



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique



Université Amar Telidji - Laghouat

**FACULTÉ DE TECHNOLOGIE
DÉPARTEMENT D'ÉLECTROTECHNIQUE**

MÉMOIRE DE MASTER

Présenté et Réalisé par :

LIMAM AHMED Mohamedou

DEBOUZ Hicham

DOMAINE : Sciences et Technologies

FILIERE : électrotechnique

SPECIALITE : Machines électriques

Thème

Étude par simulation de la distribution de la température en régime permanent dans un transformateur annulaire refroidi à l'huile.

Jury de soutenance

DOUIDI Brahim	MCA	UATLaghouat
BELLAHCENE Lahcene	MCA	UATLaghouat
YOUSFI Belkacem	MCA	Encadreur

Promotion : 2022 / 2023

ملخص:

العمل الذي قدمناه في هذه الأطروحة يتعلق بدراسة عن طريق محاكاة توزيع درجة الحرارة في حالة ثابتة في محول حلقي مبرد بالزيت، وتستند هذه الدراسة على توزيع درجة الحرارة على مستوى المحول المغمور. في الزيت. لقد حللنا هذه المشكلة باستخدام معادلات نافيه-ستوكس الخاصة بنقل الحرارة العام وقابل للانضغاط الضعيف، والتي تساعدنا على تحديد تباين التوصيل الحراري للسائل على توزيع درجة الحرارة وتأثير تغير المكان.

Abstract:

The work that we have presented in this thesis concerns a study by simulation of the distribution of the temperature in steady state in an oil-cooled annular transformer, this study is based on the distribution of the temperature at the level of the submerged transformer. in oil. We have solved this problem by using the Navier-stokes equations of weakly compressible and general heat transfer, which help us to determine the variation of the thermal conductivity of the fluid on the distribution of the temperature and the effect of the change of the place.

Résumé :

Le travail que nous avons présenté dans ce mémoire concerne une étude par simulation de la distribution de la température en régime permanent dans un transformateur annulaire refroidi à l'huile, cette étude est basée sur la distribution de la température au niveau du transformateur immergé dans l'huile. Nous avons résolu ce problème en utilisant les équations de Navier-stokes faiblement compressible et transfert de chaleur général, qui nous aident de déterminer la variation de la conductivité thermique du fluide sur la distribution de la température et l'effet du changement de la place.

Remerciements

Tout d'abord nous remercions le bon ALLAH, tout puissant, de la bonne santé, de la volonté et de la patience qu'il nous accordé tout au long de nos études.

Nous tenons à remercier cordialement, notre chef encadreur monsieur **BELKACEM Yousfi** pour sa précieuse collaboration et son pertinent conseil, qu'il n'ait cessé de nous donner tout au long de l'élaboration de ce modeste travail.

Nos plus vifs remerciements vont aux membres de jury. À monsieur **DOUIDI Brahim**, de nous avoir fait l'honneur de présider ce jury. À monsieur **BELLAHCENE Lahcene** d'avoir accepté de juger ce travail et nous avoir fait l'honneur de participer au jury de ce mémoire.

Enfin, nous remercions aussi tous ceux qui ont participé de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Dédicaces

À nos chers parents, source de vie, d'amour et d'affection

À nos chers frères et sœurs, source de joie et de bonheur

À toute notre famille, source d'espoir et de motivation

À toute nos amis, particulièrement ceux d'enfance

À vous cher lecteur

TABLE DES MATIÈRES

RESUME :	II
REMERCIEMENTS	III
DEDICACES	IV
TABLE DES MATIÈRES	V
LISTE DES FIGURES	VII
LISTE DES TABLEAUX	IX
NOMENCLATURES	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
INTRODUCTION GENERALE	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
CHAPITRE I : GENERALITES SUR LE TRANSFERT THERMIQUE	2
I. INTRODUCTION	3
I.2 LES MODES DU TRANSFERT DE LA CHALEUR	4
I.2.1 LA CONDUCTION	4
I.2.1.1 LES LOIS FONDAMENTALES DE LA CONDUCTION	5-6
I.2.2 LA CONVECTION.....	7
I.2.2.1 LES LOIS FONDAMENTALES DE LA CONVECTION.....	7
I.2.3 LE RAYONNEMENT THERMIQUE.....	8
I.3 TRANSFERT DE LA CHALEUR PAR CONDUCTION	8
I.3.1 EQUATION DE LA CHALEUR.....	8-9-10
I.3.2 RESOLUTION DE L'EQUATION DE LA CHALEUR EN REGIME PERMANENT	10
I.4 TRANSFERT DE CHALEUR PAR CONVECTION	12
I.4.1 TYPES DES CONVECTIONS.....	12
I.4.1.1 LA CONVECTION LIBRE.....	10
I.4.1.2 LA CONVECTION LIBRE FORCEE	10
I.4.1.3 LA CONVECTION MIXTE.....	13
I.4.2 TYPES DE TRANSFERT DE CHALEUR ASSISTEE PAR LE MOUVEMENT FLUIDE.....	13-14
I.4.3 REGIME D'ECOULEMENT.....	14
I.4.3.1 EN REGIME LAMINAIRE.....	14
I.4.3.2 EN REGIME TURBULENT	14-15
I.4.4 LES EQUATIONS DE NAVIER-STOKES.....	15
I.4.4.1 EQUATION DE CONSERVATION DE LA MASSE OU DE CONTINUITÉ.....	15
I.4.4.2 EQUATION DE CONSERVATION DE LA QUANTITE DE MOUVEMENT.....	15
I.4.4.3 EQUATION DE CONSERVATION DE L'ENERGIE.....	15-16
I.4.4.4 EQUATION DE POISSON.....	16
I.4.4.5 FORME NON-DIMENSIONNELLE DES EQUATIONS.....	16-17
I.5 LES GRANDEURS THERMIQUES	12
I.6 NOTIONS SUR LE TRANSFORMATEUR	18
I.6.1 DEFINITION DU TRANSFORMATEUR.....	18-19
I.6.2 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT.....	12
I.6.3 LES TYPES DE TRANSFORMATEUR	12
I.6.3.1 TRANSFORMATEUR A COLONNES.....	12
I.6.3.2 TRANSFORMATEUR CUIRASSE.....	13
I.6.3.3 TRANSFORMATEUR EN DOUBLE T.....	20-21
I.6.3.4 TRANSFORMATEUR A NOYAU ANNULAIRE	21
I.6.4 L'UTILISATION DE TRANSFORMATEUR	22
I.6.4.1 LE TRANSFORMATEUR DANS LE RESEAU ELECTRIQUE	22
I.6.4.1.1 LA PRODUCTION D'ENERGIE	23
I.6.4.1.1.1 TRANSFORMATEUR ELEVATEUR DE TENSION.....	23
I.6.4.1.2 LE TRANSPORT D'ENERGIE ELECTRIQUE.....	23
I.6.4.1.2.1 TRANSFORMATEUR D'INTERCONNEXION.....	23-24

I.6.4.1.3 LA DISTRIBUTION ELECTRIQUE.....	24
I.6.4.1.3.1 TRANSFORMATEUR ABASSEURS.....	24
I.6.4.1.3.2 TRANSFORMATEUR DE DISTRIBUTION.....	24-25
I.6.4.2 TRANSFORMATEUR SPECIAUX.....	25
I.6.4.2.1 AUTOTRANSFORMATEUR.....	25-26
I.6.4.2.2 TRANSFORMATEUR DE TENSION (TT).....	26
I.6.4.2.3 TRANSFORMATEUR DE COURANT (IT).....	27
I.7 SOURCES D'ECHAUFFEMENT DES TRANSFORMATEURS.....	27
I.7.1 PERTES JOULE.....	28
I.7.2 PERTES FER.....	28-29
I.7.3 ENVIRONNEMENT AMBIANT.....	29
I.7.4 SURCHARGE.....	30
I.7.5 MAUVAISE VENTILATION.....	30
I.8 TYPES DE REFROIDISSEMENT D'UN TRANSFORTEUR.....	30
I.8.1 REFROIDISSEMENT DES TRANSFORMATEUR PAR L'HUILE.....	30
I.8.2 LES AILETTES	31
I.8.2.1 FLUX EXTRAIT PAR UNE AILETTES.....	31
I.9 LES EQUATIONS DE LA SIMULATION.....	31-32-33
II.1 INTRODUCTION	35
II.2 PRESENTATION DU LOGICIEL COMSOL-MULTIPHYSICS	35
II.2.1. COMSOL-MULTIPHYSICS	35
II.2.2. LES PERFORMANCES DE COMSOL-MULTIPHYSICS	35
II.2.3 ÉTAPES DE RESOLUTION DES EDP PAR COMSOL-MULTIPHYSICS	36
II.2.4 INTERFACE GRAPHIQUE DU COMSOL.....	36
II.2.5 CHOIX DU MODULE PHYSIQUE.....	36-37
II.2.6. GEOMETRIE EN 2D A SIMULER	38
II.2.7 PARAMETRES PHYSIQUES DES SOUS DOMAINES.....	38-39
II.2.8 MAILLAGE DE LA GEOMETRIE	39
II.2.9 CONDITION AUX LIMITES	40
II.3 RESULTATS ET DISCUSSIONS.....	41
II.3.1 EFFET DE LA VARIATION DE LA CONDUCTIVITE THERMIQUE DU FLUIDE SUR LA DISTRIBUTION DE LA TEMPERATURE	41-42-43-44
II.3.2. EFFET DU CHANGEMENT DE LA POSITION.....	45-46-17
II.4. CONCLUSION	48
CONCLUSION GENERALE.....	49
BIBLIOGRAPHIE	50

Liste des figures

Figure. I.1. Conduction de la chaleur dans un barreau	4
Figure I.2. Plaque plane	5
Figure. I.3. Principe de la convection	7
Figure I.4. Échange thermique entre milieux différents	9
Figure I.5. Fronton simple à faces isothermes	10
Figure I.6. Présentation de la convection dans une cristallerie	12
Figure I.7. Four à convection forcée	12
Figure I.8. Écoulement et transfert de chaleur dans un canal.	13
Figure I.9. Schématisation d'un écoulement turbulent	14
Figure I.10. Schématisation d'un écoulement turbulent	15
Figure I.11 Fonctionnement d'un transformateur	19
Figure I.12. Transformateur à colonnes	20
Figure I.13. Transformateur cuirassé	20
Figure I.14. Transformateur Tt11 (Marcus Transformer of Canada Ltd)	21
Figure I.15. Transformateur à noyau annulaire	21
Figure I.16 Emplacement d'un transformateur dans le réseau électrique	22
Figure I.17 Transformateur élévateur de sortie de centrale électrique	23
Figure I.18 Transformateur d'interconnexion de réseau	24
Figure I.19 Poste de distribution surpoteaux	25
Figure I.20 Poste de distribution Cabiné	25
Figure I.21 Autotransformateur	25

Figure I.22 représenté deux exemples pour l'autotransformateur variable	26
Figure I.23 Transformateur de tension	26
Figure I.24 Transformateur de courant	27
Figure I.25 Refroidissement du transformateur par huile	30
Figure I.26 différents types d'ailettes : (a) ailette droite à section constante, (b) ailette droite à section variable, (c) ailette annulaire, (d) ailette en forme d'aiguille à section variable.	31
Figure II.1 Logo du COMSOL lors de l'ouverture	35
35	
Figure II.2 Étapes de simulation sous COMSOL	36
Figure II.3 Fenêtre de démarrage du logiciel	36
Figure II.4 Modèle de Navier-Stokes Faiblement Compressible	37
Figure II.5 Modèle de Transfert de Chaleur Général	37
Figure II.6 Géométrie du problème	38
Figure II.7 Paramètres du sous domaine fluide 38	38
Figure II.8 Paramètres de sous domaines solide	38
Figure II.8 Paramètres de sous domaines solide	39
Figure II.9 Maillage de la Géométrie	39
Figure II.10 Condition aux limites	40
Figure II.11 Distribution de la température du milieu fluide avec une conductivité thermique (a) $k_f = 0.153$, (b) $k_f = 0.3$ [W/m.K]	41
Figure II.12 Variation de la température dans un milieu solide-fluide en fonction de la conductivité thermique thermique de fluide k_f	42
Figure II.13 Variation de la température dans le fluide en fonction de la conductivité thermique [W/m.K]	42
Figure II.14 Cartographies du flux (a) de chaleur totale (b) thermique convectif	43

Figure II.15 Variation du flux thermique par conduction solide-fluide en fonction de la conductivité thermique du fluide [W/m.K]	44
Figure II.16. Variations du flux thermique convectif dans un milieu fluide en fonction de coordonnée z en choisissant deux valeur de la conductivité thermique k_f [W/m.K]	44
Figure II.17. Figure illustrant les différentes droites (D_1 en rouge, D_2 en bleu, D_3 en vert)	45
Figure II.18. Variation de la température entre deux milieux fluides	46
Figure II.19. Variation de la température entre deux milieux : un milieu fluide et un milieu solide-fluide	46
Figure II.20. Variation du flux thermique par conduction dans deux milieux : un milieu fluide et un milieu solide-fluide	47
Figure II.21. Variation du flux de la chaleur totale	47

Liste des tableaux

Tableau I.1. Valeurs de la conductivité thermique dans différents matériaux	17
Tableau II.1 Les constantes du modèle	37
Tableau II.2 Droites des conditions aux limites	40

Listes des abréviations

E : est l'énergie (j).

\emptyset : le flux de chaleur.

φ : la densité de flux thermique.

Q : la quantité de chaleur échangée à travers la surface(S).

φ_g : Flux d'énergie convertie en énergie thermique.

φ_{st} : Flux de chaleur stocké.

Re : le nombre de Reynolds.

P_j : des pertes se produisent en raison de la résistance électrique des conducteurs.

P_{Jenc} : des pertes Joule au niveau des encoches.

P_f : les pertes Fer volumiques

$P_{f moy}$: L'expression décompose les pertes moyennes en trois termes différents.

C_p : Capacité calorifique à pression constante [j/kg.K].

k : La conductivité thermique [w/m.K].

q_s : Coefficient d'absorption [w/ m^3 .K].

ρ : La densité [kg/ m^3].

h : la constante de Planck égale à $6,62.10^{-34}J$.

e : L'épaisseur de la paroi[cm].

T_1 : Température dans le premier milieu (K).

T_2 : Température dans le dixième milieu (K).

P : la densité de source de chaleur.

2D : deux dimensions.

EDP : équation aux dérivées partielles.

S : Surface.

C : chaud.

F : froid.

i : composante selon r.

j : composante selon z.

Introduction Générale

Introduction Générale

Le transfert thermique, appelé plus communément chaleur est l'un des modes d'échange thermique entre deux systèmes, c'est une notion de la thermodynamique. De tous les temps, le phénomène de propagation de la chaleur existait soit dans les milieux naturels ou industriels. Pour cela la science s'est penchée sur l'étude de la transmission d'énergie d'une façon optimale. La propagation de la chaleur est obtenue par la différence de température entre deux milieux qu'ils soient naturels ou dans un système industriel. Dans la nature, on distingue le déplacement naturel des vents entre différentes zones dont les températures sont différentes. La distribution précise de la température en régime permanent dépend de plusieurs facteurs, tels que la conception spécifique du transformateur, les paramètres de fonctionnement, la puissance du transformateur et l'efficacité du système de refroidissement. De nos jours, il est devenu nécessaire à tout technicien d'avoir des connaissances sur les lois fondamentales de transfert d'énergie. Les milieux technologiques trouvent un grand champ d'applications. Ces techniques sont diverses selon les différents modes fondamentaux à savoir : la conduction, la convection et le rayonnement. Le mécanisme le plus important de transfert de chaleur est représenté par le mode convection, c'est la résultante obtenue par l'action combinée de la conduction, de l'accumulation de l'énergie et du mouvement du milieu.

Le transformateur est le composant permettant d'élever l'amplitude de la tension alternative disponible à la sortie de l'alternateur pour l'amener aux niveaux requis pour le transport. À l'autre bout de la chaîne, du côté des consommateurs, les transformateurs sont utilisés pour abaisser la tension et la ramener aux valeurs utilisées dans les réseaux de distribution. Les pertes dans les transformateurs dues essentiellement par les conducteurs électriques notamment par effet Joule principalement qui augmentent généralement la température des transformateurs ; afin de refroidir ces derniers en utilisant des systèmes et des moyens de refroidissement.

Ce mémoire comprend deux chapitres essentiels, présentant l'étude par simulation de la distribution de la température en régime permanent dans un transformateur annulaire refroidi à l'huile.

- Le premier chapitre contient des généralités sur le transfert thermique, une introduction, ses modes, ses lois, les modèles de la simulation,
- Le deuxième chapitre contient la simulation numérique d'un transformateur refroidi par l'huile, par la méthode des éléments finis et leur implémentation sous le logiciel Comsol-Multiphysics,
- Une conclusion générale sera l'objet de la synthèse des principaux résultats obtenus.

CHAPITRE I : Généralités sur le transfert thermique

I.1. Introduction

La thermodynamique représente une partie importante de la physique technique qui étudie les lois de la production de la chaleur ayant à la base d'autre forme d'énergie, sa transformation, sa propagation et son utilisation pratique. Elle propose une description quantitative (dans l'espace et dans le temps) des changements de propriétés du système, notamment de température, entre les états initiaux et d'équilibre. L'importance décisive pour l'étude et le fonctionnement des appareils basant sur les phénomènes de transferts thermiques. Les procédés utilisés dans l'industrie sont très souvent le siège d'échanges de chaleur (fours, échangeurs de chaleur, induction, refroidissement, chauffage). En raison du développement rapide de l'industrie et de l'augmentation de la demande et du prix de l'énergie, l'objectif est d'utiliser efficacement les équipements (d'échange de chaleur) avec la moindre consommation d'énergie dans tous les cas. La notion de chaleur est définie par la thermodynamique comme étant une grandeur de parcours représentant une forme transitoire d'énergie qui se propage à la suite d'une différence de température soit :

- entre deux parties d'un système quelconque,
- entre le système et son environnement,
- entre deux systèmes séparés par un milieu matériel ou pas (vide).

L'étude des phénomènes thermiques qui accompagnent la propagation de la chaleur et le calcul des valeurs du flux thermique représente l'objectif fondamental du transfert thermique (ou de chaleur) ou thermocinétique. Cette partie importante de la physique traite aussi la description des mécanismes des modes de la propagation de la chaleur, conduisant à des relations établies soit théoriquement, soit sur la voie expérimentale entre le flux thermique transféré, les paramètres caractéristiques du système et la condition thermique de son milieu en vaironnant [PHI 2013].

Les transferts thermiques sont omniprésents tant dans la vie même de notre planète, que dans l'existence humaine sue la terre, exprimés par des gestes quotidiens de l'individu ou par des techniques très diversifiées conduisant au progrès de la civilisation.

Le transfert de chaleur est la science qui tente de prédire le transfert d'énergie entre des molécules ou des particules de matière à différentes températures. L'objectif est d'expliquer comment l'échange de chaleur se produit dans certaines conditions spécifiques et de prédire le taux d'échange de chaleur. Il complète les deux premiers principes de la thermodynamique avec des lois expérimentales supplémentaires pour déterminer le rapport de transfert d'énergie. Toute étude thermique des machines électriques a pour objectif l'évaluation de la distribution de la température pour améliorer les matériaux, la géométrie ou le système de refroidissement et permettre d'éviter les régimes de fonctionnement qui détériorent la machine et diminuent sa durée de vie. L'élévation de la température peut réduire de moitié la durée de vie d'une machine électrique. Une température élevée maintenue prolongée peut endommager le système d'isolation des enroulements et détruire les conver-

tisseurs statiques destinés à alimenter certaines machines électriques. Dans la littérature relative à cette discipline, trois modes distincts de transfert de chaleur sont généralement reconnus : la conduction, la convection et le rayonnement [YVE 2005].

I.2 Les 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 à l'unité d'une densité surfacique de puissance [PHI 2013].

I.2.1 La conduction

La conduction est définie comme le mode de transfert de chaleur dans un milieu opaque (solide, liquide ou gazeux) sans déplacement de matière en présence d'un gradient de température. Il se produit par deux mécanismes différents : le mouvement vibrationnel des molécules ou des atomes et le mouvement des électrons libres. Ce mode se produit au sein d'une même phase stationnaire ou mobile en présence d'un gradient de température. Dans ce cas, le transfert de chaleur résulte du transfert d'énergie cinétique d'une molécule à une autre molécule adjacente. Ce type de transmission est le seul qui existe dans les solides opaques (qui absorbent toute la lumière). Pour les solides transparents, une partie de l'énergie est transmise par rayonnement. Pour les fluides (gaz ou liquide), convection et rayonnement peuvent se superposer sur une ligne. Pour illustrer ce phénomène prenons la figure suivante d'un barreau soumis à deux températures T_1 et T_2 à ses extrémités [YVE 2005].

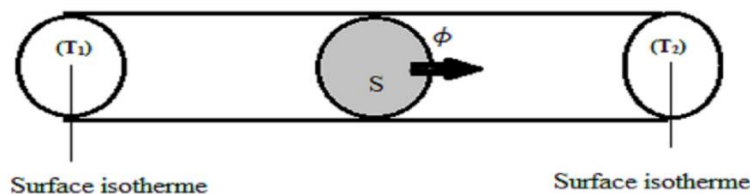


Figure. I.1. Conduction de la chaleur dans un barreau

Si l'on réunit tous les points de l'espace qui ont la même température, on obtient une surface dite surface isotherme. La variation de température par unité de longueur est maximale le long de la normale à la surface isotherme.

I.2.1.1 La loi fondamentale de la conduction

La loi fondamentale de la transmission de la chaleur par conduction ; a été proposée par le mathématicien et physicien français, Jean-Baptiste Joseph Fourier en 1822 [FRA 2013].

-Considérons une plaque plane (D) ; de surface (S) et d'épaisseur (e).

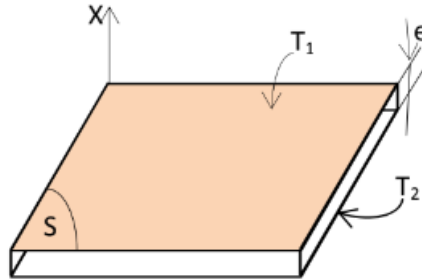


Figure I.2. Plaque plane

-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.

$$\phi = \frac{dq}{dt} \quad (I-2)$$

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

$$\varphi = \frac{dq}{S \cdot dt} \quad (I-3)$$

-Les principaux 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 :

$$\phi = k \frac{S}{e} (T_1 - T_2) \quad (I-4)$$

Tels que :

ϕ : la quantité de flux chaleur échangée à travers la surface(S).

k : la conductivité thermique [W/m. k].

Pour un élément infinitésimal ds , la relation (I-4) s'écrit :

$$d\phi = kds \frac{\partial T}{\partial x} \quad (\text{I-5})$$

L'équation (I-5) est attribuée au mathématicien et physicien Français J.B. Fourier en 1822.

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 :

$$\vec{\phi} = -k\vec{\nabla}T \quad (\text{I-6})$$

Remarque

Par convention, $\vec{\phi}$ est compté positivement dans le sens d'écoulement de la chaleur, c'est-à-dire vers la température décroissante. ∇T est un vecteur porté par le même axe mais de sens contraire à $\vec{\phi}$ d'où le signe négatif de la loi de Fourier. Pour écrire l'équation de la conduction de la chaleur sous une forme mathématique nous devons adopter un signal conventionnel selon le sens du flux thermique (par exemple: $T_1 > T_2, T_1 \rightarrow T_2$).

-Comme le 2^{ème} principe de la thermodynamique implique nécessairement, que la chaleur s'écoule des points les plus chauds vers les points les plus froids le flux thermique sera donc positif lorsque le gradient de température $\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)$ est négatif.

-On remarque que : $\frac{\Delta T}{\Delta x} = \frac{T_1 - T_2}{x_1 - x_2} = -\frac{dT}{dx}, T_1 > T_2$, pour que le flux soit positif, l'équation (I-5) doit s'écrit

avec un signal négatif : $q = -kS \frac{dT}{dx}$.

$-\frac{dT}{dx}$: le gradient de la température dans la section, c'est-à-dire le rapport de la variation de la température à la distance parcouru par le flux thermique.

- De l'équation (I -6) :

$$\phi = -k \cdot \frac{dT}{dx} \Leftrightarrow -\int_{T_1}^{T_2} k dT = \int_{x_1}^{x_2} \phi dx \Leftrightarrow \phi(x_2 - x_1) = -k(T_2 - T_1) = k(T_1 - T_2) \quad (\text{I.7})$$

I.2.2 La convection

La convection consiste essentiellement en un transfert d'énergie d'une région à une autre par le mouvement de paquets (de nombreuses molécules), typiquement des fluides ou des déplacements macroscopiques. Ce mécanisme implique toujours un transfert d'énergie par le mouvement moléculaire, qui est le côté directeur de ce mode. Il existe deux types de convection. En convection naturelle (convection libre), le mouvement des particules est dû à la différence de température imposée au liquide. La différence de température signifie la différence de densité (déplacement des particules, expansion), par exemple (chauffage de l'air dans une montgolfière, chauffage de l'eau dans un récipient). Convection forcée. Le mouvement des particules est causé par la pression appliquée au liquide par des moyens mécaniques (comme une pompe). Le transfert de chaleur par convection se produit entre deux phases en présence d'un gradient de température. L'un est généralement stationnaire et l'autre est en mouvement. Le mouvement des fluides peut être attribué aux différences de densité dues aux différences de température. La figure suivante montre le schéma de principe de la convection entre un solide dont la température T_1 et l'extérieur (fluide en mouvement) dont la température est T_2 [YVE 2005].

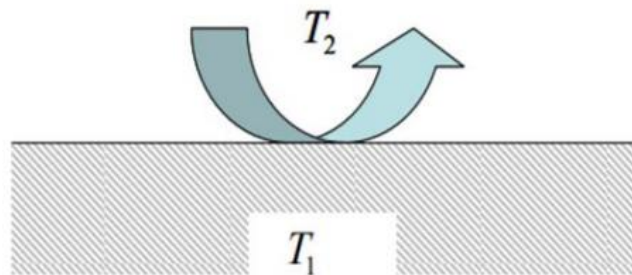


Figure. I.3. Principe de la convection

I.2.2.1 La loi fondamentale de la convection

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 [FRA 2013].

$$\phi = hS (T_{chaud} - T_{froid}) \quad (I-8)$$

$$h = k_{fluide} / \delta \quad (I-9)$$

Tels que :

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

k_{fluide} : la conductivité thermique du fluide.

h : le coefficient du transfert de chaleur par convection, $[W/m^2 \cdot K]$.

I.2.3 Le rayonnement thermique

C'est un mode d'échange de chaleur (d'énergie) sous forme d'ondes électromagnétiques selon la loi de Planck :

$$E = h\nu \quad (I-1)$$

Tels que :

E est l'énergie, ν est la fréquence d'onde associée et h est la constante de Planck égale à $6,62.10^{-34}$ J.

Donc, il ne nécessite aucun support matériel, il est analogue à la propagation de la lumière. Il se propage de manière rectiligne à la vitesse de la lumière. Le rayonnement thermique émis par les corps, se situe entre des longueurs d'ondes de $0,1 \mu\text{m}$ à $100 \mu\text{m}$. Pratiquement, les trois modes de transfert de chaleur coexisteront. Mais, ce mode de transfert devient prépondérant à des températures supérieures aux températures ordinaires. Généralement, tous les corps (solides, liquides et gazeux) émettent un rayonnement de nature électromagnétique. On peut citer que, le vide et les gaz simples comme (O_2 , H_2 , et N_2) représentent des milieux parfaitement transparents mais, les gaz composés comme (CO_2 , H_2O , CO et CH_4) et certaines liquides et solides comme (les verres et les polymères) sont partiellement transparents. La majorité des solides et des liquides sont des corps opaques puisqu'ils stoppent la propagation du rayonnement juste au niveau de leurs surfaces.

I.3 Transfert de chaleur par conduction

C'est le transfert de chaleur au sein d'un milieu solide opaque, sans déplacement de la matière, sous l'influence d'une différence de température. Dans les fluides, elle est presque toujours combinée à la convection et au rayonnement.

I.3.1 Équation de la chaleur

Considérons le système de la figure I.4.suivante.

Flux d'énergie convertie en énergie thermique :

$$\varphi_g = qsdx \quad (I-10)$$

Flux de chaleur stocké :

$$\varphi_{st} = \varphi c_p dx \quad (I-11)$$

Avec :

ρ : masse volumique [kg.m³]

c : capacité calorifique [J.kg⁻¹.C⁻¹]

T : Température [C] ou [K].

t : Temps [s].

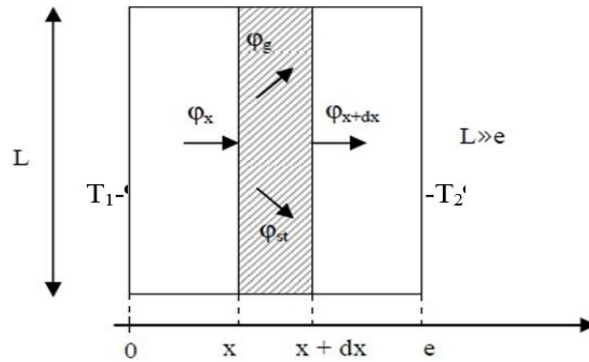


Figure I.4. Échange thermique entre milieux différents

Le bilan d'énergie sur ce système s'écrit :

$$\varphi_x + \varphi_g = \varphi_{x+dx} + \varphi_{st}$$

Donc :

$$-\left(\lambda_s \frac{\partial T}{\partial x}\right)_x + q_s dx = -\left(\lambda_s \frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x+dx} + \rho c s dx \frac{\partial T}{\partial t} \quad (I-12)$$

En divisant par dx et simplifiant on aura :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (I-13)$$

Et dans le cas tridimensionnel (cas le plus général) :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (I-14)$$

Cette équation peut être écrite :

1. Si le milieu est isotrope : $\lambda_x + \lambda_y + \lambda_z = \lambda$

$$\operatorname{div}\left(\lambda(T)\vec{\nabla}T\right)+q=\rho c\frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{I-15})$$

2. S'il n'y a pas de génération d'énergie à l'intérieur du système : $q=0$

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_x\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda_y\frac{\partial T}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda_z\frac{\partial T}{\partial z}\right)+q=\rho c\frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{I-16})$$

3. Si le milieu est homogène, λ n'est pas en fonction de T :

$$\operatorname{div}\left(\lambda\vec{\nabla}T\right)+q=\rho c\frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{I-17})$$

4. En régime permanent sans génération d'énergie, nous obtenons l'équation de Laplace :

$$\operatorname{div}\left(\lambda\vec{\nabla}T\right)=0 \text{ ou } (\lambda\nabla^2T=0) \quad (\text{I-18})$$

I.3.2 Résolution de l'équation de la chaleur en régime permanent

En régime permanent la température en chaque point du milieu est indépendante du temps. L'équation générale se réduit à l'équation de POISSON dans le cas où le milieu comporte des sources internes, ou à l'équation de LAPLACE pour un milieu sans sources.

I.3.2.1 Cas d'un fronton simple à faces isothermes

Les parois de la mure sont maintenues à des températures T_1 et T_2 uniformes, constantes et connues (Figure I.5) [J.F 2015].

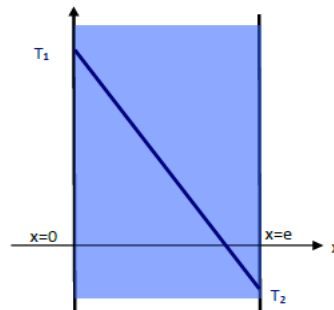


Figure I.5. Fronton simple à faces isothermes

Le système fondamental donnant la température est donné par :

$$\begin{cases} \frac{d^2 T}{dx^2} = 0 \\ T(x=0) = T_1 \\ T(x=e) = T_2 \end{cases} \quad (\text{I-19})$$

En intégrant une première fois ; on obtient le gradient de température

$$\frac{dT}{dx} = \text{Cst} = Q$$

$$T(x) = Ax + B \quad (\text{I-20})$$

Les constantes d'intégrations A et B sont déterminées à partir des conditions aux limites

$$A = \frac{(T_1 - T_2)}{e} \quad B = T_1 \quad (\text{I-21})$$

$$T(x) = \frac{(T_2 - T_1)}{e} x + T_1 \quad (\text{I-22})$$

Si $T_1 \geq T_2$ la densité du flux s'écrit :

$$\vec{\phi} = -\lambda \vec{\nabla} T = \lambda \frac{dT}{dx} \vec{i} \quad (\text{I-23})$$

$$\frac{dT}{dx} = \frac{(T_2 - T_1)}{e} \geq 0 \quad (\text{I-24})$$

Donc $\vec{\phi}$ est orientée dans le sens des x positifs, c'est-à-dire dans le sens de la propagation de la chaleur:

$$\vec{\phi} = \lambda \frac{(T_1 - T_2)}{e} \vec{i} \quad (\text{I-25})$$

Donc le flux de chaleur s'écrit :

$$\phi = \vec{\phi} \cdot \vec{s} = \lambda \frac{(T_1 - T_2)}{e} s \vec{i} = \lambda \frac{s(T_1 - T_2)}{e} \vec{i} \quad (\text{I-26})$$

I.4 Le transfert de chaleur par convection

La convection est le mode de transfert thermique privilégié entre un solide et un liquide ou un gaz. Elle est caractérisée par un transfert de chaleur associé par un mouvement de fluide. On distingue trois types d'écoulements convectifs.

I.4.1 Types des convections

I.4.1.1 La convection libre

Elle apparaît spontanément et se produit dans un fluide au sein duquel existe un gradient de température. C'est le cas dans une pièce où l'air chaud produit au niveau du sol va monter au plafond tandis que l'air froid va descendre. Le mouvement est dû au fait que les molécules en contact avec le sol vont se réchauffer (transfert de chaleur par conduction entre les molécules et la paroi du sol). La chaleur gagnée par ces molécules d'air fait que leur température augmente et leur masse volumique diminue. L'air chaud devient donc moins dense (plus léger) que l'air froid et s'élève donc sous l'effet d'une force d'Archimède, laissant sa place à d'autres molécules qui vont se réchauffer à leur tour. Exemple de la convection naturelle : mouvement de l'eau dans une cristallerie chauffée sur un feu (voir figure I.6) [BSH 1995].

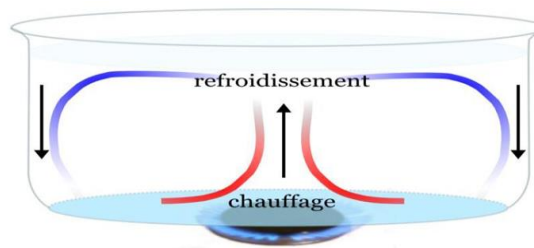


Figure I.6. Présentation de la convection dans une cristallerie

I.4.1.2 La convection libre forcée

Elle se produit quand le mouvement du fluide est imposé artificiellement ce qui va accélérer les échanges thermiques. Exemple : une pompe ou un ventilateur (radiateurs de voiture, montages électroniques refroidis ou chauffés par ventilateur, four électrique etc.) [BSH 1995].

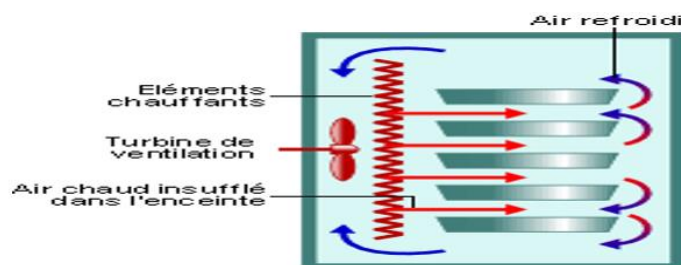


Figure I.7. Four à convection forcée

I.4.1.3 La convection mixte

Le mouvement du fluide dépend des forces extérieures et de la gravité, avec un Δt assez grand pour modifier le mouvement [BSH 1995].

I.4.2 Types de transfert de chaleur assistée par le mouvement fluide

Considérons un écoulement de fluide à travers un canal à deux dimensions (2D) comme il est montré à la figure I.8. L'entrée du canal est sur le côté gauche et la sortie se trouve à droite. Les deux parois supérieure et inférieure du canal sont à des températures plus élevées que le fluide entrant. Le mécanisme est que le fluide qui est à une température inférieure à la température de la paroi du canal, entre en contact avec la paroi et élimine la chaleur par convection. Bien que ce processus soit appelé comme étant convectif, il y a des aspects du mode de transfert de chaleur par conduction qui dominant de très près des parois chaudes [LAO 2016].

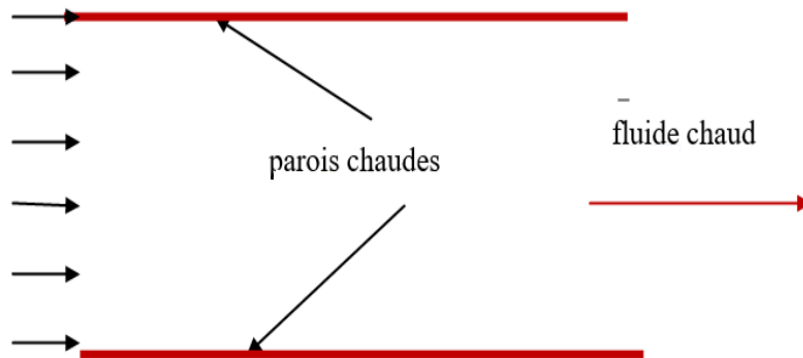


Figure I.8. Écoulement et transfert de chaleur dans un canal.

Il est évident que l'écoulement entrant avec une vitesse plus élevée transportera la chaleur à un taux plus élevé. Le taux de flux est souvent caractérisé par une quantité appelée le nombre de Reynolds, qui est défini par :

$$R_e = \frac{\rho_e U_e L}{\mu_e} \quad (I-27)$$

Avec U_e : vitesse moyenne d'entrée.

L : dimension caractéristique (la longueur du canal).

ρ_e : la densité du fluide.

μ_e : la viscosité dynamique du fluide.

Au niveau de la figure I.8, si l'écoulement est forcé dans le canal au moyen d'un dispositif externe

(pompe ou fan par exemple), alors le processus de convection est désigné par convection forcée. Si l'écoulement du fluide est créé par la différence de densité ou de température (poussée d'Archimède), alors le processus de convection est désigné par convection naturelle. La convection mixte est une situation dans laquelle les mouvements forcés et les mouvements entraînés par la différence de densité sont tous aussi importants [LAO 2016].

I.4.3 Régime d'écoulement

Compte tenu du lien entre le transfert de masse et le transfert de chaleur, il est nécessaire de prendre en compte le régime d'écoulement. Considérons à titre d'exemple l'écoulement d'un fluide dans une conduite:

I.4.3.1 En régime laminaire, l'écoulement s'effectue par couches pratiquement indépendantes

Entre deux filets fluides adjacents les échanges de chaleur s'effectuent donc :

- Par conduction uniquement si l'on considère une direction normale aux filets fluides.
- Par convection et conduction (négligeable **Figure I.9**) si l'on considère une direction nonnormale aux filets fluides.

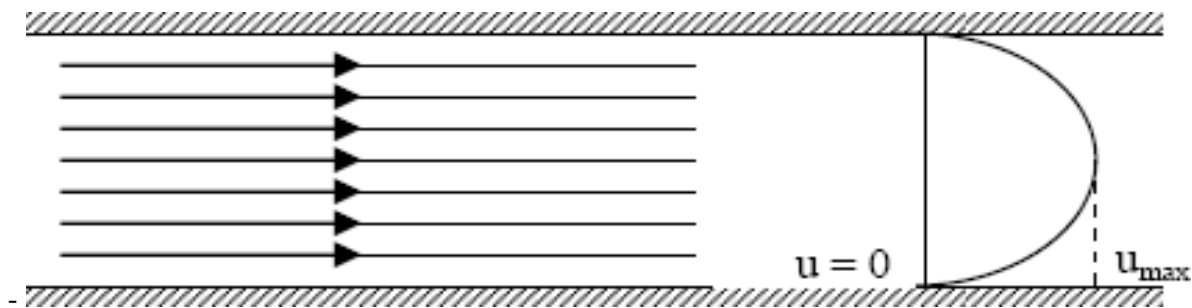


Figure I.9. Schématisation d'un écoulement turbulent

I.4.3.2 En régime turbulent, l'écoulement n'est pas unidirectionnel

L'échange de chaleur dans la zone turbulente s'effectue par convection et conduction dans toutes les directions. On vérifie que la conduction moléculaire est généralement négligeable par rapport à la convection et à la « diffusion turbulente » (mélange du fluide dû à l'agitation turbulente) en dehors de la sous-couche laminaire (**Figure I.10**).

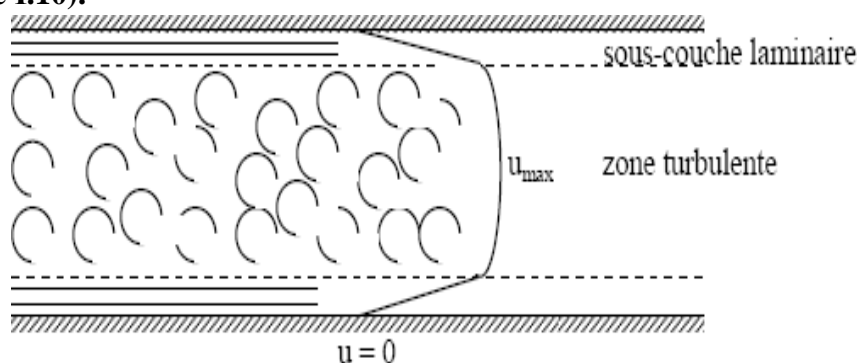


Figure I.10. Schématisation d'un écoulement turbulent

I.4.4 Les équations de Navier-stocks

Le problème physique problème de transfert de chaleur par convection, montrée sur la figure I.8 est par les équations de Navier-stocks et de l'énergie [LAO 2016].

I.4.4.1 Équation de conservation de la masse ou de continuité

L'équation de conservation de masse, ou l'équation de continuité pour un écoulement bidimensionnel (2D) s'écrit :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (\text{I-28})$$

Si la densité ρ est supposée constante, l'équation précédente réduit à :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (\text{I-29})$$

I.4.4.2 Équation de conservation de la quantité de mouvement

Dans la direction de x :

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (\text{I-30})$$

Dans la direction de y :

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (\text{I-31})$$

I.4.4.3 L'équation de conservation de L'énergie

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (\text{I-32})$$

Où : $\alpha = k/\rho c_p$ est appelée diffusivité thermique.

I.4.4.4 L'équation de poisson

la pression p est reliée au champ de vitesse u par une équation de Poisson. Par exemple, en 2D, en notant les composantes du champ de vitesse $u = (u_x, u_y)$, la relation s'écrit :

$$\Delta p = -\rho \left(\left(\frac{\partial u_x}{\partial x} \right)^2 + 2 \frac{\partial u_x}{\partial y} \frac{\partial u_y}{\partial x} + \left(\frac{\partial u_y}{\partial y} \right)^2 \right) \quad (\text{I-33})$$

où ρ représente la masse volumique du fluide.

I.4.4.5 Forme non-dimensionnelle des équations

Dans de nombreuses applications de transfert de chaleur, il est souvent préférable de travailler en adimensionnel. Par conséquent, les équations de Navier-stokes et de l'équation d'énergie pour un fluide incompressible sont mises en forme adimensionnel à l'aide d'échelles caractéristiques appropriées. Pour obtenir la forme non-adimensionnel des équations, réécrivons les équations de conservation précédentes sous forme dimensionnelle [MAR 2009].

- Équation de continuité :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (\text{I-34})$$

- Équation de quantité de mouvement selon x :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (\text{I-35})$$

- Équation de quantité de mouvement selon y :

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (\text{I-36})$$

- Équation de l'énergie :

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (\text{I-37})$$

Où : $\nu = \mu / \rho$ est la viscosité cinématique.

I.5 Les grandeurs thermiques

La conductivité thermique notée k (souvent notée λ dans les pays anglo-saxons) exprime, par sa définition, l'aptitude d'un matériau à conduire la chaleur. La Définition de la conductivité thermique est le flux de chaleur qui traverse une surface unité pour un matériau soumis à un gradient de température égal à l'unité

[NIC 2017].

La conductivité thermique dépend de (Ordre de grandeurs à température ambiante (20°C)):

- ✓ La nature physico-chimique du matériau
- ✓ La nature de la phase considérée (solide ; liquide ; gaz)
- ✓ La température
- ✓ L'orientation dans les matériaux anisotropes.

Tableau I.1. Valeurs de la conductivité thermique dans différents matériaux

Type de matériau	Conductivité thermique (W.m ⁻¹ . K ⁻¹)
Gaz à la pression atmosphérique	0.006-0.18
Matériaux isolants	0.025-0.25
Liquide non métalliques	0.1-1.0
Solide non métalliques	0.025-3
Liquide métalliques	8.5-8.5
Alliages métalliques	10-150
Métaux purs	20-400

La conductivité thermique dépend de la température lorsque l'on considère des plages étendues de température. Dans ce cas on pourra cependant souvent considérer une variation linéaire avec T sous la forme :

$$\lambda = \lambda_0 \left(1 + b(T - T_0) \right) \quad (I-38)$$

Tels que :

λ_0 : désigne la conductivité thermique à $T=T_0$

b : une constante appelée coefficient de température du solide considéré.

- $b > 0$ pour de nombreux matériaux isolants.
- $b < 0$ pour la plupart des métaux et alliages (à l'exception de l'aluminium et du laiton).

Remarque

- Pour des liquides, la conductivité thermique diminue quand la température augmente (à l'exception de l'eau et du glycérol).

I.6 Notion sur le transformateur

I.6.1 Définition du transformateur

Le transformateur est un convertisseur « alternatif-alternatif » qui permet de modifier la valeur efficace d'un signal alternatif en maintenant la fréquence et la forme de l'onde inchangées, c'est-à-dire il est transformé un signal alternatif (tension, ou courant) vers un autre signal alternatif aussi avec la même fréquence mais une valeur efficace différente.

Les transformateurs sont des machines entièrement statiques, cette absence de mouvement est d'ailleurs à l'origine de leur excellent rendement [W.T 2000].

I.6.2 Principe du fonctionnement

L'enroulement primaire est soumis à une tension sinusoïdale, il est donc traversé par un courant sensiblement sinusoïdal. En première approximation, nous pouvons négliger les chutes de tension et admettre que le flux à travers le circuit magnétique est sinusoïdal aussi, en quadrature arrière de la tension. 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 aux taux de changement ($d\Phi/dt$) et au nombre de spire que comporte cet enroulement [MEZ 2011].

Ainsi, apparaît entre les bornes du secondaire une tension sinusoïdale, qui peut être visualisée à l'oscilloscope, et dont nous pouvons mesurer la valeur efficace.

L'origine de la force électromotrice induite dans le secondaire est due à un phénomène que nous connaissons : la liaison magnétique entre les deux bobinages : c'est une **f.é.m.** mutuelle induite. Grâce à la présence du fer, la liaison magnétique est excellente et le coefficient K de couplage est à peine inférieur à l'unité.

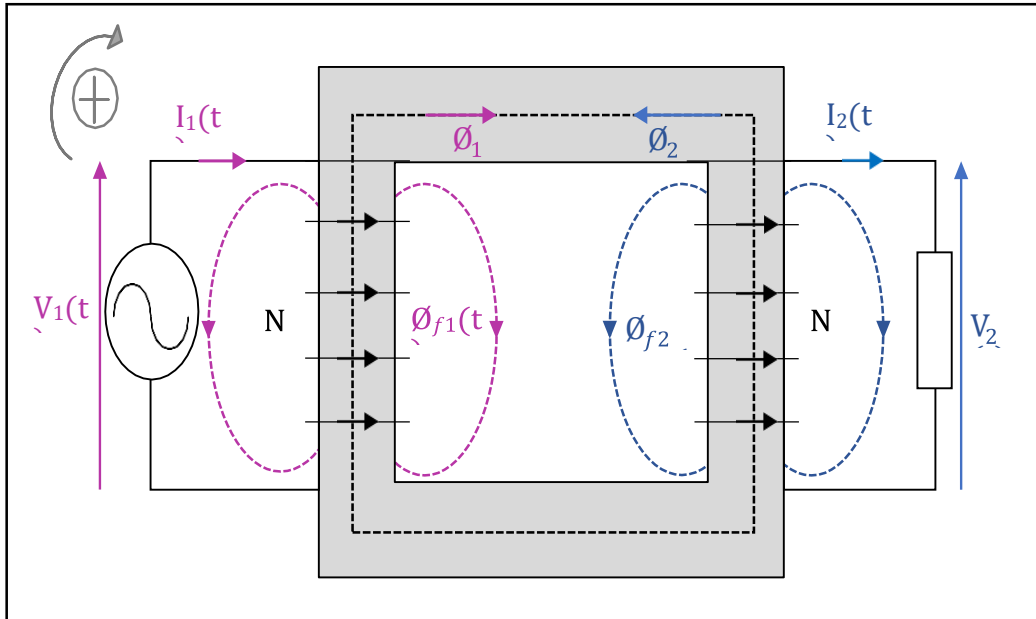


Figure I.11 Fonctionnement d'un transformateur

I.6.3 Les types du transformateur

Le choix d'un type de transformateur sur cette large gamme dépend non seulement des contraintes électriques, mécaniques et thermiques, mais également des problèmes d'encombrements et économiques. Toutefois, la majorité des équipements commercialisés concernent des transformateurs à colonnes, de distribution et d'une puissance allant de quelques dizaines à quelques centaines de kVA. [LEF 2006].

I.6.3.1 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 ferme 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 jeu. [LEF 2006]

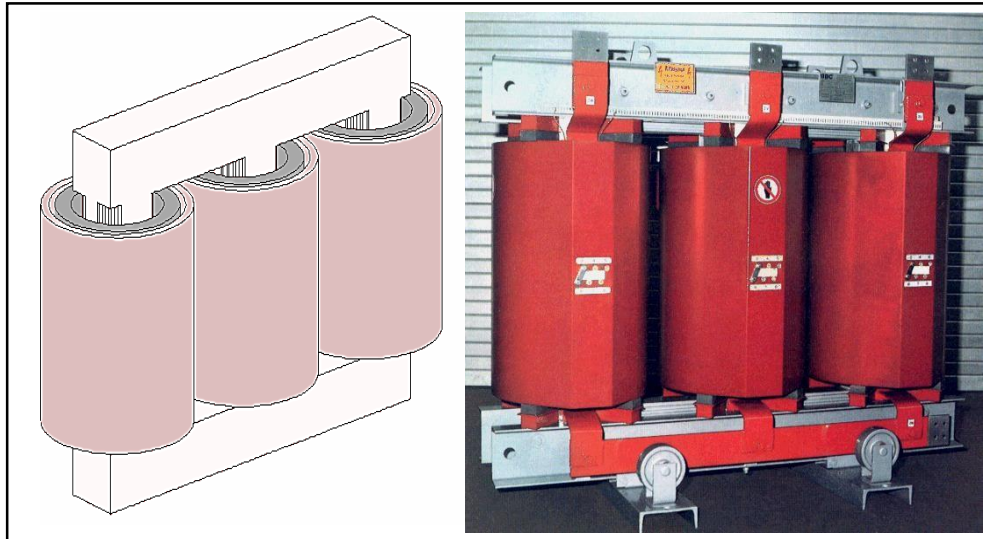


Figure I.12. Transformateur à colonnes

I.6.3.2 Transformateur cuirassé

Dans cette technologie, le circuit magnétique entoure les enroulements formés de bobines rectangulaires à axe horizontal. Le circuit magnétique, de section rectangulaire est constitué de tôles posées à plat. La cuve assure le calage du circuit magnétique et des enroulements [MEZ 2011].

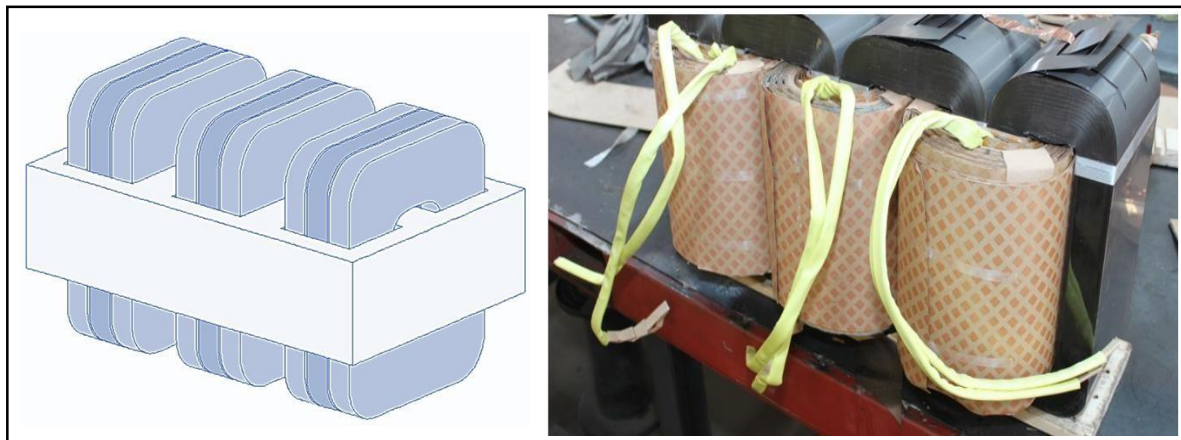


Figure I.13. Transformateur cuirassé

Ces transformateurs sont utilisés au sein des réseaux de transport et de répartitions où les surtensions transitoires sont fréquentes. Dans cet environnement, ils doivent se prémunir des effets néfastes de ces surtensions sur les enroulements. Pour cela des écrans sont utilisés afin de réduire les contraintes liées aux champs électriques dans les bobinages [MEZ 2011].

I.6.3.3 Transformateur en "double T"

Le transformateur en "double T" équivaut à placer en série deux transformateurs utilisant la connexion Scott afin de réaliser une conversion électrique, de triphasée à diphasée et vice-versa. Il existe trois types de connexions disponibles selon l'indice horaire souhaité : Tt0, Tt1 et Tt11. [LEF 2006].

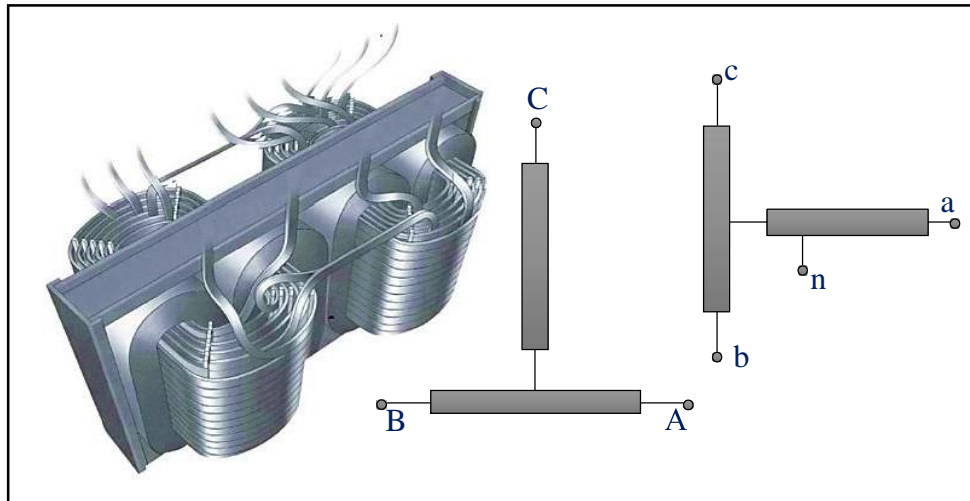


Figure I.14. Transformateur Tt11 (Marcus Transformer of Canada Ltd)

I.6.3.4 Transformateur à noyau annulaire

Un transformateur à noyau annulaire est un type de transformateur électrique qui utilise un noyau en forme d'anneau pour transfère l'énergie électriques entre les bobines primaires et secondaire. Ce noyau annulaire est généralement est constitué de tôles de fer ou de ferrites empilées pour réduire les pertes d'énergie par courants de Foucault et les pertes magnétiques. L'avantage d'un transformateur à noyau annulaire réside dans sa conception compacte et sa capacité à fournir un flux magnétique plus uniforme. Cela permet une meilleure efficacité et une réduction des pertes d'énergie par rapport aux transformateurs à noyau en forme de E ou de U plus traditionnels. En raison de sa structure annulaire, ce type de transfo peut également présenter une plus grande résistance aux vibrations et aux bruits mécaniques, ce qui le rend approprié pour des applications sensibles au bruit [ALO 2020].



Figure I.15. Transformateur à noyau annulaire

I.6.4 L'utilisation des transformateurs

Généralement l'objectif de l'utilisation d'un transformateur électrique peut être soit d'adapter, c'est-à-dire élever ou abaisser, le niveau de tension d'une source d'énergie électrique. Soit d'assurer une séparation électrique (dite aussi : galvanique) entre deux circuits, c'est-à-dire l'absence de potentiels communs entre ces circuits. Le premier cas correspond au besoin le plus fréquemment rencontré. Dans cette application, l'importance économique du transformateur est essentielle, car c'est son existence qui permet, au travers du changement de tension le transport d'énergie électrique à grande distance, et qui a conduit, par voie de conséquence, à l'abandon du courant continu pour la production de cette énergie [FAN 2004 /2003].

I.6.4.1 Le transformateur dans Le réseau électrique

Aujourd'hui, il est difficile d'imaginer un réseau électrique ou un appareil de conversion de l'électricité sans transformateur puisqu'il a permis le développement des réseaux électriques alternatifs de transport sur de longues distances en modifiant et en adaptant très facilement avec un excellent rendement, les niveaux de tension. C'est un constituant essentiel des réseaux électriques. L'énergie électrique est " transformée " plusieurs fois (3 - 4) entre son lieu de production et celui d'utilisation.

Les transformateurs participent par ailleurs au réglage de la tension au moyen de changeur de prise (modification du rapport de transformation) soit en charge, soit à vide. En 2007, il y avait 128,54 GVA de transformateurs sur le réseau 400 kV et 123,21 GVA sur le réseau 225 KV [TIX 2010].

Le réseau est classiquement découpé en trois parties principales : la production, le transport et la distribution d'électricité. **Figure I.16.**

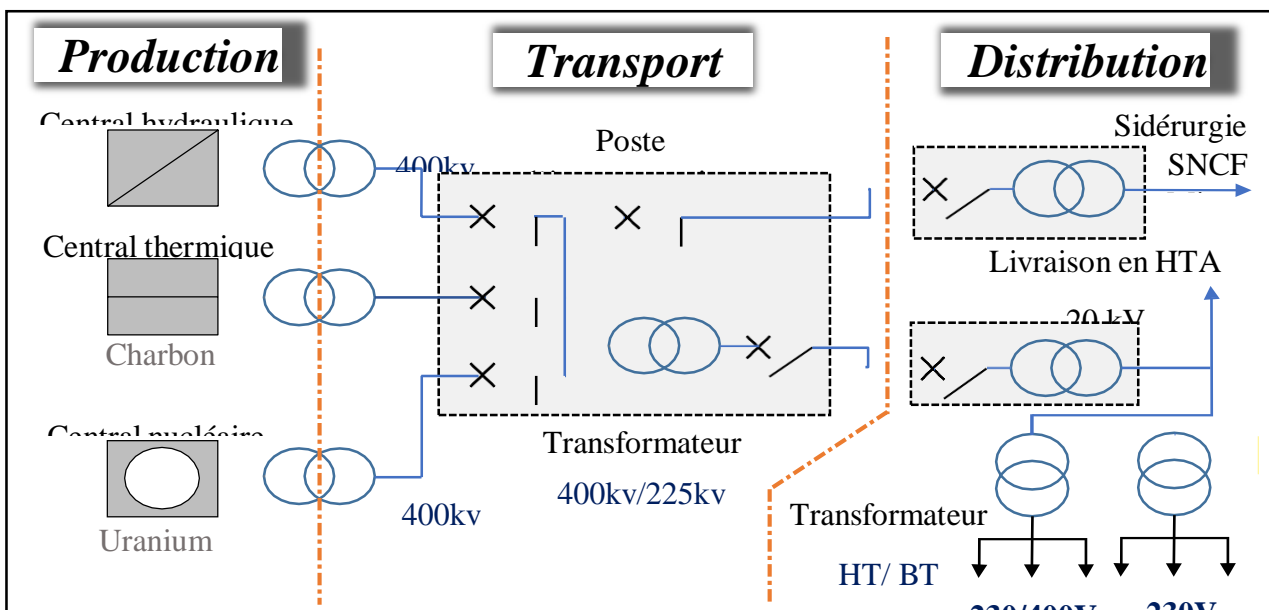


Figure I.16 Emplacement d'un transformateur dans le réseau électrique

I.6.4.1.1 La production d'électricité

Après la production d'énergie électrique par les différentes centrales électriques, cette énergie est mise à disposition sur le réseau de transport, à travers un transformateur élévateur.

I.6.4.1.1.1 Transformateur élévateur de tension

La figure I.17 représente un transformateur élévateur de sortie de centrale électrique, triphasé 760 MVA 345 kV. L'enroulement primaire du transformateur comporte des prises des réglages hors tension. Dans tous les cas les enroulements des transformateurs raccordés aux groupes sont couplés en triangle afin de filtrer les harmoniques de rangs multiples de 3 et de réduire les taux de composantes inverses transmises par le réseau [13]. Les générateurs fournissent de l'énergie à un niveau de tension de quelques kV typiquement. Pour minimiser les pertes sur les lignes, la tension doit être aussi élevée que possible, afin de réduire les courants qui transitent, généralement à 400 kV ou 220 kV en France [SAN 2011].

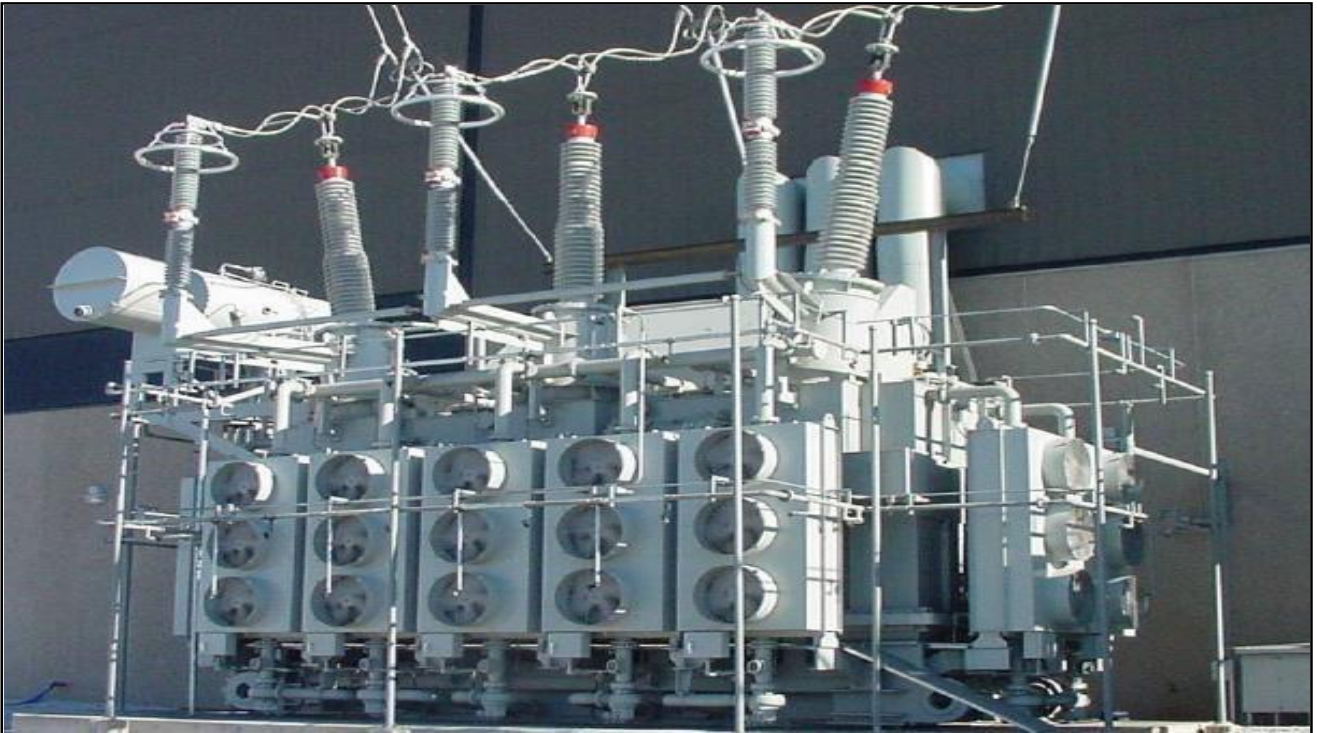


Figure I.17 Transformateur élévateur de sortie de centrale électrique

I.6.4.1.2 Le transport d'énergie électrique

Le réseau de transport d'énergie électrique assure la répartition de l'électricité depuis les grands centres de production jusqu'aux réseaux de distribution qui sont connectés aux consommateurs, le réseau de transport comporte majoritairement des transformateurs d'interconnexion.

I.6.4.1.2.1 Transformateur d'interconnexion

Selon La figure I.18 on représente un transformateur d'interconnexion de réseau, ces transformateurs

adaptent les différents niveaux de tensions du transport, généralement sont des autotransformateurs et des transformateurs pour les connexions de plus faible tension.

Les autotransformateurs d'interconnexion sont dotés d'un tertiaire de compensation alimentant un transformateur des services auxiliaire (TSA) et dans certains cas, une batterie d'inductances dont le rôle est de compenser la puissance réactive d'origine capacitive fournie par les lignes du réseau de transport [LAM 2016].



Figure I.18 Transformateur d'interconnexion de réseau

I.6.4.1.3 La distribution électrique

La liaison entre le réseau de transport et le client final est généralement assurée par le réseau de distribution électrique. C'est un réseau de proximité dont les tensions sont moindres que celles du réseau de transport, et comprenant de nombreux transformateurs abaisseurs pour adapter la tension aux différents usagers.

I.6.4.1.3.1 Transformateurs abaisseurs

Ils adaptent la tension du réseau électrique de transport, Ces transformateurs sont situés dans des postes de transformation.

I.6.4.1.3.2 Transformateurs de distribution

Ces transformateurs de faible puissance (quelques centaines de KVA) sont en général utilisés pour abaisser la tension 20 kV du réseau de distribution et l'adapter à un utilisateur final à des fins domestiques ou industrielles, le plus souvent en 400 V triphasé. A la différence des transformateurs précédents, plutôt imposants, ces transformateurs sont construits en série, et ont tendance à être remplacés lorsqu'ils sont défectueux [SAN 2011]. Ils alimentent des charges monophasées, déséquilibrées et asynchrones, ils doivent être capables de supporter des courants homopolaires permanents [LAM 2016].

Les transformateurs de distribution sont intégrés dans les postes cabines, **La figure I.19.**
Ou fixés hors de portée sur un châssis ou sur un poteau, **La figure I.20.**



Figure I.19 Poste de distribution sur poteaux



Figure I.20 Poste de distribution Cabiné

I.6.4.2 Transformateurs spéciaux

Dans les applications industrielles, on rencontre un grand nombre de transformateurs de construction spéciale. La plupart possèdent les propriétés de base.

I.6.4.2.1 Autotransformateur

On appelle autotransformateur, **La figure I.21**, un transformateur composé d'un enroulement unique monté sur un circuit magnétique. Pour un autotransformateur abaisseur, par exemple, la haute tension est appliquée à l'enroulement complet et la basse tension est obtenue entre une extrémité de l'enroulement et une prise intermédiaire [CHE 2011].

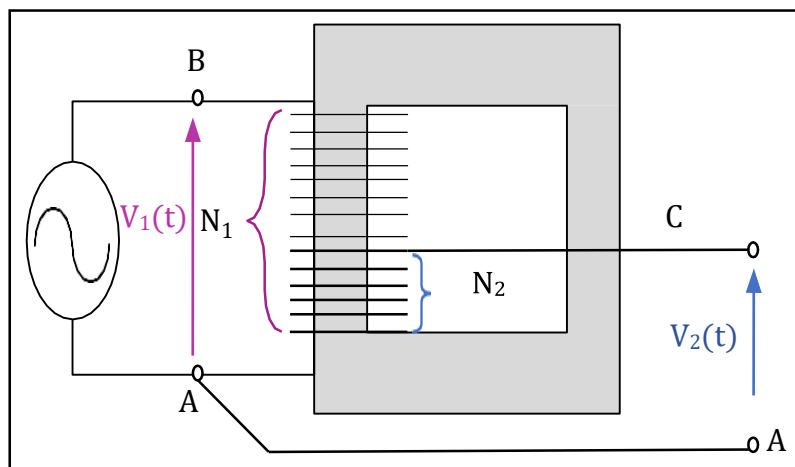


Figure I.21 Autotransformateur.



Figure I.22 représenté deux exemples pour l'autotransformateur variable

A l'opposé de l'autotransformateur, on trouve le transformateur d'isolement, transformateur de rapport en général $m = 1$, qui a pour fonction non de changer la tension, mais de supprimer toute liaison galvanique entre deux circuits (par exemple pour la sécurité des personnes intervenant sur les circuits placés au secondaire). L'appareil qui suit, le transformateur d'impédance, n'appartient plus, en tant que fonction principale, au domaine de la conversion d'énergie, mais à celui de la métrologie. Ceci n'empêche nullement qu'il soit très utilisé dans les installations de production et d'utilisation de l'énergie électrique [FAN 2004 /2003].

I.6.4.2.2 Transformateur de tension (TT)

Les transformateurs de tension comme **La figure I.23**, sont des transformateurs de haute précision dont le rapport de transformation varie très peu avec la charge.

Ils sont utilisés sur les lignes à haute tension pour alimenter des appareils de mesure (voltmètre, wattmètre, etc.) ou de protection (relais). Ils servent à isoler ces appareils de la haute tension et à les alimenter à des tensions appropriées. Le rapport de transformation est choisi de façon que la tension secondaire soit d'une centaine de volts, ce qui permet l'utilisation d'instruments de fabrication courante pour la mesure de tensions élevées. Le primaire des transformateurs de tension est branché en parallèle avec le circuit dont on veut connaître la tension. Leur construction diffère très peu de celle des transformateurs conventionnels. Cependant, leur puissance nominale est généralement faible (inférieure à 500 VA) de sorte que le volume de l'isolation dépasse souvent celui du cuivre et de l'acier utilisé [CHE 2011].

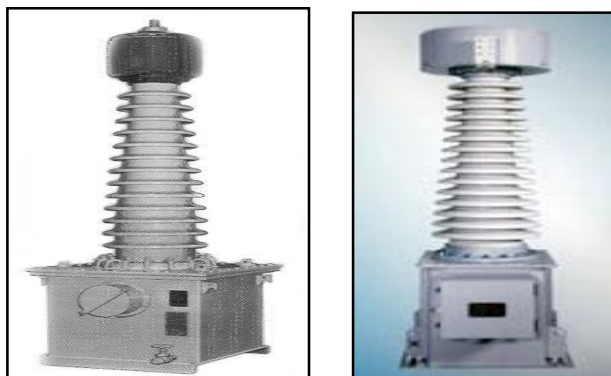


Figure I.23 Transformateur de tension

I.6.4.2.3 Transformateurs de courant (TI)

Transformateurs de courant sont des transformateurs de haute précision dont le rapport de transformation demeure essentiellement constant même lorsque la charge secondaire varie [W.T 2000]. Ils sont utilisés pour éviter d'avoir à connecter des ampèremètres, des bobines de courant d'instrument et des relais directement aux lignes à haute tension. Les transformateurs de courant réduisent le courant selon un rapport connu. Ainsi, des instruments et des dispositifs de contrôle petits et précis peuvent être utilisés car ils sont isolés de la ligne haute tension. L'enroulement primaire d'un transformateur de courant est connecté en série avec l'une des lignes fils. L'enroulement primaire consiste en quelques tours de fil lourd enroulé sur un fer laminé cœur. La bobine secondaire a plus de tours de fil plus petit et est enroulée sur le même noyau que la bobine primaire. Le courant nominal de l'enroulement primaire est le courant maximum que l'enroulement sera nécessaire pour effectuer. Pour des courants plus élevés, la ligne en question peut être installée à travers un noyau toroïdal sans aucun virage. Le noyau agit alors comme l'enroulement primaire et a pas de connexion à la ligne. L'enroulement secondaire est toujours évalué à 5 A [HER 2011].



Figure I.24 Transformateur de courant

I.7 Sources d'échauffement des transformateurs

L'échauffement d'une machine électrique, hormis un dysfonctionnement est dû essentiellement aux pertes Joule dans le bobinage, aux pertes dans le fer et aux frottements d'ordre mécanique. Le problème thermique est couplé au problème électromagnétique par la densité de source de chaleur qui représente dans ce cas les différentes pertes dans les machines électriques. Les transformateurs sont des dispositifs électriques utilisés pour transférer de l'énergie électrique entre différents niveaux de tension. Ils peuvent être soumis à différents facteurs d'échauffement qui peuvent affecter leur performance et leur durée de vie. Voici quelques sources courantes d'échauffement des transformateurs [SOU 2020].

I.7.1 Pertes Joule

Lorsque le courant électrique traverse les enroulements du transformateur, des pertes se produisent en raison de la résistance électrique des conducteurs [SOU 2020].

$$P_j = RI^2 \quad (\text{I-39})$$

Où R [Ω] représente la résistance électrique interne du conducteur (dans toutes les phases) et I [A] est la valeur efficace du courant.

Les valeurs des pertes Joule au niveau des encoches et des têtes de bobines sont données par :

$$P_{Jenc} = N_{enc} \rho_{cu}(T) \frac{N_{cond} L_{enc}}{S_{cond}} I^2 \quad (\text{I-40})$$

$$P_{Jchign} = N_{chign} \rho_{cu}(T) \frac{N_{cond} L_{chign}}{S_{cond}} I^2 \quad (\text{I-41})$$

Avec :

$\rho_{cu}(T)$: La résistivité du cuivre à la température T [$\Omega \cdot m$].

L_{enc} : Longueur d'une encoche [m]

L_{chign} : Longueur d'un chignon [m]

I : Valeur efficace du courant dans un conducteur [A]

N_{enc} : Nombre d'encoches

N_{chign} : Nombre de chignon

N_{cond} : Nombre de conducteurs par phase

S_{cond} : Section des conducteurs [m^2]

I.7.2 Pertes Fer

Les transformateurs utilisent des noyaux magnétiques pour faciliter le transfert de l'énergie. Lorsque le courant alternatif traverse le noyau, des pertes se produisent en raison du cycle continu de magnétisation et de démagnétisation du matériau magnétique. Le phénomène d'hystérésis et les courants de Foucault induisent

des pertes dans les matériaux magnétiques des machines, ces pertes peuvent être calculés par plusieurs formules [SOU 2020].

a) Formule de Steinmetz

Pour un régime purement sinusoïdal, les pertes Fer volumiques P_f sont données par :

$$P_f = K_f f^a \hat{B}^b \tag{I-42}$$

K , a , b sont des paramètres liés au matériau ferromagnétique utilisé, f [Hz] est la fréquence du champ magnétique et B [T] est la valeur crête de la densité de flux magnétique.

Cette expression ne prend pas en compte la totalité des pertes dans le fer. On peut l'utiliser pour le calcul des pertes fer à faible fréquence.

b) Formule de Bertotti

L'expression décompose les pertes moyennes en trois termes différents sous la forme :

$$P_{f\text{moy}} = \frac{1}{T} \int_0^T P_f(t) dt = K_h \hat{B}^2 + \frac{e}{12T\rho} \int_0^T \left(\frac{dB(T)}{dt} \right)^2 dt + \frac{K_e}{T} \left(\frac{dB(T)}{dt} \right)^{3/2} \tag{I-43}$$

- le premier terme désigne les pertes par hystérésis.
- le second terme quantifie les pertes par courant de Foucault.
- le troisième représente la contribution des pertes macroscopiques.

e : Épaisseur des tôles de fer [m].

ρ : Résistivité électrique du fer [Ω .m].

K_h et K_e sont des coefficients déterminés par recalage avec les mesures expérimentales.

I.7.3 Environnement ambiant

La température ambiante autour du transformateur peut également avoir un impact sur son échauffement. Si le transformateur est installé dans un endroit chaud ou confiné, il peut avoir du mal à dissiper la chaleur générée, ce qui peut entraîner une augmentation de la température du transformateur [SOU 2020].

I.7.4 Surcharge

Lorsque le transformateur est soumis à une charge supérieure à sa capacité nominale pendant une période prolongée, il peut surchauffer. Cela peut se produire en raison d'une conception inadéquate du système électrique, d'une mauvaise évaluation de la charge ou d'une utilisation incorrecte du transformateur [SOU 2020].

I.7.5 Mauvaise ventilation

Une ventilation insuffisante autour du transformateur peut entraver la dissipation de la chaleur générée. Cela peut être dû à un mauvais agencement de l'installation, à un encombrement ou à des obstructions à l'entrée ou à la sortie d'air du transformateur.

Il est important de surveiller la température des transformateurs pour éviter tout échauffement excessif. Des systèmes de surveillance de la température, des dispositifs de protection contre la surchauffe et une maintenance régulière peuvent aider à prévenir les problèmes liés à l'échauffement des transformateurs. Le calcul des pertes thermiques est essentiel pour connaître avec précision la répartition des températures dans les machines électriques. Une bonne modélisation thermique passe par une quantification précise des pertes et des phénomènes de transfert de chaleur [SOU 2020].

I.8 Types de refroidissement d'un transformateur

I.8.1 Refroidissement des transformateurs par huile

Dans cette méthode, la chaleur générée dans le noyau et l'enroulement est transférée à l'huile. Selon le principe de la convection, l'huile chauffée s'écoule vers le haut, puis dans le radiateur. La place vacante est remplie par l'huile refroidie provenant du radiateur. La chaleur de l'huile se dissipera dans l'atmosphère en raison du flux d'air naturel autour du transformateur. De cette manière, l'huile dans le transformateur continue à circuler en raison de la convection naturelle et la chaleur dissipée dans l'atmosphère en raison de la conduction naturelle. Cette méthode peut être utilisée pour des transformateurs jusqu'à environ 30 MVA [SOU 2020].

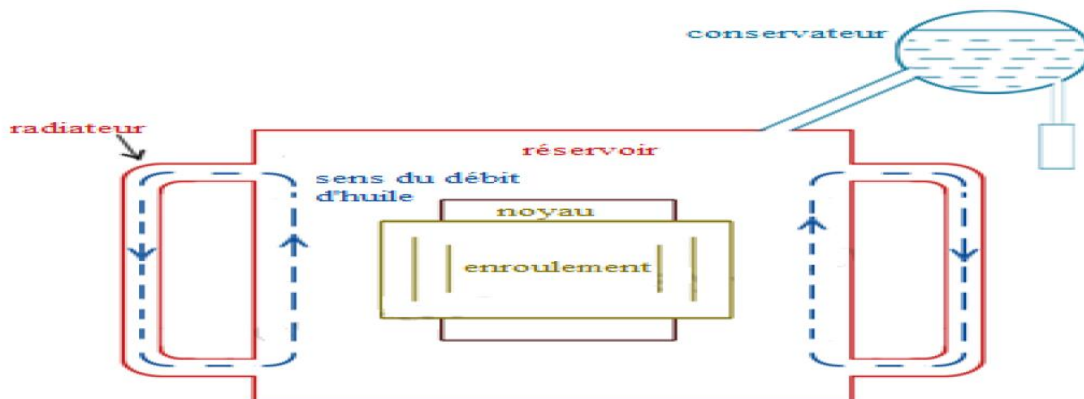


Figure I.25 Refroidissement du transformateur par huile

I.8.2 Les ailettes

Les ailettes sont de bons conducteurs de la chaleur dont une dimension est grande par rapport aux autres. Elles sont utilisées pour améliorer l'évacuation de la chaleur d'un système solide confiné dans lequel les densités de flux de chaleur sont élevées. Il existe plusieurs configurations d'ailettes (voir figure ci-dessous), dont le choix, dans la pratique, est conditionné par de nombreux critères : l'espace disponible dans le système, le poids, la facilité de fabrication, les coûts... Il faut également prendre en compte la perturbation de l'écoulement engendrée par la présence des ailettes (pertes de charge). **Figure I.26** montre quelques Exemples de systèmes à ailettes utilisés dans différents secteurs d'applications.

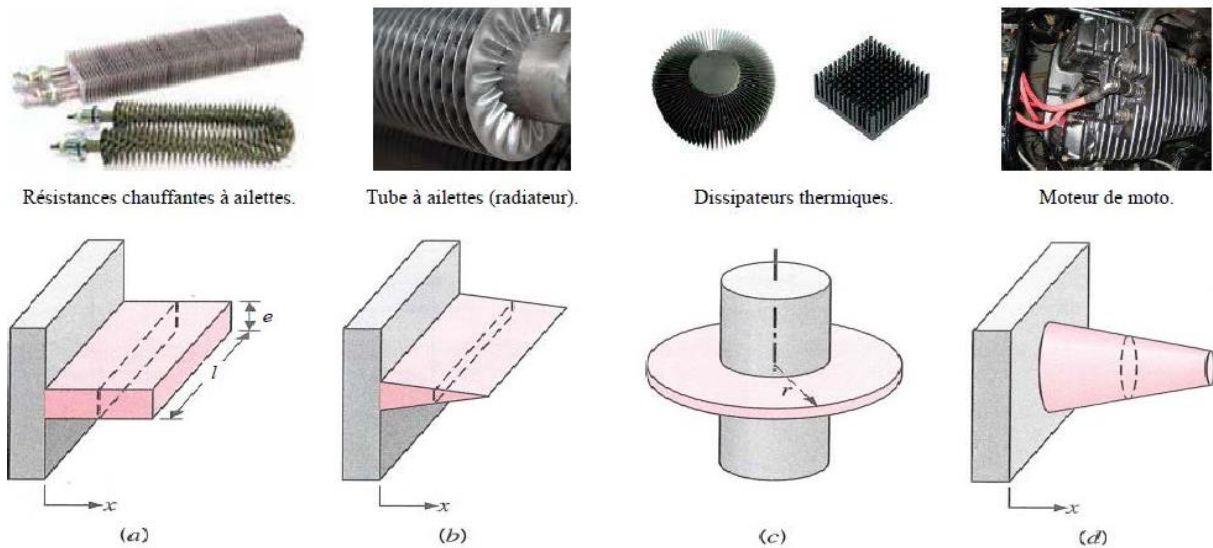


Figure I.26 différents types d'ailettes : (a) ailette droite à section constante, (b) ailette droite à section variable, (c) ailette annulaire, (d) ailette en forme d'aiguille à section variable.

I.8.2.1 Flux extrait par une ailette

Une ailette est un milieu bon conducteur de la chaleur dont une dimension est grande devant les autres, exemple : barre d'épaisseur e et de longueur L , avec $e \ll L$. Elles sont utilisées à chaque fois que des densités de flux élevées sont à transmettre dans un encombrement réduit : refroidissement de composants électroniques, refroidissement d'un moteur par air, ...

I.9 Formulation mathématique

L'équation (I-43) c'est l'équation de la chaleur en régime permanent pour un matériau isotrope et homogène. Elle décrit le flux de chaleur à travers un matériau en fonction de la distribution de température et des sources ou les pertes de chaleur présentée.

Elle s'écrit sous la forme suivante :

$$\nabla(-k\nabla T) = Q + q_s T \quad (I-44)$$

T : la température, k : la conductivité thermique du matériau, Q : représente les sources de chaleur présentes, q_s : représente les pertes de chaleur, ∇ : l'opérateur gradient.

Pour prouver cette équation, nous allons commencer par exprimer la loi de fourrier pour le flux de chaleur d'après l'équation (I-5) :

$$q = -k\nabla T$$

q : le flux de chaleur.

$-k\nabla T$: la densité de flux de chaleur.

Nous allons ensuite utiliser l'équation de la convection de l'énergie pour un matériau en régime permanent :

$$\nabla(q) = Q + q_s T \tag{I-45}$$

∇ : l'opérateur divergence

Q : représente les sources de chaleur.

En substituant l'expression de q dans cette équation, nous obtenons :

$$\nabla(-k\nabla T) = Q + q_s T \tag{I-46}$$

Ce qui nous donne finalement l'équation (I-46).

L'équation (I-46) c'est l'équation de transfert de chaleur en régime permanent pour un matériau isotrope et homogène qui inclut des sources de chaleur internes et externes (Q et q_s), ainsi que des termes pour tenir compte de la variation de la conductivité thermique (k) en fonction de la température et des phénomènes de convection ($\rho C_v \nabla T$).

$$\nabla(-k\nabla T) = Q + q_s T - \rho C_v \nabla T \tag{I-47}$$

La preuve de cette équation peut être effectuée en partant de l'équation de base pour le transfert de chaleur par conduction en régime permanent :

$$\nabla(-k\nabla T) = 0 \tag{I-48}$$

En ajoutant les termes pour les sources de chaleur, on obtient :

$$\nabla(-k\nabla T) = Q + qT \quad (\text{I-49})$$

Ensuite, on peut ajouter les termes pour les phénomènes de convection, en utilisant la loi de refroidissement de Newton l'équation (I-8) :

$$q = -h(T_s - T)$$

q : le flux de chaleur convectif

h : le coefficient de transfert de chaleur convectif

T_s : la température de surface

T : la température à une distance x de la surface.

$$\nabla T = T_s - T$$

En injectant cette expression dans l'équation de base, on obtient :

$$\nabla(-k\nabla T) = Q + qT - h(T_s - T) \quad (\text{I-50})$$

Enfin, en utilisant la définition de la convection $\rho C_v \nabla T$, on peut écrire : $h = \rho C_u$, ce qui nous donne l'équation finale (I-49) [DGE 2019].

CHAPITRE II : Simulation du transfert thermique dans un transformateur annulaire refroidi à huile

II.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la simulation du problème qui nous permet d'implémenter les modèles mathématiques développées dans le chapitre précédent, résolus par la méthode des éléments finis, à la fin la discussion des résultats obtenus.

II.2 Présentation du logiciel Comsol-Multiphysics

II.2.1. Comsol-Multiphysics

Il a été créé en 1986 par Savante Lit mark et Farad Saeid (étudiants des cycles supérieurs du mathématicien Germon Dahlquist) à la suite du cours consacré à la simulation numérique à l'institut royal de technologie (KTH) à Stockholm en suède, anciennement est nommé FEMLAB. La première version 1.0 est sortie le premier septembre 1998. Il existe aujourd'hui plusieurs versions, la plus récente est 6.1 [HAM 2016].



Figure II.1 Logo du COMSOL lors de l'ouverture

II.2.2. Les performances de Comsol-Multiphysics

Les potentialités de COMSOL sont nombreuses et cela dépend du nombre d'application qui permet de résoudre grâce à son environnement complet pour le calcul scientifique. Il est capable de coupler et résoudre des équations dans différents domaines tels que la mécanique des fluides et le transfert thermiques, l'électromagnétisme, la dynamique des fluides et la chimie et Mécanique des structures. Il offre également plusieurs solveurs de très haut niveau de performance capable de traiter des problèmes avec des temps de résolution optimaux [HAM 2016].

II.2.3 Étapes de résolution des EDP par Comsol-Multiphysics

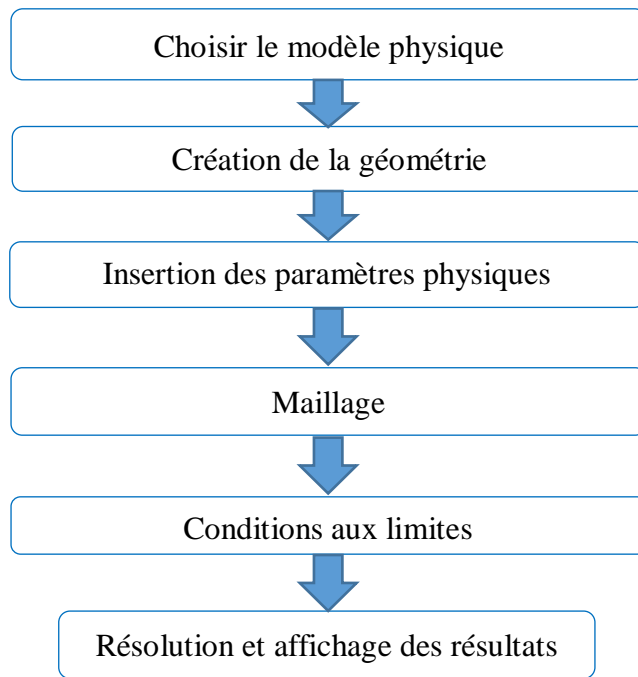


Figure II.2 Étapes de simulation sous COMSOL

II.2.4 Interface graphique du COMSOL

Au démarrage du logiciel, le navigateur de module s'affiche pour la sélection du ou des modèles physiques ainsi que le choix de la dimension de l'espace.

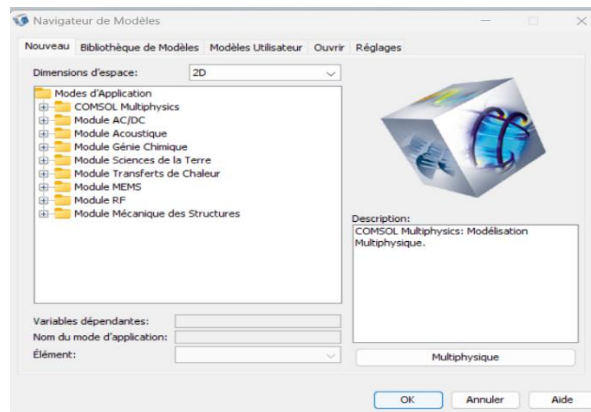


Figure II.3 Fenêtre de démarrage du logiciel

II.2.5 Choix du module physique

Nous avons choisi le module Navier-Stokes Faiblement Compressible et Transfert de Chaleur Général dans le navigateur de modèle en régime stationnaire. Nous étudions le problème en 2D.

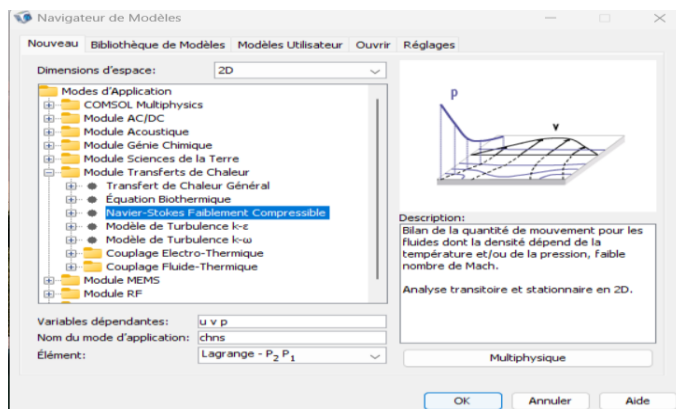


Figure II.4 Modèle de Navier-Stokes Faiblement Compressible

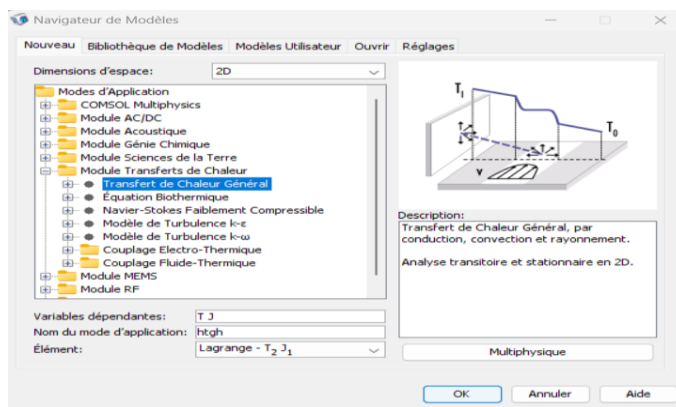


Figure II.5 Modèle de Transfert de Chaleur Général

Les constants

Tableau II.1 Les constantes du modèle

Nom	Expression	Description
k_f	0.153[w/m.K]	Conductivité thermique de fluide
k_s	383[w/m.K]	Conductivité thermique de solide
T_0	50[C°]	Température de fluide
Q_0	32400[w/ m³]	Source de chaleur
V_0	5[mm/s]	Vélocité

II.2.6. Géométrie en 2D à simuler

La figure II.5 représente la géométrie du système à étudier sous Comsol.

Conducteurs : Largeur : 0.025m, Hauteur : 0.015m.

Fluide : Largeur : 0.075m, Hauteur : 0.18m.

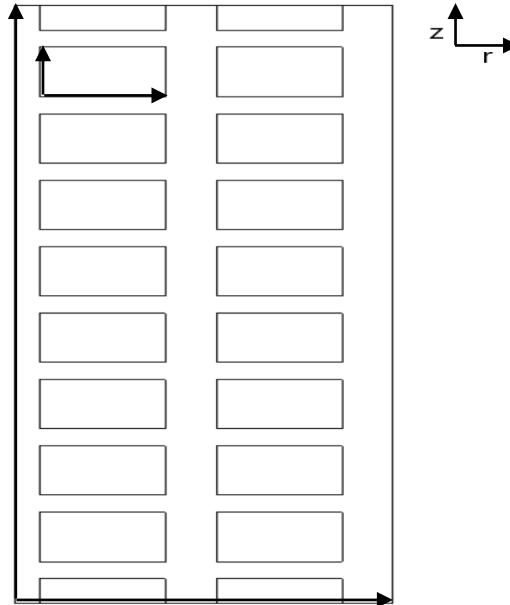


Figure II.6 Géométrie du problème

II.2.7 Paramètres physiques des sous domaines

Les figures II.6 et II.7 illustrent les paramètres physiques et les équations des différents sous domaines.

Équations

$$\nabla(-k\nabla T) = Q + q_s T - \rho C_p T \quad (II.1)$$

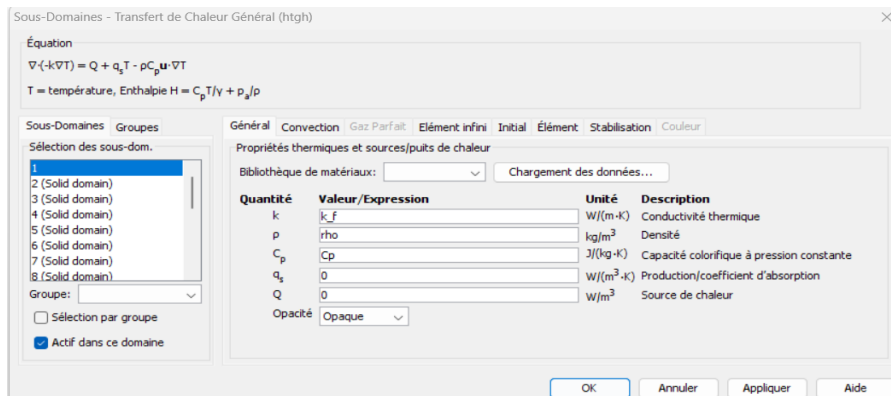


Figure II.7 Paramètres du sous domaine fluide

$$\nabla(-k\nabla T) = Q + q_s T \quad (\text{II.2})$$

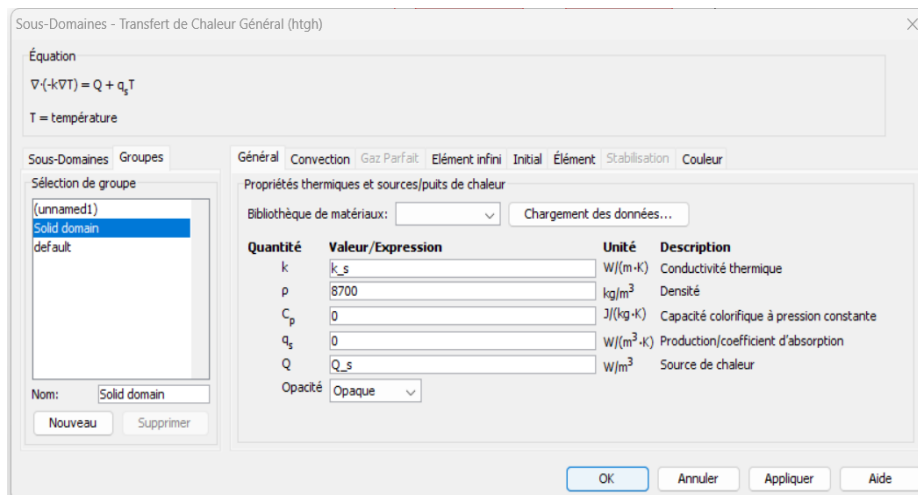


Figure II.8 Paramètres de sous domaines solide

II.2.8 Maillage de la Géométrie

La figure II.8 représente le maillage constitué de 7689 éléments triangulaires et de 3955 nœuds.

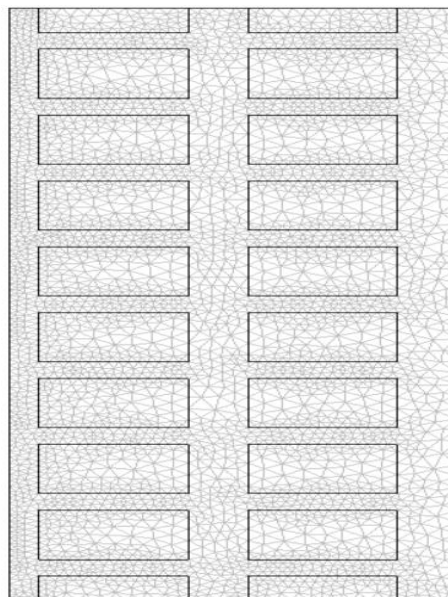


Figure II.9 Maillage de la Géométrie

II.2.9 Condition aux limites

La figure II.9 illustre les différentes conditions aux limites du problème à étudier.

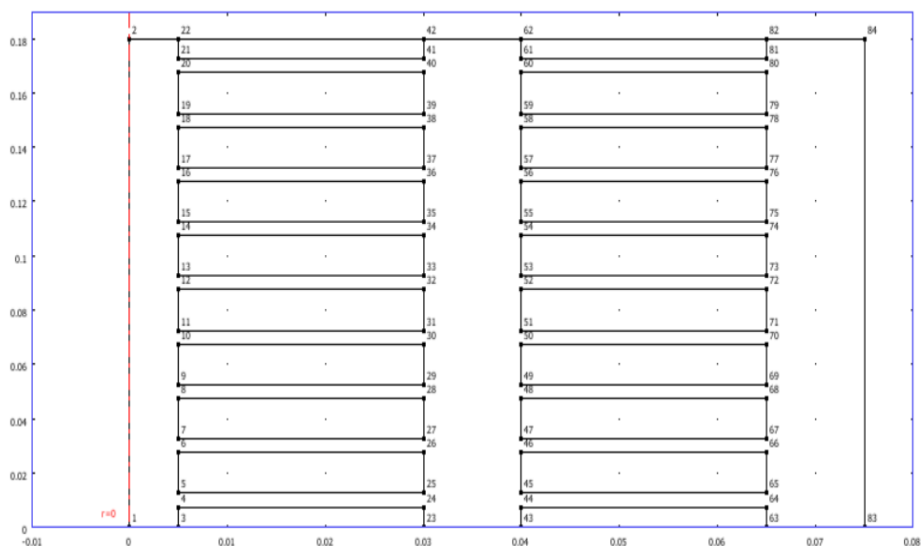


Figure II.10 Condition aux limites

Tableau II.2 Droites des conditions aux limites

Points constituant les conditions aux limites	Conditions aux limites
(1,2), (22,42), (62,82), (83,84), (43,63), (3,23)	Isolation
(1,23), (23,43), (63,83),	T=10°C
(22,42), (62,82) (83,84),	Flux convectif
(21,22), (21,41), (41,42), (61,62),(61,81), (81,82), (19,20), (20,40), (39,40), (19,39), (59,60), (60,80), (79,80), (59,79), (17,18), (18,38), (37,38), (17,37), (57,58), (58,78), (77,78), (57,77),(15,16), (16,36), (35,36),(15,35), (55,56), (56,76), (75,76), (55,75), (13,14), (14,34), (33,34), (13,33), (53,54), (54,74), (73,74), (53,73),(11,12), (12,32), (31,32), (11,31), (51,52), (52,72), (71,72), (51,71), (9,10), (10,30), (29,30), (9,29), (49,50), (50,70), (69,70), (49,69), (7,8), (8,28), (27,28), (7,27), (47,48), (48,68), (67,68), (47,67), (5,6), (6,26),(25,26),(5,25),(45,46), (46,66), (65,66), (45,65), (3,4), (4,24), (23,24), (43,44), (44,64), (63,64).	Continuité

II.3 Résultats et discussions

Comsol-Multiphysics permet d'afficher les résultats de simulation soit :

- ✓ par domaine ou sous domaine (une surface),
- ✓ selon une ligne (une droite entre deux points choisis),
- ✓ en un point choisi.

Dans tout ce qui suit, on a choisi les deux premières possibilités. Les courbes tracées sont déduites selon une droite parallèle à l'axe des ordonnées par la surface qui on a étudiée. Après avoir implanté le modèle décrit précédemment sous Comsol-Multiphysics.

II.3.1 Effet de la variation de la conductivité thermique du fluide sur la distribution de la température

D'après les figures (II.10, II.11, II.12), on constate une minimisation au niveau de la distribution du température dans les milieux solide-fluide et fluide due à l'augmentation de la conductivité thermique après les multiples utilisations du fluide.

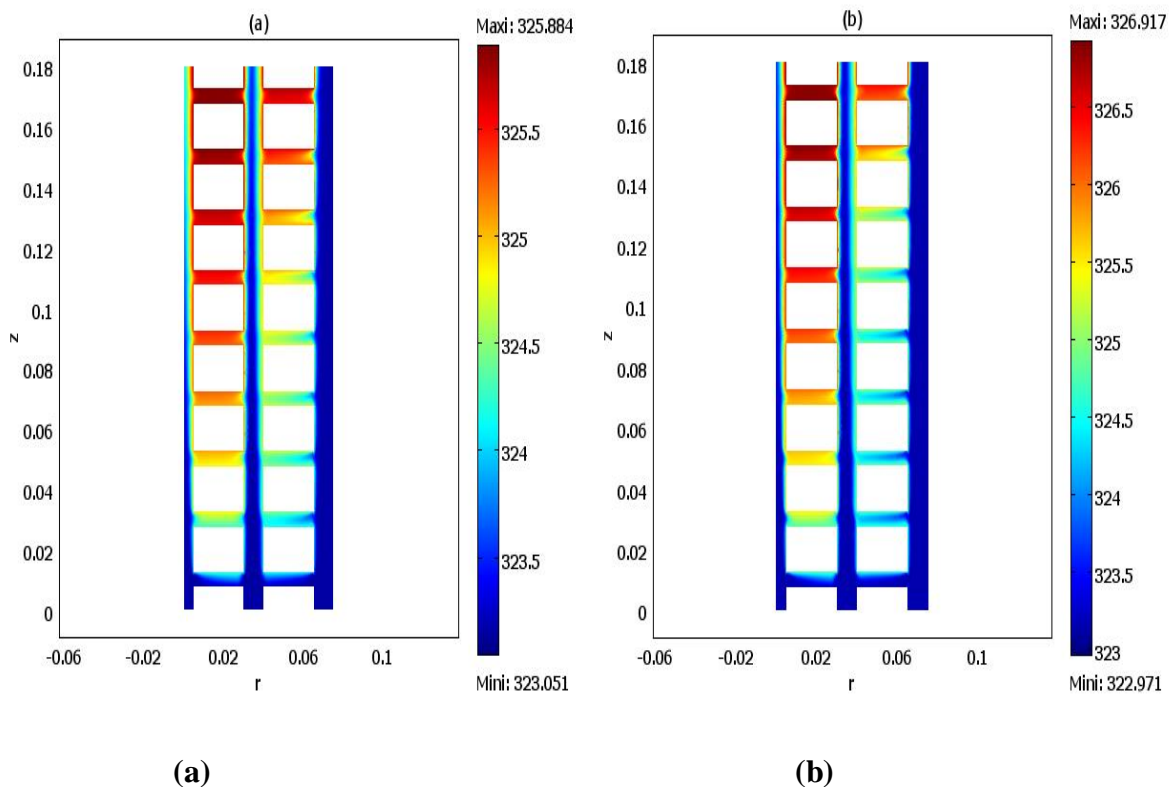


Figure II.11 Distribution de la température du milieu fluide avec une conductivité thermique (a) $k_f = 0.153$, (b) $k_f = 0.3$ [W/m.K]

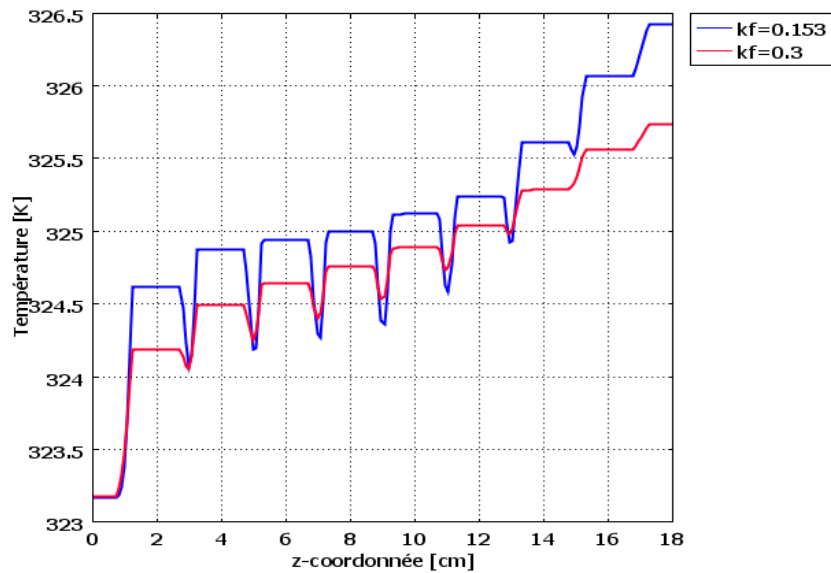


Figure II.12 Variation de la température dans un milieu solide-fluide en fonction de la conductivité thermique de fluide k_f

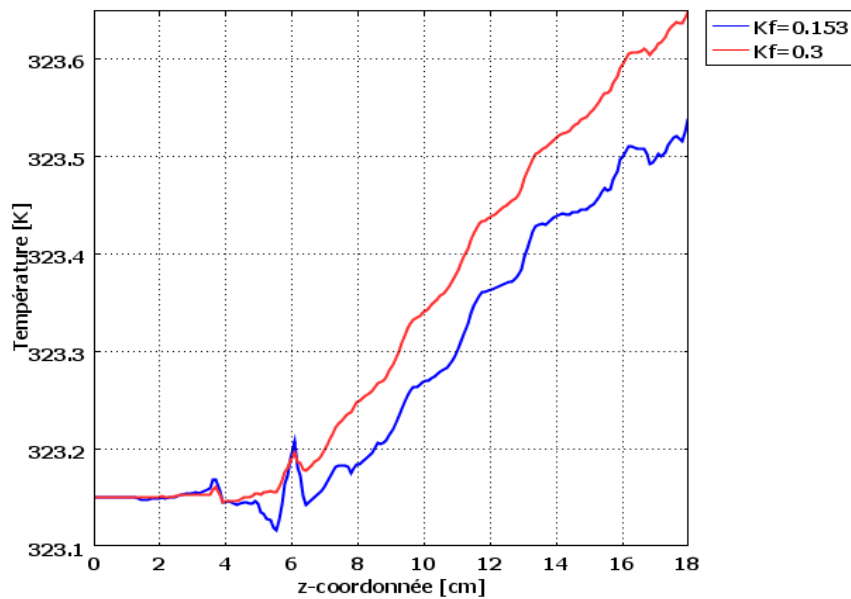
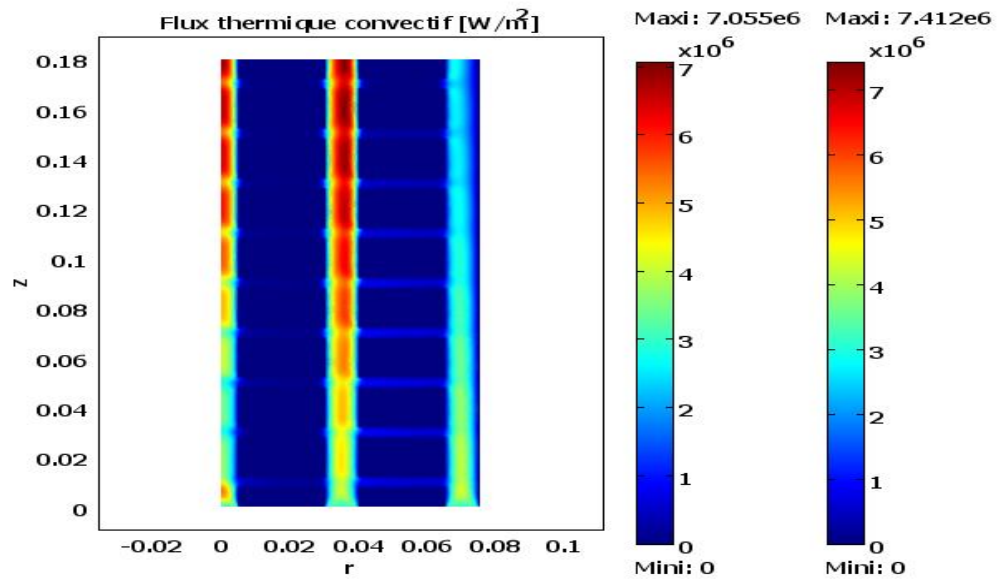


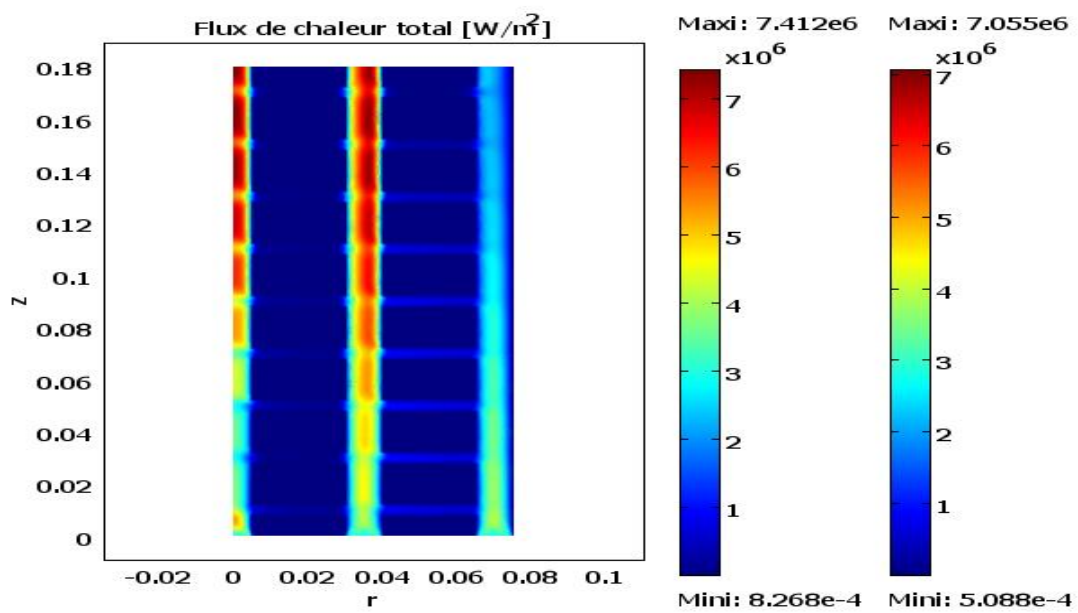
Figure II.13 Variation de la température dans le fluide en fonction de la conductivité thermique [W/m.K]

La figure II.13 (a) montre le flux thermique par convection, ce flux est emporté par un champ de vitesse de bas vers le haut, on constate une variation négligeable du flux thermique pour deux différentes valeurs de la conductivité thermique du fluide.

La figure II.13 (b) montre le flux de chaleur total, il se ressemble au flux thermique convectif à cause de la faiblesse du flux conductif.



(a)



(b)

Figure II.14 Cartographies du flux (a) de chaleur totale (b) thermique convectif

La Figure II.14 montre la variation du flux thermique par conduction dans le milieu solide-fluide, En remarquant l'amplitude du courbe augmente avec l'augmentation de la conductivité thermique.

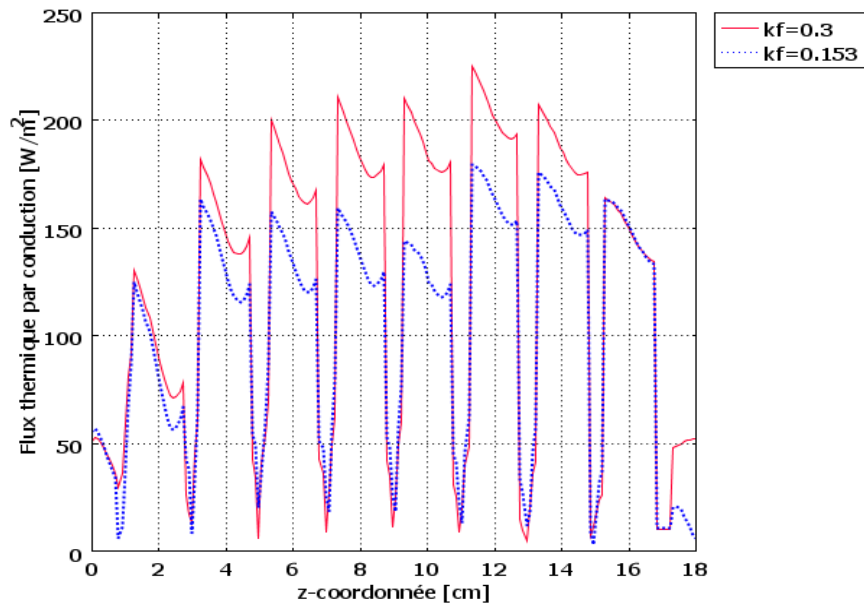


Figure II.15 Variation du flux thermique par conduction solide-fluide en fonction de la conductivité thermique du fluide [W/m.K]

La Figure II.15 montre la variation du flux thermique convectif au niveau du solide-fluide, remarquons une baisse de l'amplitude à cause de l'augmentation de la conductivité thermique.

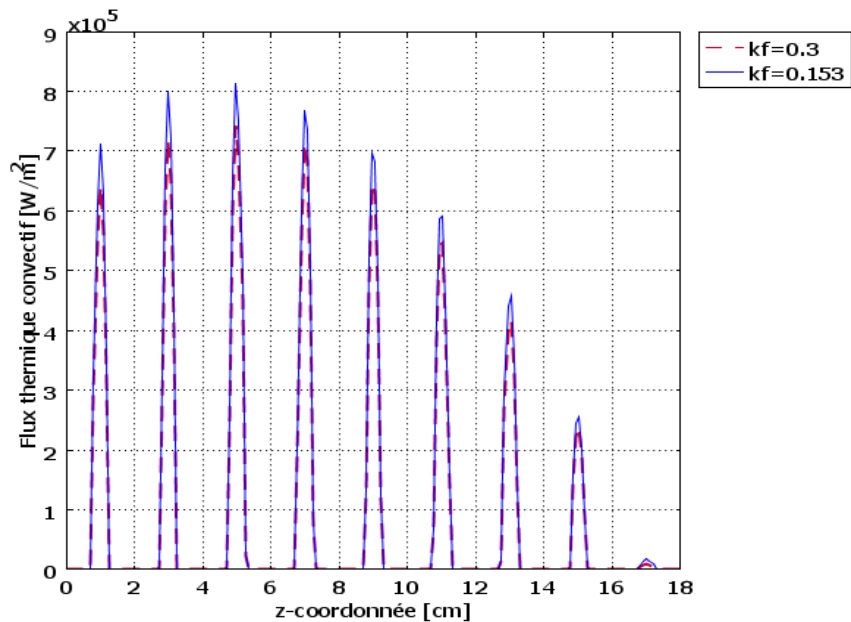


Figure II.16. Variations du flux thermique convectif dans un milieu fluide en fonction de coordonnée z en choisissant deux valeurs de la conductivité thermique k_f [W/m.K]

II.3.2. Effet du changement de la position

Remarque

- ✓ D1 : la droite parallèle à l'axe des ordonnées z qui ont les coordonnées suivantes $[(r_0=0.035, z_0=0), (r_1=0.035, z_1=0.18)]$.
- ✓ D2 : la droite parallèle à l'axe des ordonnées z qui ont les coordonnées suivantes $[(r_0=0.05, z_0=0), (r_1=0.05, z_1=0.18)]$.
- ✓ D3 : la droite parallèle à l'axe des ordonnées z qui ont les coordonnées suivantes $[(r_0=0.07, z_0=0), (r_1=0.035, z_1=0.18)]$.

La figure II.17 montre la distribution de la température dans un milieu fluide, remarquons qu'il n'a aucune différence entre les deux allures.

La Figure II.18 montre la croissance de la distribution de la température dans le milieu solide-fluide, on constate une différence entre les deux allures, cela est dû au changement de la conductivité thermique afin d'assurer la continuité.

La Figure II.19 montre le flux thermique par conduction, constatons que l'un des allures est négligeable par rapport à l'autre parce que le solide est la source de la chaleur.

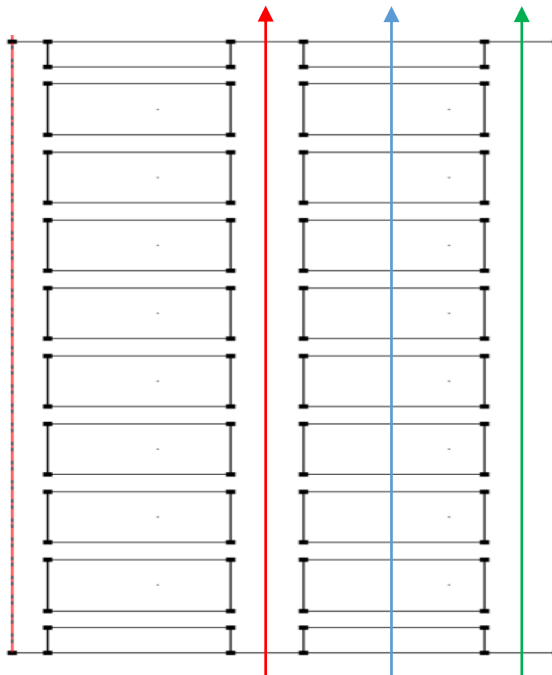


Figure II.17. illustrant les différentes droites (D₁ en rouge, D₂ en bleu, D₃ en vert)

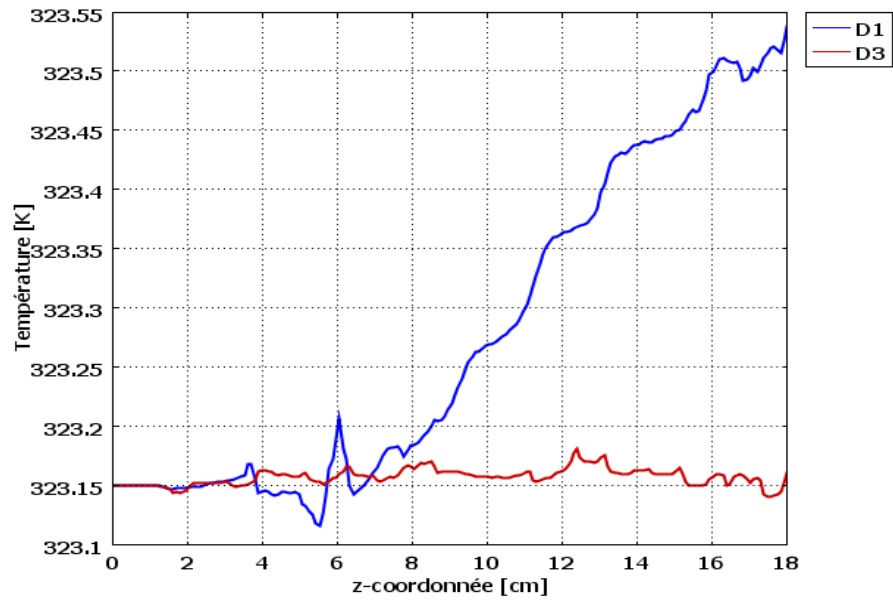


Figure II.18. Variation de la température entre deux milieux fluides

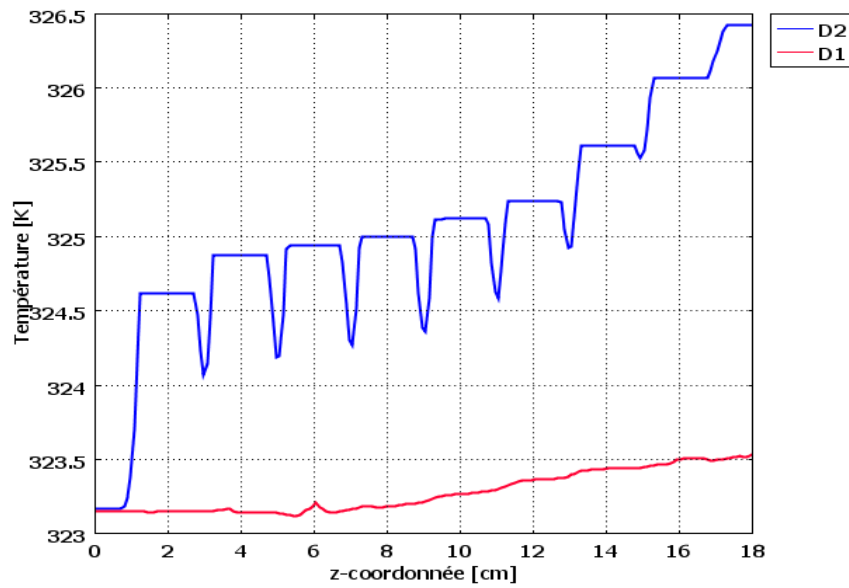


Figure II.19. Variation de la température entre deux milieux : un milieu fluide et un milieu solide-fluide

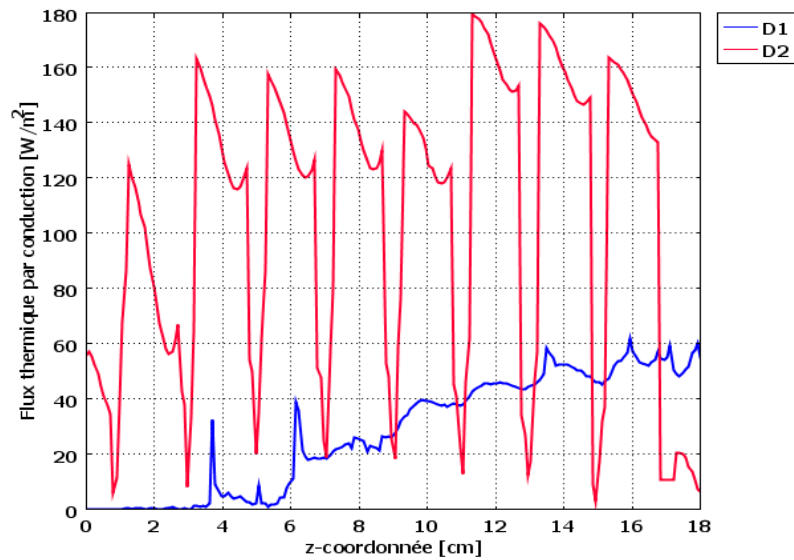


Figure II.20. Variation du flux thermique par conduction dans deux milieux : un milieu fluide et un milieu solide-fluide

La figure II.20 montre la distribution du flux thermique convectif et le flux de la chaleur total. On constate que l'un des allures est négligeable par rapport à l'autre parce que la convection dans le milieu fluide est plus grande que dans le milieu fluide-solide.

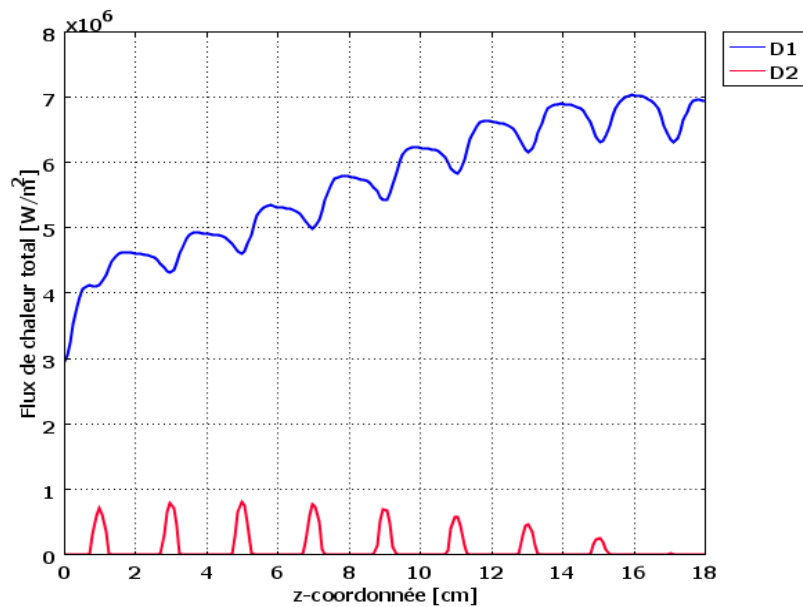


Figure II.21. Variation du flux de la chaleur totale

II.4. Conclusion

Dans ce chapitre, on a adapté des modèles physiques résolus par la méthode des éléments finis sous Comsol-Multiphysics. Les résultats obtenus permettent de comprendre les variations de température à l'intérieur du transformateur, d'identifier les zones susceptibles de chauffer et permet d'obtenir une représentation réaliste du comportement thermique du transformateur. L'élévation de la température affecte la capacité de dissipation de chaleur de l'huile et entraîne une augmentation de la température du transformateur. On constate que la température au niveau du solide est sérieuse par rapport au fluide. Ainsi, l'effet du refroidissement des fluides sur la diminution de la température. Ces résultats sont particulièrement importants pour des applications à l'échelle industriel.

Conclusion Générale

Dans ce mémoire, nous avons présenté une explication générale sur le transfert thermique ; son importance, en particulier ses modes et ses lois fondamentaux, ainsi que les différentes équations mathématiques y afférentes.

Il est important de surveiller la température des transformateurs pour éviter tout échauffement excessif. Des systèmes de surveillance de la température, des dispositifs de protection contre la surchauffe et une maintenance régulière peuvent aider à prévenir les problèmes liés à l'échauffement des transformateurs. Le calcul des pertes thermiques est essentiel pour connaître avec précision la répartition des températures dans les machines électriques. L'étude présentée dans ce mémoire porte sur la distribution de la température en régime permanent dans un transformateur refroidi par l'huile, la configuration géométrique du modèle physique est un transformateur à noyau annulaire, soumis à un gradient de température.

Nous avons pu déterminer la distribution de la température ; les cartographies des flux de chaleur convectif et flux de chaleur totale enfin la distribution de la température dans les milieux solide-fluide et fluide. On constate une minimisation au niveau de la distribution de la température dans les milieux solide-fluide et fluide due à l'augmentation de la conductivité thermique après les multiples utilisations du fluide. L'amplitude de la courbe augmente avec l'augmentation de la conductivité thermique.

La croissance de la distribution de la température dans le milieu solide-fluide, est dû au changement de la conductivité thermique afin d'assurer la continuité. Au niveau du milieu solide-fluide la température est très important car le solide est la source de la chaleur. la convection dans le milieu fluide est plus grande que dans le milieu fluide-solide.

Le problème a été abordé selon une approche numérique, en utilisant le logiciel Comsol-Multiphysics.

Bibliographie

Bibliographie

- [AGG 2015] : Aggab Mohamed El Amine, « Étude du contrôle non destructif par courant de Foucault et simulation par la méthode des éléments finis », Université Labri Ben Midi, Oum El bouagui,2015.
- [ALO 2020] : ALOUACHE Oussama et MERABET Mohammed Nabil, « Étude et modélisation des systèmes de refroidissement des transfos », Université Mohamed Seddik Ben Yahia, Jijel,2020.
- [BSH 1995]: B. Shome et M. K. Jensen, "Mixed convection laminar flow and heat transfer of liquids in isothermal horizontal circular ducts", Int. Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 38, No. 11, pp. 1945 – 1956, 1995.
- [DGE 2019] : Djeghdjou Mohamed et Amirouche Omar, « Étude, simulation et caractérisation des échanges thermiques dans les couches fines de PDMS pour les applications de Bio MEMS », Mémoire de master, Université Blida,2019.
- [FRA 2013]: Frank Kreith, Raj M, Manglick et Mark, « Principles of heat transfer », seventh edition, 2013.
- [HAM 2016] : HAMIDAOUI Meryem, « Méthodes des différences finies appliquées aux EDPS fractionnaires », Mémoire de master, Université de Tlemcen,2016.
- [JFS 2015] : J.F. sacadura coordonnateur, « Transfert thermique : initiation of approfondissement », Lavoisier, 2015.
- [LAC 2016] : laouci.M, « Modélisation et simulation numérique lieu convection mixte des anneaux rectangulaire », Université Badji Mokhtar, Annaba,2016.
- [MAR 2009] : Marc henry, « Modélisation mécanique du refroidissement primaire lors de la coulée continue d'aciers », 2009.
- [NIC 2017] : Nicolas.Errien, « Transfert thermique », Université du Maine faculté des sciences département de physique, France, 2017.
- [PHI 2013] : Philippe Marty, « Cours de transfert thermique », Université Joseph Fourier, Grenoble, 2013.
- [SOU 2020] : Souad BADACHE, « Cours échauffement et refroidissement des actionneurs électromécaniques », Université Mohamed Boudiaf, Oran,2020.
- [YVE 2005] : Yves Jannot, « Cours de transfert thermique », 2005.
- [TIX 2010] : P. TIXADOR « *ENERGIE ELECTRIQUE*, Ecole Nationale Supérieure de l'Energie,l'Eau et l'Environnement, Ecole Grenoble », 2010.
- [W.T 2000] : W. T « Électrotechnique. 3. éd., Québec: Presses de l'Université Laval », 2000.
- [LEF 2006] : A. LEFEVRE « Contribution à la modélisation électrique, électromagnétique et thermique des transformateurs: Application à l'étude de l'échauffement sur charges nonlinéaires, Doctoral dissertation. L'université de Nantes », 2006.

Bibliographie

[MEZ 2011] : M. MEZIANI « *Contribution à la modélisation analytico-numérique des transformateurs de puissance*, Diss. Université Mouloud Mammeri », 2011.

[FAN 2004 /2003] : J.-P. Fanton « *Génie électrique, Cours, Ecole centrale Paris* »,2004 /2003.

[LAM 2016] : M. Lambert « *les transformateurs électrique, DUNOD* », 2016.

[SAN 2011] : J. Sanchez « *Aide au diagnostic de défauts des transformateurs de puissance*, : Diss .L'université de GRENOBLE », 2011.

[CHE 2011] : C. CHEVASSU « *"Machines électriques: cours et problèmes."*, Ecole Nationale Supérieure Maritime, », 2011.

[HER 2011]: S. L. Herma « *Alternating Current Fundamentals, Cengage Learning*», 2011.