

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Ammar Telidji-Laghouat



FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

FILIERE : ELECTROMECHANIQUE

SPECIALITE : MAINTENANCE INDUSTRIELLE

*Etude par simulation du transfert de chaleur dans  
une plaque conductrice*

**Présenté par :**

CHAIB HICHAM

OUAR MOHAMMED ABDELATIF

**Dirigé par :**

Dr. B .YOUSFI

**Promotion: 2023/2024**

## *Remerciements*

Nous remercions avant tout, Mon dieu qui nous a éclairé la bonne voie et nous a aidés à la parcourir.

Nous remercions nos parents qui se sont sacrifiés pour notre bien et que nous ont encouragé et soutenu le long de notre vie.

Nous remercions les membres de jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait d'avoir accepté d'évaluer notre travail.

Nous remercions particulièrement notre promoteur Dr. B-Yousfi pour nous avoir encadrés, formés et motivés.

Nous tenons à souligner son professionnalisme et ses qualités d'écouter, qui ont contribué à ce que on estime avoir été une collaboration fructueuse.

Nous tenons à remercier l'ensemble de nos enseignants.

Nous remercions enfin nos amis et surtout nos familles, pour avoir supporté et accepté nos choix.

# *Dédicace*

*Je dédie ce travail à la mémoire de mes grandes mères et grand père*

*A mes très chers parents.*

*A mes frères et sœurs,*

*A tout les membres de ma famille,*

*A mes très chers amis,*

*A tout les étudiants de la promotion 2024,*

*A tout mes amis du génie Mécanique et génie électrique,*

*A tout les enseignants du département génie Mécanique et génie électrique.*

**CHAIB HICHAM**

# *Dédicace*

*Je dédie ce travail à la mémoire de mes grandes mères et grand père*

*A mes très chers parents.*

*A mes frères et sœurs,*

*A tout les membres de ma famille,*

*A mes très chers amis,*

*A tout les étudiants de la promotion 2024,*

*A tout mes amis du génie Mécanique et génie électrique,*

*A tout les enseignants du département génie Mécanique et génie électrique.*

*OUAR MOHAMMED ABDELATIF*

## Résumé

Dans ce travail, nous avons mesuré l'évolution du chauffage par l'effet Joule, la conductivité électrique, la densité de courant totale, la température, flux de chaleur en termes de différentes valeurs de résistivité, Nous avons soutenu cette recherche en l'étudiant à l'aide de l'unité de simulation COMSOL pour obtenir des résultats, Il est très important de confirmer l'étendue du rôle de la résistivité dans les résultats du transfert de chaleur, car nous concluons que plus la valeur de la résistance est faible, plus la valeur des paramètres physiques est élevée.

## Résumé

In this work, we measured the evolution of heating by the Joule effect, electrical conductivity, total current density, temperature, heat flow in terms of different resistivity values, We supported this research by student using the COMSOL simulation unit to obtain results, It is very important to confirm the extent of the role of resistivity in the heat transfer results, because we conclude that the higher the value of the resistance is lower, the higher the value of the physical parameters.

## ملخص

من خلال دراستنا هذه قمنا بقياس تطور التسخين بالجول، التوصيل الكهربائي، كثافة التيار الكلية، درجة الحرارة والتدفق الحراري بدلالة مختلف قيم المقاومة، وقد دعمنا هذا البحث من خلال دراسته باستخدام وحدة محاكاة كومسول للحصول على النتائج، ومن المهم جداً معرفة مدى دور المقاومة في نتائج انتقال الحرارة، كما نستنتج أنه كلما انخفضت قيمة المقاومة، زادت قيمة الخصائص الفيزيائية

## Sommaire

Introduction générale .....	10
I-1-Introduction.....	13
I-2-Chauffage électrique .....	13
I-3- Chauffage par effet Joule .....	13
I-4-Densité de courant électrique.....	14
I-4-1-Densité volumique.....	15
I-4-2- Densité surfacique .....	15
I-4-3- Densité linéique .....	15
I-5-La résistivité des matériaux .....	16
I-6- Conductivité électrique .....	16
I-7- chaleur et température.....	17
I-7-1- Chaleur .....	17
I-7-2- La température.....	17
I-7-Flux de chaleur.....	17
I-8-Puissance thermique .....	17
I-9-Modes de transfert de chaleur .....	18
I-9-1- Transfert de chaleur par conduction .....	18
I-9-2- Transfert de chaleur par Convection .....	19
I-9-3- Transfert de chaleur par Rayonnement.....	19
I-10- Résistance thermique .....	20
I-11-Conductivité thermique.....	21
Chapitre II.....	23
II-1-COMSOL Multiphysics .....	23
II-2- Simulation .....	24
II-2-1-Modèle .....	24
II-2-1- 1- Equation électrique (milieu conducteur DC).....	24
II-2-1- 2- Equation de transfert de chaleur par condition .....	24
II-2-2 Géométrie .....	25
II-2-3- Paramètres physiques de simulation .....	25
II-2-4- Maillage .....	26

II-2-4- Conditions aux limites .....	26
II-3- Résultats et discussions des résultats de simulation .....	27
II-3-1- Effet de la variation de la résistivité électrique sur le chauffage par effet joule .....	27
II-3-2- Effet de la variation de la résistivité électrique sur la conductivité électrique.....	31
II-3-3- Effet de la variation de la résistivité électrique sur la densité de courant totale .....	34
II-3-4- Effet de la variation de la résistivité électrique sur la température .....	37
II-3-5- Effet de la variation de la résistivité électrique sur la flux de chaleur .....	41
Conclusion générale.....	44
Bibliographie .....	45

## List de Figure

**Figure I.1** : Effet Joule

**Figure I.2** : Densité

**Figure I.3** : sens du transfert thermique

**Figure I.4** : Propagation de la chaleur

**Figure I.5** : Fluide à  $T_m$

**Figure I.6** : Mouvement de fluide

**Figure I.7**: Types de transfert thermique

**Figure I.8** : Transfert de chaleur à travers une paroi plane

**Figure II-1** : COMSOL

**Figure II-2** : Equation électrique

**Figure II-3** : Equation transfert chaleur par condition

**Figure II-4** : la plaque à simuler

**Figure II-5** : le maillage du domaine à étudier

**Figure II-6** : les différentes conditions aux limites imposées

**Figure II-7** : Variation du chauffage par effet joule à différentes valeurs de résistivités

« Ohm.m » : (a)1.754 (b) 2.84 (c) 5.64

**Figure II-8** : Variation du chauffage par effet joule à différentes valeurs de résistivités

«Ohm.m»(a)1.754 (b) 2.84 (c)5.64

**Figure II-9** : Variation de la conductivité électrique à différentes valeurs de résistivités

«Ohm.m»(a)1.754 (b) 2.84 (c) 5.64

**Figure II-10 :** Variation de la conductivité électrique à différentes valeurs de résistivités

«Ohm.m»(a)1.754 (b) 2.84 (c) 5.64

**Figure II-11 :** Variation du densité de courant totale a différentes valeurs de résistivités

«Ohm.m»(a)1.754 (b) 2.84 (c) 5.64

**Figure II-12 :** Variation du densité de courant totale a différentes valeurs de résistivités

«Ohm.m»(a)1.754 (b) 2.84 (c) 5.64

**Figure II-13:** Variation de la température pour différentes valeurs de résistivités

«Ohm.m»(a)1.754 (b) 2.84 (c) 5.64

**Figure II- 14 :** Variation de la température pour différentes valeurs de résistivités

«Ohm.m»(a)1.754 (b) 2.84 (c) 5.64

**Figure II- 15:** Variation du flux de chaleur pour différentes valeurs de résistivités

«Ohm.m»(a)1.754 (b) 2.84 (c) 5.64

**Figure II-16:** Variation du flux de chaleur pour différentes valeurs de résistivités

«Ohm.m»(a)1.754 (b) 2.84 (c) 5.64

## List de tableau

**Tableau 1:** Résistivité de certains bons conducteurs

**Tableau I-2:** Conductivités thermiques de quelques matériaux

**Tableau II.1 :** les paramètres physiques la tôle de notre simulation

**Tableau II.2 :** Les différentes conditions aux limites imposées

**Tableau II.3 :** Valeurs maximales et minimales du chauffage, (W/m<sup>3</sup>), par effet Joule de la figure II-7

**Tableau II.4:** les valeurs maximales du Chauffage par effet joule

**Tableau II.5 :** Valeurs maximales et minimales de la conductivité électrique(s/m), de la figure II-9

**Tableau II.6 :** les valeurs maximales de la conductivité électrique

**Tableau II.7:** Valeurs maximales et minimales de la densité de courant totale (A/m<sup>3</sup>), de la figure II-11

**Tableau II.8:** les valeurs maximales de la densité de courant totale

**Tableau II.9 :** Valeurs maximales et minimales de la température (K), de la figure II-13

**Tableau II.10 :** les valeurs maximales de température

**Tableau II.11 :** Valeurs maximales et minimales du flux de chaleur (W/m<sup>3</sup>), de la figure II-11

**Le tableau II.12 :** les valeurs maximales de flux de chaleur

## Introduction générale

L'énergie est considérée comme l'une des piliers fondamentaux dans la plupart des secteurs industriels et domestiques en raison de ses multiples utilisations. Elle correspond à un transfert ou échange par interaction d'un système avec son environnement, ce système subit alors une transformation. Généralement, on distingue deux types d'énergies :

1. Le travail qui peut prendre diverses formes selon l'origine physique du transfert en jeu (électrique, magnétique, mécanique, etc.).
2. La chaleur.

La thermodynamique classique ne s'intéresse généralement qu'aux états d'équilibre et aux variations entre ces états, grâce à l'utilisation de fonctions d'état, qui sur un plan mathématique sont des différentielles totales exactes. On pourrait d'ailleurs plus logiquement appeler cette discipline la thermostatique. Le formalisme généralement utilisé nécessite ainsi seulement la connaissance des états initiaux et finaux sans pour autant examiner en détail le processus de transfert d'énergie, ni les modes d'interaction. L'étude complète et générale des mécanismes de transfert d'énergie nécessite d'aborder le formalisme de la thermodynamique hors équilibre [1].

Dans le cadre de ce travail, nous nous limiterons de façon modeste, parmi les transferts énergétiques, à l'étude des transferts de chaleur ou transferts thermiques. Nous serons ainsi amenés à répondre à deux questions :

1. Qu'est-ce qu'un transfert de chaleur?
2. Comment la chaleur est-elle transmise?

Les réponses apportées à ces deux questions nous permettront de comprendre les mécanismes physiques mis en jeu dans les transferts de chaleur.

Par définition, un transfert de chaleur ou transfert thermique entre deux corps est une interaction énergétique qui résulte d'une différence de température entre eux. On distingue habituellement trois modes de transfert de chaleur :

1. La conduction thermique ou diffusion thermique.
2. Le rayonnement thermique.
3. La convection.

Ces trois modes sont régis par des lois spécifiques et font ainsi l'objet de ce chapitre, cependant strictement parlant, seuls la conduction et le rayonnement sont des modes fondamentaux de transmission de la chaleur ; la convection, tout en étant très importante, ne fait que combiner la conduction avec un déplacement de fluide. Pourtant, ce mode de transfert est plus difficile à étudier, car il mélange de manière

intime échange de chaleur et transfert de masse. Les applications directes en sont aussi très larges, à la fois en convection libre et surtout en convection forcée. En outre il est rare qu'une situation particulière ne concerne qu'un seul mode ; le plus souvent deux sinon trois modes entrent en jeu. Il sera donc nécessaire de poser correctement les problèmes pour prendre en compte ces différents mécanismes.

Dans ce contexte général, notre étude s'intéresse à la filière électrothermique et consiste essentiellement le chauffage électrique par conduction. Ce travail comporte deux chapitres ainsi qu'une introduction et une conclusion générales.

Dans le premier chapitre (partie théorique), les techniques de chauffage notamment le chauffage électrique et ses caractéristiques techniques tels que : l'effet Joule, densité du courant électrique (volumique, surfacique, ainsi que linéique), la résistivité des matériaux, la conductivité électrique, et les définitions de la température et de la chaleur seront présentées. Ensuite, les différentes modes de transfert de chaleur tels que : transfert par conduction, convection, et rayonnement seront discutée.

Dans le deuxième chapitre (partie pratique), on le consacre à la simulation du phénomène du transfert de chaleur par conduction dans une plaque de différentes résistivités (plaque 1, plaque 2, et plaque 3) par l'utilisation du logiciel COMSOL. Tout d'abord, la conception de la plaque sous COMSOL sera faite toute en suivant les étapes suivantes : introduction du module et du modèle mathématique (équations électrique et de transfert de chaleur par conduction), Introduction des paramètres physiques de simulation, ainsi que le maillage. Ensuite, la simulation du phénomène sera élaborée dans les trois types de plaques. Finalement, une discussion des différents résultats obtenus.

Enfin, nous terminons ce mémoire par une conclusion générale ainsi que quelques perspectives dégagées de ce travail.

# Chapitre I

## I-1-Introduction

Lorsque nous utilisons des matériaux conducteurs pour faire circuler un courant électrique, nous cherchons souvent à minimiser la résistance électrique, mais cette dernière et ces effets – tels que la lumière et la chaleur – peuvent également être utiles. Le chauffage par induction consiste à employer un courant électrique pour provoquer délibérément un comportement électrique chauffant un matériau grâce à des effets de résistance. Ces effets peuvent être utilisés pour tout type d'applications, de la fusion du fer à des températures..

## I-2- Chauffage par effet Joule

Le passage du courant électrique dans les récepteurs provoque parfois un fort dégagement de chaleur et de lumière : c'est l'effet Joule. Cet effet porte le nom du physicien anglais James Prescott Joule qui l'a étudié vers 1860.

Lorsqu'on place une pièce conductrice dans un champ magnétique variable, elle sera le siège des courants induits de Foucault. Leur circulation provoque l'échauffement de la pièce d'après l'effet Joule. L'énergie calorifique (en Joule) dégagée par un conducteur Électrique de résistance (en Ohm) traversée par un courant d'intensité (en Ampère) pendant un temps (en seconde) est donné par la relation :

$$Q = R \cdot I^2 \cdot t \quad (I.1)$$

Le passage du courant qui porte au rouge (Figure I.1) les « résistances » des plaques permettant ainsi la cuisson des aliments par l'effet de Joule. La chaleur se propage vers le centre de la pièce par diffusion thermique [2].

L'énergie dissipée sous forme de chaleur entre deux instants  $t_1$  et  $t_2$  par un dipôle de résistance  $R$  traversé par un courant d'intensité  $i$  s'écrit :

$$W = R \int_{t_1}^{t_2} i^2 dt \quad (I.2)$$

La puissance moyenne vaut donc :

$$P = \frac{W}{t_2 - t_1} = \frac{R}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} i^2 dt \quad (I.3)$$

En régime de courant périodique l'expression de la puissance peut se mettre sous la forme :

$$P = RI_{eff}^2 \quad (I.4)$$

Avec :

$I_{eff}^2$  : La valeur efficace de l'intensité du courant En régime de courant continu l'expression de la puissance devient :

$$P = RI^2 \quad (I.5)$$

Si ce dipôle vérifie la loi d'Ohm, on peut écrire :

$$P = U \cdot I \quad (I.6)$$

$$P = \frac{U^2}{R} \quad (I.7)$$

$$W = R \int_{t_1}^{t_2} i^2 dt \quad (I.8)$$

Avec :

U la valeur efficace de la tension à ses bornes.

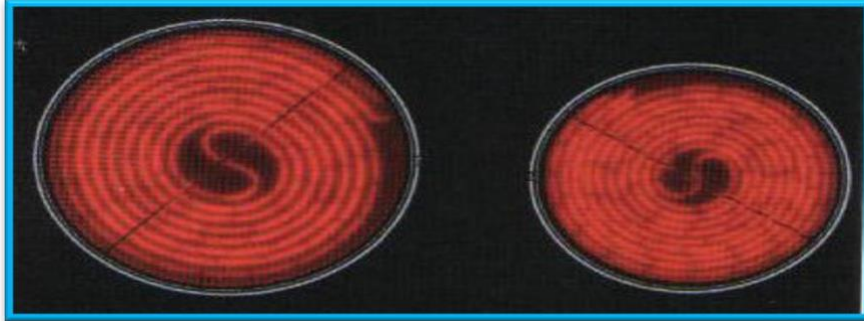


Figure I.1 : Effet Joule [1].

### I-3-Densité de courant électrique

La densité de courant, ou densité volumique de courant, est un vecteur qui décrit le courant électrique à l'échelle locale, en tout point d'un système physique. Dans le Système international d'unités, Son module s'exprime en ampères par mètre carré ( $A/m^2$  ou  $A \cdot m^{-2}$ ). À l'échelle du système tout entier il s'agit d'un champ de vecteurs, puisque la vectrice densité de courant est définie en tout point. [3].

Quand l'électricité circule essentiellement à la surface d'un objet (notamment celle d'un conducteur parcouru par un courant électrique de haute fréquence), on définit la densité surfacique de courant, également vectorielle, dont le module s'exprime en Ampères par mètre ( $A/m$ ).

Quand l'électricité circule dans un conducteur filiforme (de dimensions latérales très petites en comparaison de sa longueur), on définit la densité linéique de courant, un vecteur parallèle au fil, dirigé dans le sens du courant et dont le module est l'intensité électrique, exprimée en ampères

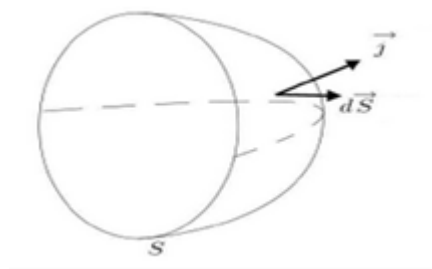


Figure I.2 : Densité [3].

#### I-3-1-Densité volumique

Un courant électrique est un débit de charges électriques à travers une surface orientée. Pour une surface élémentaire décrite par son vecteur normal  $\vec{ds}$ , l'intensité du courant traversant cette surface et  $\vec{j}$ , le vecteur densité de courant en ce point, sont reliés par :

$$dI = \vec{j} \cdot \vec{ds} \quad (I.9)$$

Pour obtenir l'intensité du courant à travers une surface finie  $S$ , on intègre cette relation sur la surface totale :

$$I = \iint_S \vec{J} \cdot d\vec{s} \quad (\text{I.10})$$

Le signe de  $I$  est alors lié à l'orientation de la surface  $S$ .

### I-3-2- Densité surfacique

Une densité de courant est par défaut une densité de courant volumique. Si l'on considère un conducteur dont une des dimensions est très faible devant les deux autres (une plaque d'épaisseur  $e$ ), on peut définir la densité surfacique de courant :

$$\vec{J}_S = \int_0^e \vec{J} dz \quad (\text{I.11})$$

Où  $z$  désigne une coordonnée mesurée perpendiculairement à la surface. L'intensité du courant passant à travers une ligne tracée sur la surface est alors :

$$I = \int_0^c \vec{J} \cdot d\vec{l} \quad (\text{I.12})$$

Où la ligne, de longueur  $l$ , est parcourue par le chemin élémentaire  $d\vec{l}$

### I-3-3- Densité linéique

On peut de même définir la densité linéique de courant, pour les circuits électriques classiques (où les conducteurs sont des fils de section faible par rapport à leur longueur) :

$$\vec{J}_L = \int_S \vec{J} ds \quad (\text{I.13})$$

Où l'intégrale est étendue à l'ensemble d'une section  $S$  du fil.

L'intensité électrique circulant dans le fil est alors :

$$I = \|\vec{J}_L\| \quad (\text{I.14})$$

En d'autres termes, la densité linéique est le vecteur :

$$\vec{J}_L = I \vec{u} \quad (\text{I.15})$$

Où  $\vec{u}$  est un vecteur unitaire tangent au fil et dirigé dans le sens du courant.

## I-4-La résistivité des matériaux

Puisque la résistivité est l'inverse de la Conductivité, la résistivité dépend des mêmes Paramètres physiques que la conductivité. Ainsi, Ce n'est pas tous les matériaux qui sont de bon Conducteur à température ambiante. Plus un matériau est résistif, plus il est coûteux En différence de potentielle pour y faire circuler Un courant (loi d'Ohm). [4]

**Tableau 1:** Résistivité de certains bons conducteurs

Matériaux	La résistivité a 20C° (x10 <sup>-8</sup> Ω .m)
Argent	1.5
Cuivre	1.7
Or	2.4
Aluminium	2.8
Tungstène	5.6
Platine	11

### I-5- Conductivité électrique

La conductivité électrique est un phénomène physique qui consiste à laisser passer librement les charges électriques dans un corps, solide ou liquide. Il s'oppose à la résistivité, qui ralentit le courant en lui résistant. Les capacités de conductivité électrique sont propres à chaque matériau. Certains laissent mieux passer le courant électrique que d'autres, ils sont alors considérés comme de très bons, voire d'excellents conducteurs.[5]

La loi de Nernst-Einstein qui permet un calcul précis de la conductivité électrique d'un matériau, qu'il soit sous forme liquide ou solide. La formule de la conductivité est la suivante :

$$\sigma = \frac{DZ^2e^2c}{KT} \tag{I.16}$$

Pour estimer la conductivité électrique, il faut donc se renseigner sur :

- D: le coefficient de diffusion du matériau
- z: le nombre de charges portées par le matériau
- e: la charge élémentaire
- c: la concentration du matériau
- k: la constante de Boltzmann (environ égale à  $1,3806 \times 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$ )
- T: la température absolue

Voilà une autre loi de simulation :

$$\sigma = 1 / (\rho_0(1 + \alpha(T - T_0))) \tag{I.17}$$

$\sigma$ : Conductivité électrique

$\alpha$  : Coefficient de température

$\rho_0$ : Résistivité à la température de référence

T : température

$j^e$  : Densité de courant externe

$Q_j$  : Source de courant

## I-6- chaleur et température

### I-6-1- Chaleur

La chaleur est une énergie, son unité est le Joule (J). On peut définir le Joule thermique ainsi Il faut 4186 J pour élever de 1°C une masse de 1kg d'eau. Une autre unité, moins utilisée, est la calorie (cal) : c'est la chaleur nécessaire pour élever 1g d'eau de 1°C. Les nutritionnistes utilisent la kilocalorie (kcal).

### I-6-2- La température

C'est la manifestation mesurable de la chaleur stockée. Elle s'exprime en : °C (degrés Celsius) ou en °K (Kelvin) ou en Fahrenheit (°F) [6]

### I-7-Flux de chaleur

C'est la quantité d'énergie thermique  $dQ$  échangée pendant une durée  $dt$  (en J/s ou encore en Watt)

$$d\varphi = ( dQ / dt ) \quad (I.18)$$

$$\varphi_e = \dot{m}c_p(T_1 - T_2) \quad (I.19)$$

Avec :

$\varphi_e$  :Flux de chaleur entrant dans le système (W)

$m$  : débit massique ( $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ )

$c_p$ : Chaleur spécifique ( $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )

$T_1, T_2$  : Températures d'entrée et de sortie (K)

### I-8-Puissance thermique

Tout appareil (chaudières ou poêles) produisant de la chaleur est caractérisé par une certaine puissance, Généralement exprimée en Watt (W) ou (KW), le transfert de chaleur se produit toujours spontanément du corps chaud vers le corps froid. L'équilibre thermique est atteint lorsque les corps sont à la même température [7].

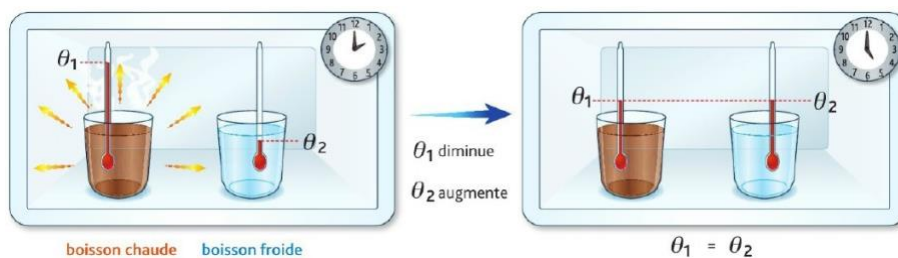


Figure I.3 : sens du transfert thermique [7]

### I-9-Modes de transfert de chaleur

La chaleur est transférée par conduction, rayonnement et convection. Ces trois modes de transfert de chaleur faire simultanément [8]

#### I-9-1- Transfert de chaleur par conduction

C'est le transfert de chaleur au sein d'un milieu opaque, sans déplacement de matière, sous l'influence d'une différence de température. La propagation de la chaleur par conduction à l'intérieur d'un corps

s'effectue selon deux mécanismes distincts : une transmission par les vibrations des atomes ou molécules et une transmission par les électrons libres.

La théorie de la conduction repose sur l'hypothèse de Fourier : le flux est proportionnel au gradient de température [9]

$$\vec{\phi} = -\lambda S \overrightarrow{\text{grad}}(T) \quad (I.20)$$

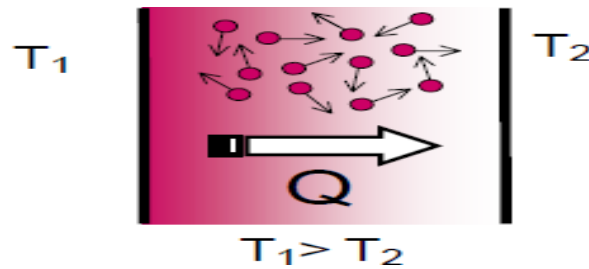


Figure I.4 : Propagation de la chaleur

Ou sous forme algébrique

$$\phi = -\lambda S \frac{dT}{dx} \quad (I.21)$$

Avec :

$\phi$  Flux de chaleur transmis par conduction (W)

$\lambda$  Conductivité thermique du milieu ( $\text{W m}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ )

$x$  Variable d'espace dans la direction du flux (m)

$S$  Aire de la section de passage du flux de chaleur ( $\text{m}^2$ )

### I-9-2- Transfert de chaleur par Convection

C'est le transfert de chaleur entre un solide et un fluide, l'énergie étant transmise par le déplacement du fluide. Ce mécanisme de transfert est régi par la loi de Newton :

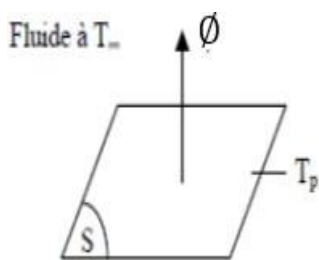


Figure I.5 : Fluide à  $T_m$

$$\phi = h \cdot s \cdot (T_p - T_\infty)$$

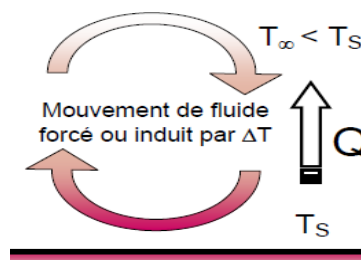


Figure I.6 : Mouvement de fluide)

$$(I.22)$$

- $\varphi$  : Flux de chaleur transmis par convection (W)
- $H$  : Coefficient de transfert de chaleur par convection ( $\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ )
- $T_p$  : Température de surface du solide ( $^\circ\text{C}$ )
- $T_\infty$  : Température du fluide loin de la surface du solide ( $^\circ\text{C}$ )
- $S$  : Aire de la surface de contact solide/fluide ( $\text{m}^2$ )

La valeur du coefficient de transfert de chaleur par convection  $h$  est fonction de la nature du fluide, de sa température, de sa vitesse et des caractéristiques géométriques de la surface de contact solide/fluide.

### I-9-3- Transfert de chaleur par 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 du 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 [10]

$$\Phi_{rad} = C_{trans} (T_{ambtrans}^4 - T^4) \quad (I.23)$$

$C_{trans}$ : Constante définie par l'utilisateur

$T_{ambtrans}$ : Température ambiante

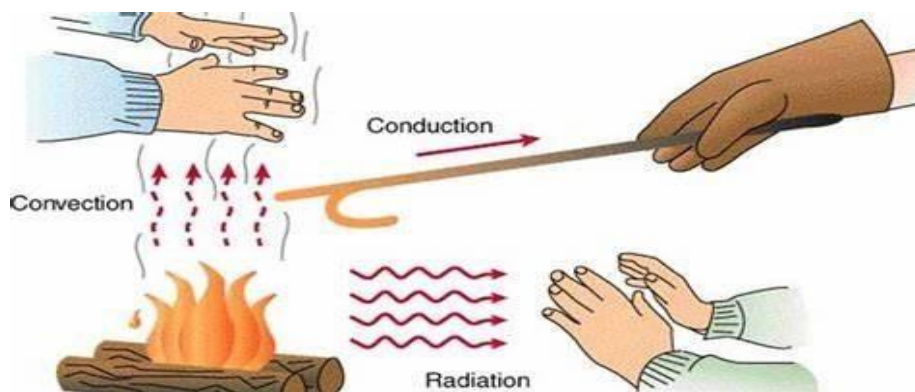


Figure I.7: Types de transfert thermique

### I-10- Résistance thermique

Une paroi plane, dont deux faces sont à des températures différentes  $T_1$  et  $T_2$ , est le siège d'un transfert thermique par conduction. Lorsque les températures  $T_1$  et  $T_2$  sont constantes au cours du temps, le flux s'exprime par :

$$\varphi = \frac{T_1 - T_2}{R_{th}} \quad (I.24)$$

Avec  $T_1$  et  $T_2$  en (Kelvin) ou en ( $^\circ\text{C}$ ) et  $T_1 > T_2$

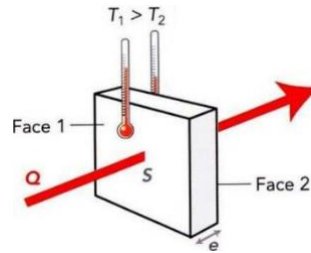
La résistance thermique surfacique et globale sont données par les équations suivantes respectivement :

$$R_{th} = \frac{e}{\lambda} \left[ \text{°C} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{W}} \right] \quad (\text{I.25})$$

$$R_{th} = \frac{e}{\lambda S} \left[ \text{°C} / \text{W} \right] \quad (\text{I.26})$$

Avec

E : en (m), S en (m<sup>2</sup>),  $\lambda$  en (K.m<sup>-1</sup>. K<sup>-1</sup>)



**Figure I.8 : Transfert de chaleur à travers une paroi plane**

Pour un même écart de température entre les 2 faces d'une paroi, plus la résistance thermique de la paroi est grande plus le flux thermique est faible. Une paroi de grande résistance thermique est un bon isolant thermique.

La résistance thermique  $R_{th}$  d'une paroi plane dépend de la conductivité thermique du matériau  $\lambda$ , de son épaisseur  $e$  et de la surface  $S$  traversée par le flux.

Pour un même écart de température entre les 2 faces d'une paroi, plus la résistance thermique de la paroi est grande, plus le flux thermique est faible.

Une paroi de grande résistance thermique est un bon isolant thermique

### **I-11-Conductivité thermique**

La conductivité thermique est le déplacement de l'énergie thermique des parties chaudes d'un système vers les parties froides. Lorsque l'énergie diffuse dans un système, les différences de température décroissent et l'entropie croît. Elle dépend de :

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

Le tableau I-2 résume les valeurs de la conductivité thermique de certains matériaux parmi les plus courants.

**Tableau I-2: Conductivités thermiques de quelques matériaux**

<b>Matériau</b>	<b><math>\lambda</math> (W.m<sup>-1</sup>°C<sup>-1</sup>)</b>
Argent	419
Cuivre	386
Aluminium	204
Plâtre	0,48
Verre	1,0

# Chapitre II

### Chapitre II

#### II-1-COMSOL Multiphysics

COMSOL Multiphysics est un logiciel de simulation numérique basé sur la méthode des éléments finis. Ce logiciel permet de simuler de nombreux phénomènes physiques et applications en ingénierie, et tout particulièrement les phénomènes couplés ou simulation multi-physiques.

Le logiciel COMSOL et la société correspondante ont été créés en 1986 par des étudiants de Germond Dahlquist, dans la suite de son cours consacré à la simulation numérique à l'Institut royal de technologie (KTH) à Stockholm en Suède. La première version de COMSOL Multiphysics est utilisée en 1998.

L'utilisateur définit ses couplages ou sélectionne les interfaces prédéfinies. Les différentes étapes du processus de modélisation - définir la géométrie, les propriétés matériaux, le maillage, choisir la ou les physiques, résoudre et afficher les résultats - sont intégrées dans une seule interface. Des modules d'applications optionnels offrent des interfaces spécialisées notamment en mécanique linéaire et non linéaire, acoustique, écoulement, électromagnétisme basse et haute fréquence, corrosion, plasma, suivi de particules, Transfert de chaleur, génie chimique, géophysique, optimisation, MEMS, ainsi qu'avec les logiciels de CAO et matlab.

Ce logiciel est multiplateforme (Windows, Mac, Linux). En plus des physiques précitées, COMSOL Multiphysics autorise l'utilisateur à définir ses propres systèmes d'équations aux dérivées partielles (EDP), soit sous forme différentielle, soit sous formulation faible. Les couplages avec des équations aux dérivées ordinaires (EDO) et des équations algèbro-différentiels (EAD) sont également possible.

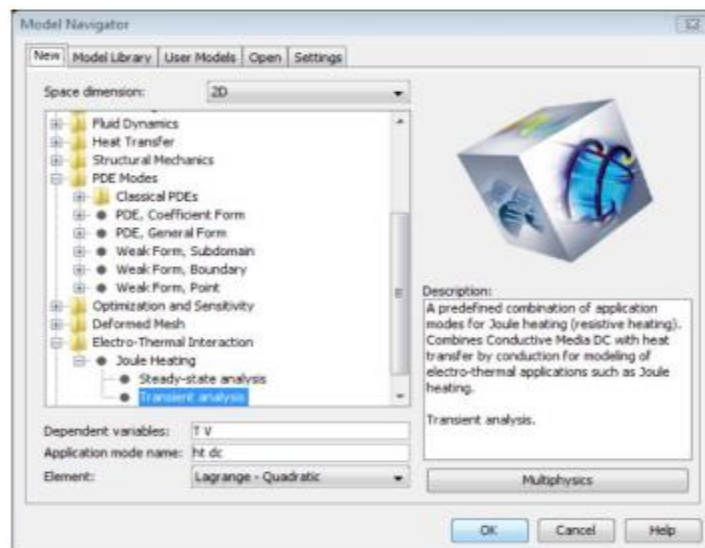


Figure II-1 : COMSOL

## II-2- Simulation

### II-2-1-Modèle

#### II-2-1- 1- Equation électrique (milieu conducteur DC)

L'équation (II.1) présente la relation conductivité électrique en fonction de la résistivité ainsi que la variation de la température.

$$-\nabla (\sigma \nabla V - j^e) = Q_j, \quad \sigma = 1 / (\rho_0(1 + \alpha(T - T_0))) \quad (\text{II.1})$$

Avec :

$\sigma$ : Conductivité électrique

$\alpha$  : Coefficient de température

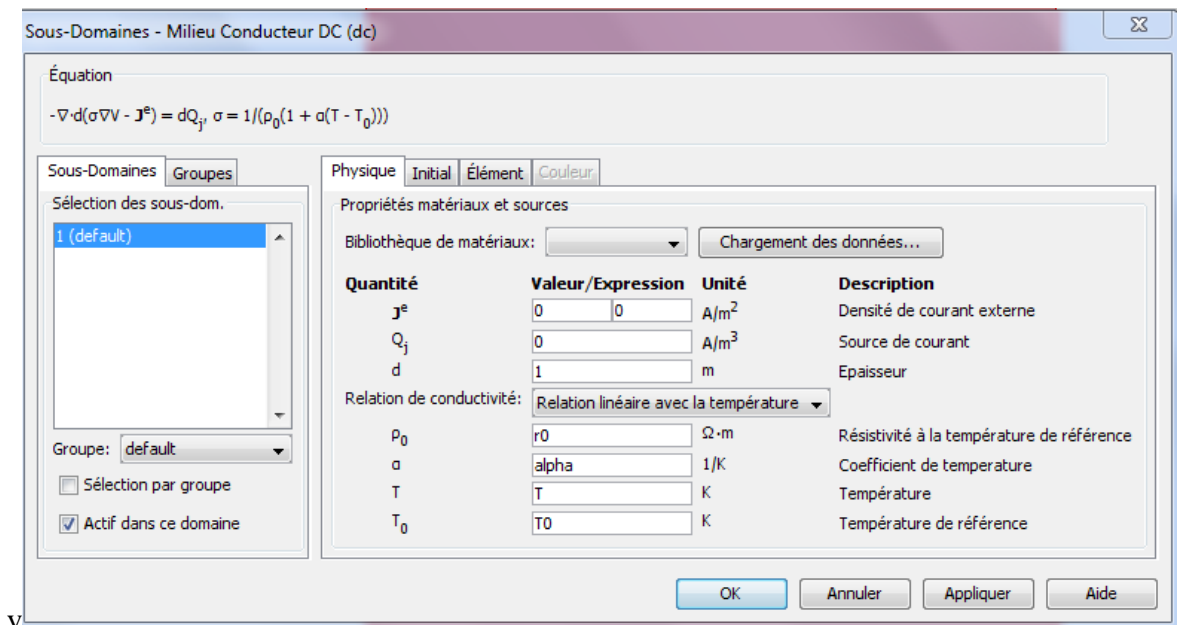
$\rho_0$ : Résistivité à la température de référence

T : température

$j^e$  : Densité de courant externe

$Q_j$  : Source de courant

La figure II-2 représente équation électrique (milieu conducteur DC) :



**Figure II-2 : Equation électrique**

#### II-2-1- 2- Equation de transfert de chaleur par condition

L'équation (II.2) présente la loi fondamentale du transfert de chaleur.

$$\delta_{ts} \rho C_p \frac{dT}{dt} - \nabla \cdot (k \nabla T) = Q + h_{trans} (T_{ext} - T) + C_{trans} (T_{ambtrans}^4 - T^4) \quad (\text{II.2})$$

Avec :

$\delta_{ts}$  : Coefficient d'échelle de temps

P : Densité

$C_p$  : Capacité calorifique a pression constante

K (isotrope): Conductivité thermique

Q : Source de chaleur

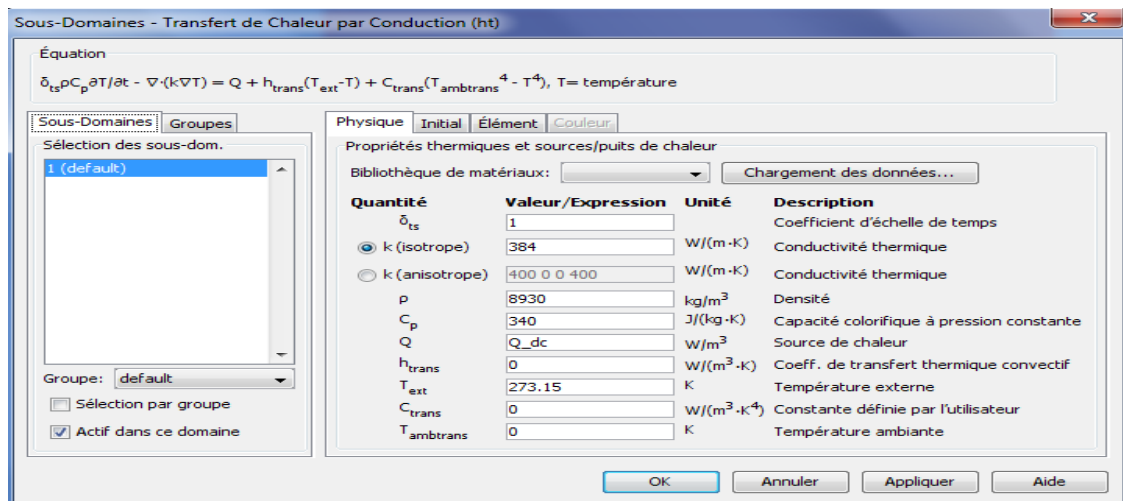
$h_{trans}$  : Coeff. De transfert thermique convectif

$T_{ext}$  : Température externe

$C_{trans}$  : Constante définie par l'utilisateur

$T_{amb}$  : Température ambiante

La figure II-6 représente équation transfert chaleur par condition :



**Figure II-3** : Equation transfert chaleur par condition

### II-2-2 Géométrie

Figure II-3 représente la plaque à simuler, elle est de forme carrée de 1m de côté.

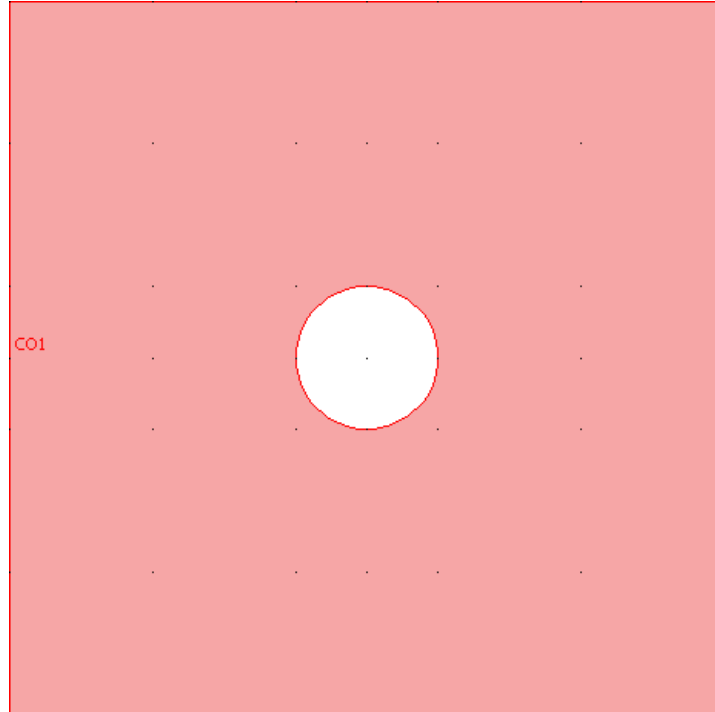


Figure II-4 : la plaque à simuler

### II-2-3- Paramètres physiques de simulation

Le tableau II.1 résume les paramètres physiques la tôle de notre simulation.

Tableau II.1 : les paramètres physiques la tôle de notre simulation

Description	valeur	Unité
Résistivité à 20°C	$1,754.10^{-8}$	ohm*m
Température de référence	20	[degC]
Coefficient de température	0.0039	[1/K]
Potentiel électrique	0.1	[V]

### II-2-4- Maillage

La figure II-4 représente le maillage du domaine à étudier. Ce maillage est composé de 3488 éléments triangulaires et de 1828 nœuds.

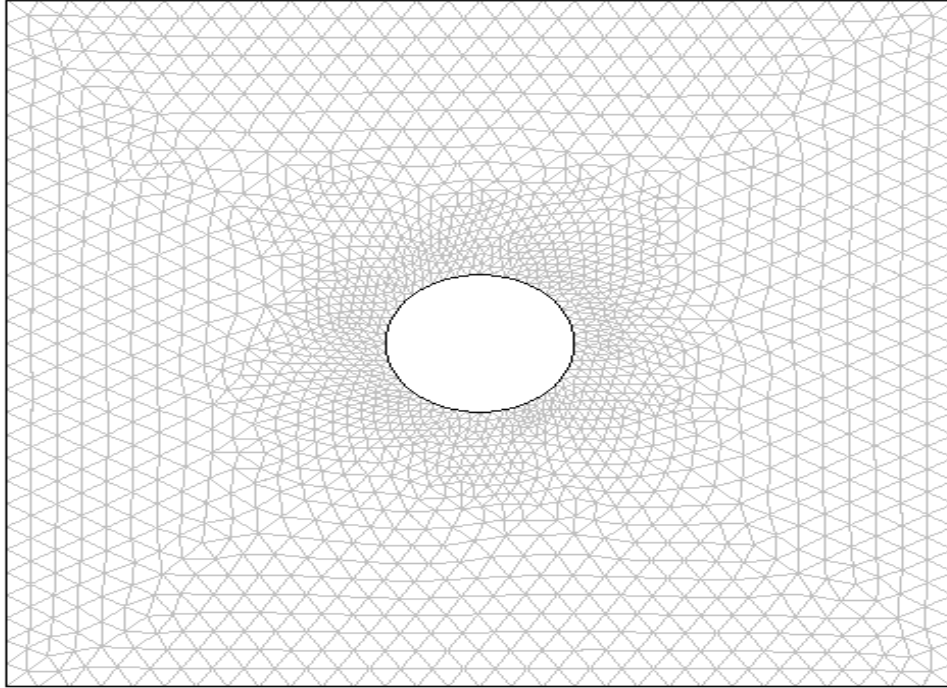


Figure II-5 : le maillage du domaine à étudier

### II-2-4- Conditions aux limites

La figure II-5 et le tableau II.2 représente les différentes conditions aux limites imposées sur le domaine représenté par la figure.

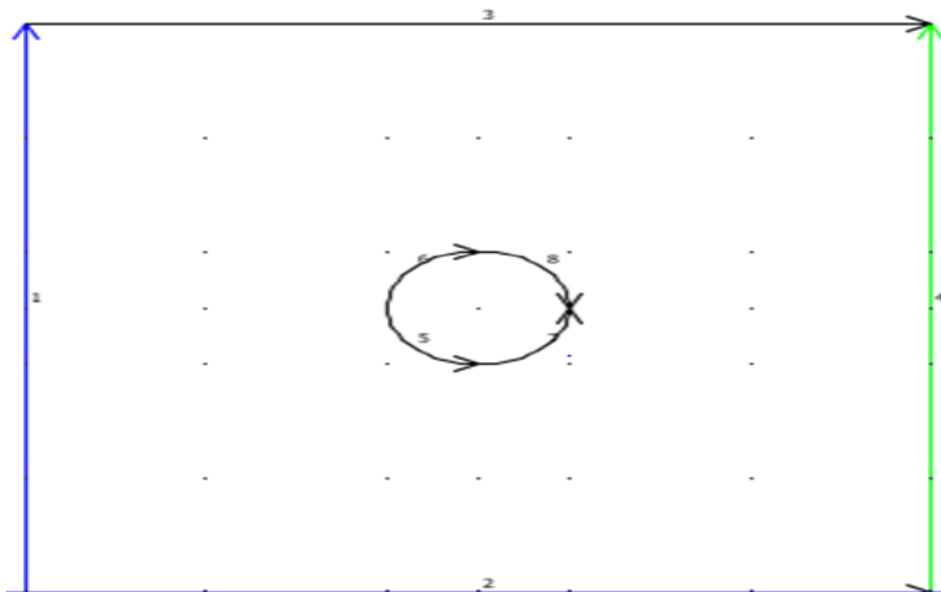


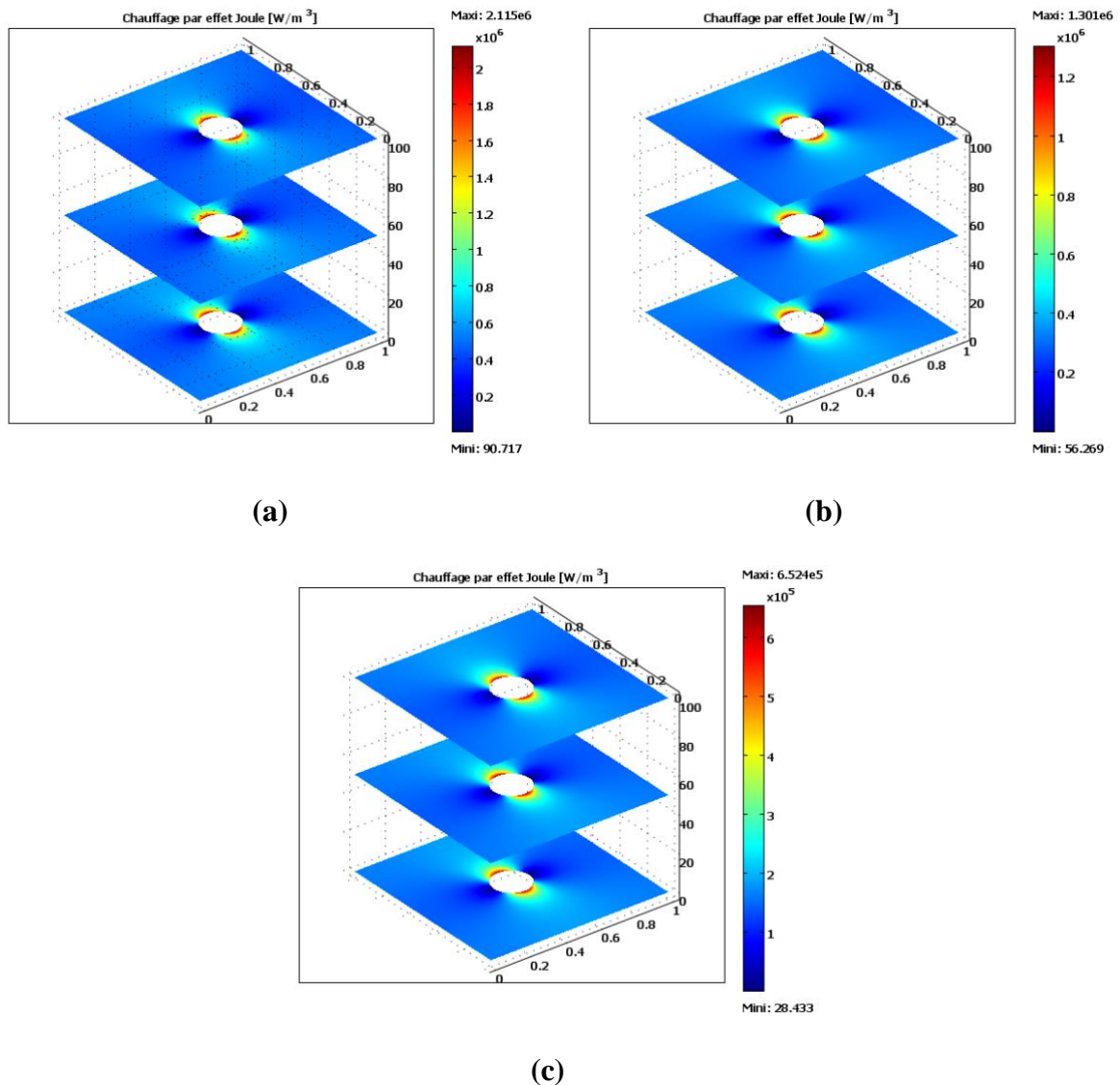
Figure II-6 : Les différentes conditions aux limites imposées

**Tableau II.2 :** Les différentes conditions aux limites imposées

Numéro de frontière	Tension imposée	Température
1	$v_0=v$	$T = T_0$
2	$N J=0$	$n. (k\nabla T)=0$
3	$N J=0$	$n. (k\nabla T)=0$
4	$v=0$	$T = T_0$
5	$N J=0$	$T = T_0$
6	$N J=0$	$T = T_0$
7	$N J=0$	$T = T_0$
8	$N J=0$	$T = T_0$

## II-3- Résultats et discussions des résultats de simulation

### II-3-1- Effet de la variation de la résistivité électrique sur le chauffage par effet Joule



**Figure II-7 :** Variation du chauffage par effet Joule à différentes valeurs de résistivités « Ohm.m » :

## Chapitre II : simulation

(a)1.754 (b) 2.84 (c) 5.64

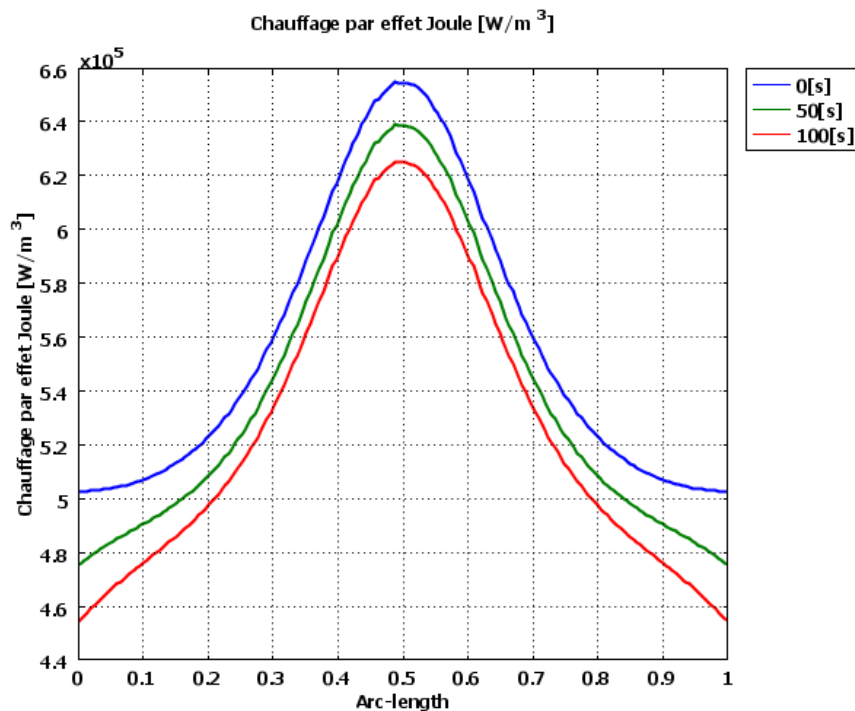
La figure II-7 représente la cartographie de la distribution du chauffage par effet Joule ainsi développé en variant la résistivité de la plaque. On remarque une valeur importante, dans les trois graphes, au tour du trou dans la plaque, cela est dû aux conditions aux limites imposées (tableau II.2). Le chauffage par effet Joules est plus faible en partant vers les extrémités de la plaque.

**Tableau II.3 :** Valeurs maximales et minimales du chauffage par effet Joule, ( $W/m^3$ ), de la figure II-7

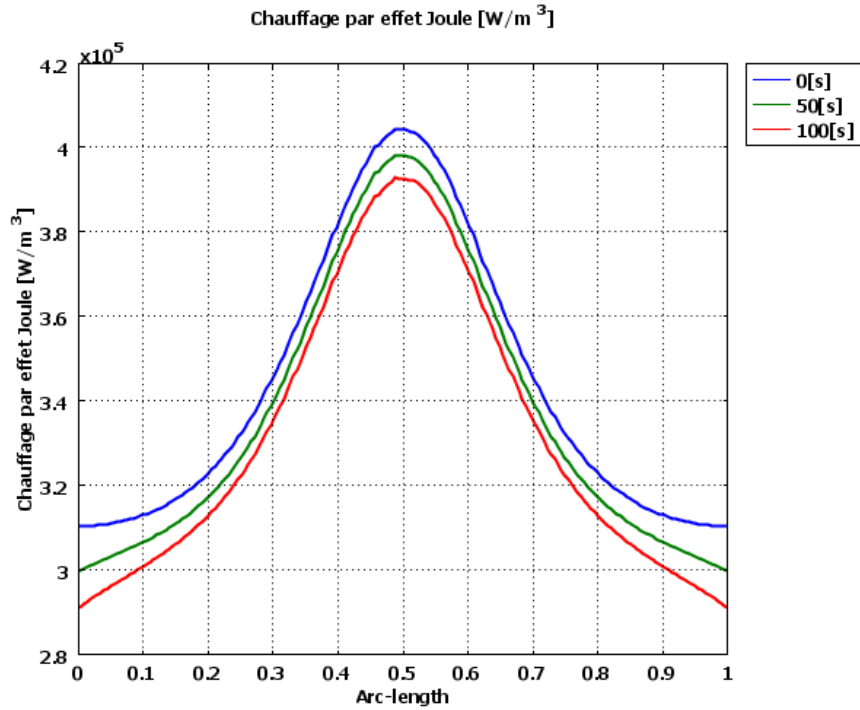
	max	min
<b>Plaque 1</b>	$2.115.10^6$	$90.719.10^6$
<b>Plaque 2</b>	$1.301.10^6$	$56.269.10^6$
<b>Plaque 3</b>	$6.524.10^5$	$28.433.10^5$

La figure II.8 représente le chauffage par effet Joule aux instants 0, 50 et 100 pour les différentes résistivités choisies. Ces courbes obtenues selon une droite tracée horizontalement entre deux points de coordonnées (0,0.2) et (1,0.2).

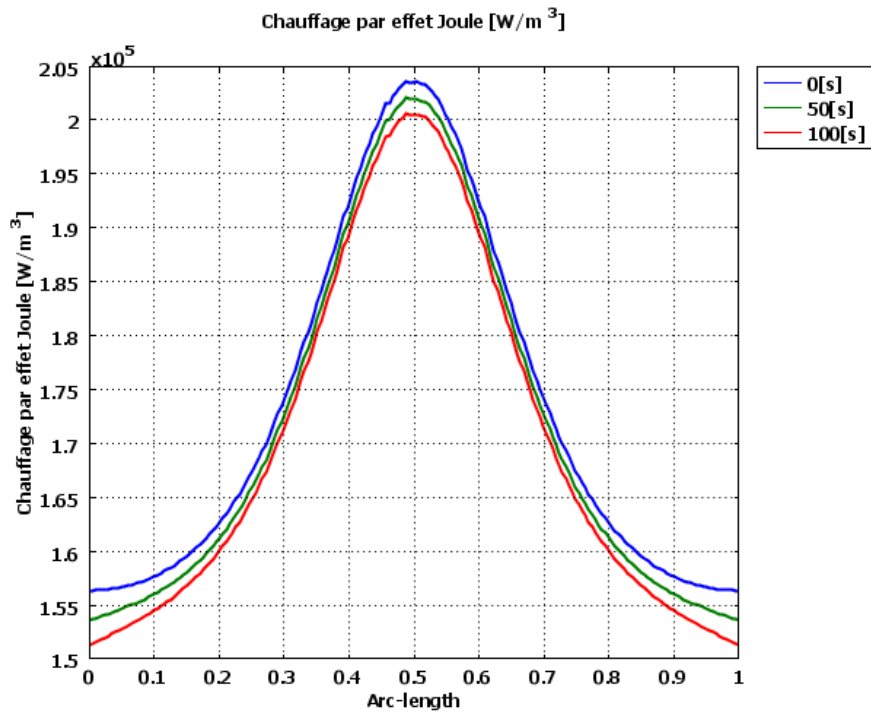
On remarque un même comportement en variant la résistivité de la tôle, le chauffage par effet Joule augmente en partant du premier point, il atteint son maximum (tableau II.4). Notons ici qu'il y a une symétrie remarquable dans cette figure en s'éloignant de la valeur maximale.



(a)



(b)



(c)

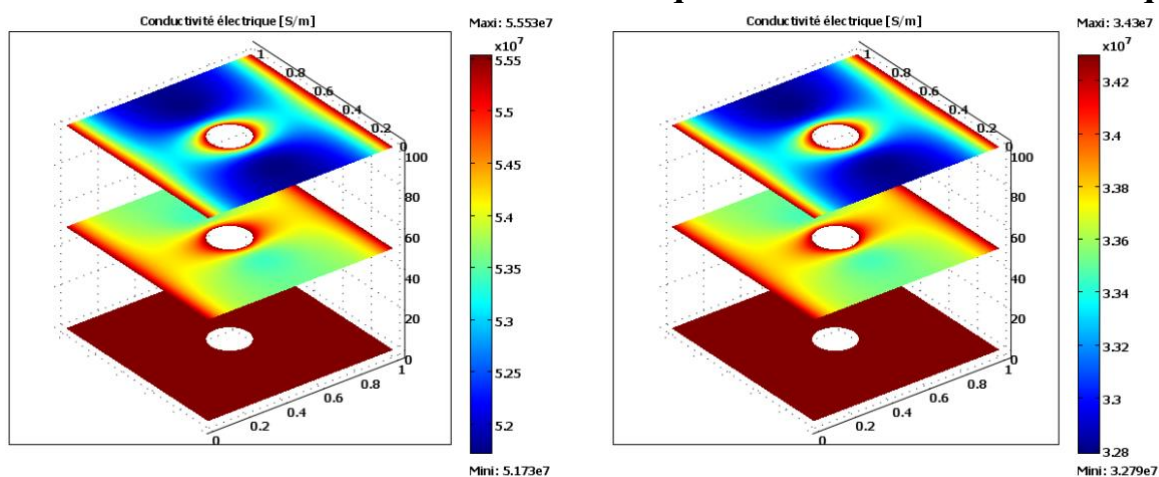
**Figure II-8** : Variation du chauffage par effet Joule à différentes valeurs de résistivités «Ohm.m»(a)1.754 (b) 2.84 (c) 5.64

**Tableau II.4:** les valeurs maximales du Chauffage par effet Joule

		Temps (Sec)		
		0	50	100
<b>Chauffage par effet joule (W/m<sup>3</sup>).10<sup>5</sup></b>	<b>Plaque 1</b>	6.55	6.4	6.25
	<b>Plaque 2</b>	4.05	4.00	3.9
	<b>Plaque 3</b>	2.04	2.02	2.00

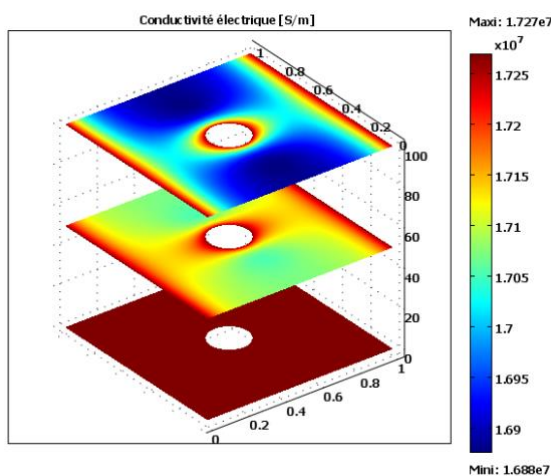
Le tableau II.3 résume les valeurs maximales du chauffage par effet Joule dans la plaque pour différentes valeurs de résistivités, on remarque que le chauffage par effet Joule diminue avec le temps, on note ici, que le chauffage par effet Joule diminue en changeant la résistivité du matériau.

### II-3-2- Effet de la variation de la résistivité électrique sur la conductivité électrique



(a)

(b)



(c)

## Chapitre II : simulation

**Figure II-9 :** Variation de la conductivité électrique à différentes valeurs de résistivités «Ohm.m»(a)1.754 (b) 2.84 (c) 5.64

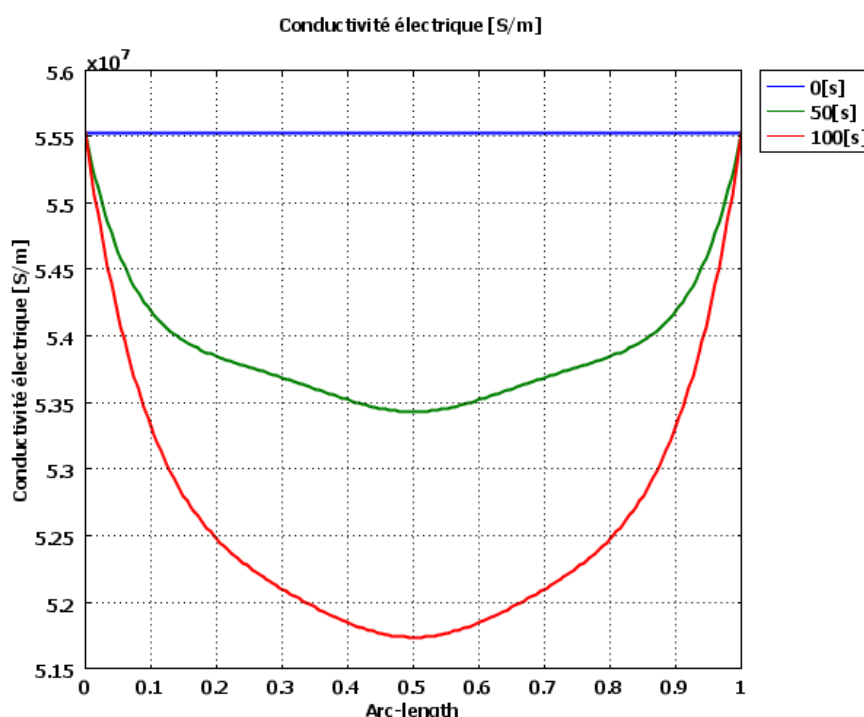
La figure II-9 représente la cartographie de la distribution de la conductivité électrique ainsi développé en variant la résistivité de la plaque. On remarque une valeur importante, dans les trois graphes, dans bordure et au tour du trou dans la plaque, cela est dû aux conditions aux limites imposées (tableau II.2).

**Tableau II.5 :** Valeurs maximales et minimales de la conductivité électrique(s/m), de la figure II-9

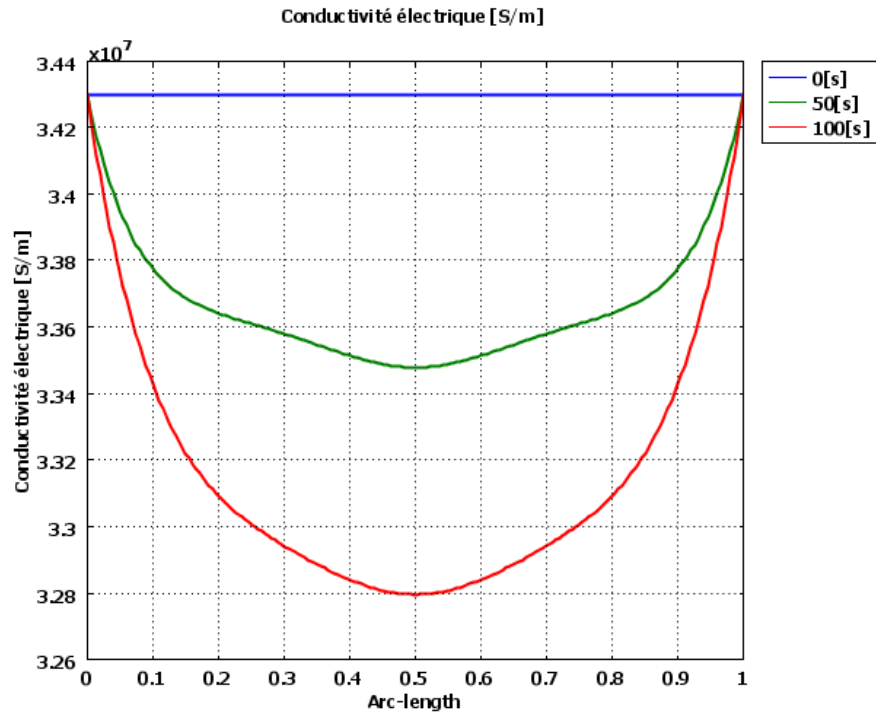
	Max	Min
<b>Plaque 1</b>	$5.553.10^7$	$5.173.10^7$
<b>Plaque 2</b>	$3.28.10^7$	$3.28.10^7$
<b>Plaque 3</b>	$1.727.10^7$	$1.688.10^7$

La figure II.10 représente la conductivité électrique aux instants 0, 50 et 100 pour les différentes résistivités choisies. Ces courbes obtenues selon une droite tracée horizontalement entre deux points de coordonnées (0,0.2) et (1,0.2).

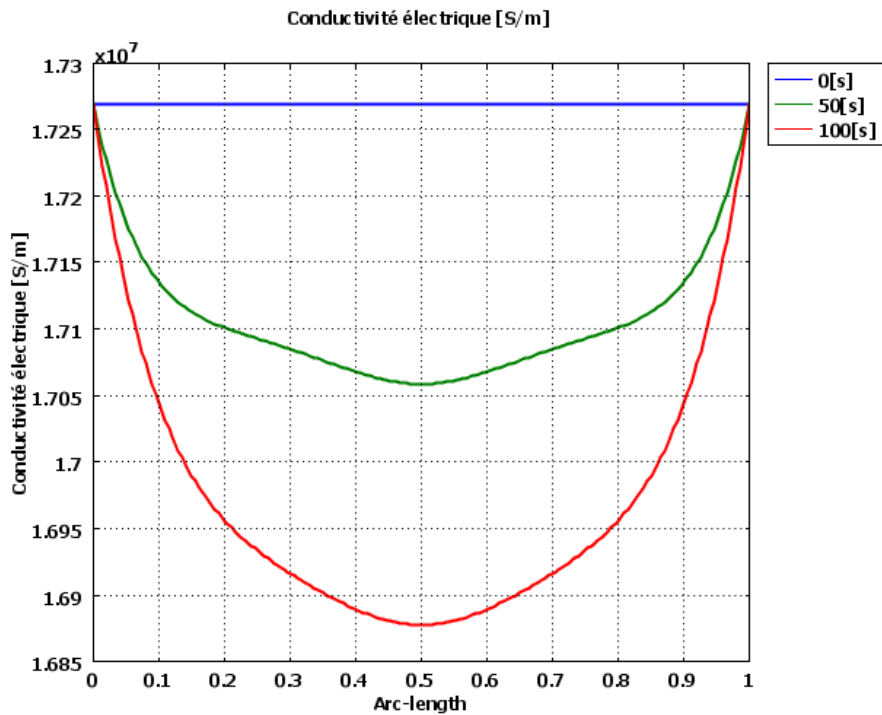
On remarque un même comportement en variant la résistivité de la tôle, la conductivité électrique démuni en partant du premier point, il atteint son maximum (tableau II.6). Notons ici qu'il y a une symétrie remarquable dans cette figure en s'éloignant de la valeur minimale.



(a)



(b)



(c)

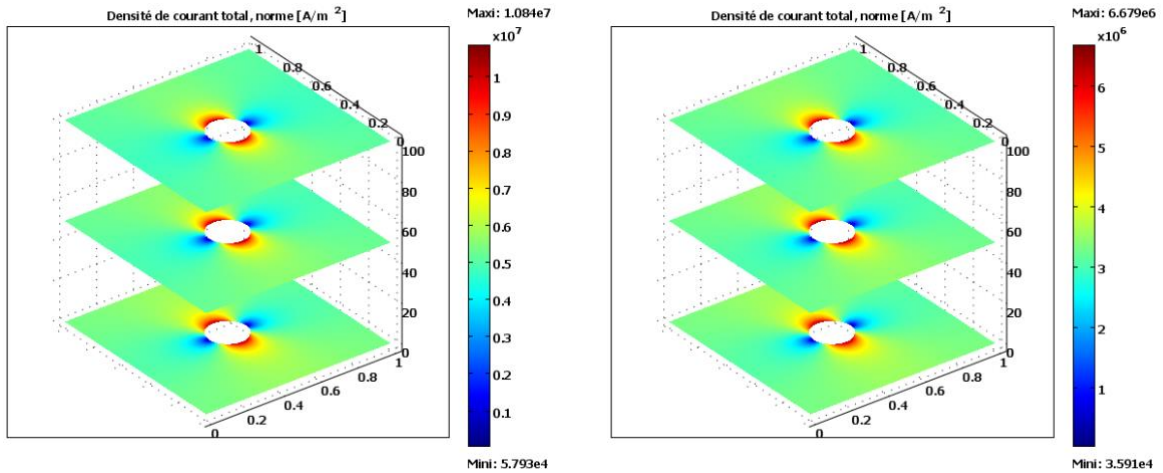
**Figure II-10** : Variation de la conductivité électrique à différentes valeurs de résistivités «Ohm.m»(a)1.754  
(b) 2.84 (c) 5.64

**Tableau II.6 : les valeurs maximales de la conductivité électrique**

		Temps (Sec)		
		0	50	100
<b>conductivité électrique (s/m) <math>\cdot 10^7</math></b>	<b>Plaque 1</b>	5.55	5.35	5.17
	<b>Plaque 2</b>	3.43	3.35	3.28
	<b>Plaque 3</b>	1.727	1.704	1.687

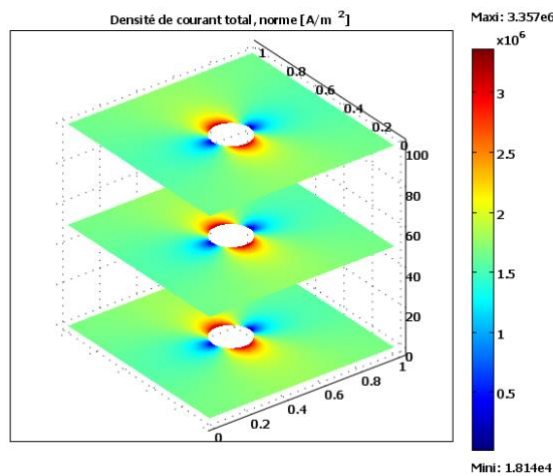
Le tableau II.4 résume les valeurs de la conductivité électrique minimales obtenues dans la plaque pour différentes valeurs de résistivités, on remarque que la conductivité électrique diminue avec le temps, on note ici cette que conductivité électrique diminue en changeant la résistivité des matériaux. Cette diminution est justifiée car la conductivité et la résistivité sont inversement proportionnelles.

### II-3-3- Effet de la variation de la résistivité électrique sur la densité de courant totale



(a)

(b)



(c)

## Chapitre II : simulation

**Figure II-11** : Variation du densité de courant totale a différentes valeurs de résistivités «Ohm.m»(a)1.754 (b) 2.84 (c) 5.64

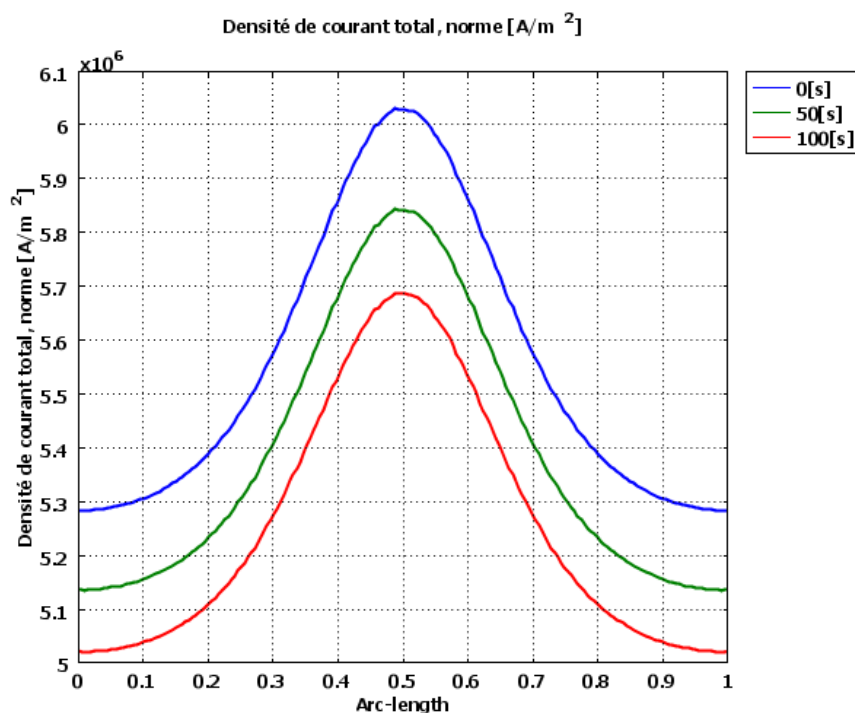
La figure II-11 représente la cartographie de la distribution de la densité de courant totale ainsi développé en variant la résistivité de la plaque. On remarque une valeur importante, dans les trois graphes, au tour du trou dans la plaque, cela est dû aux conditions aux limites imposées (tableau II.2).

**Tableau II.11:** Valeurs maximales et minimales de la densité de courant totale ( $A/m^3$ ), de la figure II-11

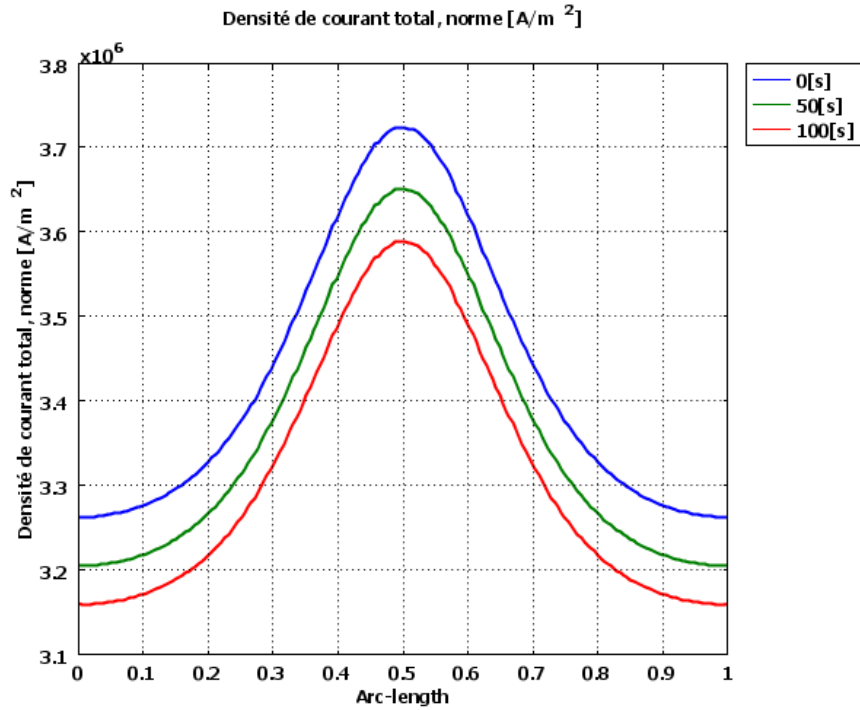
	Max	Min
<b>Plaque 1</b>	$1.084.10^7$	$5.793.10^7$
<b>Plaque 2</b>	$6.679.10^6$	$3.591.10^6$
<b>Plaque 3</b>	$3.357.10^6$	$1.814.10^6$

La figure II.18 représente densité de courant totale aux instants 0, 50 et 100 pour les différentes résistivités choisies. Ces courbes obtenues selon une droite tracée horizontalement entre deux points de coordonnées (0,0.2) et (1,0.2).

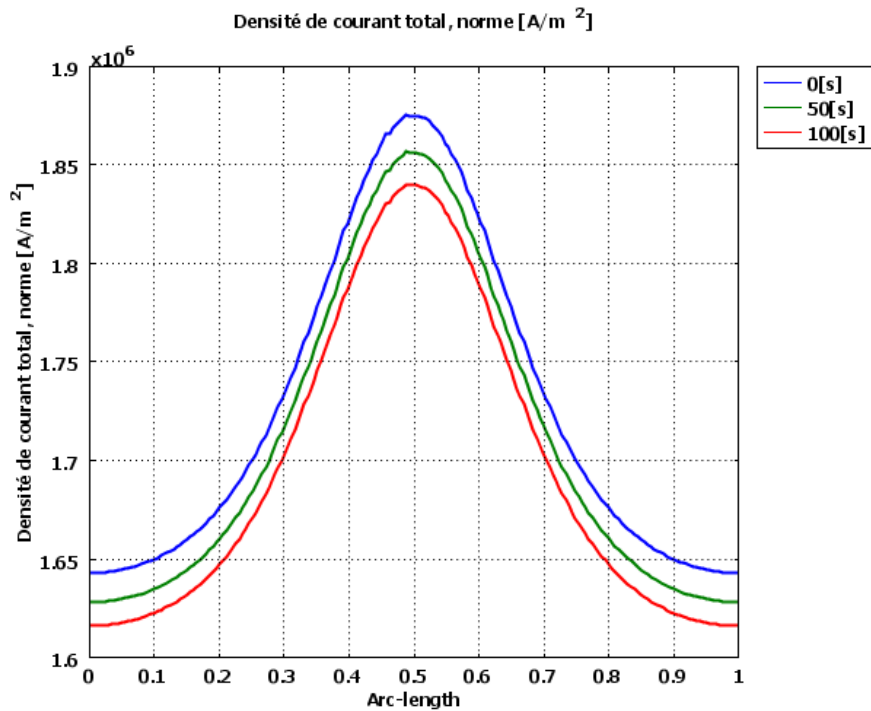
On remarque un même comportement en variant la résistivité de la tôle, densité de courant totale augmente en partant du premier point, il atteint son maximum (tableau II.12). Notons ici qu'il y a une symétrie remarquable dans cette figure en s'éloignant de la valeur maximale.



(a)



(b)



(c)

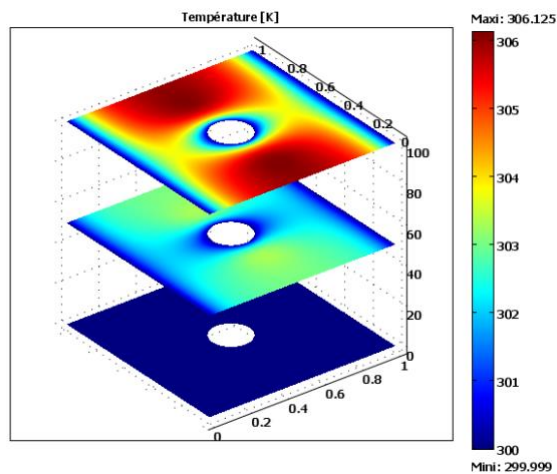
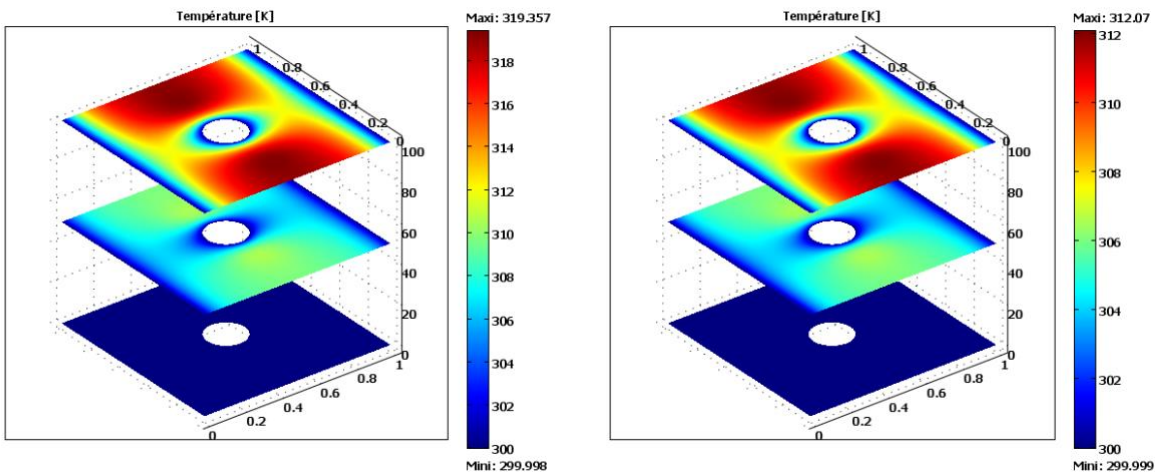
**Figure II-12 :** Variation du densité de courant totale a différentes valeurs de résistivités «Ohm.m»(a)1.754 (b) 2.84 (c) 5.64

**Tableau II.8:** les valeurs maximales du densité de courant totale

		Temps (Sec)		
		0	50	100
densité de courant totale (A/m <sup>3</sup> ).10 <sup>6</sup>	Plaque 1	6.02	5.85	5.69
	Plaque 2	3.72	3.65	3.58
	Plaque 3	1.88	1.86	1.83

Le tableau II.5 résume les valeurs de la densité de courant totale maximales dans les matériaux pour différentes valeurs de résistivités, on remarque que la densité de courant totale diminue avec le temps, on note ici cette que conductivité électrique diminue en changeant la résistivité des matériaux.

### II-3-4- Effet de la variation de la résistivité électrique sur la température



## Chapitre II : simulation

**Figure II-13:** Variation de la température pour différentes valeurs de résistivités «Ohm.m»(a)1.754 (b) 2.84 (c) 5.64

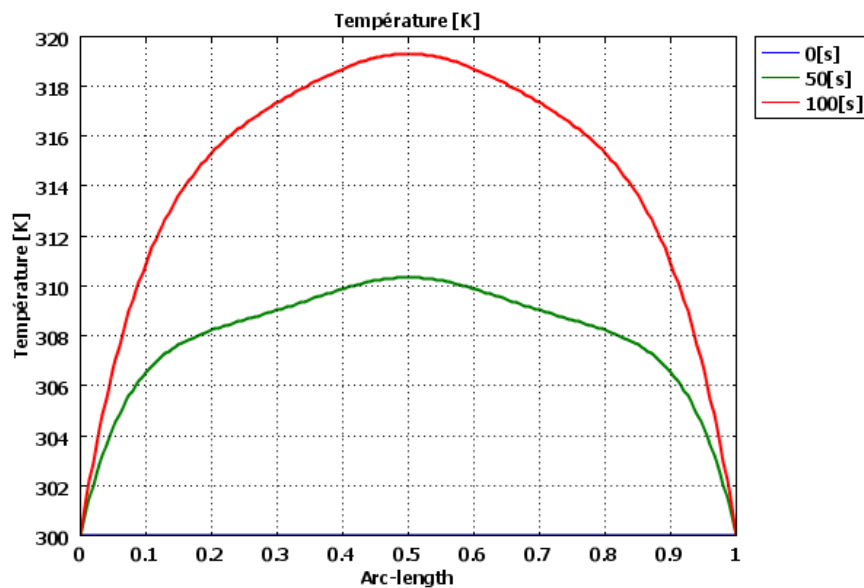
La figure II-9 représente la cartographie de la distribution de la température ainsi développé en variant la résistivité de la plaque. On remarque une valeur Faible, dans les trois graphes, dans bordure et au tour du trou dans la plaque, cela est dû aux conditions aux limites imposées (tableau II.2).

**Tableau II.9 :** Valeurs maximales et minimales de la température (K), de la figure II-13

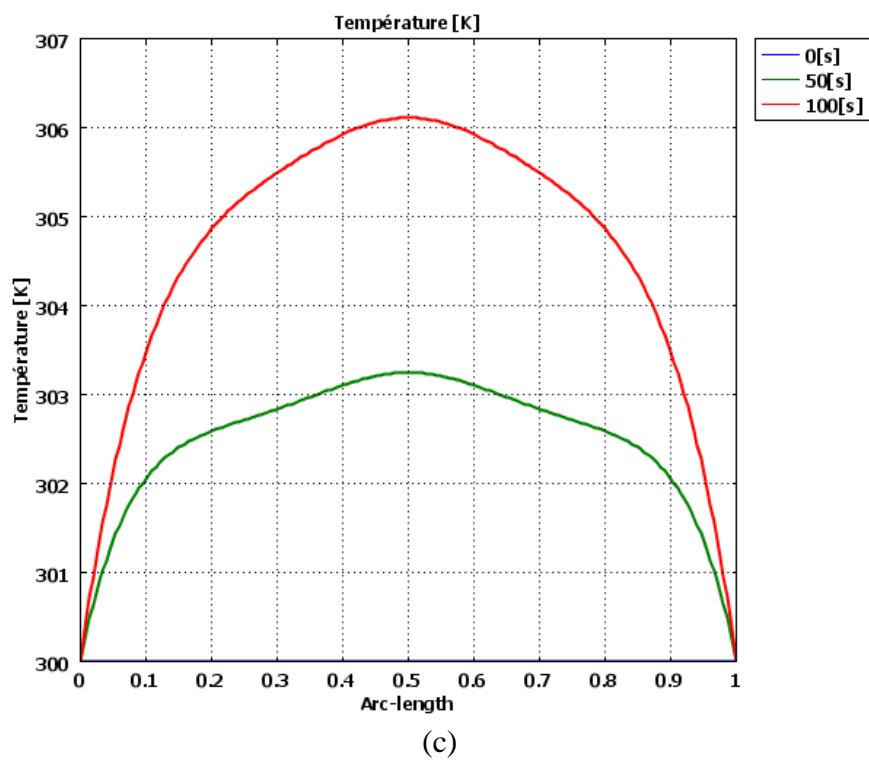
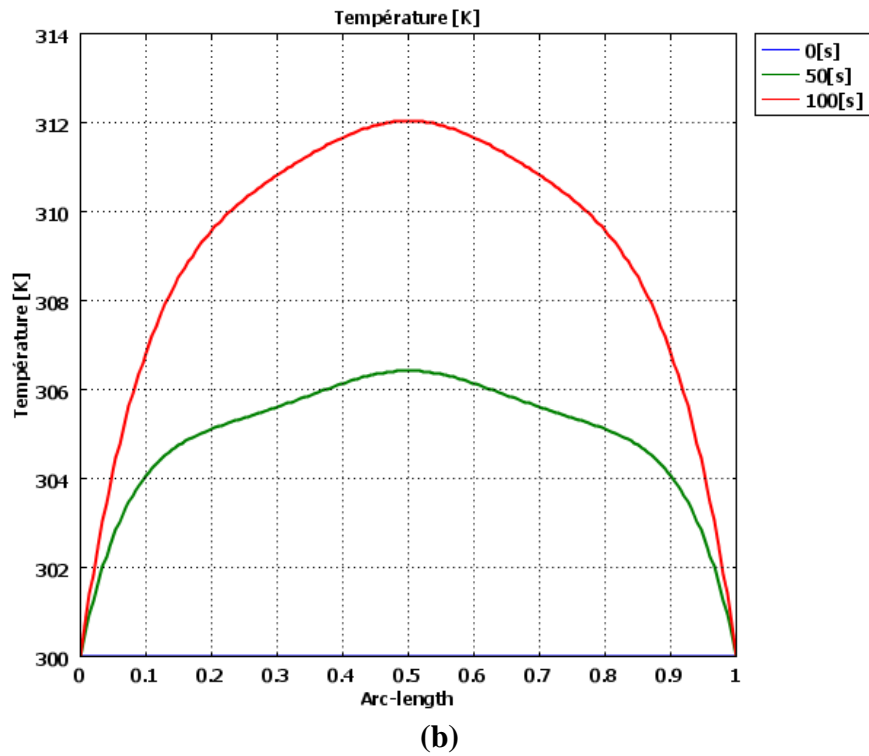
	Max	Min
<b>Plaque 1</b>	319.357	299.999
<b>Plaque 2</b>	312.07	299.999
<b>Plaque 3</b>	306.125	299.999

La figure II.18 représente température aux instants 0, 50 et 100 pour les différentes résistivités choisies. Ces courbes obtenues selon une droite tracée horizontalement entre deux points de coordonnées (0,0.2) et (1,0.2).

On remarque un même comportement en variant la résistivité de la tôle, température augmente en partant du premier point, il atteint son maximum (tableau II.14). Notons ici qu'il y a une symétrie remarquable dans cette figure en s'éloignant de la valeur maximale.



(a)



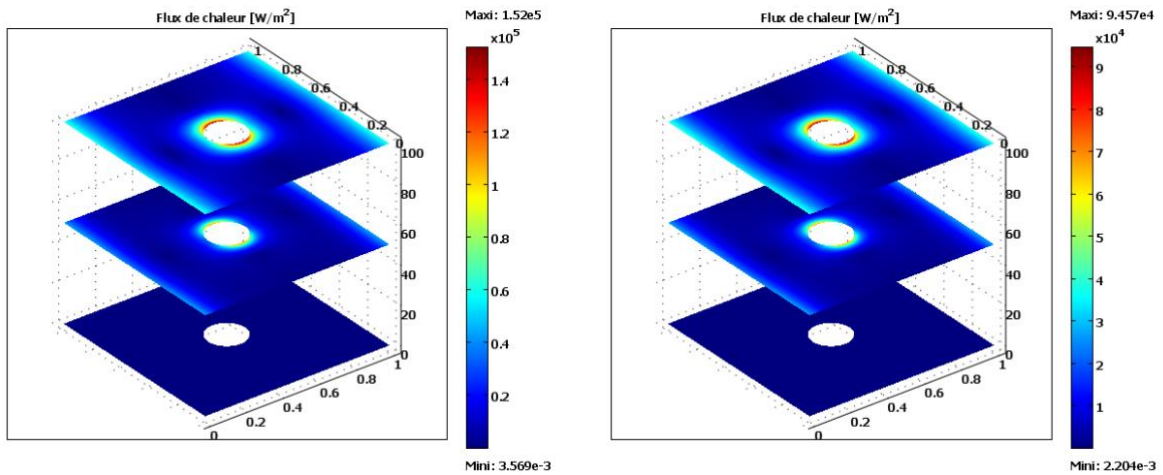
**Figure II- 14** : Variation de la température pour différentes valeurs de résistivités «Ohm.m»(a)1.754 (b) 2.84 (c) 5.64

**Tableau II.10** : les valeurs maximales de température

		Temps (s)		
		0	50	100
température (K)	Plaque 1	0	315	319
	Plaque 2	0	306.5	312
	Plaque 3	0	303.2	306.1

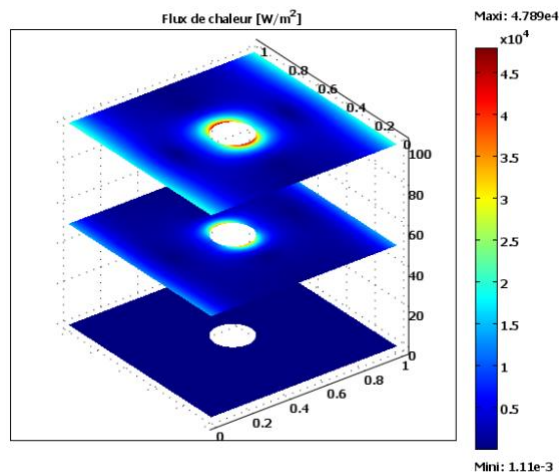
Le tableau II.6 résume les valeurs de la température maximales dans les matériaux pour différentes valeurs de résistivités, on remarque que la température augmenté avec le temps, on note ici cette que la température diminue en changeant la résistivité des matériaux.

### II-3-5- Effet de la variation de la résistivité électrique sur la flux de chaleur



(a)

(b)



(c)

## Chapitre II : simulation

**Figure II- 15:** Variation du flux de chaleur pour différentes valeurs de résistivités «Ohm.m»(a)1.754 (b) 2.84 (c) 5.64

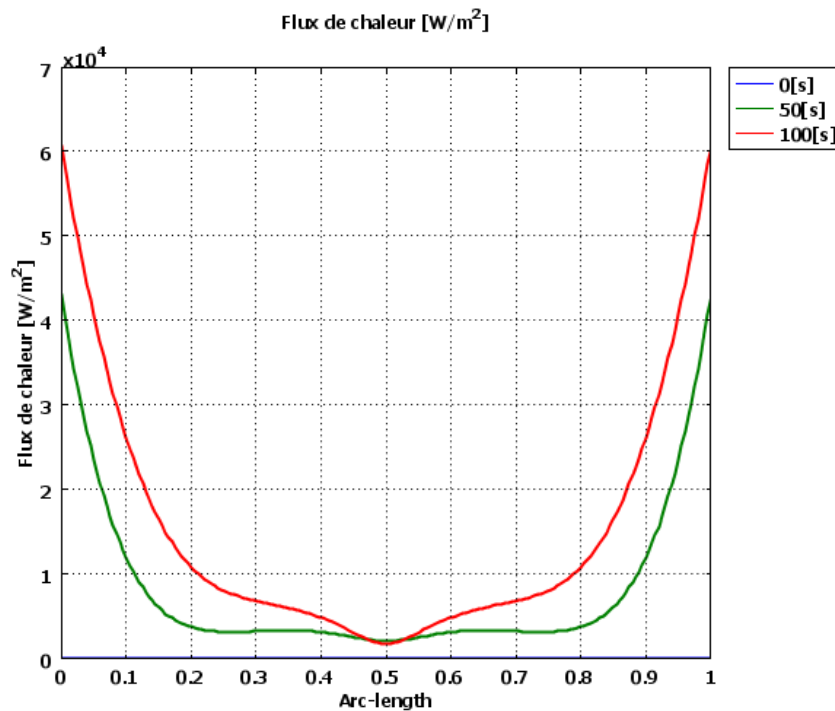
La figure II-15 représente la cartographie de la distribution du flux de chaleur ainsi développé en variant la résistivité de la plaque. On remarque une valeur importante, dans les trois graphes, au tour du trou dans la plaque, cela est dû aux conditions aux limites imposées (tableau II.2).

**Tableau II.11 :** Valeurs maximales et minimales du flux de chaleur (W/m<sup>3</sup>), de la figure II-11

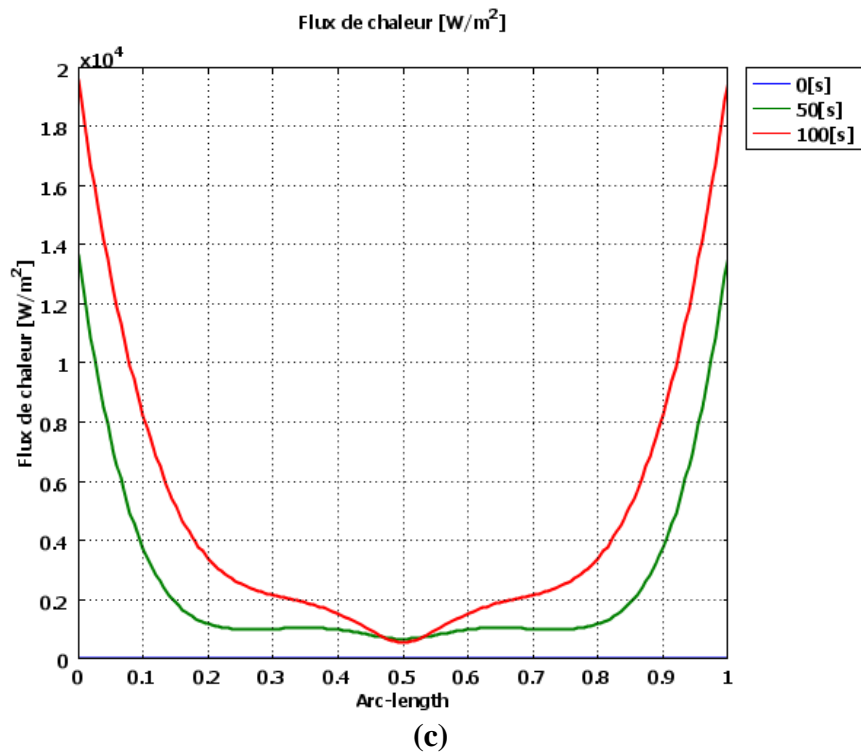
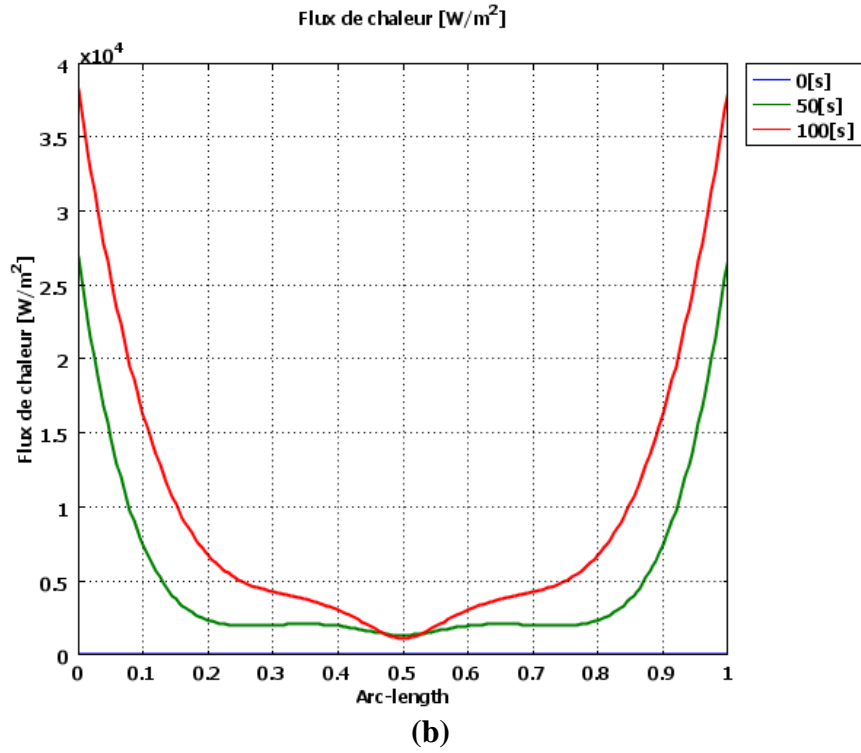
	Max	Min
<b>Plaque 1</b>	$1.52.10^5$	$3.569.10^5$
<b>Plaque 2</b>	$9.4571.10^4$	$2.204.10^4$
<b>Plaque 3</b>	$4.799.10^4$	$1.11.10^4$

La figure II.18 représente  $v$  aux instants 0, 50 et 100 pour les différentes résistivités choisies. Ces courbes obtenues selon une droite tracée horizontalement entre deux points de coordonnées (0,0.2) et (1,0.2).

On remarque un même comportement en variant la résistivité de la tôle, flux de chaleur augmente en partant du premier point, il atteint son maximum (tableau II.12). Notons ici qu'il y a une symétrie remarquable dans cette figure en s'éloignant de la valeur minimale.



(a)



**Figure II-16:** Variation du flux de chaleur pour différentes valeurs de résistivités «Ohm.m»(a)1.754 (b) 2.84 (c) 5.64

## Chapitre II : simulation

---

**Le tableau II.12 :** les valeurs maximales de flux de chaleur

		Temps (s)		
		0	50	100
flux de chaleur (W/m <sup>3</sup> ) .10 <sup>4</sup>	Plaque 1	0	4.4	6
	Plaque 2	0	2.7	4.6
	Plaque 3	0	1.4	1.9

Le tableau II.7 résume les valeurs de flux de chaleur maximales dans les matériaux pour différentes valeurs de résistivités, on remarque que flux de chaleur augmenté avec le temps, on note ici cette que flux de chaleur diminue en changeant la résistivité des matériaux.

## Conclusion générale

L'étude présentée dans ce mémoire a porté sur, l'étude des phénomènes du transfert de la chaleur par conduction dans divers matériaux, dans l'objectif est de faire une comparaison entre le transfert de la chaleur dans ces derniers. À cette fin, nous avons utilisé le logiciel COMSOL pour simuler les différentes matériaux.

Afin d'atteindre nos objectifs, nous sommes passés par plusieurs étapes :

Tout d'abord, on a commencé par une description générale des techniques de chauffage notamment le chauffage électrique et ses caractéristiques techniques tels que : l'effet Joule.

Par la suite, nous avons simulé le phénomène du transfert de chaleur par conduction dans des plaques chauffantes (1m x 1m) de différents résistivité (plaque 1, plaque 2, et plaque 3) par l'utilisation du logiciel COMSOL.

Finalement, nous avons étudié la simulation du phénomène de transfert de chaleur sous l'environnement COMSOL ainsi qu'une discussion et analyse des résultats.

Après résultats de simulation, nous constatons que le chauffage par effet Joule diminue en fonction du temps ainsi qu'on fonction de la résistivité du matériau sous test. Même remarques par rapport à la conductivité électrique et densité de courant totale. Ainsi que la température et flux de chaleur sont augmenté on fonction du temps.

Il reste toutefois, beaucoup de voies à explorer afin de poursuivre et compléter notre travail, et qui se résumant, non exhaustivement dans les points suivants :

- ✓ utilisation d'autres logiciels de simulation : Ansys, ProSim HEX, etc.
- ✓ introduction d'autres matériaux ou alliages, etc.

## Bibliographie

[1]	BOUDOUAYA Thawriya, Etude de transfert de chaleur à travers d'un matériau formé de deux couches : Froide & chaude, mémoire de Master, université MOULAT Tahar de SAIDA, 2021.
[2]	Electricité Chapitre 3-activité-2-effet-joule.pdf
[3]	<i>The Electrical Engineering Handbook</i> , Elsevier Academic Press, 2004 (ISBN 0-12-170960-4), p. 480.
[4]	<a href="https://physique.cmaisonneuve.qc.ca/svezina/nyb/note_nyb/NYB_XXI_Chap%203.2.pdf">https://physique.cmaisonneuve.qc.ca/svezina/nyb/note_nyb/NYB_XXI_Chap%203.2.pdf</a>
[5]	<a href="https://www.totalenergies.fr/particuliers/parlons-energie/dossiers-energie/logement/la-conductivite-electrique-tout-savoir">https://www.totalenergies.fr/particuliers/parlons-energie/dossiers-energie/logement/la-conductivite-electrique-tout-savoir</a>
[6]	<a href="https://www.temperature.ro/Sectionea%201.3.2.htm">https://www.temperature.ro/Sectionea%201.3.2.htm</a>
[7]	<a href="https://chauffage.pagesjaunes.fr/astuce/voir/561345/puissance-thermique#:~:text=%C3%A9clairera%20votre%20lanterne%20!-,Puissance%20thermique%20%3A%20d%C3%A9finition,caract%C3%A9ristique%20intrins%C3%A8que%20de%20l'appareil.">https://chauffage.pagesjaunes.fr/astuce/voir/561345/puissance-thermique#:~:text=%C3%A9clairera%20votre%20lanterne%20!-,Puissance%20thermique%20%3A%20d%C3%A9finition,caract%C3%A9ristique%20intrins%C3%A8que%20de%20l'appareil.</a>
[8]	J. C. SABONNADIÈRE, J. L. COULOMB, “ Calcul des Champs Electromagnétiques ” Technique de l'ingénieur D.3020.pp.I-
[9]	Ecole des Mines Nancy (2ème année) –TRANSFERTS THERMIQUES Yves JANNOT 2012
[10]	Université Ibn Khaldoun – Tiaret Faculté des Sciences de la Matière Département de Physique Physique énergétique / Transfert de Chaleur et de masse I Cours et Travaux dirigés/ PRESENTE PAR : Dr. Benaïssa TRAR