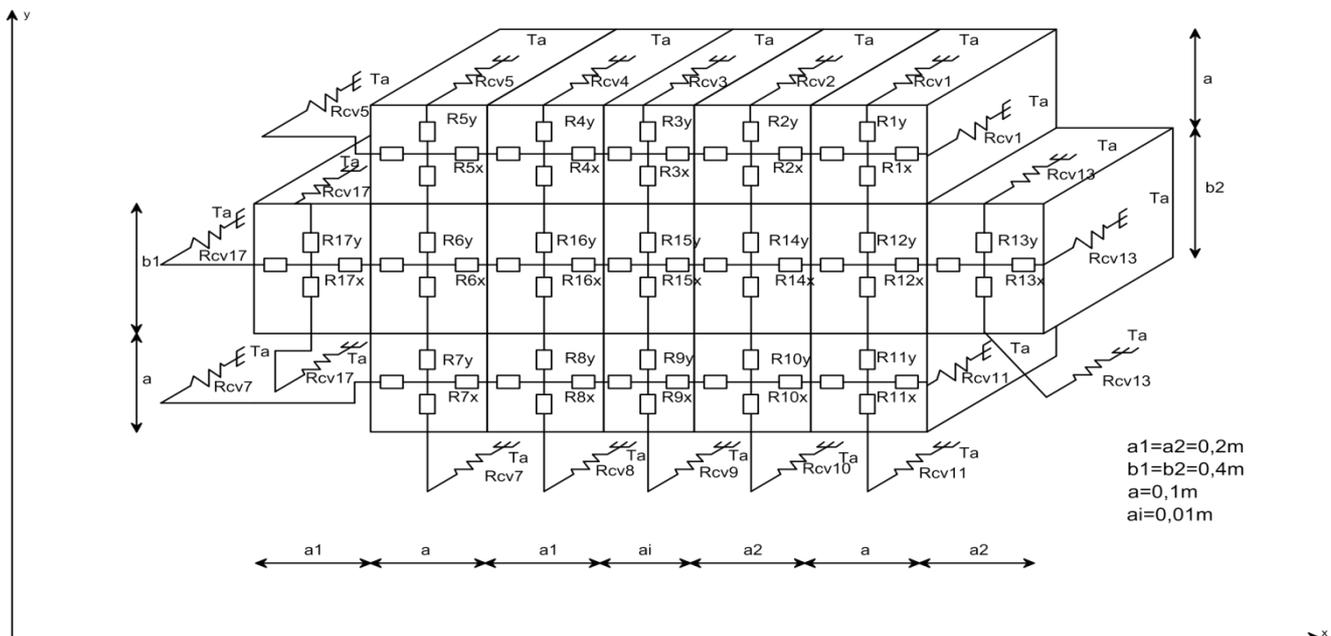
Les coefficients d'échanges avec l'environnement sont appliqués aux 20 surfaces externes du transformateur. Ces coefficients représentent l'ensemble des échanges thermiques par convection et par rayonnement du composant avec l'extérieur.

III-5 Mise en œuvre et résolution :

Le modèle a été implanté sous Matlab-Simulink pour automatiser la création du RTN. Une fonction de post traitement a aussi été développée pour pouvoir visualiser la distribution de la température dans les différents éléments du transformateur.

Le fait que les coefficients d'échange thermique avec l'environnement dépendent de la température, introduit une non-linéarité dans le système, La résolution du problème nécessite

donc un bouclage pour évaluer ces coefficients en fonction de la température, de manière itérative jusqu'à obtenir une convergence du problème quand la norme de la différence des vecteurs températures de deux itérations successives est inférieur à un certain écart.



III-6 Présentation du transformateur étudié :

Le transformateur étudié est un transformateur monophasé décomposé en dix-sept nœuds, formé de deux bobines électriques identiques. Les détails géométriques de transformateur vous voyez sur la fig.4

Fig.4 : RTN en 2D du transformateur.

III-7 Les résultats obtenus après la simulation :

Simulation de problème thermique :

Avec la simulation à l'aide MATLAB, Ont permis de calculer analytiquement la répartition des températures de ce transformateur.

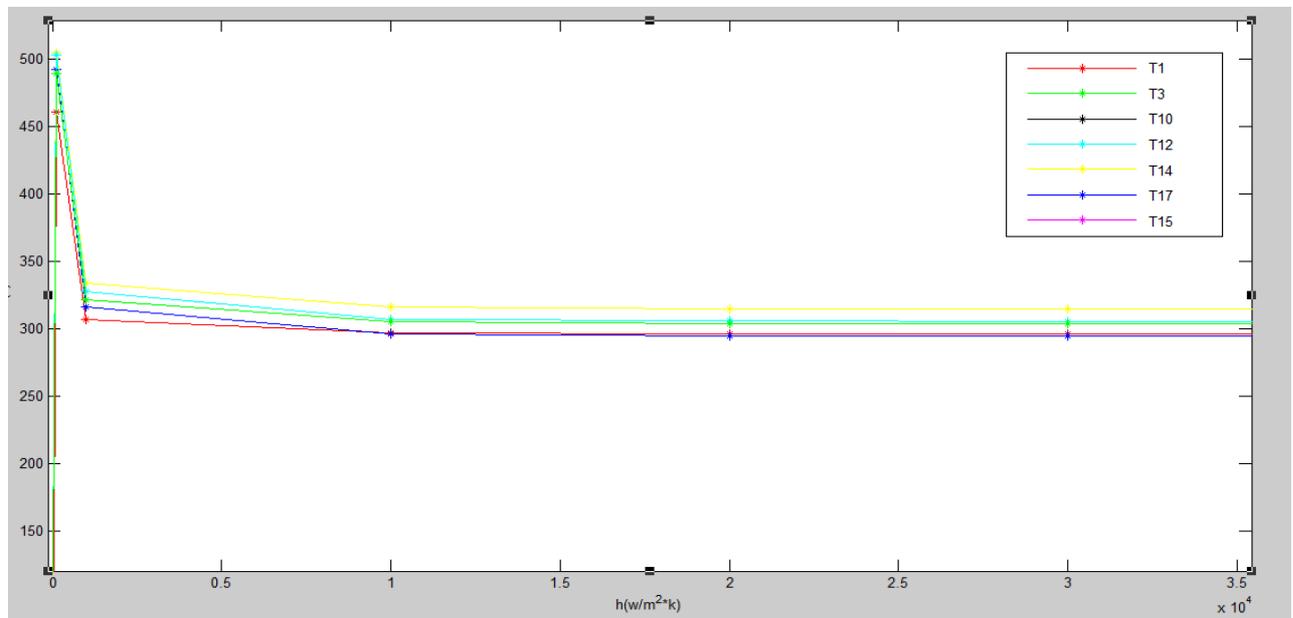
J1 (A/m ²)	0	2e+6	2e+6	4e+6
J2 (A/m ²)	0	1e+6	3e+6	3.5e+6
T1 (k°)	293.7892	294.6887	294.7977	297.4995
T2 (k°)	294.1325	298.004	298.6367	310.2737
T3 (k°)	294.2754	296.708	300.5772	307.9971
T4 (k°)	294.4281	295.687	303.2153	307.2280
T5 (k°)	293.8575	294.130	295.8755	296.7489
T6 (k°)	295.1136	296.329	304.9713	308.8890
T7 (k°)	293.8471	294.119	295.8649	296.7379
T8 (k°)	294.3521	295.610	303.1382	307.1479
T9 (k°)	293.5423	295.965	299.8329	307.2238
T10 (k°)	292.5174	296.368	296.9969	308.5700
T11 (k°)	293.5676	294.464	294.5727	297.2657
T12 (k°)	294.7770	299.244	299.5157	312.9266
T13 (k°)	293.1036	293.888	293.9048	296.2612
T14 (k°)	294.0421	302.572	303.1165	328.7247
T15 (k°)	294.2327	298.693	305.7891	319.3927
T16 (k°)	294.7391	297.112	313.9080	321.5522
T17 (k°)	293.0971	293.2563	294.4800	294.9959

Tableau 1 : La variation de la température en fonction des densités des courants dans un transformateur

Remarque : les pertes cuivre dans les enroulements, sont dues à l'effet joule. De plus, une augmentation de ces derniers augmente la température donc ces pertes sont des sources d'échauffements dans les différents éléments conducteurs des transformateurs.

h (w/m ² *k°)	10	100	1000	10000	20000	30000	40000	100000
T1 (k°)	2.1336	461.0618	306.7997	296.576	296.1437	296.0031	295.9331	295.8067
T2 (k°)	2.1669	489.626	321.670	305.049	304.137	303.831	303.678	303.397
T3 (k°)	2.1666	489.411	321.610	305.041	304.132	303.828	303.675	303.396
T4 (k°)	2.1663	489.196	321.550	305.034	304.128	303.825	303.673	303.395
T5 (k°)	2.1311	459.197	306.380	296.532	296.119	295.985	295.919	295.799
T6 (k°)	2.1765	497.711	325.480	306.741	305.656	305.289	305.104	304.763
T7 (k°)	2.1311	459.197	306.380	296.532	296.119	295.985	295.919	295.799
T8 (k°)	2.1663	489.196	321.550	305.034	304.128	303.825	303.673	303.395
T9 (k°)	2.1666	489.411	321.610	305.041	304.132	303.828	303.675	303.396
T10 (k°)	2.1669	489.626	321.670	305.049	304.137	303.831	303.678	303.397
T11 (k°)	2.1336	461.061	306.799	296.576	296.143	296.003	295.933	295.806
T12 (k°)	2.1824	503.025	327.975	307.204	305.930	305.493	305.268	304.844
T13 (k°)	2.1844	503.078	321.523	297.051	295.461	294.909	294.623	294.075
T14 (k°)	2.1830	504.922	334.161	315.965	314.918	314.563	314.384	314.051
T15 (k°)	2.1829	504.763	334.088	315.952	314.910	314.558	314.379	314.049
T16 (k°)	2.1827	504.603	334.016	315.939	314.902	314.552	314.374	314.047
T17 (k°)	2.1725	492.403	316.455	296.108	294.902	294.494	294.288	293.910

Tableau 2 : La variation des températures T en fonction de coefficient d'échange (h)



Remarque : l'échange entre l'ensemble des surfaces extérieures du transformateur est modélisé par un coefficient d'échange convectif, et une température ambiante $T_{amb} = 293\text{k}$.

En toute rigueur, h évalué avec la température T et diffère d'une surface à l'autre, apportant ainsi une forte non linéarité au système, notre étude tente de montrer les limites thermiques du transformateur.

ai(m)	0.01	0.03	0.05	0.07	0.09
T1 (k°)	295.9050	295.7303	295.5943	295.4845	295.3935
T2 (k°)	303.3785	302.5516	301.9214	301.4207	301.0107
T3 (k°)	303.0139	300.9699	299.5654	298.5456	297.7816
T4 (k°)	303.6130	303.3471	303.1994	303.1181	303.0763
T5 (k°)	295.9441	295.9002	295.8760	295.8628	295.8563
T6 (k°)	305.1409	305.0519	305.0037	304.9794	304.9692
T7 (k°)	295.9333	295.8778	295.8496	295.8362	295.8311
T8 (k°)	303.5346	303.1836	303.0069	302.9241	302.8932
T9 (k°)	302.2578	299.2578	297.3909	296.1951	295.4119
T10 (k°)	301.7127	298.0475	295.0794	292.6105	290.5142

T11 (k°)	295.6764	295.1121	294.6551	294.2752	293.9527
T12 (k°)	305.0577	304.3143	303.7127	303.2142	302.7927
T13 (k°)	294.8839	294.8406	294.8055	294.7764	294.7518
T14 (k°)	313.6945	312.2113	311.0106	310.0156	309.1743
T15 (k°)	310.2562	306.9862	305.6291	304.7476	304.1162
T16 (k°)	314.2500	314.0721	313.9755	313.9269	313.9065
T17 (k°)	294.4878	294.4838	294.4815	294.4804	294.4800

Tableau 3 : L'évolution de la température T en fonction de l'épaisseur de l'isolant ai

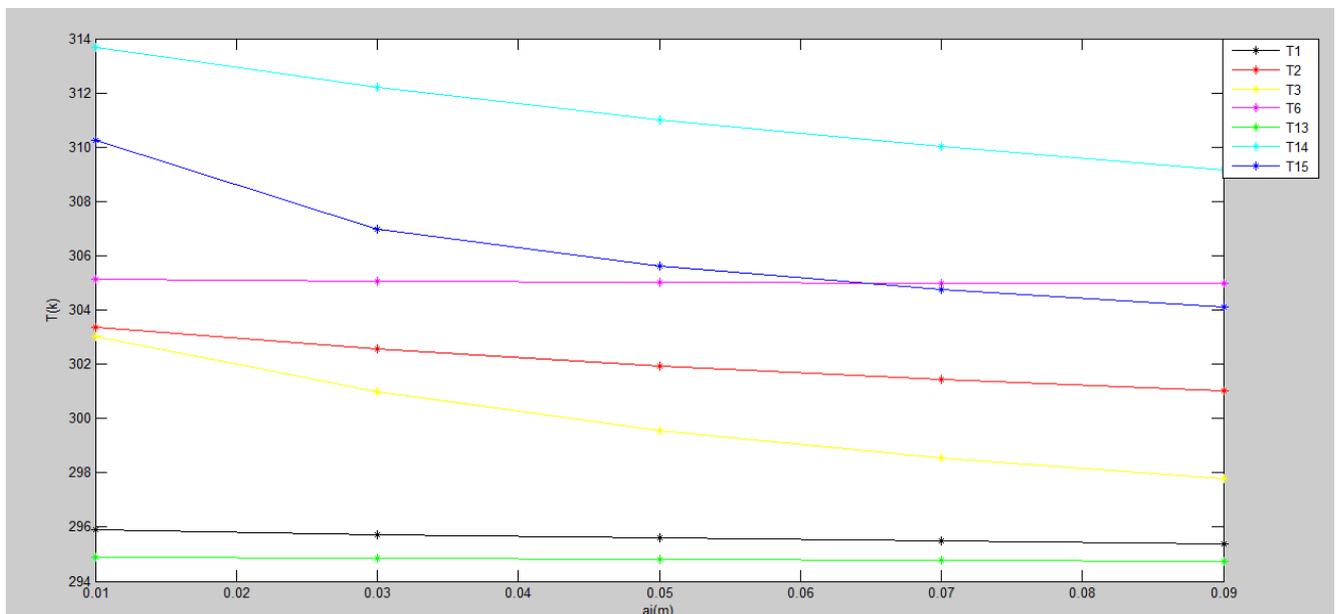


Fig.6 L'évolution de la température T1, T2, T3, T6, T13, T14, T15 en fonction de l'épaisseur de l'isolant ai.

Remarque : On remarque qu'à chaque fois qu'on augmente l'épaisseur de l'isolant, la température de l'isolant diminue. C'est la traduction de la propriété d'isolant thermique de ce matériau.

a(m)	0.1	0.2	0.3	0.4
a1(m)=a2(m)	0.2	0.3	0.4	0.5
b1(m)=b2(m)	0.4	0.6	0.8	1
T1 (k°)	295.9050	303.0339	314.6060	331.1035
T2 (k°)	303.3785	323.8303	355.2641	398.5866
T3 (k°)	303.0139	323.4817	354.8815	398.1759
T4 (k°)	303.6130	324.0074	355.3792	398.6612
T5 (k°)	295.9441	303.0493	314.5891	331.0603
T6 (k°)	305.1409	328.8066	366.8802	422.4007
T7 (k°)	295.9333	303.0234	314.5544	331.0192
T8 (k°)	303.5346	323.8396	355.1634	398.4118
T9 (k°)	302.2578	322.4768	353.8125	397.0647
T10 (k°)	301.7127	321.8669	353.2643	396.5565
T11 (k°)	295.6764	302.7314	314.2844	330.7697
T12 (k°)	305.0577	328.9299	367.2260	422.9257
T13 (k°)	294.8839	298.2530	305.7377	320.2012
T14 (k°)	313.6945	356.5346	424.6989	522.3112
T15 (k°)	310.2562	346.8346	405.1323	488.4754
T16 (k°)	314.2500	357.0198	425.0522	522.5691
T17 (k°)	294.4878	297.4698	304.5790	318.7121

Tableau 4 : La variation de la température en fonction des paramètres géométriques du transformateur

Remarque : en remarque que le changement des paramètres géométrique du transformateur à l'influence sur l'augmentation de la température de ce dernier, l'échauffement se produis par les pertes d'énergie électrique dans la partie active du transformateur pendant son fonctionnement, ce qui nécessite le refroidissement de ce dernier.

III-8 Conclusion :

LA décomposition de manière structurelle répond aux exigences d'un modèle RTN précis il nous permet d'éviter le recours à la méthode des éléments finis plus compliquée et très coûteuse en temps de calcul ceci confirme l'efficacité de cette méthode dans un cas aussi simple à modéliser. Il n'en sera certainement pas aussi simple pour des systèmes qui diffusent la température dans les trois dimensions de l'espace comme c'est le cas de tous les systèmes réels notamment les transformateurs.

Conclusion générale

Cette étude nous a permis de mieux connaître le transformateur en générale, notamment du point de vue construction et constitution. Ce travail nous a permis de compléter nos connaissances sur les dispositifs électrotechniques.

Les pertes dans un transformateur apparaissent sous forme de chaleur et donnent lieu à une augmentation de température (échauffement).

L'échauffement à l'intérieur du transformateur, qu'elle soit causée par les pertes cuivre et fer, provoque un vieillissement accéléré de l'isolant. Ce dernier est le déterminant de la durée de vie du transformateur. D'où l'intérêt de la connaissance de la température maximale qu'atteignent les différentes parties du transformateur notamment celle de l'isolant.

Un modèle thermique est nécessaire pour la connaissance de la répartition de la température 2D dans le transformateur étudié.

Un composant peut être décomposé soit de manière comportementale (thermique), ou structurelle (géométrique).

Les bases de la modélisation thermique par réseau thermique nodal ont été présentées, tout comme la formulation mathématique et les différents types de résolution du problème. l'application de ce type de modèle aux transformateur étudié et son implémentation ont été développés. Le modèle RTN et a ensuite été appliqué sur le transformateur.

Le modèle RTN nous permet de convertir un problème thermique en un autre de résistance électrique équivalent grâce à l'analogie thermique-électrique.

Annexe

Calcul des résistances de conduction et de convection et construction des matrices A et B et du vecteur U

1/ point T1 :

$$r_{1x} = r_{1y} =$$

2/ point T2 :

$$r_{2x} =$$

$$r_{2y} =$$

3/ point T3 :

$$r_{3x} =$$

$$r_{3y} =$$

4/ point T4 :

$$r_{4x} =$$

$$r_{4y} =$$

5/ point T5 :

$$r_{5x} = r_{5y} = r_{1x}$$

6/ point T6 :

$$r_{6x} =$$

$$r_{6y} =$$

7/ point T7 :

$$r_{7x} = r_{7y} = r_{1x}$$

8/ point T8 :

$$r_{8x} = r_{4x}$$

$$r_{8y} = r_{4y}$$

9/ point T9 :

$$r_{9x}=r_{3x}$$

$$r_{9y}=r_{3y}$$

10/ point T10 :

$$r_{10x}=r_{2x}$$

$$r_{10y}=r_{2y}$$

11/ point T11 :

$$r_{11x}=r_{11y}=r_{1x}$$

12/ point T12 :

$$r_{12x}=r_{6x}$$

$$r_{12y}=r_{6y}$$

13/ point T13 :

$$r_{13x} =$$

$$r_{13y} =$$

14/ point T14 :

$$r_{14x}=r_{13x}$$

$$r_{14y}=r_{13y}$$

15/ point T15 :

$$r_{15x}==$$

$$r_{15y}==$$

16/ point T16 :

$$r_{16x}==$$

$$r_{16y} =$$

17/ point T17 :

$$r_{17x}=r_{16x}$$

$$r_{17y}=r_{16y}$$

a-1 Les résistances de convections:

a-1 dans le fer :

rcv1=

rcv2=

rcv3=

rcv4=

rcv5== rcv1

rcv6= 0

rcv7= rcv1

rcv8= rcv4

rcv9= rcv3

rcv10= rcv2

rcv11= rcv1

rcv12= 0

a-2 dans le cuivre:

rcv13x=

rcv13y=

rcv14= 0

rcv16= 0

rcv17x=

rcv17y=

a-3 dans l'isolant :

rcv15= 0

b/ construction de la matrice A :

A(1,1)=+++

A(1,2)=

A(1,12)=

A(2,2)=+++

A(2,1)= A(1,2)

A(2,3)=

A(2,14) =

$$A(3,3) = +++$$

$$A(3,2) = A(2,3)$$

$$A(3,4) =$$

$$A(3,15) =$$

$$A(4,4) = +++$$

$$A(4,3) = A(3,4)$$

$$A(4,5) =$$

$$A(4,16) =$$

$$A(5,5) = +++$$

$$A(5,4) = A(4,5)$$

$$A(5,6) =$$

$$A(6,6) = +++$$

$$A(6,5) = A(5,6)$$

$$A(6,7) =$$

$$A(6,16) =$$

$$A(6,17) =$$

$$A(7,7) = +++$$

$$A(7,6) = A(6,7)$$

$$A(7,8) =$$

$$A(8,8) = +++$$

$$A(8,7) = A(7,8)$$

$$A(8,9) =$$

$$A(8,16) =$$

$$A(9,9) = +++$$

$$A(9,8) = A(8,9)$$

$$A(9,10) =$$

$$A(9,15) =$$

$$A(10,10) = +++$$

$$A(10,9) = A(9,10)$$

$$A(10,11)=$$

$$A(10,14)=$$

$$A(11,11)=+++$$

$$A(11,10)=A(10,11)$$

$$A(11,12)=$$

$$A(12,12)=+++$$

$$A(12,1)=A(1,12)$$

$$A(12,11)=A(11,12)$$

$$A(12,13)=$$

$$A(12,14)=$$

$$A(13,13)=++$$

$$A(13,12)=A(12,13)$$

$$A(14,14)=+++$$

$$A(14,2)=A(2,14)$$

$$A(14,10)=A(10,14)$$

$$A(14,12)=A(12,14)$$

$$A(14,15)=$$

$$A(15,15)=+++$$

$$A(15,3)=A(3,15)$$

$$A(15,9)=A(9,15)$$

$$A(15,14)=A(14,15)$$

$$A(15,16)=$$

$$A(16,16)=+++$$

$$A(16,4)=A(4,16)$$

$$A(16,6)=A(6,16)$$

$$A(16,8)=A(8,16)$$

$$A(16,15)=A(15,16)$$

$$A(17,17)=++$$

$$A(17,6)=A(6,17)$$

Construction de la matrice B :

$$B(1,18)=+)$$

$$B(2,18)=$$

$$B(3,18)=$$

$$B(4,18)=$$

$$B(5,18)=+$$

$$B(6,18)=0$$

$$B(7,18)=+$$

$$B(8,18)=$$

$$B(9,18)=$$

$$B(10,18)=$$

$$B(11,18)=+$$

$$B(12,18) = 0$$

$$B(13,18)=+$$

$$B(14,18)=0$$

$$B(15,18)=0$$

$$B(16,18)=0$$

$$B(17,18)=+$$

Construction de la matrice U:

1-les pertes dans le fer :

$q_{fer_i} = q_{fer_m} \cdot v_i$ avec $i=1,12$ et q_{fer_m} : pertes fer massiques (pertes fer/masse)

$$\rho_{fer}=7860\text{kg/m}^3$$

La masse : $m=\rho_{fer} \cdot v$ et $\rho_{fer}=m/v$ (ρ_{fer} : masse volumiques du fer)

Pertes dans le fer à 50Hz : $q_{fer_m} = 2.5\text{w/kg}$

$$a=0.1;$$

$$a_1=0.2;$$

$$a_i =0.01;$$

$$a_2=0.2;$$

$$b_1=0.4;$$

$$b_2=0.4;$$

$$h=1000;$$

$$V_1=a^3; v_2=a^2 \cdot a_2; v_3= a^3 \cdot a_i; v_4= a^2 \cdot a_1; v_5=v_1; v_6=b_1 \cdot a \cdot a_1; v_7= a^3 ;$$

$$v_8=v_4; v_9=v_3; v_{10}=v_2; v_{11}=v_1; v_{12}=v_6; v_{13}=b_2 \cdot a_2 \cdot a; v_{14}=v_{13};$$

$$v_{15}=a_i \cdot b_2 \cdot a; v_{16}=a_1 \cdot b_1 \cdot a; v_{17}=v_{16}$$

2- les pertes dans le cuivre:

$$R = \rho_{cu} \cdot$$

$$P_{cu} = R \cdot I^2 = R \cdot J^2 \cdot S^2 = \rho_{cu} \cdot J^2 \cdot S^2 = J^2 \cdot \rho_{cu} \cdot S^2 = J^2 \cdot V$$

$$P_{cu} = \rho_{cu} \cdot V \cdot J^2 \quad \text{avec : } \rho_{cu} = (1.75 \cdot 10^{-8}) \quad \text{et } J = 3 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$$

$$P_{cu_{13}} = \rho_{cu} \cdot V_{13} \cdot J_1^2$$

$$P_{cu_{14}} = P_{cu_{13}}$$

$$P_{cu_{16}} = \rho_{cu} \cdot V_{16} \cdot J_{16}^2 \quad \text{avec : } J = J_1 = J_2 = J_{16}$$

$$P_{cu_{17}} = P_{cu_{16}}$$

$$\text{La température ambiante : } T_{amb} = (20 + 273 \text{K}) = 293 \text{K}$$

$$q_{fer1} = 2.5 \cdot 7860 \cdot 0.1^3 = 19.65$$

$$q_{fer2} = 2.5 \cdot 7860 \cdot 0.1^2 \cdot 0.2 = 39.3$$

$$q_{fer3} = 2.5 \cdot 7860 \cdot 0.1^2 \cdot 0.01 = 1.965$$

$$q_{fer4} = 2.5 \cdot 7860 \cdot 0.1^2 \cdot 0.2 = 39.3$$

$$q_{fer5} = 2.5 \cdot 7860 \cdot 0.1^3 = 19.65$$

$$q_{fer6} = 2.5 \cdot 7860 \cdot 0.1 \cdot 0.2 = 39.3$$

$$q_{fer7} = 2.5 \cdot 7860 \cdot 0.1^3 = 19.65$$

$$q_{fer8} = 2.5 \cdot 7860 \cdot 0.1^2 \cdot 0.2 = 39.3$$

$$q_{fer9} = 2.5 \cdot 7860 \cdot 0.1^2 \cdot 0.01 = 1.965$$

$$q_{fer10} = 2.5 \cdot 7860 \cdot 0.1^2 \cdot 0.2 = 39.3$$

$$q_{fer11} = 2.5 \cdot 7860 \cdot 0.1^3 = 19.65$$

$$q_{fer12} = 2.5 \cdot 7860 \cdot 0.4 \cdot 0.1 \cdot 0.2 = 157.2$$

$$q_{cu13} = 1.75 \cdot 10^{-8} \cdot ((3 \cdot 10^6)^2) \cdot 0.4 \cdot 0.1 \cdot 0.2 = 1260$$

$$q_{cu14} = 1.75 \cdot 10^{-8} \cdot ((3 \cdot 10^6)^2) \cdot 0.4 \cdot 0.1 \cdot 0.2 = 1260$$

$$q_{iso15}=0$$

$$q_{cu16}=1.75 \cdot 10^{-8} \cdot ((3 \cdot 10^6)^2) \cdot 0.2 \cdot 0.4 \cdot 0.1 = 1260$$

$$q_{cu17}=1.75 \cdot 10^{-8} \cdot ((3 \cdot 10^6)^2) \cdot 0.2 \cdot 0.4 \cdot 0.1 = 1260$$

Bibliographie :

- [1] Souad Chebaani : « Modélisation thermique d'un transformateur utilisant un matériau composite Fer-Résine » Mémoire en Electrotechnique, Université de Batna, 2012.
- [2] Reda Bakri : « Modélisation thermique des composants magnétique planar pour l'électronique de puissance » Thèse Doctorat en génie électrique, Centrale Lille, 2018.
- [3] Draifia Smail, Mahiddine Fathi : « Analyse du comportement thermique d'un compartiment isolant au gaz de commutation utilisant la méthode de réseau thermique » Mémoire en génie électrique, Université de Tébessa, 2021.
- [4] A. BERFAS, M. NEKACHE : « calcul et exploitation d'un transformateur triphasé de puissance 25/30MVA - 30kV / 5,875kV» Mémoire en génie électrique, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2010.
- [5] Zaidi Ramdane, Haddadi Abd El Kader : « Localisation de défauts dans un transformateur de puissance » Mémoire en génie électrique, université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2011
- [6] Cherif Salma, Ould Slimane Djafar : « Modélisation 2-D par éléments finis des transformateurs de distribution par couplage fort magnétique-circuit électrique et magnétique-densité de courant » Mémoire en génie électrique, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2009.