



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

\*\*\*\*\*

ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE

\*\*\*\*\*

MENTION ELECTRONIQUE



## **Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de Master**

**Domaine** : Science de l'ingénieur

**Mention** : Electronique

**Parcours à visée de recherches** : Systèmes et Dispositifs Electroniques

# ***REFROIDISSEMENT D'UN DISPOSITIF ELECTRONIQUE PAR AILETTE THERMIQUE***

Présenté par : RASOLOFOMANANA Tolotra Iarivony Nirina

Soutenu le : 17 Décembre 2016

Année universitaire : 2013 - 2014



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

\*\*\*\*\*

ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE

\*\*\*\*\*

MENTION ELECTRONIQUE

**Mémoire en vue de l'obtention du  
diplôme de Master**

**Domaine** : Science de l'ingénieur

**Mention** : Electronique

**Parcours à visée de recherches** : Systèmes et Dispositifs Electroniques

***REFROIDISSEMENT D'UN  
DISPOSITIF ELECTRONIQUE PAR  
AILETTE THERMIQUE***

Présenté par : RASOLOFOMANANA Tolotra Iarivony Nirina

Devant le jury composé de :

Mr RASTEFANO Elisée, président

Mme RABEHERIMANANA Lyliane Irène, examinateur

Mr HERINANTENAINA Edmond Fils, examinateur

Mr RANDRIAMAROSON Rivo Mahandrisoa, examinateur

Rapporteur : Mr RATSIMBA Mamy Nirina

Soutenu le : 17 Décembre 2016

Année universitaire : 2013 - 2014

# REMERCIEMENTS

Avant toutes choses, je tiens à remercier DIEU TOUT PUISSANT qui m'a donné la force et la patience d'accomplir ce travail. Grâce Lui soit rendue.

J'exprime ma reconnaissance envers les personnes suivantes à qui je me permets d'adresser mes vifs remerciements et mes sincères gratitudees :

Mme **RABEHERIMANANA Lyliane Irène**, Responsable du parcours à visée de recherches Systèmes et Dispositifs et Electroniques (SDE) et Examineur,

Mr **ANDRIAMANANTSOA Guy Danielson**, Responsable de la parcours Electronique,

Mr **RASTEFANO Elisée**, Président,

Mr **RATSIMBA Mamy Nirina**, mon encadreur qui n'a pas ménagé son temps, malgré ses responsabilités tout au long de l'élaboration de ce travail ;

Mr **HERINANTENAINA Edmond Fils**, Examineur,

Mr **RANDRIAMAROSON Rivo Mahandrisoa**, Examineur, pour l'intérêt qu'ils ont porté à mes recherches en acceptant d'examiner ce travail.

Mes vifs remerciements vont également à tous les enseignants qui m'ont donné tout leur savoir-faire.

Je tiens à exprimer mes plus profonds remerciements et mes plus profondes reconnaissances envers mes parents pour leur amour constant, pour leurs encouragements et pour le soutien qu'ils m'ont toujours donné.

Je remercie chacun de mes amis et tous les membres de ma famille pour tout le support qu'ils m'ont apporté.

Enfin, je remercie tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réussite de ce mémoire.

*Tolotra*

# RESUME

Tout composant semi-conducteur admet une température maximale de fonctionnement, appelée température maximale de jonction, dépendant du type de matériau utilisé et de la technologie de réalisation. Cette température maximale de jonction reste une donnée importante puisque c'est elle qui permet d'estimer le niveau de refroidissement nécessaire au bon fonctionnement du composant.

Pour refroidir un composant électronique de puissance, une ailette thermique est nécessaire ; dans ce mémoire, on a étudié le comportement théorique et physique de cette ailette et finalement des simulations ont été faites en utilisant un modèle d'ailette conçue avec COMSOL Multiphysics 4.3.

# TABLE DES MATIERES

<b>REMERCIEMENTS</b> .....	i
<b>RESUME</b> .....	ii
<b>TABLE DES MATIERES</b> .....	iii
<b>LISTE DES ABREVIATIONS</b> .....	vii
<b>LISTE DES FIGURES</b> .....	viii
<b>LISTE DES TABLEAUX</b> .....	xi
<b>INTRODUCTION</b> .....	1
<b>Chapitre I : TRANSFERT THERMIQUE</b> .....	2
<b>I. Généralités</b> .....	2
<b>I.1 La chaleur au cours de l'histoire</b> .....	2
<b>I.2 Historique de l'électronique</b> .....	3
<b>I.3 Effet Joule</b> .....	5
<b>I.3.1 Définition</b> .....	5
<b>I.3.2 Expériences</b> .....	5
<b>I.3.3 Avantages et inconvénients de l'effet Joule</b> .....	6
<b>II. Modes de transferts thermiques</b> .....	7
<b>II.1 La conduction thermique :</b> .....	7
<b>II.1.1 Loi de Fourier</b> .....	8
<b>II.1.2 Conduction pure d'un circuit électronique</b> .....	9
<b>II.1.3 Exemple de calcul : analyse de la conduction de chaleur sur un circuit</b> .....	10
<b>II.2 La convection naturelle ou forcée :</b> .....	12
<b>II.2.1 La convection naturelle</b> .....	12
<b>II.2.2 Convection forcée</b> .....	16
<b>II.3 Le rayonnement</b> .....	18
<b>II.3.1 Définitions</b> .....	18
<b>II.3.2 Définition du corps noir et loi d'émission du corps noir</b> .....	20
<b>Chapitre II : REFROIDISSEMENT ET PROTECTION THERMIQUE DES COMPOSANTS ELECTRONIQUES</b> .....	22
<b>I. Origines des pertes dans les composants</b> .....	22
<b>I.1 Pertes en conduction</b> .....	22
<b>I.2 Pertes en commutation</b> .....	22
<b>I.3 Nécessité de la protection des éléments</b> .....	23
<b>II. Dissipateurs thermiques</b> .....	23

II.1	Analogie en modèle électrique et modèle thermique.....	23
II.2	Schéma thermique analogique avec un circuit électrique : .....	24
II.2.1	<i>Sans dissipateur thermique</i> : .....	24
II.2.2	<i>Avec dissipateur thermique</i> : .....	24
II.3	Modèle du dissipateur .....	25
III.	Notion de résistance thermique.....	25
III.1	Définition.....	25
III.2	Utilisation en électronique avec exemple de calcul.....	28
III.3	Utilisation d'un radiateur avec exemple de calcul.....	28
III.4	Utilisation et montage .....	29
III.4.1	<i>Isolation électrique entre le composant et le dissipateur</i> .....	29
III.4.2	<i>Amélioration du contact entre le dissipateur et le composant, montage</i> .....	31
III.5	Applications : mise en évidence de l'importance des dissipateurs thermiques pour un transistor .....	31
IV.	Différents types de refroidissement .....	37
IV.1	Systèmes de refroidissement par air .....	37
IV.1.1	<i>Convection forcée dans l'air</i> .....	37
IV.1.2	<i>La pompe piézoélectrique</i> .....	37
IV.2	Le refroidissement par liquide .....	38
IV.3	Spray cooling.....	39
IV.4	Refroidissements par jets.....	41
IV.5	Refroidissement par caloducs.....	41
IV.6	Drain thermique .....	42
IV.7	Refroidissement par effet Peltier .....	42
<b>Chapitre III : MODELISATION THERMIQUE D'UN COMPOSANT DE PUISSANCE</b> .....		45
I.	Le BJT ou Bipolar Junction Transistor (transistor bipolaire).....	45
I.1	Fonctionnement d'un BJT.....	45
I.1.1	<i>Constitution d'un BJT</i> .....	45
I.1.2	<i>Le transistor NPN polarisé</i> .....	46
I.2	Caractéristique (montage en émetteur commun) .....	47
I.2.1	<i>Caractéristique d'entrée : <math>I_b = f(v_{BE}, V_{CE})</math></i> .....	47
I.2.2	<i>Caractéristique de sortie : <math>i_c = f(v_{CE})</math></i> .....	48
I.2.3	<i>Région de fonctionnement</i> .....	48
I.3	Polarisation d'un transistor.....	49
I.3.1	<i>Polarisation directe</i> .....	50

I.3.2	<i>Autopolarisation ou polarisation automatique</i> .....	50
I.4	<b>Notion de stabilité</b> .....	51
I.4.1	<i>Facteur de stabilité</i> .....	51
I.4.2	<i>Exemple de calcul du facteur de stabilité</i> .....	51
I.5	<b>Transistor en régime variable (petits signaux, fréquence intermédiaire)</b> .....	52
I.5.1	<i>Montage en émetteur commun</i> .....	52
I.5.2	<i>Représentation en régime variable avec le modèle naturel : modèle de GIACOLETTO ou modèle en <math>\Pi</math>(<math>\pi</math>)</i> .....	52
II.	<b>Les F.E.T. ou Field Effect Transistor (Transistor à effet de champs)</b> .....	53
II.1	<b>Le MOSFET</b> .....	54
II.1.1	<i>Structure et fonctionnement</i> .....	54
II.1.2	<i>Caractéristiques</i> .....	55
II.1.3	<i>Type de MOSFET</i> .....	55
II.1.4	<i>Symbole</i> .....	56
II.2	<b>Le JFET</b> .....	56
II.2.1	<i>Structure, fonctionnement et symboles</i> .....	56
II.2.2	<i>Caractéristique</i> .....	57
II.2.3	<i>Polarisation des JFET</i> .....	57
III.	<b>Modèle thermique d'un composant de puissance</b> .....	58
III.1	<b>Modèle électrique équivalent</b> .....	58
III.2	<b>Equivalence entre grandeurs électriques et grandeurs thermiques</b> .....	59
III.3	<b>Modèle thermique élaboré</b> .....	61
III.3.1	<i>Structure segmentée du modèle thermique</i> .....	61
III.3.2	<i>Interface composant – refroidisseur</i> .....	62
III.4	<b>Exemple : modélisation d'un MOSFET en tenant compte des effets de la température</b> .....	63
III.4.1	<i>Définition du problème</i> .....	63
III.4.2	<i>Relations des paramètres électriques avec la température</i> .....	63
III.4.3	<i>Modèle de simulation : exemple d'une dépendance des paramètres à la température</i> .....	64
<b>Chapitre IV : REALISATION ET SIMULATION</b> .....		65
I.	<b>Ailettes thermiques</b> .....	65
I.1	<b>Généralités</b> .....	65
I.1.1	<i>Définition et applications des ailettes thermiques</i> .....	65
I.1.2	<i>Problème de l'ailette</i> .....	66
I.2	<b>Modèle théorique</b> .....	69
I.2.1	<i>Equation de l'ailette thermique</i> .....	69

1.2.2	<i>Etudes expérimentales</i> .....	70
<b>II.</b>	<b>Simulation</b> .....	74
II.1	Introduction à ComsolMultiphysics .....	74
II.2	Simulation de notre dispositif à ailette thermique via le ComsolMultiphysics 4.3 .....	77
<b>CONCLUSION</b>	.....	84
<b>Annexe 1 : EMISSIVITE DES METAUX</b>	.....	85
<b>Annexe 2 : DISSIPATEURS THERMIQUES USUELS</b>	.....	86
<b>Annexe 3 : GENERALITES SUR LES SEMI-CONDUCTEURS ET LES TRANSISTORS</b>	.....	88
<b>REFERENCE</b>		

# LISTE DES ABREVIATIONS

<b>BJT :</b>	Bipolar Junction Transistor
<b>C.I ou I C :</b>	Circuit Intégré ou Integrated Circuit
<b>DIP :</b>	Dual In-line Package
<b>ENIAC :</b>	Electronic Numerical Integrator Computer
<b>FET :</b>	Field Effect Transistor
<b>GSI :</b>	Great Scale Integration
<b>JFET :</b>	Jonction Field Effect Transistor
<b>LSI :</b>	Large Scale Integration
<b>MESFET :</b>	Metal Semiconductor Field Effect Transistor
<b>MOSFET :</b>	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
<b>MSI :</b>	Medium Scale Integration
<b>PCB :</b>	Printed Circuit Boards
<b>S.C :</b>	Semi-conducteur
<b>SSI :</b>	Short Scale Integration
<b>TPN :</b>	Tôle Plane Noire
<b>ULSI :</b>	Ultra Large Scale Integration
<b>VLSI :</b>	Very Large Scale Integration
<b>ZCE :</b>	Zone de Charge d'Espace

# LISTE DES FIGURES

Figure 1. 1: Expérience de Joule .....	3
Figure 1. 2: Courbe montrant l'augmentation du nombre de composant à intégrer dans une chips au cours des années [5].....	4
Figure 1. 3 : Mode de transfert thermique par conduction [6]. .....	7
Figure 1. 4: Transfert thermique par conduction [7].....	8
Figure 1. 5: Schéma tridimensionnel et unidimensionnel du circuit à 12 pins DIP [9]. .....	10
Figure 1. 6: Schéma électronique du problème [10] .....	11
Figure 1. 7: Transfert de chaleur par convection thermique [11].....	12
Figure 1. 8: Convection naturelle .....	12
Figure 1. 9: Boîte à composants électroniques.....	14
Figure 1. 10: Principe de l'expérience de William Herschel .....	19
Figure 1. 11: Spectre des ondes électromagnétiques ( $\lambda$ en m).....	19
Figure 1. 12: Emittance monochromatique d'un corps noir à deux températures différentes .....	21
Figure 2. 1 : Modèle en conduction.....	22
Figure 2. 2: Le dissipateur thermique.....	23
Figure 2. 3: Modèle thermique .....	23
Figure 2. 4: Circuit électrique sans dissipateur thermique .....	24
Figure 2. 5: Circuit électrique avec dissipateur thermique.....	24
Figure 2. 6: Le radiateur et modèle thermique équivalent .....	25
Figure 2. 7: Une résistance électrique .....	25
Figure 2. 8: Dissipation de puissance thermique à travers un matériau.....	25
Figure 2. 9: Schéma expliquant la loi d'Ohm thermique .....	26
Figure 2. 10: Composant électronique avec protection thermique.....	28
Figure 2. 11: Schématisation du transfert de chaleur directe jonction- ambiant.....	28
Figure 2. 12: Composant électronique avec protection thermique et radiateur .....	28
Figure 2. 13: Schématisation du transfert thermique jonction- ambiant avec radiateur .....	29
Figure 2. 14: Rajout d'une isolation électrique entre le composant et le dissipateur.....	30
Figure 2. 15: Montage avec isolation électrique .....	30
Figure 2. 16: Schématisation du transfert thermique jonction- radiateur- ambiant et isolant.....	30
<b>Figure 2. 17:</b> Schéma du montage du transistor 2N5877 (NPN) .....	31
Figure 2. 18: Radiateur pour boîtier T03 à $R_{th} = 1,5 \text{ } ^\circ\text{C/W}$ .....	33
Figure 2. 19: schéma du montage avec le LM7805 .....	33
Figure 2. 20: Les radiateurs choisis pour l'exemple 3 .....	34
Figure 2. 21: Schéma du montage avec le LM7812.....	34
Figure 2. 22: Schéma du montage hacheur avec transistor MOSFET .....	35
Figure 2. 23: Système de refroidissement par air [18] .....	37
Figure 2. 24: Le dual cooling jet [19].....	38
Figure 2. 25: Principe de fonctionnement de la pompe piézoélectrique .....	38
Figure 2. 26: Refroidissement liquide à plaque froide [20]. .....	39
Figure 2. 27: Schéma d'un refroidissement régulier à liquide configuré pour un ordinateur [21]	39
Figure 2. 28: Principe du spray cooling [22].....	40

Figure 2. 29: Description des différents organes du spray cooling.....	40
Figure 2. 30: Exemples de modules de spray cooling.....	40
Figure 2. 31: Refroidissement par jets [23].....	41
Figure 2. 32: Schéma de principe d'un caloduc [24]. ....	41
Figure 2. 33: Dissipateur thermique avec un ventilateur et un tube à chaleur .....	42
Figure 2. 34: Principe et exemples de dissipateurs thermiques externes [25].....	42
Figure 2. 35: Effet Peltier [26]. ....	43
Figure 2. 36: Application de plusieurs thermo-éléments en semi-conducteurs à un seul étage....	43
Figure 2. 37: Caractéristiques techniques du module Peltier TEC1-12706.....	43
Figure 3. 1: Les deux types de BJT et leurs symboles .....	45
Figure 3. 2: Représentation du BJT par des diodes.....	46
Figure 3. 3: Le transistor NPN polarisé.....	46
Figure 3. 4: Le BJT dans un circuit intégré.....	47
Figure 3. 5: Montage en émetteur commun du BJT.....	47
Figure 3. 6: Courbe $i_B = f(v_{BE}, V_{CE})$ .....	48
Figure 3. 7: Courbe $i_C = f(V_{CE})$ .....	48
Figure 3. 8: Polarisation directe d'un transistor .....	50
Figure 3. 9: Polarisation automatique d'un BJT .....	50
Figure 3. 10: Montage en émetteur commun pour le transistor en régime variable .....	52
Figure 3. 11: Schéma équivalent de Giacometto du BJT monté en émetteur commun .....	53
Figure 3. 12: Schéma de principe d'un MOSFET à canal n .....	54
Figure 3. 13: Formation du canal : zone de déplétion.....	54
Figure 3. 14: Réseau de caractéristiques $i_D - v_{DS}$ pour des tensions $v_{GS}$ fixées au-dessus de $V_t$ ..	55
Figure 3. 15: Symboles des MOSFET par enrichissement et par appauvrissement .....	56
Figure 3. 16: Un JFET à canal N et symboles d'un JFET.....	56
Figure 3. 17: Caractéristique du JFET : $I_{DS} = f(V_{GS})$ et $I_{DS} = f(V_{DS}, V_{GS})$ .....	57
Figure 3. 18: Polarisation des JFET, (a) : polarisation fixée, (b) : autopolarisation de la source et (c) : polarisation par pont .....	57
Figure 3. 19: Ligne de transmission [29] .....	58
Figure 3. 20: Modèle électrique simplifié de la ligne de transmission .....	59
Figure 3. 21: Transformation par le principe de dualité.....	59
Figure 3. 22: Modèle thermique.....	60
Figure 3. 23: Modèle thermique segmenté d'un cas réel .....	60
Figure 3. 24: Structure du modèle thermique d'un semi-conducteur de puissance [30].....	61
Figure 3. 25: Paramètre du modèle thermique d'un MOSFET .....	62
Figure 3. 26: Exemple de montage d'un composant de puissance.....	62
Figure 3. 27: Modèle thermique de l'interface et du refroidisseur.....	62
Figure 3. 28: Modèle thermique d'un MOSFET .....	63
Figure 3. 29: Modèle de simulation .....	64
Figure 3. 30: Modèle de simulation avec un circuit thermique équivalent naturel .....	64
Figure 4. 1: Ailette en forme de spirale.....	65
Figure 4. 2: Le radiateur d'une voiture .....	66
Figure 4. 3: L'ailette sur les microprocesseurs .....	66

Figure 4. 4: Mise en évidence du problème des ailettes.....	67
Figure 4. 5: Schéma du dispositif expérimental n°1 .....	71
Figure 4. 6: Schéma du dispositif expérimental n°2 .....	73
Figure 4. 7: Exemple d'interface dans ComsolMultiphysics .....	75
Figure 4. 8: Les sous options dans Heat Transfer Module.....	76
Figure 4. 9: Comportement d'une Heat_sink dans ComsolMultiphysics .....	76
Figure 4. 10: Selection du Model Wizard .....	77
Figure 4. 11: Le mode $\Delta u$ Mathematics.....	77
Figure 4. 12: Le mode Time Dependent .....	78
Figure 4. 13: Le mode Geometry sur ComsolMultiphysics .....	78
Figure 4. 14: Sélection et création d'un Block.....	79
Figure 4. 15: Le circuit de base de notre dispositif expérimental .....	79
Figure 4. 16: Le Paramétrage du second Block .....	80
Figure 4. 17: Résultat obtenu après validation des données .....	80
Figure 4. 18: Schéma des deux Block unis .....	81
Figure 4. 19: Résultat obtenu après paramétrage de la source chaude.....	81
Figure 4. 20: Le nouveau Patch dans Model Builder.....	82
Figure 4. 21: Résultat du Mode 3D Plot Group .....	82
Figure 4. 22: Résultat final du comportement thermique de notre dispositif expérimental.....	83
Figure 4. 23: Résultat obtenu avec cinq ailettes.....	83
Figure A. 1: (a) : Situation à $T = 0^\circ\text{K}$ (le silicium est isolant) ; (b) : situation à $T \gg 0^\circ\text{K}$ .....	89
Figure A. 2: Semi-conducteur extrinsèque de type n.....	90
Figure A. 3: Semi-conducteur extrinsèque de type p.....	90
Figure A. 4: Diffusion des électrons dans le silicium P non homogène .....	93
Figure A. 5: Diffusion des trous dans le silicium N non homogène .....	94
Figure A. 6: Etat d'équilibre d'une jonction PN .....	94
Figure A. 7: Jonction pn en court-circuit .....	95
Figure A. 8: Jonction pn polarisée en direct.....	95
Figure A. 9: Symbole d'une diode .....	96
Figure A. 10: Caractéristique directe à température de jonction constante .....	96
Figure A. 11: Caractéristique $i(u)$ d'une diode parfaite .....	97
Figure A. 12: a) Symbole général ; b) Diode parfaite dans l'état bloqué et c) Diode parfaite dans l'état passant.....	97
Figure A. 13: Courant inverse de la diode .....	97
Figure A. 14 : Les modèles les plus simples de la diode .....	98
Figure A. 15: Schéma équivalent de la diode.....	99

# LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Résultat de la première expérience de Joule .....	5
Tableau 2: Résultat de la deuxième expérience de Joule .....	6
Tableau 3: Résultat de la troisième expérience de Joule.....	6
Tableau 4: Les conductivités de quelques corps [8]. .....	9
Tableau 5: Données thermique du circuit à analyser la conduction.....	10
Tableau 6: Coefficient de convection de l'air en régime laminaire .....	13
Tableau 7: Correspondance entre le nombre de Nusselt et le nombre de Reynolds .....	18
Tableau 8: Valeur de la résistance thermique de quelques transistors usuels .....	27
Tableau 9: Avantages et inconvénients de quelques types de dissipateur thermique .....	44
Tableau 10: Quelques valeurs typiques de $V_{CE}$ et $V_{BE}$ pour différents états du BJT .....	49
Tableau 11: Quelques valeurs de $I_{C0}$ , $\beta$ et $V_{BE}$ en fonction de la température .....	51
Tableau 12: Définition des grandeurs physiques .....	59
Tableau 13: Relations entre grandeurs physiques [29] .....	60
Tableau 14 : Datasheet montrant le « Transient Thermal Characteristics » .....	61
Tableau 15: Emissivité des métaux en haute température .....	85
Tableau 16: Quelques valeurs de $\rho$ et $n$ pour divers éléments à 300°K.....	88
Tableau 17: Valeurs de la mobilité des trous et des électrons ainsi que $E_{max}$ à 300°K.....	92

# INTRODUCTION

Les problèmes de transfert thermique, bien que côtoyés quotidiennement, sont souvent interprétés de façon fantaisiste. Étant complexes, ils ne sont pas toujours bien appréhendés, même par des esprits de bonne culture scientifique, car dans nos cursus classiques, ils sont abordés trop superficiellement.

L'utilisateur éventuel doit donc se référer à des ouvrages spécialisés dont le formalisme est assez déconcertant pour le praticien occasionnel qui sera vite perdu parmi l'avalanche de concepts, de formules, de nombres sans dimension, qui ne sont le plus souvent applicables qu'à des cas très particuliers et très variés, si sérieuses et si fouillées que soient les analyses proposées.

Pour résoudre le problème de transfert de chaleur, il y a les ailettes thermiques qui sont présentes partout dans notre quotidien, sans même que l'on s'en rende compte. Dans une société où l'énergie détient une place centrale, comment manipuler celle-ci est devenu une problématique importante. Nous savions déjà que les ailettes thermiques permettaient par exemple d'évacuer la chaleur d'un système électronique. C'est pour cela qu'on a choisi le thème « **Refroidissement d'un dispositif électronique par ailette thermique** ». Cette étude doit nous permettre d'en apprendre plus sur leur rôle, de comprendre la manière dont fonctionnent celles-ci, et à terme d'essayer de les modéliser.

Dans ce but, nous allons tout d'abord nous intéresser à l'évolution de la notion de chaleur au cours de l'histoire ainsi qu'un bref aperçu de l'histoire de l'électronique. Ensuite, on va traiter les trois bases du transfert thermique, conduction, convection, rayonnement. Dans le second chapitre nous verrons comment refroidir et protéger les composants et dans le troisième chapitre comment modéliser thermiquement un composant de puissance. Finalement, Nous allons faire une réalisation et une simulation de l'ailette.

# Chapitre I : TRANSFERT THERMIQUE

## I. Généralités

### I.1 La chaleur au cours de l'histoire

Le feu avait longtemps intrigué les physiciens et les chimistes du XVIIème et du XVIIIème siècle concernant ses caractéristiques physiques, à savoir le dégagement de chaleur mêlé à la lumière et aux flammes. Le point qui les a laissés le plus dubitatif reste ce que le feu dégage lors de la combustion d'un matériau.

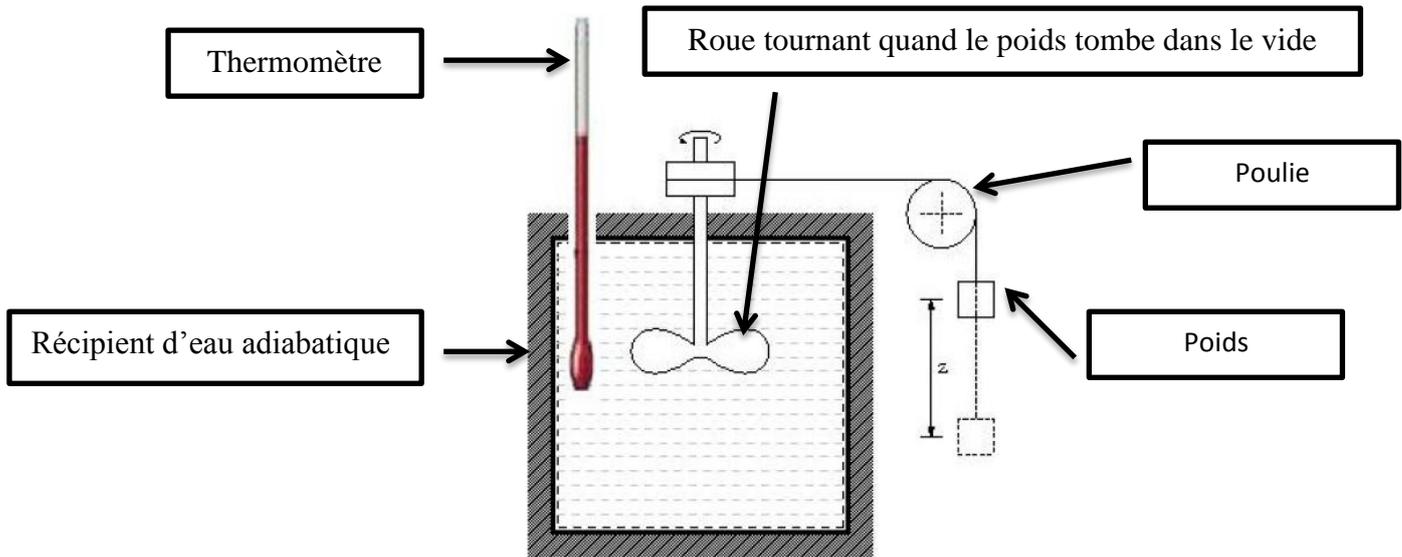
Au XVIIIème siècle, les chimistes de l'époque pensaient qu'au cœur de chaque matériau inflammable se trouvait une sorte de fluide. Ce fluide, nommé le phlogistique, serait incolore, inodore et impondérable (invisible physiquement). Cependant la présence de ce fluide se remarquerait lorsqu'un matériau brûlerait. En effet, les chimistes supposaient que la chaleur qui était dégagée, lors de la combustion du matériau, était ce fluide. Plus le fluide serait présent initialement dans le matériau (avant une combustion) et plus la quantité de chaleur qui s'en dégagerait serait importante et mieux le matériau brûlerait.

Un peu plus tard durant ce siècle, d'autres chimistes émirent d'autres théories sur la chaleur selon lesquelles : il s'agirait d'un fluide s'écoulant des corps chauds vers les corps froids.

**Lavoisier** (XIXème siècle) [1], le révolutionnaire et initiateur de la chimie de notre temps, qui mit fin à l'alchimie se fourvoya également. En effet, il classa la chaleur avec des atomes tels que l'azote ou l'oxygène. Lui qui démontra que : lors d'une réaction chimique la masse totale des réactifs et des produits se conservait tout au long de la réaction, pensait notamment que la chaleur était un fluide. Cependant, grâce à cette loi de conservation, il posa les bases de la loi de conservation de l'énergie.

**Sadi Carnot** (XIXème siècle) [2], établit les bases de la thermodynamique, à seulement 27 ans, dans son ouvrage intitulé Réflexions sur la puissance motrice du feu et les machines propres à développer cette puissance (1824). A l'intérieur de celui-ci, il développe le second principe de la thermodynamique à savoir que : quel que soit le système fermé, il existe une grandeur extensive appelée entropie dont la valeur  $S$  est une fonction des variables d'état et donnée par la formule  $\Delta S = S^r_{t1 \rightarrow t2} + S^p_{t1 \rightarrow t2}$ . « L'entropie d'un système caractérise son degré de désordre, cela permet de mesurer la dégradation de l'énergie d'un système ». La majeure partie de ses travaux a été consacrée aux machines thermiques, qui transformaient l'énergie thermique, produite lors de la combustion du charbon, en énergie mécanique.

James Prescott Joule (1818-1889) [3], lui, a passé de longues heures à mettre en relation chaleur, électricité et travail mécanique. Pour ce faire, il a réalisé une expérience connue de nos jours montrée sur la figure suivante :



**Figure 1. 1:** Expérience de Joule

Celle-ci consiste à accrocher un poids au bout d'une corde relié à une roue à aube immergée dans un récipient d'eau aux parois adiabatiques. Quand le poids tombe dans le vide la roue se met à tourner dans l'eau ce qui provoque une élévation de la température de l'eau.

Il en déduit que la chaleur est une énergie (car résultante d'un mouvement mécanique) et qu'elle est proportionnelle au travail fourni.

Ainsi il énonce le 1er principe de la thermodynamique, concernant la conservation de l'énergie, qui est le suivant :  $\Delta U + \Delta E_c + \Delta E_p = W_{1 \rightarrow 2} + Q_{1 \rightarrow 2}$

La chaleur n'est plus un fluide particulier ni une quantité que l'électricité ou les travaux mécaniques transportent mais bel et bien une énergie que l'on peut transformer en travaux mécaniques par exemple. L'énergie ne se crée pas mais se transforme.

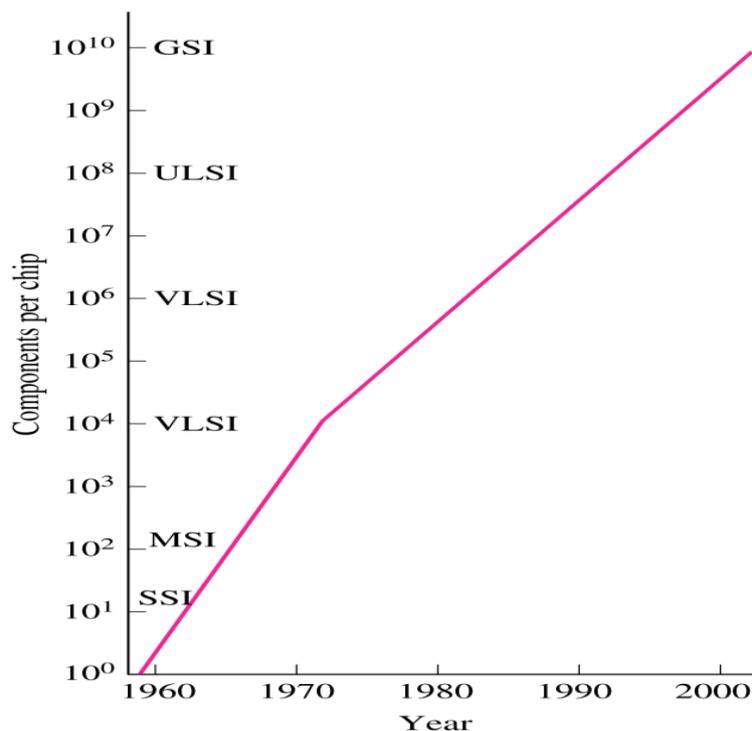
## 1.2 Historique de l'électronique

Le domaine de l'électronique s'est développé rapidement depuis 1883, quand Thomas Edison a inventé la diode. La tube à vide qui est devenu la fondation de l'industrie de l'électronique jusqu'aux années 50, a joué un rôle fondamental dans le développement de la radio, de la TV, du radar, et du ordinateur numérique [4].

Beaucoup d'ordinateurs ont été créés pendant cette période par des groupes dont la plus grande et la plus connue fut ENIAC (Electronic Numerical Integrator and Computer), construit à l'université de la Pennsylvanie en 1946. Le ENIAC a nécessité plus de 18000 diodes, avait une dimension de 7m x 14 m et consomme une grande quantité de puissance, entre autre son taux de fiabilité était très faible car le taux d'échec des tubes à vide fut élevé.

L'invention du transistor bipolaire en 1948 marquait le commencement d'une nouvelle ère dans l'industrie de l'électronique et les tubes à vides disparaissaient petit à petit. Les transistors peuvent exécuter les fonctions des tubes à vide avec une plus grande fiabilité en plus d'avoir une faible consommation et occupaient peu d'espace. Les premiers transistors furent fabriqués au Germanium qui ne pourrait pas fonctionner correctement aux températures au-dessus de 100°C. Donc, ils ont été remplacés par le Silicium qui pourrait fonctionner à températures beaucoup plus élevées.

Ensuite, il y a eu l'invention des Circuits Intégrés (CI) ou Integrated Circuits (IC) en 1959, tel que des diodes, des transistors, des résistances, et des condensateurs peuvent être placés ensemble sur un même circuit encapsulé. Le nombre de composants à intégrer n'a pas cessé d'augmenter comme le montre la Figure 1.2.



**Figure 1. 2:** Courbe montrant l'augmentation du nombre de composant à intégrer dans une chips au cours des années [5]

Face à cette augmentation des composants pouvant être intégrés sur une chips, on a créé une échelle : le MSI ou Medium-Scale Integration, dans les années 60 avec 50 à 1000 composants par chips. Le LSI ou Large –Scale Integration en 1970 avec 1 000 à 100 000 composants par chips et en 1980, le VLSI ou Very Large-Scale Integration avec 100 000 à 10 000 000 composants par chips. Il y a aussi le SSI ou short-Scale Integration, le ULSI ou Ultra Large-Scale Integration et enfin le GSI ou Great-Scale Integration. Aujourd'hui, il n'est pas rare de voir une chips de 3 cm × 3 cm avec plusieurs millions de composants qui y est intégrés.

Le développement du microprocesseur par Intel Corporation au début des années 70 a contribué à l'essor de l'industrie de l'électronique. Cette rapide évolution a permis aux gens d'avoir des ordinateurs personnels ou Personal Computers (PC) pour l'usage au travail ou domestique à un prix accessible.

L'électronique est devenu indispensable, on le trouve presque partout, que ce soit dans des montres, dans les appareils électroménagers que dans les automobiles. Aujourd'hui, il est difficile d'imaginer un nouveau produit qui n'implique aucune composante électronique.

Notons qu'un dégagement de chaleur autour et derrière le composant est produit par effet Joule dans un élément résistif lorsque celui-ci est traversé par un courant continu. La température du composant continuera de s'élever jusqu'à ce que celui soit détruit à moins que la chaleur ne soit transférée loin ou évacuée par d'autre astuce.

### I.3 Effet Joule

#### I.3.1 Définition

Quand un courant électrique (qui n'est autre que l'effet des collisions des électrons) passe à travers un conducteur, celui-ci dissipe de l'énergie sous forme de chaleur : c'est l'effet Joule [3]. L'effet Joule a été trouvé par James Prescott JOULE en 1860. Ce phénomène est observable dans plusieurs applications quotidiennes : sèche- cheveux, four électrique, plaque de cuisson, bouilloire électrique,...

#### I.3.2 Expériences

Chauffons un récipient contenant 0,24 g d'eau avec 3 résistances différentes :  $R_1 = 10 \Omega$ ,  $R_2 = 20 \Omega$ ,  $R_3 = 30 \Omega$  avec un courant 1 A. On alimente chacune des résistances pendant 2,5 mn et on mesure la température de l'eau.

Le tableau ci-après donne le résultat :

**Tableau 1:** Résultat de la première expérience de Joule

Résistances	Température initiale	Température finale	Ecart de température
$R_1 = 10 \Omega$	10° C	13,6°C	3,6°C
$R_2 = 20 \Omega$	10° C	15,4°C	5,4°C (soit 1,5*3,6°C)
$R_3 = 30 \Omega$	10° C	17,2°C	7,2°C (soit 2*3,6°C)

On peut conclure que le dégagement de la chaleur est proportionnel à la résistance

Pour la deuxième expérience de Joule, on prendra une seule résistance  $R = 10\Omega$  mais nous allons la faire parcourir par un courant de 1A, 2A et 3A. On change le courant chaque 2,5 mn. Nous mesurons la température de l'eau à la fin de chaque essai. Ci-dessous les résultats :

**Tableau 2:** Résultat de la deuxième expérience de Joule

Résistances	Température initiale	Température finale	Ecart de température	Intensités
$R = 10 \Omega$	10°C	13,6 °C	3,6 °C	1 A
$R = 10 \Omega$	10°C	24,4 °C	14,4 °C (soit $3,6^\circ\text{C} \cdot 2^2$ )	2 A
$R = 10 \Omega$	10°C	42,4 °C	32,4 °C (soit $3,6^\circ\text{C} \cdot 3^2$ )	3 A

⇒ Le dégagement de la chaleur est proportionnel au carré de l'intensité qui traverse la résistance

Dans cette dernière expérience, nous allons travailler avec une seule résistance  $R = 10 \Omega$  et un courant d'intensité 1 A. Mais on alimente la résistance pendant 2.5 mn, 5 mn et 7.5 mn. Ci-après le résultat :

**Tableau 3:** Résultat de la troisième expérience de Joule

Résistances	Température initiale	Température finale	Ecart de température	Durée d'alimentation
$R = 10 \Omega$	10°C	13.6 °C	3.6 °C	2.5 mn
$R = 10 \Omega$	10°C	17.2°C	7.2 °C (soit $3,6^\circ\text{C} \cdot 2$ )	5 mn
$R = 10 \Omega$	10°C	20.8 °C	10.4 °C (soit $3,6^\circ\text{C} \cdot 3$ )	7.5 mn

⇒ Le dégagement de chaleur est proportionnel au temps de passage du courant dans la résistance.

Finalement, nous pouvons exprimer l'énergie dégagée par effet Joule par :

$$W = RI^2t \quad (1.1)$$

### 1.3.3 Avantages et inconvénients de l'effet Joule

L'effet Joule est un avantage lorsqu'il s'agit d'un appareil produisant de la chaleur ou de la lumière :

- ✓ Fusibles : elles sont utilisés pour faire fondre un conducteur calibré afin d'isoler un circuit électrique en cas de surintensité.
- ✓ Ampoule à incandescence : le filament de tungstène est placé dans une enceinte contenant un gaz noble. Porté à une température très élevée (plus de 2200 °C), le filament devient incandescent et émet de la lumière.

- ✓ Chauffage : les chauffages électriques sont l'exploitation la plus connue de l'effet Joule. Les grille-pain, les plaques de cuisson,... peuvent convertir la totalité de l'énergie électrique en chaleur par convection et par rayonnement.

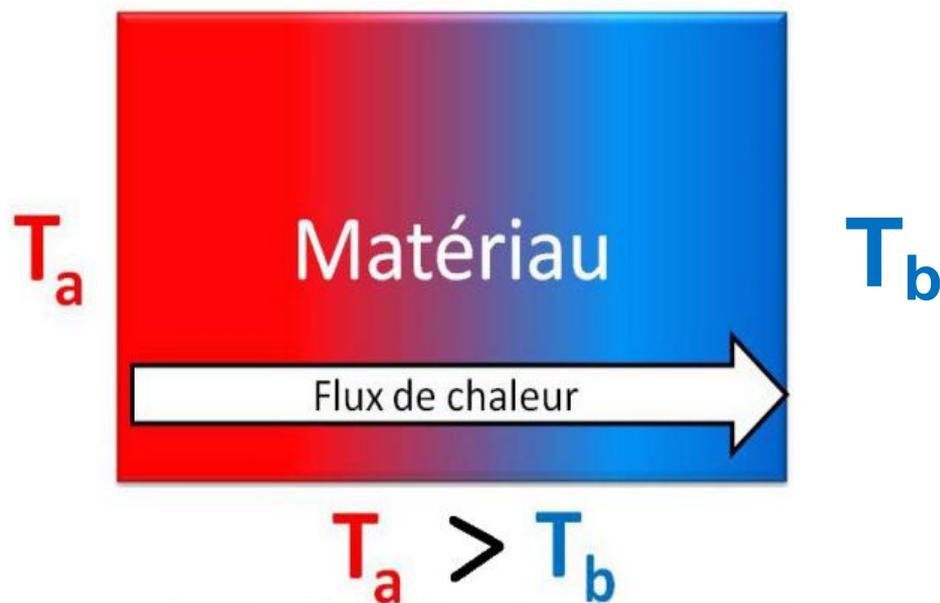
Dans quelques situations, on peut dire que l'effet Joule est indésirable mais inévitable :

- ✓ Les lignes électriques qui conduisent le courant de la centrale aux distributeurs perdent de la puissance par effet Joule.
- ✓ L'isolant d'un conducteur se détériore parce que le cuivre s'est échauffé.
- ✓ Les pertes en chaleur dans les moteurs réduisent son rendement.

## II. Modes de transferts thermiques

### II.1 La conduction thermique :

La conduction thermique est un transfert thermique ayant lieu au cœur d'un matériau c'est-à-dire à l'échelle microscopique. Elle résulte de l'élévation ou de la baisse de la température dans une certaine région d'un corps. Ceci provoque une différence de température dans l'intégrité du corps. Ainsi la région la plus froide du corps s'échauffe au contact de la région la plus chaude.

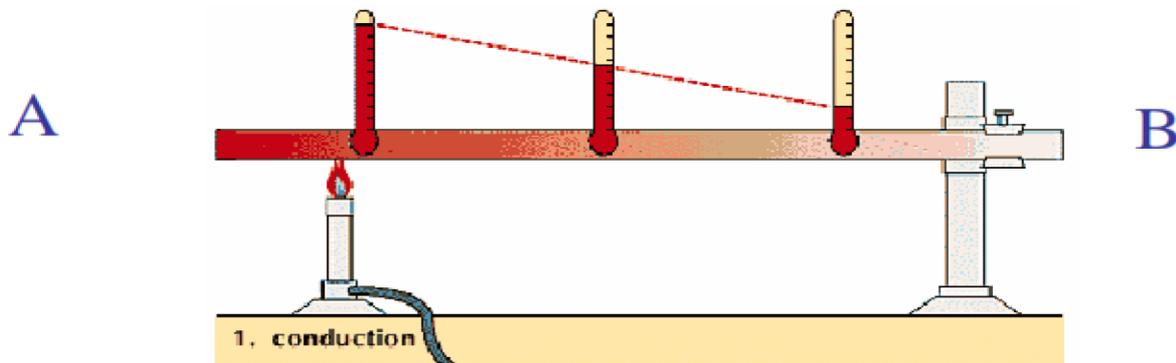


**Figure 1. 3 :** Mode de transfert thermique par conduction [6].

Ce transfert thermique a lieu sans transfert de matière mais avec transfert d'énergie. En effet, on peut considérer la conduction thermique au sein d'un solide comme la transmission de proche en proche de l'énergie microscopique de vibration du réseau cristallin. Car le fait que le corps soit chaud se traduit par une agitation microscopique des atomes composant le réseau cristallin. Dans les liquides et les gaz le transport de la chaleur par conduction est très souvent négligeable devant les deux autres types de transport de la chaleur (par convection et par rayonnement).

### II.1.1 Loi de Fourier

Le **flux de chaleur** (dimension  $W/m^2$ ) transféré par conduction dans une direction donnée est proportionnel au gradient de température dans cette direction.



**Figure 1. 4:** Transfert thermique par conduction [7]

On chauffe une barre métallique à son extrémité A. Nous observons une différence de température. Cette différence de la potentielle va créer un flux de chaleur :

$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{L} \quad [W] \quad (1.2)$$

k : transfert thermique de la matière [ $W/^\circ C \cdot m$ ]

A : surface où il y a transfert de la chaleur [ $m^2$ ]

L : longueur du milieu [m]

$\Delta T$  : différence de température [ $^\circ C$ ]

Cette loi, dite de Fourier, est donc telle que la composante sur l'axe Ox du flux est égale à :

$$\varphi_x = - \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1.3)$$

$\varphi_x$  est la composante du flux sur l'axe Ox et T la température au point considéré. Dans cette loi, postulée dès 1822 par Fourier, le coefficient de proportionnalité  $\lambda$  est une caractéristique physico-chimique du point matériel désignée sous le nom de **conductivité ou conductibilité thermique**. Dans le système international, elle s'exprime en  $W/m \cdot K$ .

Le signe moins dans la loi de Fourier indique que le transfert de chaleur se fait vers du point chaud vers les basses températures.

Dans le tableau suivant sont reportées les conductivités de quelques corps solides, liquides et gazeux.

Les métaux sont beaucoup plus conducteurs de la chaleur que les substances non métalliques, les gaz sont plutôt mauvais conducteurs.

**Tableau 4:** Les conductivités de quelques corps [8].

Matériau	$\lambda$ (W.m <sup>-1</sup> . K <sup>-1</sup> )	Matériau	$\lambda$ (W.m <sup>-1</sup> . K <sup>-1</sup> )
Chrome	449	Ardoise	2,2
Argent	419	Grès	1,8
Cuivre	386	Verre	0,78
Aluminium	204	Papier	0,48
Zinc	112	Chêne	0,17
Fer (pur)	73	Laine de verre	0,038
Acier Inox	16	Eau	0,556
Mercure	8,2	Air	0,0262

La conductivité thermique d'un milieu est proportionnel à sa longueur et inversement proportionnelle à sa résistance thermique et sa température

$$R = \frac{L}{k.A} \quad (1.4)$$

L : longueur du milieu [m]

k : transfert thermique de la matière [W/°C.m]

A : surface où il y a transfert de chaleur [m<sup>2</sup>]

Le flux de chaleur peut s'écrire alors :

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R} \quad (1.5)$$

### II.1.2 Conduction pure d'un circuit électronique

Un circuit électronique est toujours formé par deux ou plusieurs composants électroniques. Nous savons que soumise à une tension d'alimentation, ces composants dégagent de la chaleur. Puisque notre but est de refroidir le circuit, l'étude de l'acheminement de la chaleur s'avère donc nécessaire. Pour l'analyse, nous devons nous intéresser aux différentes jonctions qui existent dans le circuit puisque c'est là que la chaleur est générée.

Le circuit est de trois dimensions, mais pour l'étude, nous pouvons faire une approximation à une dimension mais en ajoutant ce qu'on appelle une « constriction de résistance thermique ». Pour une petite surface de génération de chaleur, la résistance de constriction est donnée par :

$$R_{constriction} = \frac{1}{\sqrt{\pi}.d.k} \quad (1.6)$$

d : diamètre du milieu [m]

k : transfert thermique de la matière [W/°C.m]

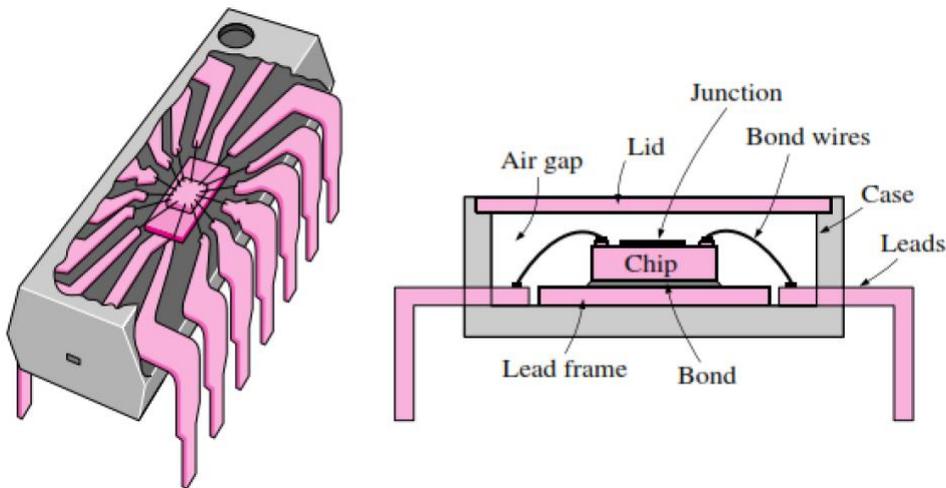
### II.1.3 Exemple de calcul : analyse de la conduction de chaleur sur un circuit

#### a- Énoncé du problème

Un circuit à 12 pins dissipe 0.6 W d'énergie dans un DIP (Dual In-line Package). Les matériels ainsi que les dimensions des diverses sections de cet composant électronique sont donnés sur le tableau suivant :

**Tableau 5:** Données thermique du circuit à analyser la conduction

Section et matériels	Conductivité [W/m. °C]	Longueur [mm]	Surface de transfert de chaleur
Constriction de jonction	-	-	d = 0.4 mm
Circuit en silicone	120	0.4	3mm * 3mm
Liaison eutectique	296	0.03	3mm * 3 mm
Cadre conducteur en Cu	386	0.25	3mm * 3mm
Séparateur en plastique	1	0.2	12*1mm*0.25mm
Conducteur en Cu	386	5	12*1mm*0.25mm



**Figure 1. 5:** Schéma tridimensionnel et unidimensionnel du circuit à 12 pins DIP [9].

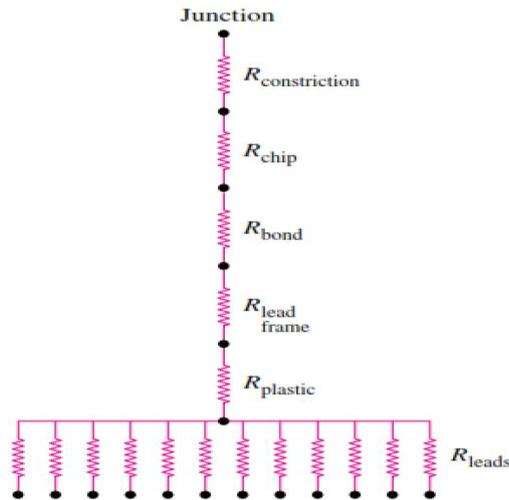
Le but est d'estimer la température de la jonction si la température perçue au bout des pins est de 40°C

#### b- Résolution

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R} = \frac{T_{jonction} - T_{pins}}{R_{jonctions-pins}}$$

- Calcul de  $R_{jonction-pins}$  :

Pour simplifier notre étude, nous allons travailler sur une dimension. Donc, il nous faut une résistance de constriction. Nous avons donc le schéma électronique suivant :



**Figure 1. 6:** Schéma électronique du problème [10]

Les résistances montées en parallèle des 12 pins peuvent être remplacées par une résistance équivalente. Nous aurons donc :  $R_{Constriction}$ ,  $R_{Chip}$ ,  $R_{Bond}$ ,  $R_{Lead\ frame}$ ,  $R_{Plastic}$  et  $R_{Leads}$  montées en série.

$$R_{Constriction} = \frac{1}{\sqrt{\pi dk}} = \frac{1}{\sqrt{\pi} * (0.4 * 10^{-3})(120)} = 11.75 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

$$R_{Chip} = \frac{L}{kA} = \frac{0.4 * 10^{-3}}{120 * (3 * 3 * 10^{-6})} = 0.37 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

$$R_{Bond} = \frac{L}{kA} = \frac{0.03 * 10^{-3}}{296 * (3 * 3 * 10^{-6})} = 0.01 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

$$R_{Lead\ frame} = \frac{L}{kA} = \frac{0.25 * 10^{-3}}{386 * (3 * 3 * 10^{-6})} = 0.07 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

$$R_{Plastic} = \frac{L}{kA} = \frac{0.2 * 10^{-3}}{12 * 0.25 * 10^{-6}} = 66.67 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

$$R_{Leads} = \frac{L}{kA} = \frac{5 * 10^{-3}}{386 * (12 * 0.25 * 10^{-6})} = 4.32 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

$$R_{Junction-pins} = \sum R = 11.75 + 0.37 + 0.01 + 0.07 + 66.67 + 4.32 = 83.19 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

- Température de la jonction

$$T_{jonction} = (R_{jonction-pins} \cdot \phi) + T_{pins}$$

$$T_{jonction} = (83.19 * 0.6) + 40 = 89.91 \text{ } ^\circ\text{C}$$

On a :

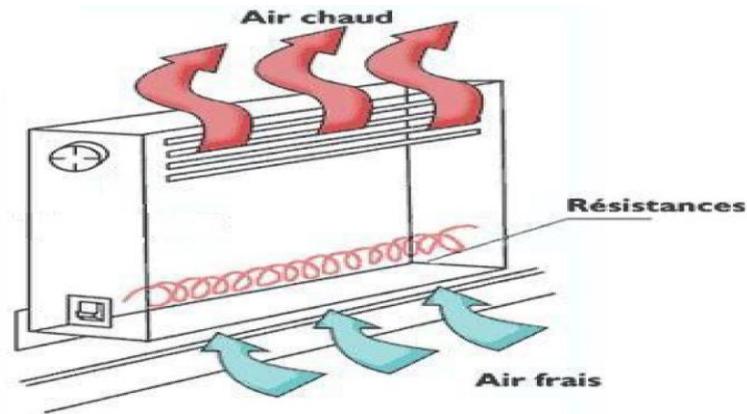
$$\mathbf{T_{jonction} = 89.91 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

#### c- Interprétations et analyses :

- ✓ Concernant le plastique : il représente 80% de la résistance thermique totale c'est à dire que 80% de la température sont perdues entre les conducteurs et la jonction. La température de la jonction devrait être égale à  $(89.91 - 40 = 49.91 \text{ } ^\circ\text{C})$  si la résistance thermique de la plastique est éliminée.
- ✓ Plus la résistance d'un milieu est élevée, moins sera le flux de chaleur. Les conducteurs sont donc des sources majeures de la chaleur.

## II.2 La convection naturelle ou forcée :

La convection est un transfert thermique impliquant un déplacement de matière à l'échelle macroscopique (fluides et gaz) .



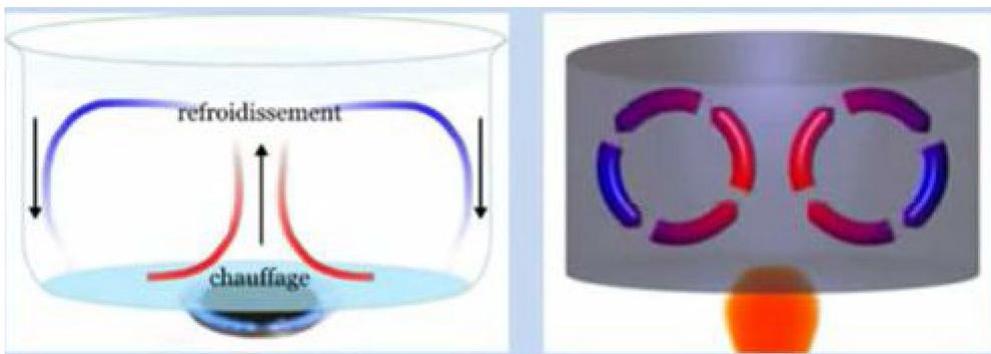
**Figure 1. 7:** Transfert de chaleur par convection thermique [11].

Elle peut être naturelle et provenir d'une variation locale de température au sein même d'un fluide ou d'un gaz. En effet, cette variation provoque une baisse de la masse volumique de la « partie » la plus chaude du fluide ou du gaz. Ainsi cette « partie » s'élève et induit ce mouvement d'ensemble du fluide ou du gaz.

Elle peut également être forcée afin d'accélérer les échanges thermiques, comme avec un ventilateur par exemple.

### II.2.1 La convection naturelle

Quand on parle de convection naturelle, le mouvement est dû à des causes naturelles : la variation de température du fluide qui engendre à son tour des variations de densité.



**Figure 1. 8:** Convection naturelle

On chauffe l'eau dans une casserole à l'aide d'une plaque chauffante. La plaque va chauffer l'eau petit à petit, mais à partir du fond de la casserole. L'eau chauffée va monter et l'eau qui est encore à basse température va descendre : On dit qu'il y a convection

### a- Nombre de Grashof

C'est le rapport entre les forces d'inertie aux forces de viscosité. Elle caractérise le régime d'écoulement :

$$G_r = \frac{l^3 \cdot \rho^2 \cdot g \cdot \beta \cdot \Delta T}{\mu^2} \quad (1.7)$$

l: Dimension linéaire caractéristique de la surface où l'échange a eu lieu [m]

$\rho$  : Masse volumique du fluide [Kg/m<sup>3</sup>]

g : Accélération de la pesanteur (9.81 m/s<sup>2</sup>)

$\beta$  : Coefficient de dilatation volumique du fluide [°C]<sup>-1</sup> :

❖ Pour l'air :  $\beta = 1/T$ , T [°K]

❖ Pour l'eau :  $\beta = 0.2$  à 20 °C

$\beta = 0.53$  à 60 °C

$\beta = 0.67$  à 90 °C

$\Delta T$  : Différence de température entre la paroi et le fluide [°C]

$\mu$ : Viscosité du fluide [Pa.s]

### b- Expression de NUSSELT

C'est le rapport entre le transport de chaleur en régime convectif et le transport de chaleur en l'absence de mouvement du fluide.

$$N_u = C \cdot (G_r * P_r)^n \quad (1.8)$$

n = 1/4 pour la convection laminaire (se dit de l'écoulement d'un fluide dont les couches glissent les unes sur les autres), et 1/3 pour la convection turbulente (se dit d'une agitation brutale).

C : coefficient d'échange ; dépend du type du régime de convection ainsi que de la géométrie

**Tableau 6:** Coefficient de convection de l'air en régime laminaire

Géométrie et Orientation de la paroi	Coefficient de convection laminaire [W/m <sup>2</sup> . °C]	Dimension caractéristique [m]
Plaque verticale dont la hauteur est inférieure à 30 cm (ou cylindre verticale)	$h_{conv} = 1.42 * \left(\frac{\Delta T}{H}\right)^{0.25}$	H : Hauteur de la plaque
Plaque verticale dont la hauteur est supérieure à 30 cm (ou cylindre verticale)	$h_{conv} = 1.78 * (\Delta T)^{0.25}$	
Cylindre horizontal	$h_{conv} = 1.32 * \left(\frac{\Delta T}{D_e}\right)^{0.25}$	$D_e$ : Diamètre extérieur du cylindre
Plaque horizontale chauffant vers le haut	$h_{conv} = 1.32 * \left(\frac{\Delta T}{L}\right)^{0.25}$	L : largeur de la plaque
Plaque horizontale chauffant vers le bas	$h_{conv} = 0.66 * \left(\frac{\Delta T}{L}\right)^{0.25}$	L : largeur de la plaque
Sphère	$h_{conv} = \left(1.14 + \frac{0.17}{D}\right) \Delta T^{0.25}$	D : diamètre de la sphère

Si la pression atmosphérique est  $P \neq 1 \text{ atm}$ , on a :  $h_{conv,P \text{ atm}} = h_{conv,1 \text{ atm}} * \sqrt{P}$

### c- Flux et radiation

Une fois  $h_{conv}$  déterminé, le flux de transfert de la chaleur peut être calculé par :

$$\dot{Q}_{conv} = \varphi_{conv} = h_{conv} * A_S * \Delta T = h_{conv} * A_S (T_S - T_{fluide}) \quad (1.9)$$

$A_S$  : Surface d'échange [ $m^2$ ]

Le transfert de radiation est :

$$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon * A_S * \sigma * (T_s^4 - T_{alentours}^4) \quad (1.10)$$

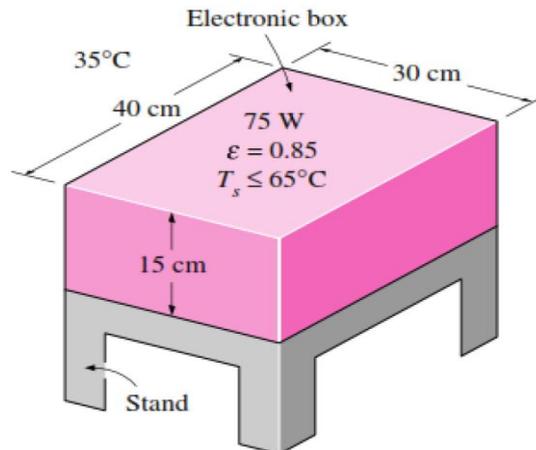
$\varepsilon$ : Emissivité de la surface

$\sigma$  : Constante de Boltzmann ( $5.67 * 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ )

### d- Exemple de calcul : refroidissement d'une boîte électronique

#### i. Enoncé du problème

Une boîte électronique de dimension 15cm\*30cm\*40cm est placée dans une chambre à une température 35°C. L'extérieur de la boîte a une émissivité de 0.5. Si les composants électroniques à l'intérieur de la boîte dissipent 75 W, et la température de la surface extérieure de la boîte n'excède pas 65 °C, est-il possible de profiter de la convection naturelle ainsi que de la radiation seulement pour garantir le refroidissement de la boîte ?



**Figure 1. 9:** Boîte à composants électroniques

#### ii. Résolution

- Calculons séparément le flux de transfert de la convection naturelle et celui de la radiation :
- On peut considérer les 4 côtés de la boîte comme étant des surfaces verticales de hauteur 0,15 m :

$$L_c = 0.15 \text{ m}$$

$$A_c = ((2*0.4) + (2*0.3))*0.15 = 0.21 \text{ m}^2$$

$$h_{conv} = 1.42 * \left(\frac{\Delta T}{L_c}\right)^{0.25} = 1.42 * \left(\frac{65-35}{0.15}\right)^{0.25} = 5.34 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\dot{Q}_c = h_{conv} * A_c * \Delta T = 5.34 * 0.21 * (65 - 35) = 33.64 \text{ W}$$

- La surface en haut est assimilable à une plaque horizontale chauffant vers le haut :

$$h_{conv} = 1.32 * \left(\frac{\Delta T}{L_h}\right)^{0.25}$$

$$L_h = \frac{4 * A_s}{P} = \frac{4 * 0.3 * 0.4}{2(0.3 + 0.4)} = 0.34 \text{ m}$$

$$A_h = 0.3*0.4 = 0.12 \text{ m}^2$$

$$h_{conv,top} = 1.32 * \left(\frac{65-35}{0.34}\right)^{0.25} = 4.05 \text{ W/m}^2\text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\dot{Q}_{conv,top} = h_{conv,top} * A_h * \Delta T = 4.05 * 0.12 * (65-35) = 14.58 \text{ W}$$

- La boîte étant placée dans la chambre, la température de ses alentours est donc égale à la température de l'air dans la chambre (i.e.  $35^\circ\text{C} = 308 \text{ } ^\circ\text{K}$ ). Le taux de transfert de la chaleur par radiation est donc :

$$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon * A * \sigma * (T_s^4 - T_{alentours}^4)$$

$$A = A_c + A_h = 0.05 + 0.06 = 0.11 \text{ m}^2$$

$$\dot{Q}_{rad} = 0.85 * 0.11 * 5.67 \cdot 10^{-8} * (373^4 - 298^4) = 60.81 \text{ W}$$

Le flux total de la chaleur est alors :

$$\dot{Q}_{total} = \dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{rad} = 36.54 + 16.12 + 60.81 = 113.5 \text{ W}$$

### iii. Interprétation

- $\dot{Q}_{total}$  est supérieure à la puissance dissipée par le circuit. Donc, on peut assurer le refroidissement de la boîte juste par convection naturelle et la radiation.
- Le flux de chaleur par radiation représente ici 57% du flux total. La radiation élimine presque la moitié de la chaleur produite par les composants électroniques. Mais ; n'oublions pas qu'elle dépend de l'émissivité de la paroi ainsi que de la surface où l'échange de la chaleur aura lieu. Plus la surface de la paroi est grande, plus la chaleur est éliminée.

## II.2.2 Convection forcée

La vitesse de fluide associé à une convection naturelle est naturellement lente. C'est pour cela que la convection naturelle est limitée au système de faible puissance. Quand elle ne nous suffit plus pour refroidir notre système, on a recours à l'utilisation d'un ventilateur : c'est la convection forcée. Autrement dit, on parle de convection forcée quand la cause du mouvement est un dispositif externe.

### a- Taux de transfert de chaleur

La chaleur absorbée par l'air n'est autre que celle dégagée par les composants électroniques. Son expression est :

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{out} - T_{in}) \quad (1.11)$$

$\dot{Q}$  : Taux de transfert de la chaleur vers l'air

$\dot{m}$  : Débit massique de l'air

$C_p$  : Chaleur de l'air

$T_{out}, T_{in}$  : Température de l'air respectivement à l'intérieur et à la sortie de l'enclosure. Plus la température de l'air entrant est grande, plus celle à la sortie l'est aussi, donc celle à l'intérieur (c'est-à-dire les composants) est aussi grande. Il est alors nécessaire de limiter la température de l'air à 10 °C et celle à la sortie de l'enclosure à 70 °C.

La masse de l'air nécessaire pour le refroidissement est liée à la température de l'air disponible pour le refroidissement.

### b- Nombre de Reynolds

C'est le rapport des forces d'inertie aux forces de viscosité. Il caractérise l'écoulement dans une canalisation, et est donné par :

$$Re = \frac{V \cdot L_C}{\nu} \quad (1.12)$$

$V$  : Vitesse du fluide [m/s]

$L_C$  : Longueur du fluide en mouvement

$A_C$  : Surface où passe le fluide

$\nu = \frac{\mu}{\rho}$  : Viscosité du fluide [m<sup>2</sup>/s]

$\rho$  : Masse volumique du fluide [Kg/m<sup>3</sup>]

$\mu$  : Viscosité dynamique du fluide [Pa.S]

### c- Flux de chaleur par convection

La formule du flux de chaleur est identique à celle de la convection naturelle :

$$\dot{Q}_{conv} = h \cdot A_S \cdot (T_S - T_{fluide})$$

h: Coefficient moyenne du transfert par convection [W/m<sup>2</sup>°C]

A<sub>S</sub> : Surface où il y a transfert de la chaleur par convection [m<sup>2</sup>]

T<sub>S</sub>, T<sub>fluide</sub> : Température respective de la surface et du fluide

### d- Température

\* Si l'entrée de l'effet est négligeable, le coefficient h est constant. Dans ce cas, T<sub>S</sub>, T<sub>fluide</sub> croient linéairement, donc leur différence est aussi devenue constante. L'augmentation de la température de la surface au-dessus de la température du fluide est :

$$\Delta T_{rise,surface} = T_S - T_{fluide} = \frac{\dot{Q}_{conv}}{hA_S}$$

\* Si la température de sortie du fluide est donnée, la température de la plus grande surface au bout du canal est donnée par :

$$T_{S,max} = T_{fluid,max} + \frac{\dot{Q}}{hA_S} = T_{out} + \frac{\dot{Q}}{hA_S}$$

Si cette température est dans l'intervalle permise, alors le refroidissement est convenable. Si ce n'est pas le cas, alors il faut adopter un ventilateur beaucoup plus grand.

\* La température moyenne du fluide pour un écoulement intérieur est :

$$T_{avg} = \frac{1}{2}(T_{in} + T_{out})$$

\* Pour un écoulement extérieur,

$$T_{film} = \frac{1}{2}(T_S + T_{fluide})$$

### e- Nombre de Nusselt

C'est le rapport de la quantité de chaleur échangée par la convection à la quantité de chaleur échangé par la conduction :

$$Nu = \frac{h \cdot D}{k} = 0.023 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.4} \quad (1.13)$$

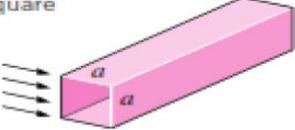
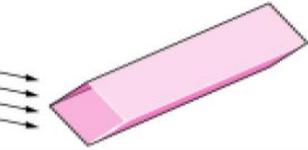
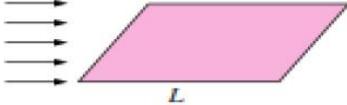
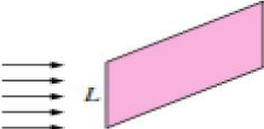
k: Conductivité thermique du fluide

Re : Nombre de Reynolds

Pr : Nombre de Prandtl (0.7 pour l'air à la température d'une chambre).

La figure ci-dessous montre des correspondances entre le nombre de Nusselt et celui de Reynolds ainsi que des intervalles du nombre de Reynolds selon la forme géométrique concernée :

**Tableau 7:** Correspondance entre le nombre de Nusselt et le nombre de Reynolds

Cross-section of the cylinder	Fluid	Range of Re	Nusselt number
Circle 	Gas or liquid	0.4–4 4–40 40–4000 4000–40,000 40,000–400,000	$Nu = 0.989 Re^{0.330} Pr^{1/3}$ $Nu = 0.911 Re^{0.385} Pr^{1/3}$ $Nu = 0.683 Re^{0.466} Pr^{1/3}$ $Nu = 0.193 Re^{0.618} Pr^{1/3}$ $Nu = 0.027 Re^{0.805} Pr^{1/3}$
Square 	Gas	5000–100,000	$Nu = 0.102 Re^{0.675} Pr^{1/3}$
Square (tilted 45°) 	Gas	5000–100,000	$Nu = 0.246 Re^{0.588} Pr^{1/3}$
Flat plate 	Gas or liquid	0–5 × 10 <sup>5</sup> 5 × 10 <sup>5</sup> –10 <sup>7</sup>	$Nu = 0.664 Re^{1/2} Pr^{1/3}$ $Nu = (0.037 Re^{4/5} - 871) Pr^{1/3}$
Vertical plate 	Gas	4000–15,000	$Nu = 0.228 Re^{0.731} Pr^{1/3}$

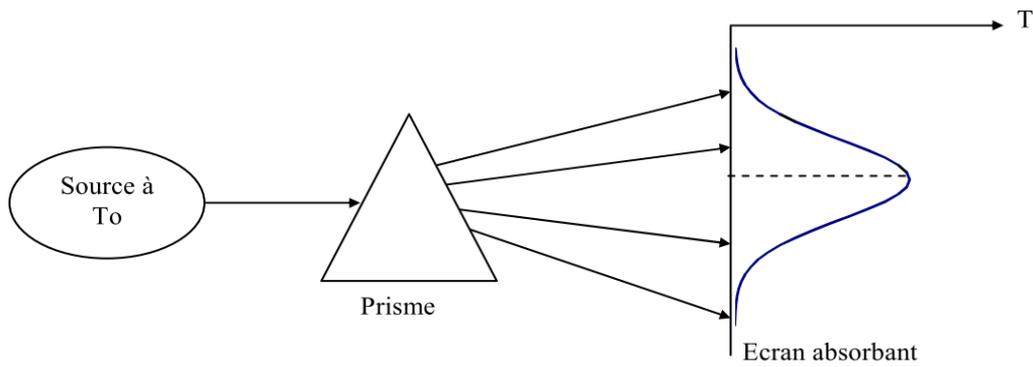
## II.3 Le rayonnement

### II.3.1 Définitions

#### a- Nature du rayonnement

Le rayonnement est un transfert thermique ne nécessitant pas de milieu matériel par opposition aux deux autres [12]. En effet, ce type de transfert thermique résulte de l'émission de rayons électromagnétiques transportant de l'énergie. Cette émission d'énergie s'effectue au détriment de l'énergie du corps émetteur (annexe 1). Ils sont émis par un corps chaud, tel que le soleil, et échauffent le corps qui les reçoit.

Le rayonnement se propage de manière rectiligne à la vitesse de la lumière, il est constitué de radiations de différentes longueurs d'onde comme l'a démontré l'expérience de William Herschel montré sur la figure suivante :



**Figure 1. 10:** Principe de l'expérience de William Herschel

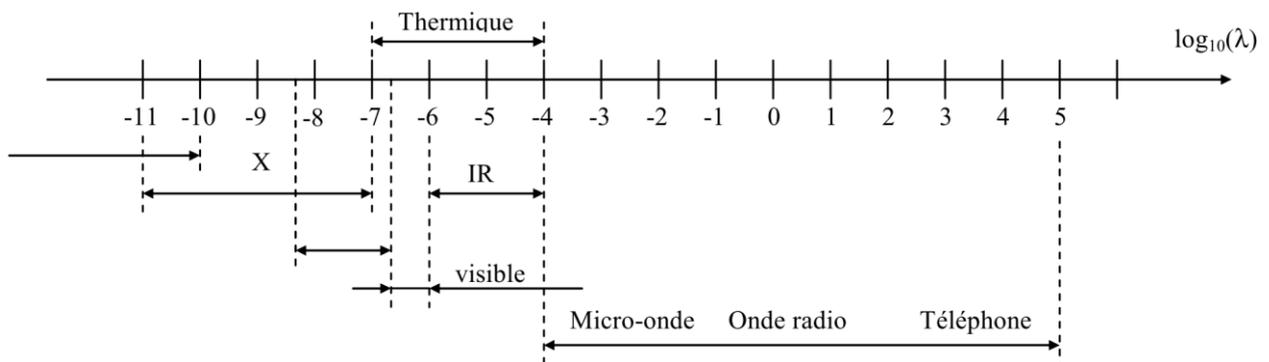
En passant à travers un prisme, les radiations sont plus ou moins déviées selon leur longueur d'onde. On envoie donc les radiations émises par une source à la température  $T_0$  sur un prisme et projette le faisceau dévié sur un écran absorbant (noirci), on obtient ainsi la décomposition du rayonnement total incident en un spectre de radiations monochromatiques.

Si l'on déplace le long de l'écran un thermomètre, on mesure la température  $T_e$  caractérisant l'énergie reçue par l'écran dans chaque longueur d'onde. En construisant la courbe  $T_e = f(\lambda)$ , on obtient la répartition spectrale de l'énergie rayonnée pour la température  $T_0$  de la source. On constate que :

- L'énergie émise est maximale pour une certaine longueur d'onde  $\lambda_m$  variable avec  $T_0$ .
- L'énergie n'est émise que sur un intervalle  $[\lambda_1, \lambda_2]$  de longueur d'onde caractérisant le rayonnement thermique.

On trouvera représentés sur la figure 1.12, les différents types d'ondes électromagnétiques et leurs longueurs d'ondes correspondantes. On retiendra que le rayonnement thermique émis par les corps se situe entre 0.1 et 100  $\mu\text{m}$ . On notera par ailleurs que le rayonnement est perçu par l'homme :

- Par l'œil : pour  $0.38 \mu\text{m} < \lambda < 0.78 \mu\text{m}$  rayonnement visible.
- Par la peau : pour  $0.78 \mu\text{m} < \lambda < 314 \mu\text{m}$  rayonnement IR



**Figure 1. 11:** Spectre des ondes électromagnétiques ( $\lambda$  en m)

## b- Définitions relatives aux sources

### i. Flux

- On appelle flux d'une source S, la puissance rayonnée notée  $\varphi$  par S dans tout l'espace qui l'entoure, sur toutes les longueurs d'onde. Le flux  $\varphi$  s'exprime en Watt.
- Le flux envoyé par un élément de surface  $dS$  dans un angle solide élémentaire  $d\Omega$  est notée  $d^2\varphi$ .
- Le flux envoyé dans tout l'espace par une surface élémentaire  $dS$  est noté  $d\varphi$ .
- Le flux envoyé par une surface S dans l'angle solide  $d\Omega$  entourant la direction Ox est notée  $d\varphi_x$ .

### ii. Emission énergétique

- Monochromatique :

Un élément de surface  $dS$  émet un certain flux d'énergie par rayonnement dans toutes les directions du  $\frac{1}{2}$  espace. Ce flux est reparti sur un intervalle de longueurs d'ondes. Si l'on considère le flux d'énergie  $d\varphi_{\lambda}^{\lambda+d\lambda}$  émis entre les deux longueurs d'ondes  $\lambda$  et  $\lambda + d\lambda$ , on définit l'émission monochromatique d'une source à la température T par :

$$M_{\lambda T} = \frac{d\varphi_{\lambda}^{\lambda+d\lambda}}{dS \cdot d\lambda} \quad (1.14)$$

- Totale :

C'est la densité de flux de chaleur émise par rayonnement par  $dS$  sur tout le spectre des longueurs d'ondes. Elle n'est plus fonction que de la température T et de la nature de la source :

$$M_T = \int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} M_{\lambda T} \cdot d\lambda = \frac{d\varphi}{dS} \quad (1.15)$$

## II.3.2 Définition du corps noir et loi d'émission du corps noir

Les caractéristiques du rayonnement thermique entre deux surfaces sont bien connues dans le cas des **corps noirs** ou corps radiants parfaits. Un corps noir absorbe intégralement tout rayonnement incident, et la qualité et l'intensité du rayonnement qu'il émet ne dépend que de sa température. Le pouvoir émissif d'un corps noir vers une surface hémisphérique située en avant de la surface noire est donné par la loi de **Stephan-Boltzmann** :

$$M_{0T} = \sigma \cdot T^4 \quad (1.16)$$

T étant exprimé en kelvin (K).

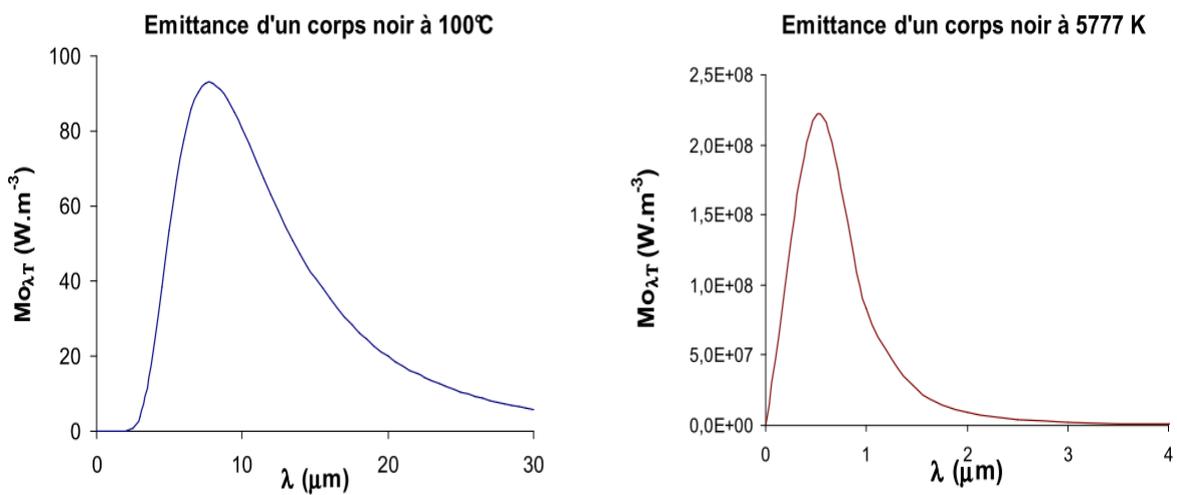
La constante  $\sigma$  dite de Stephan vaut dans le système international :  $\sigma = 5,6704 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$

Si  $M_{0\lambda T}$  est le pouvoir émissif monochromatique pour la longueur d'onde  $\lambda$  de telle sorte que  $M_{0\lambda T} \cdot d\lambda$  représente le pouvoir émissif à travers la demi-sphère située en avant pour les rayonnements de longueur d'onde comprise entre  $\lambda$  et  $\lambda + d\lambda$ , la **loi de Planck** donne :

$$M_{0\lambda T} = \frac{C_1 \cdot \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1} \quad (1.17)$$

Avec :  $C_1 = 3,742 \cdot 10^{-16} \text{ W/m}^2$   
 $C_2 = 1,4385 \cdot 10^{-2} \text{ m.K}$

La loi de Planck permet de tracer les courbes isothermes représentant les variations de  $M_{0\lambda T}$  en fonction de la longueur d'onde pour diverses températures :



**Figure 1. 12:** Emittance monochromatique d'un corps noir à deux températures différentes

Ainsi, on a pu voir trois modes de transfert thermique que l'on pourrait exploiter simultanément ou indépendamment pour refroidir un système de dispositif électronique. Intéressons-nous maintenant de près à ces dispositifs électroniques.

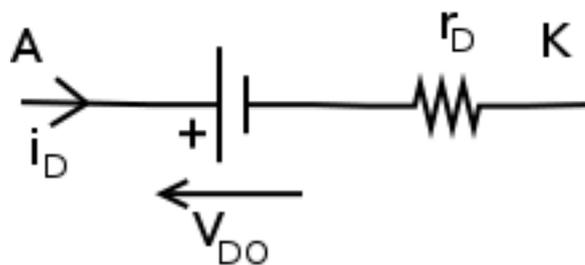
# Chapitre II : REFROIDISSEMENT ET PROTECTION THERMIQUE DES COMPOSANTS ELECTRONIQUES

## I. Origines des pertes dans les composants

### I.1 Pertes en conduction

En **conduction** [13], le passage du courant électrique dans le matériau semi-conducteur d'un composant de puissance provoque l'élévation de sa température par **effet Joule**.

La puissance dissipée résultante peut être exprimée à partir des éléments du modèle électrique équivalent en conduction. Pour la diode et le thyristor, ce modèle apparaît à la figure 2.1.



**Figure 2. 1** : Modèle en conduction

La **puissance dissipée en conduction** s'exprime

$$P_{cond} = \langle p(t) \rangle = V_{D0} \cdot \langle i(t) \rangle + r_D \cdot \langle i^2(t) \rangle = V_{D0} I_{moy} + r_D I_{eff}^2 \quad (2.1)$$

En conclusion, l'évaluation de la puissance dissipée nécessite la **détermination des courants moyen et efficace** dans le composant.

### I.2 Pertes en commutation

La puissance dissipée provient aussi des **pertes par commutations** (changements d'état du composant entre les états bloqué et passant). Elle s'exprime par la relation :

$$P_{com} = P_{OFF-ON} + P_{ON-OFF} = \frac{1}{2} I_D \cdot V \cdot t_{mi} \cdot f + \frac{1}{2} I_D \cdot V \cdot t_{di} \cdot f \quad (2.2)$$

Où  $P_{OFF-ON}$  est la puissance dissipée durant la mise en conduction,  $t_{mi}$  sa durée (temps de montée du courant),  $P_{ON-OFF}$  la puissance dissipée durant le blocage,  $t_{di}$  sa durée (temps de descente du courant),  $I_D$  le courant à établir ou couper,  $V$  la tension du réseau et  $f$  la fréquence des commutations.

### I.3 Nécessité de la protection des éléments

La somme des deux puissances précédente provoque l'élévation de la température de fonctionnement qui diminue la durée de vie du composant pouvant provoquer sa **destruction**.

La température du composant est limitée en évacuant la puissance produite à l'aide de **dissipateurs thermiques** (radiateurs) qui favorisent la **conduction** et la **convection thermiques**.

## II. Dissipateurs thermiques

Ce type de refroidissement exploite le transfert thermique par convection naturelle. L'utilisation de dissipateur thermique par ailette est un exemple typique [14].

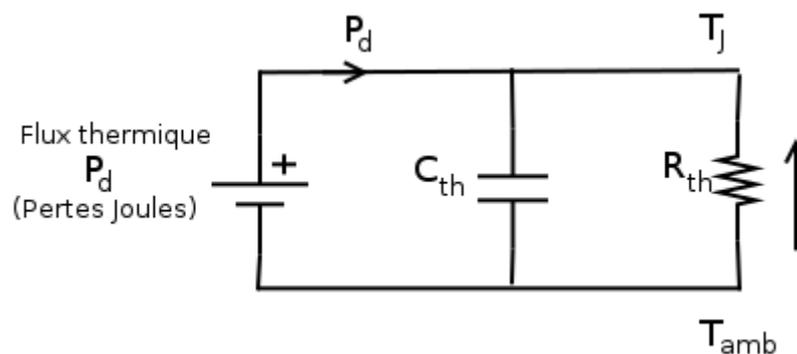
Le dissipateur thermique consiste à attacher un bloc de métal fabriqué ou extrudé sur la partie nécessitant le refroidissement. Une pâte thermique peut être utilisée.



**Figure 2. 2:** Le dissipateur thermique

### II.1 Analogie en modèle électrique et modèle thermique

Par analogie, le modèle thermique de la figure 2.3 montre le flux thermique  $P_d$  (en watts) à évacuer (puissance provenant de l'effet Joule). Ce flux est assimilé à un courant électrique qui s'écoule dans la résistance thermique  $R_{th}$  (en  $^{\circ}C/W$ ). La capacité thermique  $C_{th}$  (en  $J/C$ ) traduit l'aspect transitaire du phénomène caractérisé par sa constante de temps  $R_{th}C_{th}$ .

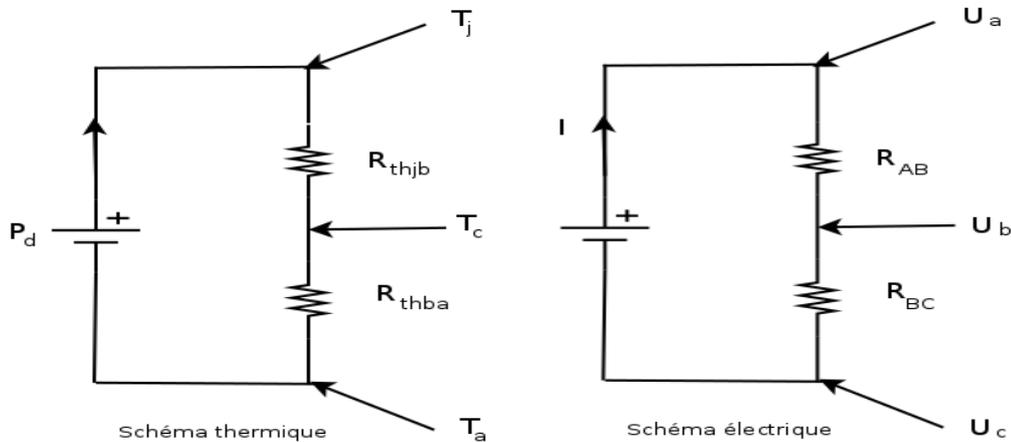


**Figure 2. 3:** Modèle thermique

## II.2 Schéma thermique analogique avec un circuit électrique :

### II.2.1 Sans dissipateur thermique :

Voici le schéma thermique équivalent par analogie d'un circuit électrique sans dissipateur thermique :



**Figure 2. 4:** Circuit électrique sans dissipateur thermique

**Tj** (en °C) : température de jonction ( $T_j$  max donné par le constructeur de 120 à 250°C)

**Tc** ou **Tb** (en°C) : température du boîtier

**Ta** (en °C) : température de l'air ambiant

**Rthjb** ou **Rthjc** (en °C/W) : résistance thermique jonction boîtier donné par le constructeur

**Rthba** (en °C/W) : résistance thermique boîtier air ambiant

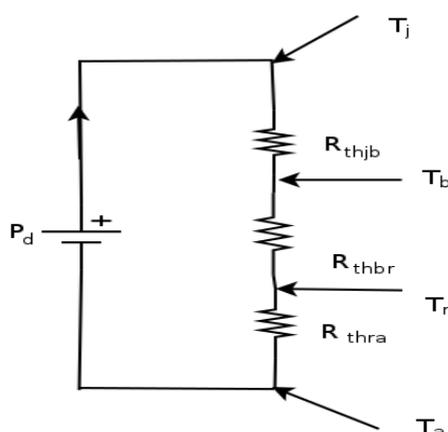
Les constructeurs indiquent également la valeur **Rthja** sans radiateur

Schéma électrique :  $U_B - U_C = I \times (R_{AB} + R_{BC})$

Schéma thermique :  $T_j - T_a = P_d \times (R_{thjb} + R_{thba})$

### II.2.2 Avec dissipateur thermique :

Le circuit avec dissipateur thermique sera :



**Rthbr** : résistance thermique boîtier-radiateur, dépend du mode de fixation, avec ou sans mica, avec ou sans graisse à la silicone

**Rthra** : résistance thermique radiateur air ambiant dépend de la surface du radiateur.

$$T_j - T_d = P_d \times \sum R_{th}$$

$$\text{avec } \sum R_{th} = R_{thjb} + R_{thbr} + R_{thra}$$

**Figure 2. 5:** Circuit électrique avec dissipateur thermique

### II.3 Modèle du dissipateur

Sans se préoccuper de l'évolution transitoire, le flux thermique  $P_d$  qui mène de la jonction du composant à l'air ambiant traverse différentes résistances thermiques placées en série.

Pour favoriser l'évacuation, il faut minimiser la résistance globale en augmentant la surface de dissipation, sa nature ou en forçant la convection (ventilation). Le comportement thermique suit les lois de Kirchhoff des circuits linéaires pour être modélisé classiquement tel que l'on voit sur la Figure 2.6 :

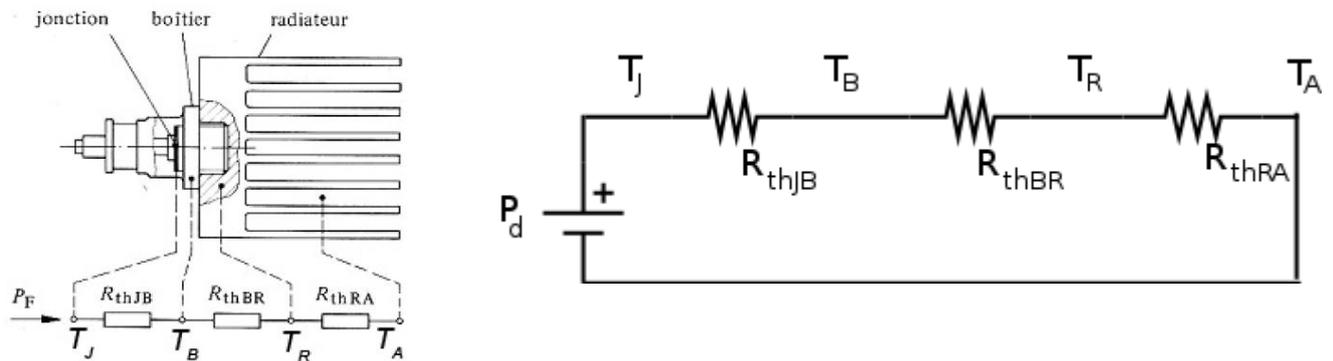


Figure 2. 6: Le radiateur et modèle thermique équivalent

## III. Notion de résistance thermique

### III.1 Définition

Une résistance électrique est le rapport entre la différence de tension aux bornes de l'élément considéré et le courant qui le traverse.

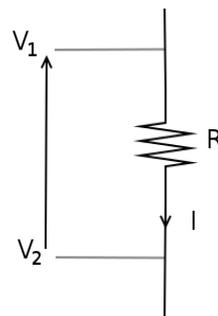


Figure 2. 7: Une résistance électrique

Nous pouvons faire une analogie pour définir la résistance thermique.

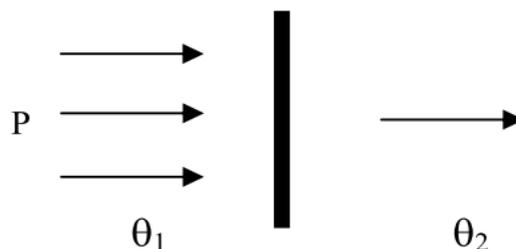


Figure 2. 8: Dissipation de puissance thermique à travers un matériau

Une puissance  $P$  à dissiper provoque une élévation de température  $\theta_1$  du matériau. On retrouvera une température  $\theta_2$  inférieure à  $\theta_1$  à l'extérieur de celui-ci.

On conçoit que plus la résistance thermique du matériau est élevée, moins il aura tendance à céder sa chaleur au milieu ambiant.

L'expression de la résistance thermique est donc :

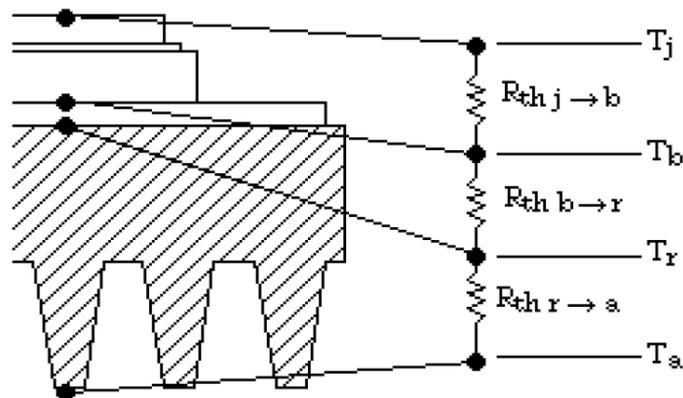
$$R_{TH} = \frac{\theta_1 - \theta_2}{P} \quad [^{\circ}C/W] \quad (2.3)$$

Tout comme pour une résistance électrique, plus celle-ci est faible, plus le courant passe facilement. Pour une résistance thermique, plus elle est faible plus la chaleur est facilement évacuée et moins le composant chauffe.

La résistance thermique [15] d'un matériau est principalement fonction de :

- La surface de contact entre les matériaux. Plus elle est importante, plus la résistance thermique est faible.
- La nature du matériau, l'air est un bon isolant thermique. L'acier, le cuivre sont de bons conducteurs thermiques, leur résistance thermique sera donc faible.
- Type de revêtement du matériau (le noir mat aura une résistance thermique plus faible que le revêtement blanc brillant)

Voici un schéma expliquant cette loi d'Ohm :



**Figure 2. 9:** Schéma expliquant la loi d'Ohm thermique

Avec :

La puce est à la température  $T_j$ , et le boîtier du transistor à la température  $T_b$ .

Le transistor a une résistance thermique  $R_{thj \rightarrow b}$  qui va déterminer son aptitude à évacuer les calories produites dans la jonction. On peut écrire la loi d'Ohm thermique pour ce composant :

$$R_{thj \rightarrow b} = \frac{T_j - T_b}{P} \quad (2.4)$$

Ensuite, on rencontre la fixation/ isolation du transistor sur le radiateur : on va la caractériser par la résistance thermique boîtier / radiateur  $R_{thb \rightarrow r}$  :

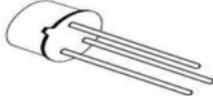
$$R_{thb \rightarrow r} = \frac{T_b - T_r}{P} \quad (2.5)$$

Enfin, il y a la liaison entre le radiateur et l'air ambiant, définie par la résistance thermique du radiateur  $R_{thr \rightarrow a}$  :

$$R_{thr \rightarrow a} = \frac{T_r - T_a}{P} \quad (2.6)$$

Le tableau ci-contre montre la résistance thermique et la dissipation maximale typique de quelques boîtiers usuels de transistors, mais pour plus de précision il faut consulter le datasheet :

**Tableau 8:** Valeur de la résistance thermique de quelques transistors usuels

	Boîtier	Nom	Jonction vers ambiant (°C/W)	Jonction vers boîtier (°C/W)
Petits signaux		TO202	100	10
		TO92	200	83.3
		TO18	300	80
		TO39	190	50
		TO220	50	5
Puissance		TO3	35	4
		SOT32 ou TO126	100	10

### III.2 Utilisation en électronique avec exemple de calcul

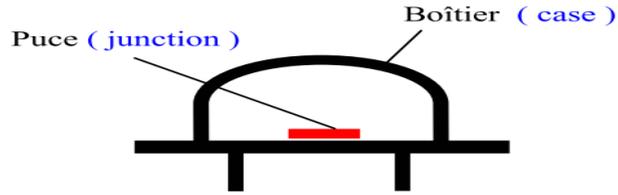


Figure 2. 10: Composant électronique avec protection thermique

La chaleur doit partir de la source (jonction) jusqu'à l'air ambiant. Les Résistances thermiques rencontrées seront donc :

$R_{TH JC}$ : Jonction/ Boîtier (Case)

$R_{TH CA}$  : boîtier / ambiante

On doit avoir :

$$R_{TH} = \frac{\theta_J - \theta_{amb}}{P}$$

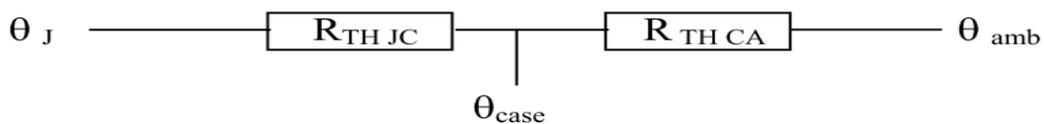


Figure 2. 11: Schématisation du transfert de chaleur directe jonction- ambiante

#### Exemple :

Soit une Puissance de 10 W à évacuer sous forme thermique. Quelle est la résistance thermique maximum du composant lui permettant de dissiper (évacuer vers l'extérieur) la chaleur ?

On prendra :  $\theta_{J_{max}} = 150\text{ }^\circ\text{C}$        $\theta_{amb} = 50\text{ }^\circ\text{C}$  (au voisinage du composant)

Soit  $R_{THT} = (150 - 50)/ 10 = 10\text{ }^\circ\text{C} / \text{W}$

La résistance thermique totale du composant devra être inférieure à  $10\text{ }^\circ\text{C} / \text{W}$

Sinon, il va falloir recourir à un dispositif de refroidissement (dissipateur, ventilateur etc...)

### III.3 Utilisation d'un radiateur avec exemple de calcul

Si la  $R_{THJamb}$  donnée par le constructeur est inférieure à la résistance calculée, il est nécessaire d'aider le composant à évacuer la chaleur.

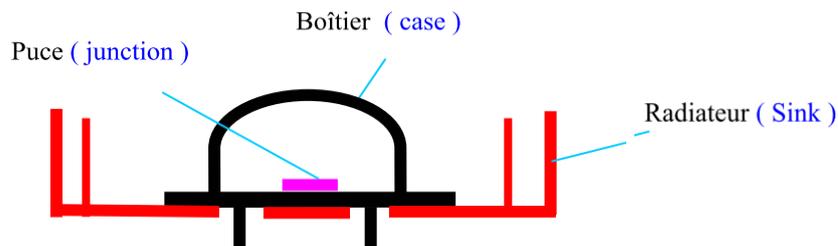
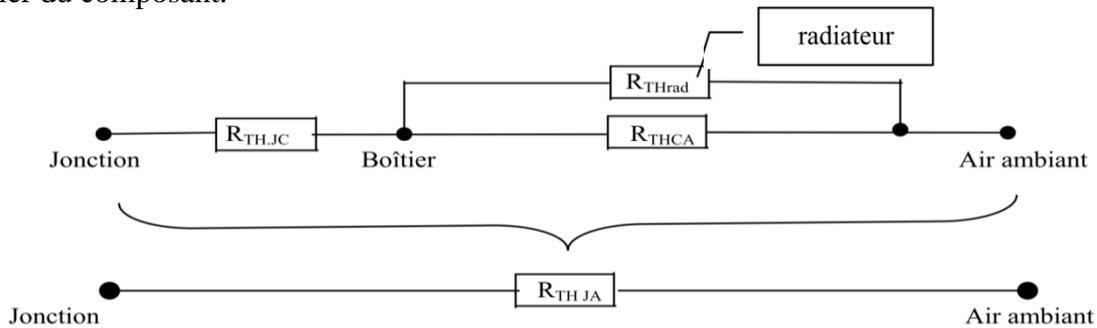


Figure 2. 12: Composant électronique avec protection thermique et radiateur

On néglige la résistance du boîtier du composant ( $R_{THCA}$ ) en considérant que celui-ci participe peu à l'évacuation de la chaleur. La résistance thermique du dissipateur se substitue à celle du boîtier du composant.



**Figure 2.13:** Schématisation du transfert thermique jonction-ambiant avec radiateur

### Exemple :

Soit une puissance de  $P = 20 \text{ W}$  à évacuer sous forme thermique.

Nous évaluons la température au voisinage du composant comprise entre  $10^\circ\text{C}$  et  $50^\circ\text{C}$ .

Les caractéristiques du composant sont :

$$\begin{aligned}\theta_J &= 150^\circ\text{C} \\ R_{THJC} &= 1.2^\circ\text{C/W} \\ R_{THJ_{amb}} &= 35^\circ\text{C/W}\end{aligned}$$

Le composant doit donc avoir une résistance thermique au plus de :

$$R_{THT} = \frac{\theta_J - \theta_{amb}}{P} = \frac{150 - 50}{20} = 5^\circ\text{C/W}$$

La  $R_{THJ_{amb}}$  étant de  $35^\circ\text{C/W}$  ; il faut « aider » le composant.

La résistance thermique du radiateur sera donc  $R_{THTrad} = R_{THT} - R_{THJC} = 5 - 1,2^\circ\text{C/W} = 3,8^\circ\text{C/W}$ .

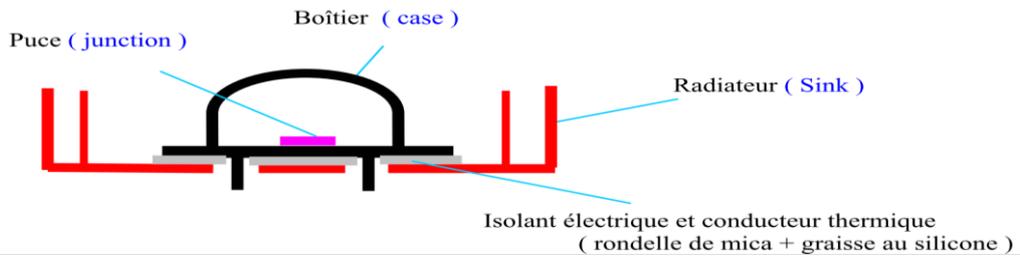
**La résistance thermique** du radiateur devra donc être au **maximum de  $3,8^\circ\text{C/W}$** .

## III.4 Utilisation et montage

### III.4.1 Isolation électrique entre le composant et le dissipateur

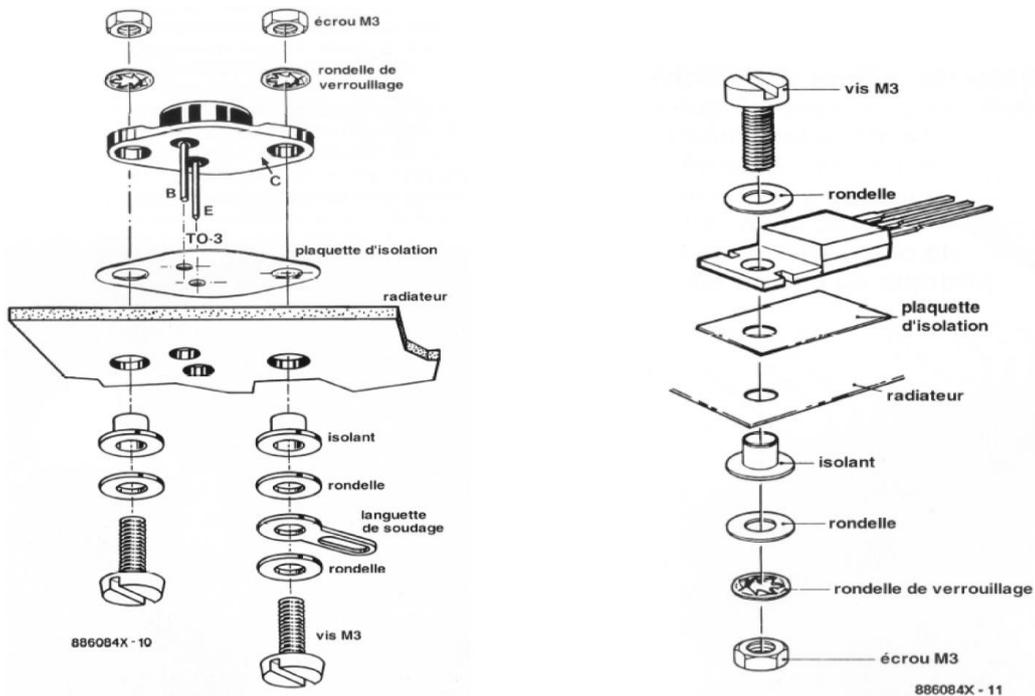
Le boîtier d'un composant de puissance n'est pas forcément isolé du circuit électrique et de ce fait peut être porté à un potentiel élevé. De plus plusieurs composants peuvent partager le même dissipateur et donc occasionner des courts-circuits.

Il conviendra donc dans ces conditions **d'isoler électriquement** mais **non thermiquement** le boîtier du composant, du dissipateur.



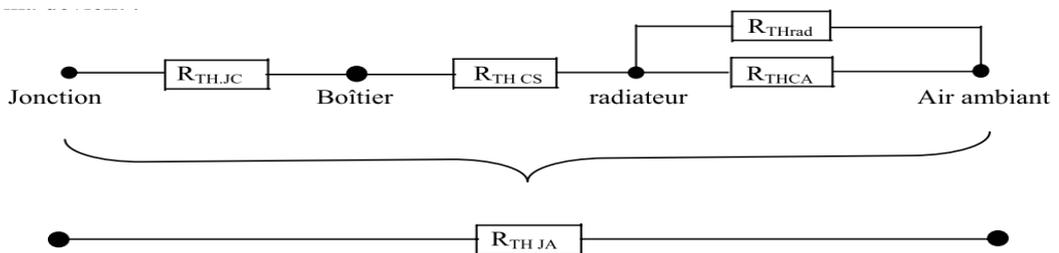
**Figure 2. 14:** Rajout d’une isolation électrique entre le composant et le dissipateur

Ceci sera réalisé par l’interposition d’une rondelle de mica entre le composant et le radiateur. On pourra également utiliser des vis en nylon et/ou des canons isolants pour la fixation du composant.



**Figure 2. 15:** Montage avec isolation électrique

Le schéma devient :



**Figure 2. 16:** Schématisation du transfert thermique jonction- radiateur- ambiant et isolant

$R_{THCS}$  = Résistance thermique boîtier / radiateur.

Il conviendra bien évidemment de tenir compte de cet ajout dans le calcul du dissipateur.  $R_{THCS}$  sera ajoutée à la résistance thermique jonction / boîtier du composant.

### III.4.2 Amélioration du contact entre le dissipateur et le composant, montage

Le contact entre le composant et le dissipateur devant être le meilleur possible, le serrage des vis de fixation doit être suffisant.

Il est également recommandé d'utiliser systématiquement de la graisse à la silicone (isolant électrique et bon conducteur thermique) entre le radiateur et le composant.

La position et l'endroit où est placé le dissipateur est un facteur important. Il ne faut pas oublier que la chaleur dissipée doit être cédée au milieu ambiant. Il conviendra donc que l'air puisse circuler librement autour du dissipateur. Des trous d'aération ou bien même un ventilateur peuvent être nécessaires.

Ne pas oublier que la chaleur monte. Pour favoriser la dissipation thermique ce mouvement ne doit pas être contrarié. Ne pas placer de radiateur sous un boîtier ou une carte. Disposer les ailettes du radiateur verticalement.

### III.5 Applications : mise en évidence de l'importance des dissipateurs thermiques pour un transistor

Voyons quelques exemples pour illustrer l'importance d'un dissipateur thermique [16] :

#### Exemple 1 :

Soit le montage suivant :

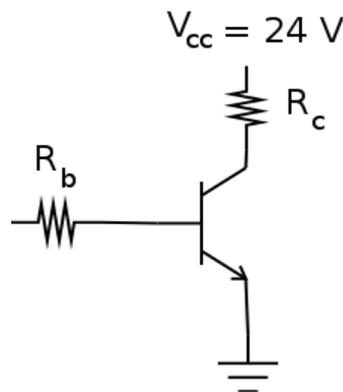


Figure 2. 17: Schéma du montage du transistor 2N5877 (NPN)

La température ambiante maximale est de  $50^{\circ}\text{C}$ ,  $R_c$  est une résistance de chauffage ayant pour caractéristique :  $U_n = 24 \text{ V}$  ;  $P_n = 48 \text{ W}$  ;  $R$  à froid =  $1,5 \Omega$  et  $R$  à chaud =  $12 \Omega$ .

On a un transistor 2N5877 :

$20 < \beta_{FE} < 50$	boîtier T03	$P_{\text{Max}} = 150 \text{ W}$	$I_{\text{Cmax}} = 10 \text{ A}$
$V_{\text{CEsat}} = 1 \text{ V}$	$\theta_{j\text{Max}} = 125^{\circ}\text{C}$	$R_{\text{TH CA}} = 30^{\circ}\text{C/W}$	$V_{\text{CE0}} = 60 \text{ V}$
$R_{\text{TH JC}} = 2^{\circ}\text{C/W}$	$t_{\text{ON}} = 2\mu\text{s}$		

Le transistor est saturé :

- calculons la puissance que devra dissiper le transistor
- montrons qu'un dissipateur sera nécessaire

**Réponse :**

- on a  $P = V_{CC} \cdot I_C$

$$I_C = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_C} \Rightarrow P = V_{CE} \left( \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_C} \right) = 1 \cdot \left( \frac{24 - 1}{12} \right) = 1,9 \text{ W}$$

- a-t-on besoin d'un radiateur ?

Recherchons la résistance thermique nécessaire pour évacuer cette puissance

$$R_{TH} = \frac{\theta_j - \theta_{amb}}{P} = \frac{125 - 50}{1,9} = 39,5^\circ\text{C/W}$$

$R_{TH} > R_{THJC} + R_{THCA} \Rightarrow$  un dissipateur n'est donc pas nécessaire

**Exemple 2 :**

Un transistor MOS de puissance maintenu en fonctionnement dans la zone ohmique est traversé par un courant  $I_D = 30 \text{ A}$ . Sa résistance Drain-Source vaut alors  $R_{DS} = 0,1 \ \Omega$ .

Pour ce composant, les données constructeur indiquent :

Température de Jonction	$-55^\circ\text{C} < T_j < 150^\circ\text{C}$
Résistance thermique Jonction/Air	$R_{ThJA} = 40^\circ\text{C/W}$
Résistance thermique Jonction/Boîtier	$R_{ThJB} = 0,2^\circ\text{C/W}$
Résistance thermique Boîtier/radiateur	$R_{ThBR} = 0,24^\circ\text{C/W}$

Montrons que le transistor ne peut pas fonctionner de façon permanente dans de l'air à  $T_A = 25^\circ\text{C}$  sans être équipé d'un radiateur et calculons la résistance thermique maximum de son radiateur de refroidissement.

**Réponse :**

La puissance dissipée dans le transistor MOS est :  $P = R_{DS} \cdot I_D^2 = 0,1 * 30^2 = 90 \text{ W}$

**Sans radiateur :**  $T_j - T_A = R_{ThJA} \cdot P = 40 \cdot 90 = 3600^\circ\text{C} \Rightarrow T_j = T_A + 3600 = 3625^\circ\text{C} > 150^\circ\text{C}$

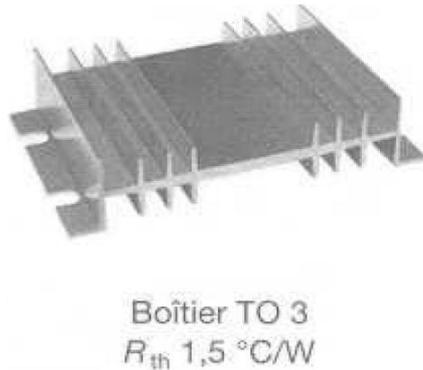
$\Rightarrow$  Le transistor MOS est donc détruit s'il n'est pas équipé d'un radiateur.

On sait qu'en présence d'un radiateur, à l'équilibre thermique :  $T_j - T_A = (R_{ThJB} + R_{ThBR} + R_{ThRA}) \cdot P$

Donc :

$$150 - 25 \geq (0,2 + 0,24 + R_{ThRA}) \cdot 90 \Rightarrow R_{ThRA} \leq \frac{125 - 25}{90} - (0,2 + 0,24) = 0,95^\circ\text{C/W}$$

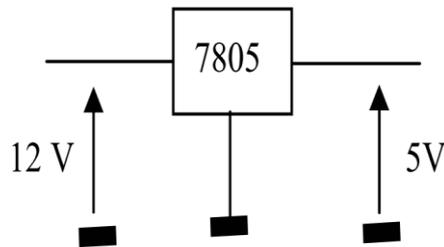
On pourra choisir un radiateur pour boîtier T03 (voire annexe2).



**Figure 2. 18:** Radiateur pour boîtier T03 à  $R_{th} = 1,5 \text{ °C/W}$

**Exemple 3 :**

On désire obtenir une tension de 5 V continue à partir d'une tension de 12 V continue. Nous utiliserons pour cela un régulateur de tension linéaire intégré de type LM7805 en boîtier T03.



**Figure 2. 19:** schéma du montage avec le LM7805

Le rôle de celui-ci est de donner une tension constante quelque soit la tension d'entrée.

La température ambiante au voisinage du régulateur est évaluée à 40 °C

Les caractéristiques du composant sont les suivantes :

$$V_{INMAX} = 35 \text{ V} \quad R_{THJC} = 1,5 \text{ °K/W} \quad V_{OUT} = 5 \text{ V} \quad R_{THJamb} = 28 \text{ °K/W}$$

$$I_{OUTMAX} = 3 \text{ A} \quad \text{Boîtier T03} \quad \theta_{JMAX} = 150 \text{ °C}$$

- trouvons le courant maximum disponible si l'on n'utilise pas le radiateur
- si on a besoin d'un courant de 1,5 A. Quel dissipateur choisir ?

**Réponse :**

- on dispose d'une résistance thermique totale (de la puce jusqu'à l'air ambiant) de 28 °K/W

$$\text{Soit : } R_{TH} = \frac{\theta_J - \theta_{amb}}{P} \Rightarrow P = \frac{\theta_J - \theta_{amb}}{R_{TH}} = \frac{150 - 40}{28} = 3,93 \text{ W}$$

Nous pouvons en déduire le courant sachant que  $P = U \cdot I$

$$P = (V_{IN} - V_{OUT})I \Rightarrow I = \frac{P}{V_{IN} - V_{OUT}} = \frac{3,93}{12 - 5} = 561 \text{ mA}$$

- calcul du radiateur si on désire un courant de 1,5 A.

$$P = (V_{IN} - V_{OUT})I = (12 - 5)1,5 = 10,5 \text{ W}$$

$$\Rightarrow R_{TH} = \frac{\theta_J - \theta_{amb}}{P} \Rightarrow R_{TH} = \frac{150-40}{10,5} = 10,47 \text{ }^\circ\text{C/W (ou } ^\circ\text{K/W)}$$

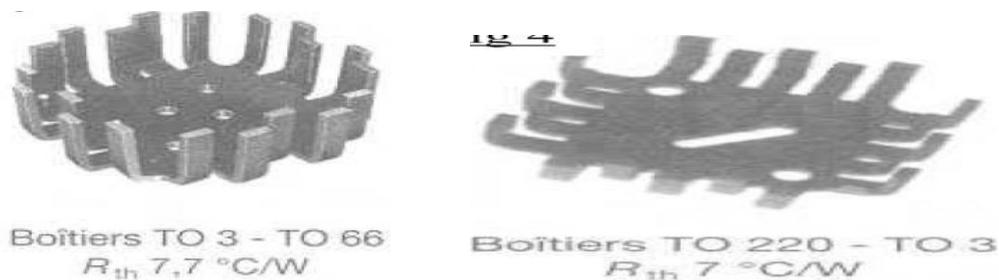
Cette résistance thermique est inférieure à la résistance thermique jonction - ambiant du composant, un radiateur est donc nécessaire :

$$10,47 = R_{TH\ rad} + R_{TH\ JC}$$

$$R_{TH\ rad} = 10,47 - R_{TH\ JC}$$

$$R_{TH\ rad} = 8,97 \text{ }^\circ\text{C/W}$$

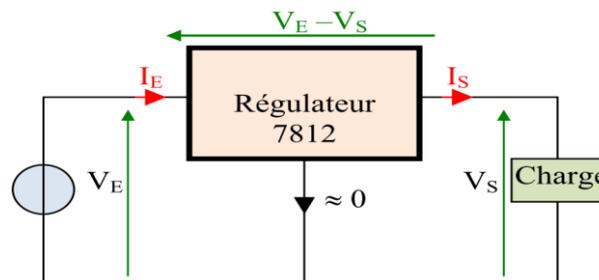
Le radiateur choisi sera donc un radiateur qui a 7,7 °C/W ou 7 °C/W



**Figure 2. 20:** Les radiateurs choisis pour l'exemple 3

#### Exemple 4 :

Le régulateur intégré 7812 ci-contre reçoit une tension d'entrée de  $V_E = 18 \text{ V}_{DC}$  et délivre, en sortie, un courant  $I_S = 500 \text{ mA}$  sous une tension de  $V_S = 12 \text{ V}_{DC}$ . Montrer que le régulateur ne peut pas fonctionner de façon permanente dans l'air à  $T_A = 35^\circ\text{C}$  sans être équipé d'un radiateur.



**Figure 2. 21:** Schéma du montage avec le LM7812

Données constructeur :

Température de Jonction	$-40 \text{ }^\circ\text{C} < T_j < 125 \text{ }^\circ\text{C}$
Résistance thermique Jonction/Air	$R_{ThJA} = 65 \text{ }^\circ\text{C/W}$
Résistance thermique Jonction/Boîtier	$R_{ThJB} = 5 \text{ }^\circ\text{C/W}$
Résistance thermique Boîtier/radiateur	$R_{ThBR} = 0,3 \text{ }^\circ\text{C/W}$

Calculons la résistance thermique maximum  $R_{ThRA}$  du radiateur nécessaire pour permettre un fonctionnement permanent du régulateur dans les conditions décrites ci-dessus avec de l'air à  $T_A = 35^\circ\text{C}$  et une température de jonction ne dépassant pas  $T_J = 125^\circ\text{C}$ .

**Réponse :**

- sans radiateur de refroidissement :

$$P = (V_E - V_S) \cdot I_S = (18 - 12) \cdot 0,5 = 3 \text{ W} \Rightarrow T_J - T_A = R_{ThJA} \cdot P = 65 \cdot 3 = 195^\circ\text{C}$$

$$\Rightarrow T_A = 195 + 35 = 230^\circ\text{C} > 125^\circ\text{C}$$

Donc destruction du composant (ou mise en défaut) lors d'un fonctionnement permanent sans radiateur.

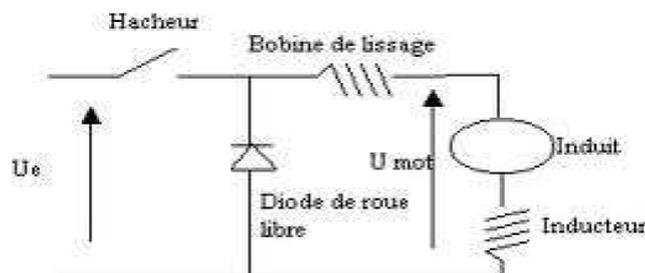
- avec un radiateur :

$$T_J - T_A = (R_{ThJB} + R_{ThBR} + R_{ThRA}) \cdot P \Leftrightarrow R_{ThRA} = \frac{T_J - T_A}{P} - R_{ThJB} - R_{ThBR} = \frac{90}{3} - 5 - 0,3$$

$$= 24,7^\circ\text{C/W}$$

**Exemple 5 :**

On a 2 MOSFET en parallèle dans un hacheur série sous 12 V qui commute un courant de 10 A chacun à la fréquence de 20 kHz :



**Figure 2. 22:** Schéma du montage hacheur avec transistor MOSFET

Voici la datasheet du composant :

**ABSOLUTE MAXIMUM RATING**

Symbol	Parameter	Value	Unit
$V_{DS}$	Drain-source Voltage ( $V_{in} = 0$ )	Internally Clamped	V
$V_{in}$	Input Voltage	18	V
$I_D$	Drain Current	Internally Limited	A
$I_R$	Reverse DC Output Current	-14	A
$V_{esd}$	Electrostatic Discharge ( $C = 100 \text{ pF}$ , $R = 1.5 \text{ K}\Omega$ )	2000	V
$P_{tot}$	Total Dissipation at $T_c = 25^\circ\text{C}$	50	W
$T_J$	Operating Junction Temperature	Internally Limited	$^\circ\text{C}$
$T_c$	Case Operating Temperature	Internally Limited	$^\circ\text{C}$
$T_{stg}$	Storage Temperature	-55 to 150	$^\circ\text{C}$

**THERMAL DATA**

$R_{thj-case}$	Thermal Resistance Junction-case	Max	2.5	$^\circ\text{C/W}$
$R_{thj-amb}$ <td>Thermal Resistance Junction-ambient</td> <td>Max</td> <td>62.5</td> <td><math>^\circ\text{C/W}</math></td>	Thermal Resistance Junction-ambient	Max	62.5	$^\circ\text{C/W}$

ON (\*)

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
$V_{IN(th)}$	Input Threshold Voltage	$V_{DS} = V_{in}$ $I_D + I_{in} = 1 \text{ mA}$	0.8		3	V
$R_{DS(on)}$	Static Drain-source On Resistance	$V_{in} = 10 \text{ V}$ $I_D = 5 \text{ A}$ $V_{in} = 5 \text{ V}$ $I_D = 5 \text{ A}$			0.1 0.14	$\Omega$

**ELECTRICAL CHARACTERISTICS** (continued)  
SWITCHING (\*\*)

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
$t_{d(on)}$ $t_r$ $t_{d(off)}$ $t_f$	Turn-on Delay Time Rise Time Turn-off Delay Time Fall Time	$V_{DD} = 15\text{ V}$ $I_d = 5\text{ A}$ $V_{gen} = 10\text{ V}$ $R_{gen} = 10\ \Omega$ (see figure 3)		50 80 230 100	100 160 400 180	ns ns ns ns
$t_{d(on)}$ $t_r$ $t_{d(off)}$ $t_f$	Turn-on Delay Time Rise Time Turn-off Delay Time Fall Time	$V_{DD} = 15\text{ V}$ $I_d = 5\text{ A}$ $V_{gen} = 10\text{ V}$ $R_{gen} = 1000\ \Omega$ (see figure 3)		600 0.9 3.8 1.7	900 2 6 2.5	ns $\mu\text{s}$ $\mu\text{s}$ $\mu\text{s}$
$(di/dt)_{on}$	Turn-on Current Slope	$V_{DD} = 15\text{ V}$ $I_D = 5\text{ A}$ $V_{in} = 10\text{ V}$ $R_{gen} = 10\ \Omega$		60		A/ $\mu\text{s}$
$Q_i$	Total Input Charge	$V_{DD} = 12\text{ V}$ $I_D = 5\text{ A}$ $V_{in} = 10\text{ V}$		30		nC

Étude par MOSFET :

Il peut dissiper une puissance maximum de 50 W. Dans un MOSFET, il y a pertes par conduction, et les pertes par commutation.

Calcul de la puissance à dissiper par le composant :

- Perte par conduction :  $P_C = R_{DS(on)} * I_{eff}^2 = 0,1 * 10^2 = 10\text{ W}$

$R_{DS(ON)}$  : résistance interne du composant.

$I_{eff}$  : courant traversant le MOSFET

- Perte par commutation :

$$P_f = \frac{1}{2} * V_{DS} * I_{eff} * (t_r + t_f) * f = \frac{1}{2} * 12 * 10 * (2 * 10^{-6}) * 20000 = 2,4\text{ W}$$

J'ai pris 1  $\mu\text{s}$  pour temps de montée et 1  $\mu\text{s}$  de descente car peu de MOSFET ont un temps supérieur à cette durée, puis ça fait prendre un peu de marge

$V_{DS}$  : Tension Drain-source

$I_d$  : courant traversant le MOSFET

$t_r$  et  $t_f$  : temps de montée et de descente du composant

$f$  : sa fréquence de commutation

$$P_{tot} = P_C + P_f = 10 + 2,4 = 12,4\text{ W}$$

D'après la datasheet, le composant à une résistance thermique total (sans dissipateur) de 62,5 °C/W. Avec une température de jonction maximale de 150 °C, on a :

$$T_a = 12,4 * 62,5 = 775\text{ °C}$$

⇒ Un dissipateur est donc obligatoire si l'on veut que le composant dissipe toute cette puissance thermique sans cramer. On remarque dans la datasheet que le constructeur indique une résistance thermique entre la puce, et le boîtier de 2,5 °C/W.

On ne veut pas que la température dépasse 100 °C (on prend une marge de sécurité pour le composant et on néglige la fixation isolation du transistor qui est en général de 1 °C/W), et le composant est dans un milieu à 40 °C.

Donc la différence de température nous donne un  $\Delta T$  de 60 °C avec un P de 12,4 W :

$$R = \Delta T / P = 60 / 12,4 = 4,83 \text{ °C/W}$$

Ce résultat de R, comprend la résistance thermique total, avec le dissipateur. Sachant que le constructeur nous donne la résistance thermique de la puce au boîtier, de 2,5 °C/W, le dissipateur doit donc dissiper  $4,83 - 2,5 = 2,33 \text{ °C/W}$ .

Voyons maintenant quelques types de refroidissement usuels [17].

## IV. Différents types de refroidissement

### IV.1 Systèmes de refroidissement par air

#### IV.1.1 Convection forcée dans l'air

Le soufflage d'air forcé grâce à des ventilateurs est la méthode la plus utilisée en refroidissement de composants électroniques de par sa simplicité de mise en œuvre, de son coût et de sa stabilité. L'air est mis en mouvement par le biais de générateur d'écoulement comme le montre l'exemple de la figure 2.23. Le coefficient d'échange h est de l'ordre de 10 à 500  $\text{W.m}^{-2}.\text{k}^{-1}$ .

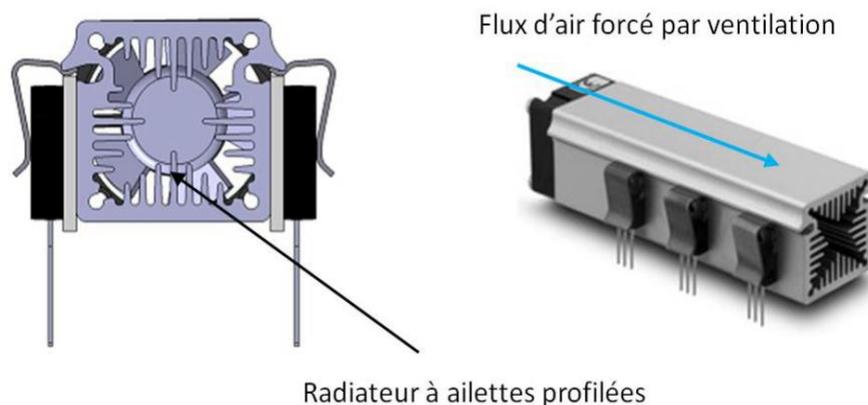
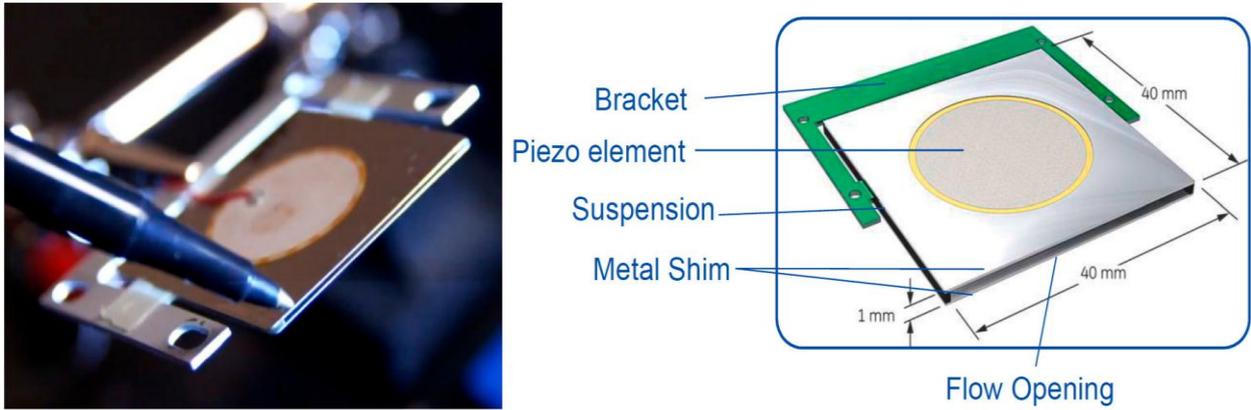


Figure 2. 23: Système de refroidissement par air [18]

#### IV.1.2 La pompe piézoélectrique

La pompe à air piézoélectrique dit « dual piezo cooling jet » est un appareil microfluidique d'environ 1mm d'épaisseur. Cet appareil est composé de deux disques de nickel qui sont connectés de chaque côté par un matériau piézoélectrique en céramique alimenté par un courant alternatif.

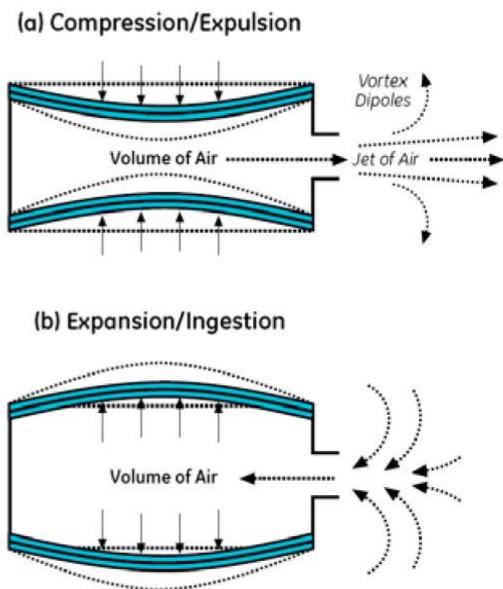
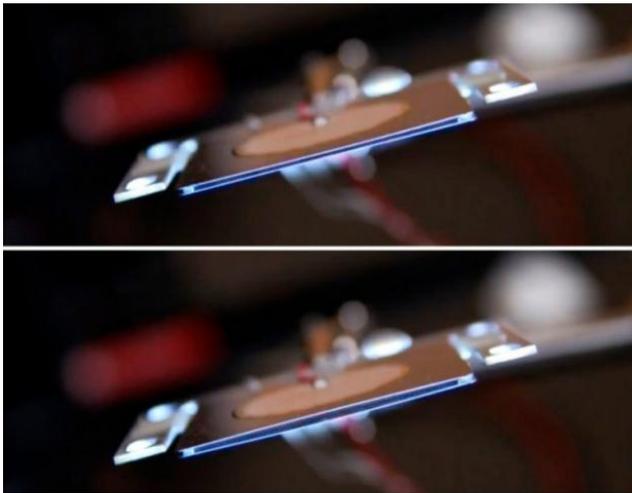


**Figure 2. 24:** Le dual cooling jet [19].

L'appareil fonctionne comme le poumon. Lorsqu'un courant alternatif passe à travers les céramiques, les deux disques piézoélectriques vibrent à une fréquence plus de 100 Hz.

Contractés, les disques de nickel sont poussés simultanément et propulsent l'air chaud à grande vitesse. L'expansion des deux disques assure l'aspiration de l'air chaud.

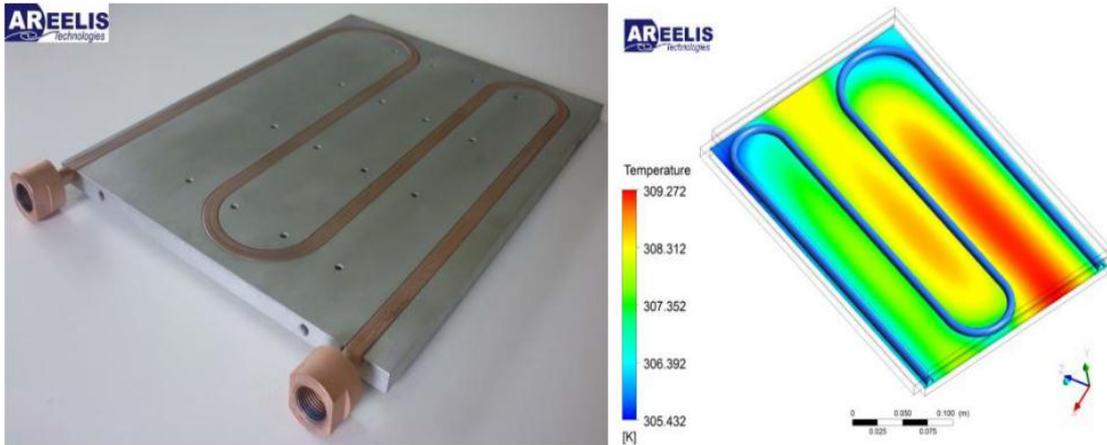
Cet appareil est silencieux et ne requiert aucun moteur. Il est fin et consomme moins d'énergie que les ventilateurs conventionnels.



**Figure 2. 25:** Principe de fonctionnement de la pompe piézoélectrique

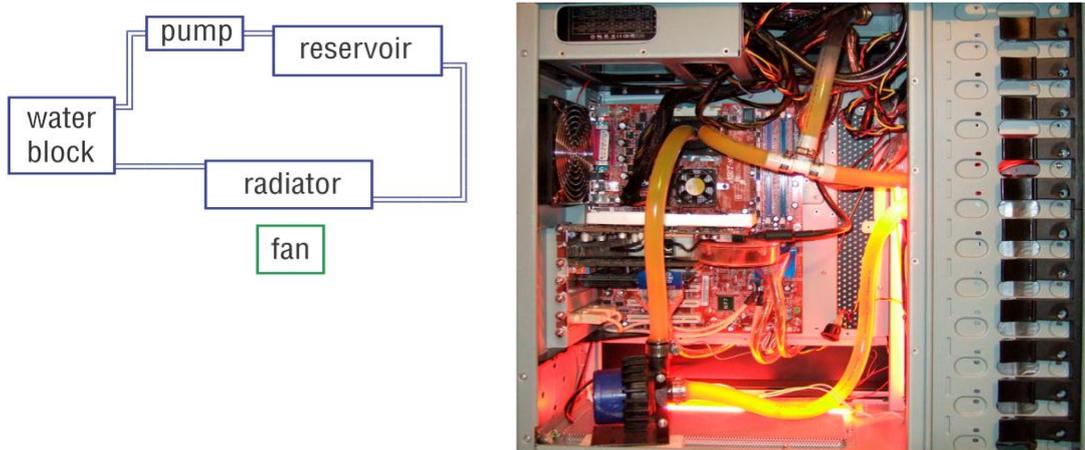
#### IV.2 Le refroidissement par liquide

Le refroidissement par liquide est une méthode très efficace pour enlever les excès de température. Il est implémenté dans les composants électroniques sous la forme d'une plaque à eau dans laquelle circule un liquide caloporteur ou de canalisation fluidique accolées aux parois à refroidir. Un système composé principalement d'une pompe et d'un échangeur permet d'évacuer la chaleur contenue dans le liquide caloporteur vers l'extérieur du serveur.



**Figure 2. 26:** Refroidissement liquide à plaque froide [20].

Le fluide frigorigène le plus commun dans les ordinateurs de bureau est l'eau distillée. Les avantages du refroidissement par eau par rapport au refroidissement par air incluent la capacité thermique spécifique de l'eau ainsi que sa conductivité thermique.

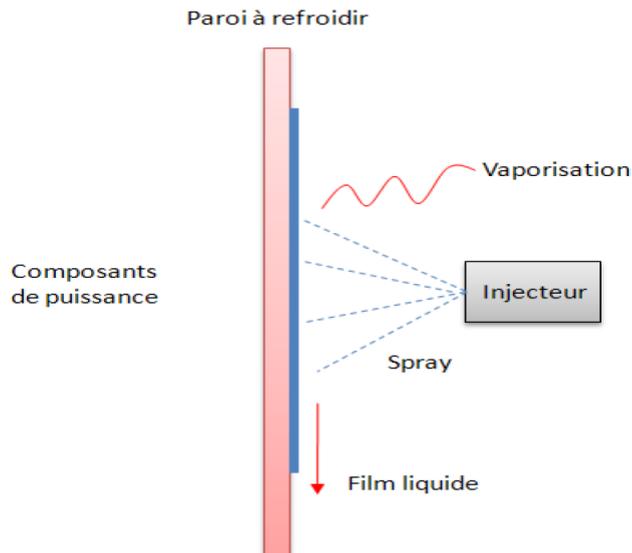


**Figure 2. 27:** Schéma d'un refroidissement régulier à liquide configuré pour un ordinateur [21]

### IV.3 Spray cooling

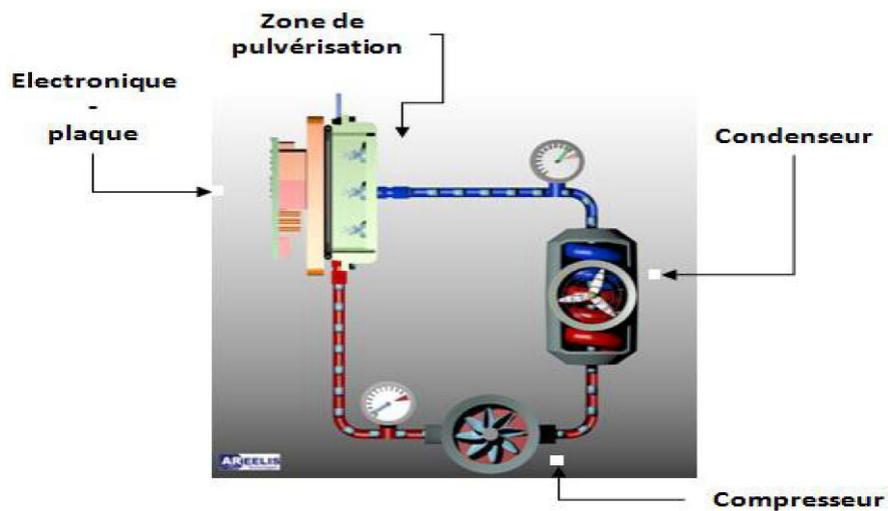
Avec les liquides, plusieurs solutions sont possibles : utiliser le fluide comme simple caloporteur, augmenter les échanges convectifs par des jets, ou bénéficier de l'évaporation du liquide. Le refroidissement à l'aide d'un jet de liquide atomisé ou « spray cooling » exploite ces trois modes. Le principe consiste à pulvériser un liquide proche de la paroi que l'on souhaite refroidir. Les échanges se produisent au niveau de :

- L'impact des gouttelettes du jet atomisé sur la paroi produisant un échange convectif élevé du fait de leur vitesse.
- l'évaporation de la gouttelette qui capte l'énergie thermique de la paroi pour compenser l'énergie utilisée pour le changement de phase.
- L'évacuation de la chaleur par le film liquide formé à la surface de la paroi.



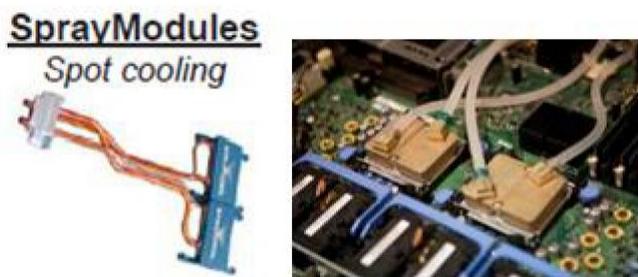
**Figure 2. 28:** Principe du spray cooling [22].

La figure 2.29 montre les différents organes d'un système spray cooling : condenseur, compresseur, plaque et zone de pulvérisation.



**Figure 2. 29:** Description des différents organes du spray cooling

Cette technique est très efficace pour refroidir l'électronique de puissance. La figure 2.30 présente des exemples de modules spray cooling pour le refroidissement des composants électroniques.



**Figure 2. 30:** Exemples de modules de spray cooling

#### IV.4 Refroidissements par jets

Le refroidissement par jets est une solution privilégiée dans les applications industrielles lorsque l'on cherche à extraire, ou bien à apporter un flux de chaleur intense sur une surface. Dans le domaine de l'électronique, l'augmentation perpétuelle de la puissance dissipée par les composants modernes, ainsi que le souci permanent de compacité ont conduit au besoin de trouver des solutions efficaces au problème de l'extraction de chaleur en milieu confiné. Dans le cas des super- calculateurs, un jet de fluide diélectrique peut être utilisé en projection directe sur les éléments semi-conducteurs.

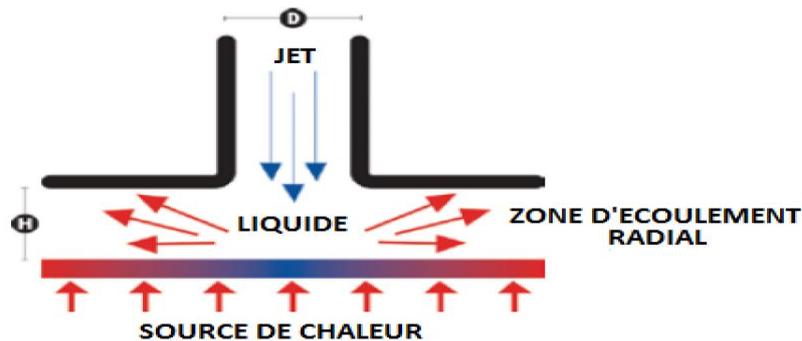


Figure 2. 31: Refroidissement par jets [23].

#### IV.5 Refroidissement par caloducs

Le caloduc est un système de refroidissement diphasique fermé dont le fonctionnement est basé sur une circulation en boucle fermée du fluide caloporteur. Les caloducs sont caractérisés par :

- Une conductivité thermique très élevée
- Un fonctionnement quasi isotherme
- Un contrôle de la température

Ils fonctionnent sans aucune pièce en mouvement ce qui réduit le bruit et nécessite peu de maintenance. Les forces générant la circulation du fluide caloporteur peuvent être aussi : capillaires, électrostatiques, magnétiques ou osmotiques.

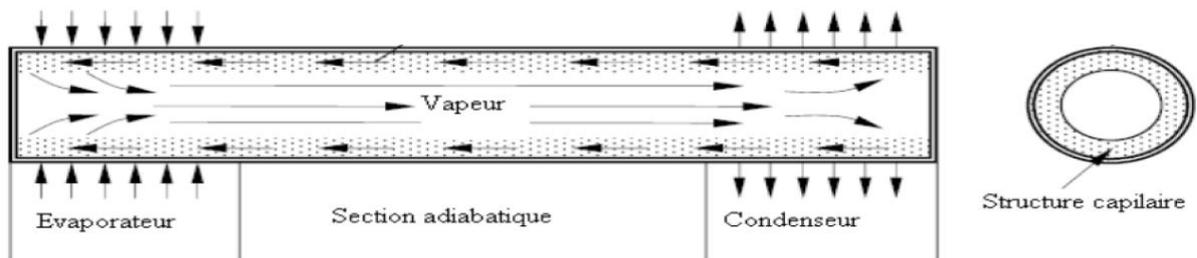


Figure 2. 32: Schéma de principe d'un caloduc [24].

Pour l'utilisation du tube à chaleur dans les ordinateurs, le dissipateur thermique sur le processeur est attaché à un large radiateur. Les deux dissipateurs sont creux et se sont attachés créant un grand tube à chaleur qui transfère la chaleur du processeur vers les radiateurs.



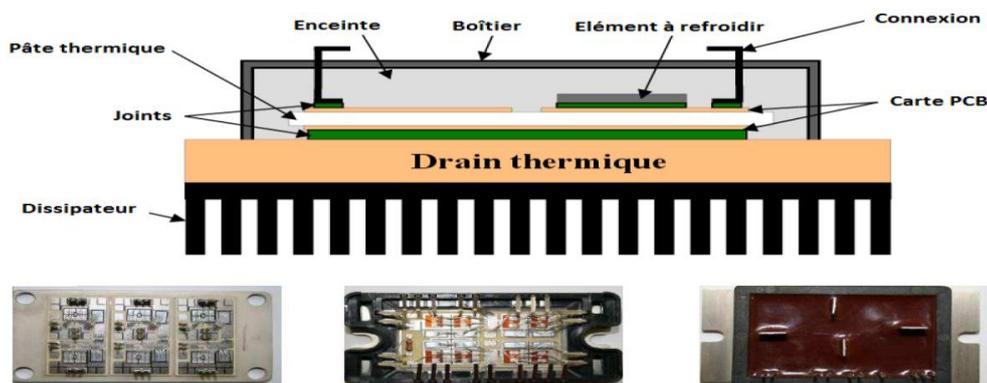
**Figure 2. 33:** Dissipateur thermique avec un ventilateur et un tube à chaleur

#### IV.6 Drain thermique

L'évacuation de la chaleur par conduction thermique est préférée lorsque, pour des problèmes de poids, d'encombrement et de coûts, l'utilisation de la convection thermique n'est pas possible. La conduction thermique est retenue pour des composants de faible puissance thermique ( $< 10 \text{ W}$ ).

Un drain thermique est composé :

- D'une structure métallique (cuivre, étain, acier ...) permettant de conduire et de dissiper la thermique
- De pâte thermique (Sil-Pad, Gap-Pad...) permettant de réaliser le contact entre l'élément à refroidir et la structure métallique
- D'ailettes de ventilation

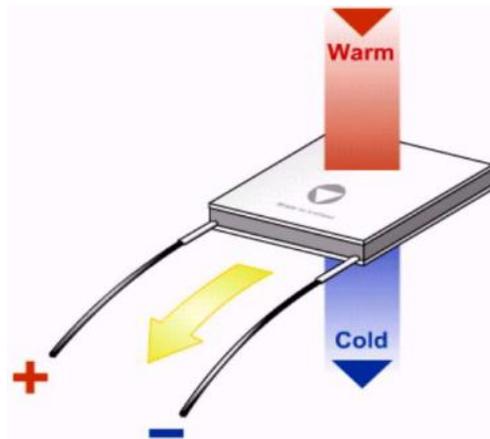


**Figure 2. 34:** Principe et exemples de dissipateurs thermiques externes [25].

#### IV.7 Refroidissement par effet Peltier

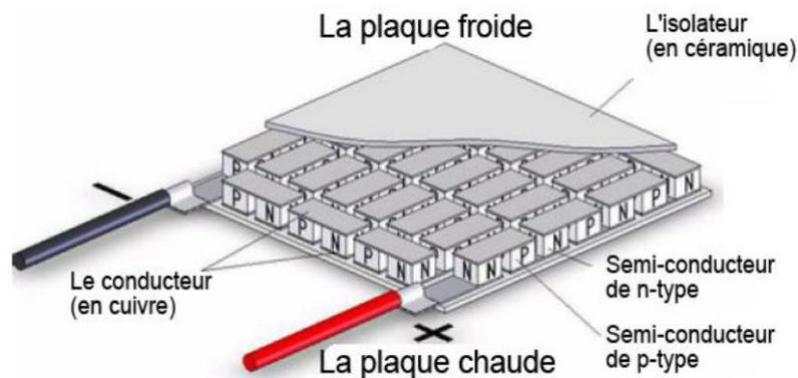
Une possibilité de produire de la réfrigération sans faire intervenir des mécanismes et des écoulements de fluides frigorigènes est d'utiliser un refroidisseur qui s'appuie sur les effets thermoélectriques. En considérant un circuit fermé formé de deux fils conducteurs, fait de matériaux différents, en contact à chaque extrémité. En chauffant une des jonctions, un courant électrique se met à circuler dans le circuit.

Ces effets thermoélectriques qui résultent du couplage entre le phénomène de conduction thermique et celui de conduction électrique sont connus sous le nom d'**effet Seebeck**. Si une différence de potentiel électrique est appliquée sur le circuit, un effet de réfrigération en résulte. La jonction froide se refroidit, et la jonction chaude se réchauffe. C'est l'effet Peltier sur lequel est basée la réfrigération thermoélectrique.



**Figure 2. 35:** Effet Peltier [26].

Dans la pratique, pour améliorer les performances de puissance, de rendement et d'écart de température, les thermo-éléments sont multi-étagés, chaque étage comprenant un nombre décroissant de jonctions Peltier montées en parallèle, d'où une forme en pyramide, les étages inférieurs devant pomper la chaleur dissipée à l'extrémité chaude des étages supérieurs.



**Figure 2. 36:** Application de plusieurs thermo-éléments en semi-conducteurs à un seul étage

A titre d'exemple, la figure 2.37 présente les caractéristiques techniques du module Peltier TEC1-12706 :

Tension nominale	15 V	
I max.	6.4 A	
Puissance de refroidissement (max.)	65 W	
Différence de température (max.)	60 °C	
Larg.	40 mm	
Hauteur	3.8 mm	
Longueur	40 mm	

**Figure 2. 37:** Caractéristiques techniques du module Peltier TEC1-12706

Ainsi on a pu voir quelques types de dissipateur thermique usuel ; résumons leurs avantages, leurs inconvénients et leurs gammes de flux thermiques dans le tableau suivant. Ces systèmes sont classés par ordre croissant de flux thermique dissipé :

**Tableau 9:** Avantages et inconvénients de quelques types de dissipateur thermique

Système	Avantages	Inconvénients	flux thermique maximal dissipée (W.cm <sup>-2</sup> )
Drain thermique	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ simplicité d'utilisation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ utilisable pour de faible puissance</li> </ul>	0,01 à 0,1
Convection naturelle (air)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ très simple à mettre en œuvre</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ nécessite une adaptation de l'architecture</li> <li>▪ utilisable pour de petites puissances uniquement</li> </ul>	0,01 à 0,1
Effet Peltier	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ pas d'éléments mécaniques</li> <li>▪ silencieux</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ très énergivores</li> </ul>	5 à 50
Convection forcée (air)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ simple à mettre en œuvre</li> <li>▪ contrôlable de l'extérieure</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ introduction de poussières</li> <li>▪ nécessite un ventilateur</li> </ul>	0,1 à 70
Caloduc	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Pas de pièce en mouvement</li> <li>▪ Simple et robuste</li> <li>▪ Système passif</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ La forme peut poser un problème dans l'intégration</li> </ul>	5 à 250
Convection forcée (fluide)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Simple</li> <li>▪ Plus efficace que l'air</li> <li>▪ Contrôlable de l'extérieur</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Système actif</li> </ul>	10 à 350
Jets	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Applicable sur de grande surface</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Nécessite un lourd équipement (pompe, régulateur de débit, réservoir de stockage)</li> <li>▪ Consommation d'énergie</li> </ul>	100 à 350
Spay Cooling	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Bon recouvrement spatial de la zone à refroidir.</li> <li>▪ Permet un refroidissement à la demande et localisé</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Complexité réglage des injecteurs</li> <li>▪ Pressurisation du liquide avant injection</li> <li>▪ Système actif</li> </ul>	500

Ainsi on a vu l'importance des dissipateurs thermiques pour refroidir les composants de puissances ; intéressons-nous maintenant à la modélisation thermique de ces composants.

# Chapitre III : MODELISATION THERMIQUE D'UN COMPOSANT DE PUISSANCE

Tout composant semi-conducteur admet une température maximale de fonctionnement, appelée température maximale de jonction, dépendant du type de matériau utilisé et de la technologie de réalisation. Ainsi, avec du silicium, cette température peut passer de 80°C pour certains composants de la microélectronique à 250°C pour un transistor MOSFET de puissance basse tension. Cette température maximale de jonction reste une donnée importante puisque c'est elle qui permet d'estimer le niveau de refroidissement nécessaire au bon fonctionnement du composant.

## I. Le BJT ou Bipolar Junction Transistor (transistor bipolaire)

### I.1 Fonctionnement d'un BJT

#### I.1.1 Constitution d'un BJT

Un BJT consiste en un cristal de Silicium (par exemple) dans laquelle **une couche du type n est en sandwich entre deux couches du type p (BJT du type pnp)**. Ou alternativement **une couche du type p entre deux couches du type n (BJT du type npn)**. La couche prise en sandwich est **la base**, très mince ( $\sim 0.5 \mu$ ) et dopée plus légèrement que les deux autres couches (**émetteur et collecteur**) [27].

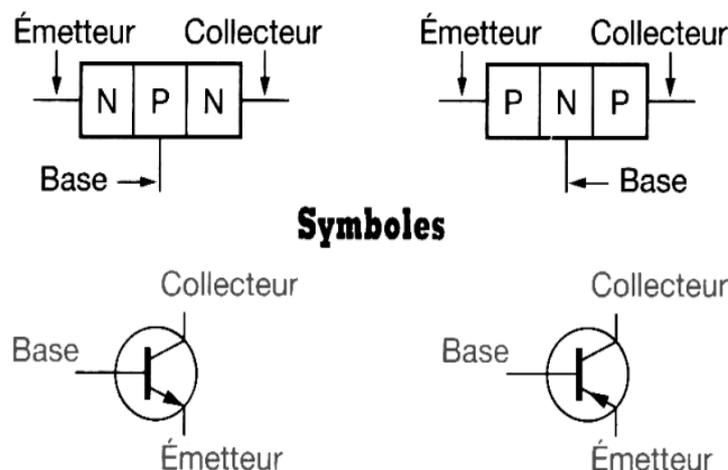
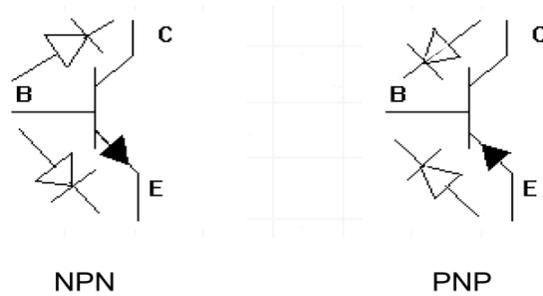


Figure 3. 1: Les deux types de BJT et leurs symboles

L'émetteur est toujours repéré par une flèche qui indique le sens du courant dans la jonction entre base et émetteur. C'est l'effet transistor qui permet à la diode qui est en inverse de conduire quand une tension est appliquée sur la base.



**Figure 3. 2:** Représentation du BJT par des diodes

On peut considérer le transistor comme l'association de deux diodes dont la représentation ci-dessus peut aider.

La loi de Kirchoff appliquée au transistor bipolaire est :

$$I_E = I_C + I_B \quad (3.1)$$

### 1.1.2 Le transistor NPN polarisé

- Pour  $0 < V_1 < V_{\text{seuil}}$  de la jonction PN

La jonction BE est polarisée en directe mais pas passante  $\Rightarrow I_B = 0$ . Il faut  $V_2 > V_1$  pour pouvoir polariser le transistor.

$\Rightarrow$  La jonction BC est polarisée en inverse

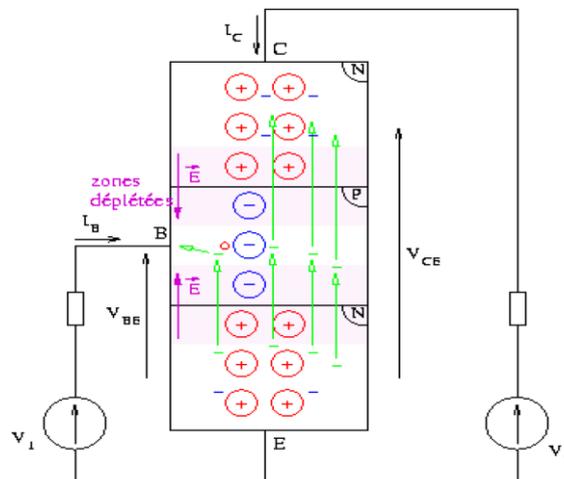
$\Rightarrow I_C = \text{courant inverse} = I_{CE0} \approx 0$

- Pour  $V_1 > V_{\text{seuil}}$  de la jonction PN

$\Rightarrow I_B > 0$  et  $V_{BE} \approx 0,6 \text{ V}$  ou  $0,7 \text{ V}$

Ce courant est constitué d'un flux d'électrons allant de l'émetteur vers la base. Les électrons arrivant dans la base peuvent rester libres longtemps avant d'être piégés. La base étant fine, ils arrivent à la 2<sup>ème</sup> jonction et passent dans le collecteur. La majorité des électrons injectés par l'émetteur traversent la base et se retrouvent dans le collecteur.

Il en résulte un courant positif  $I_C$  de valeur bien supérieure à  $I_B$



**Figure 3. 3:** Le transistor NPN polarisé

Lorsque le transistor est polarisé correctement, on peut définir plusieurs rapports de courants statiques (courants continus), notamment :

- Alpha statiques :

$$\alpha_{DC} = \frac{I_C}{I_E} = \frac{I_C}{I_C + I_B} \approx 1 \text{ car } I_B \ll I_C \quad (3.2)$$

$\alpha_{DC}$  :            0,99 pour un transistor classique  
                          0,95 pour un transistor de puissance

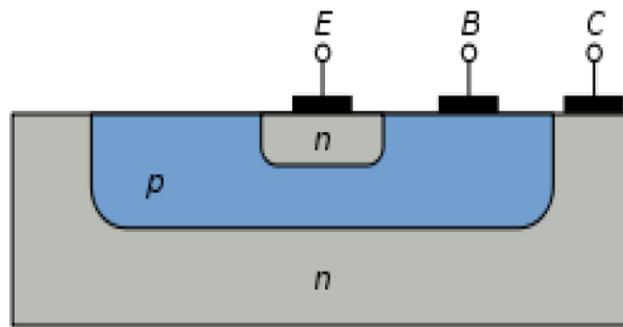
- Bêta statique ou gain en courant du transistor:

$$\beta_{DC} = \frac{I_C}{I_B} \quad (3.3)$$

$100 < \beta_{DC} < 300$  : transistors classiques

$20 < \beta_{DC} < 100$  : transistors de puissance

La représentation d'un BJT dans un circuit intégré est telle que :

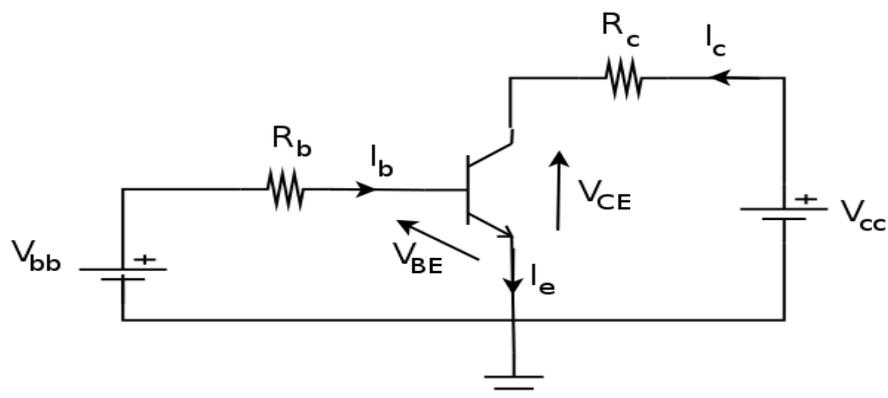


**Figure 3. 4:** Le BJT dans un circuit intégré

## I.2 Caractéristique (montage en émetteur commun)

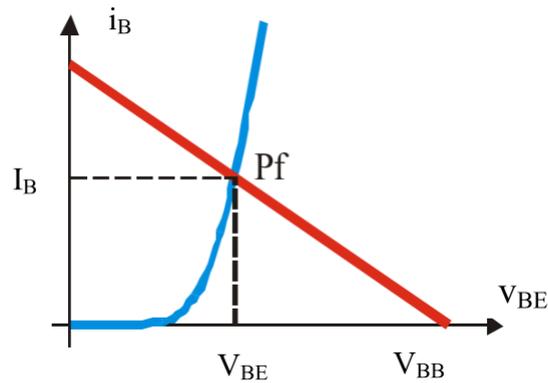
### I.2.1 Caractéristique d'entrée : $I_b = f(v_{BE}, V_{CE})$

Pour un montage en émetteur commun, on a :



**Figure 3. 5:** Montage en émetteur commun du BJT

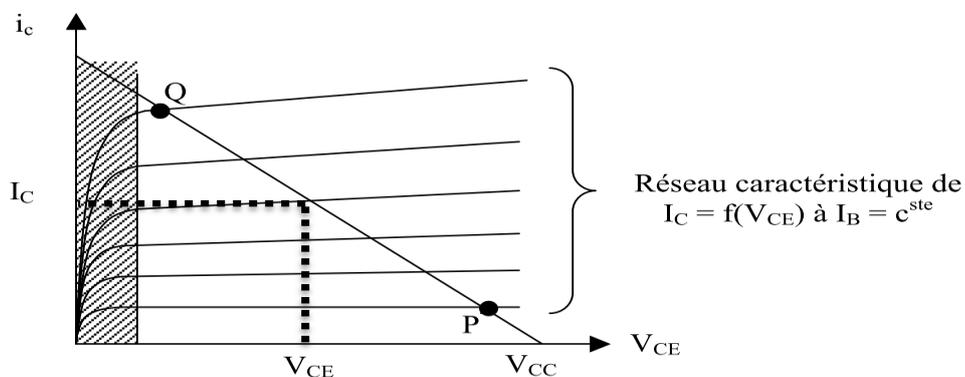
La courbe donnant le courant de la base en fonction de  $V_{BE}$  et  $V_{CE}$  est :



**Figure 3. 6:** Courbe  $i_B = f(V_{BE}, V_{CE})$

### 1.2.2 Caractéristique de sortie : $i_c = f(v_{CE})$

Pour la caractéristique de sortie :



**Figure 3. 7:** Courbe  $i_c = f(V_{CE})$

### 1.2.3 Région de fonctionnement

#### a- Région active

- $J_E$  (jonction base- émetteur) est polarisé dans le sens directe  
 $J_C$  polarisé dans le sens inverse

⇒ Région active directe

- $J_E$  polarisé dans le sens inverse  
 $J_C$  polarisé dans le sens direct

⇒ Région active inverse

Dans la région active,  $I_C$  est très sensible à la variation des signaux d'entrées. On utilise la région active pour l'amplification des signaux.

$$\left. \begin{aligned} I_B &= -(I_C + I_E) \\ I_C &= \alpha I_E + I_{C0} \end{aligned} \right\} I_C = \frac{I_{C0}}{1-\alpha} + \frac{\alpha}{1-\alpha} I_B \approx \beta \cdot I_B$$

$I_{C0} \approx$  nA ou pA pour Si  
 $\mu$ A ou nA pour Ge

Les pentes des lignes sont très sensibles aux variations de  $\alpha$ . Donc le réseau de sortie varie énormément d'un BJT à un autre du même numéro de référence.

#### b- Région de blocage (BJT OFF) : $I_E = 0$ et $I_C = I_{C0}$

Même si la base est en circuit ouvert, le transistor n'est pas bloqué car  $-I_E = +I_C = I_{C0}$ . Pour bloquer un BJT, il faut polariser  $J_E$  légèrement en sens inverse

$$\text{Ge} : |0,1| \text{ V}$$

$$\text{Si} : |0,0| \text{ V}$$

#### c- Région de saturation

Le BJT entre en saturation lorsqu'on cherche à trop augmenter  $I_C$  pour un circuit donné en agissant sur  $I_B$ .

$$\text{Limite du mode actif} : V_C = V_B \text{ et } I_C = \frac{V_{CC} - V_C}{R_C}$$

$$I_{C\text{limite}} = \frac{V_{CC} - V_B}{R_C} \text{ d'où } I_{B\text{limite}} = \frac{I_{C\text{limite}}}{\beta} \quad (3.4)$$

Si on augmente encore  $I_B$ ,  $I_C$  a tendance à augmenter. On a  $V_{CC} - V_C = R_C \cdot I_C \Rightarrow V_C$  va diminuer ce qui entrainera  $V_C < V_B$ ,  $J_C$  devient polarisé dans le sens direct.

$\Rightarrow$  Le BJT est saturé et  $V_{CE}$  est faible

$I_C$  n'est plus contrôlé par  $I_B$  mais déterminé par le circuit externe :  $V_{CC}$  ;  $R_C$  et  $-V_{CE}$ .

$$\text{Pour le circuit précédent} : V_{CC} = I_C \cdot R_C + V_{CE} \text{ donc } I_C = \frac{1}{R_C} \cdot (V_{CC} - V_{CE})$$

#### d- Valeur typique

**Tableau 10:** Quelques valeurs typiques de  $V_{CE}$  et  $V_{BE}$  pour différents états du BJT

	$V_{CE}$ Sat	$V_{BE}$ Sat	$V_{BE}$ act	$V_{BE}$ pour bloqué	$V_{\gamma} = V_{BE}$ pour active
<b>BJT au Si</b>	0,2 – 0,3	0,8	0,7	0,0	0,5
<b>BJT au Ge</b>	0,1	0,3	0,2	- 0,1	0,1

### I.3 Polarisation d'un transistor

Pour l'amplification des signaux, on utilise en générale le BJT dans la région active  $|V_{BE}|$  du type de transistor utilisé.

Dans le circuit :  $R_B$ ,  $R_C$ ,  $R_L$ ,  $R_E$  sont aux choix ;  $P_{C\text{max}}$  (puissance maximale dissipée au circuit du collecteur),  $I_{C\text{max}}$  et  $V_{CE\text{max}}$  sont limités par le fabricant.

### I.3.1 Polarisation directe

C'est une polarisation avec une source de tension :

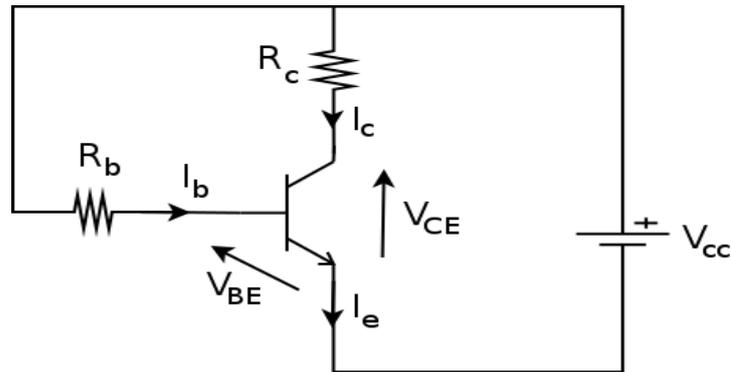


Figure 3. 8: Polarisation directe d'un transistor

- Equation du circuit de la base :

$$V_{CC} = I_B \cdot R_B + V_{BE}$$

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B} \approx \frac{V_{CC}}{R_B} \quad (3.5)$$

$$I_B \neq f(I_C) \text{ mais } I_C = \beta \cdot I_B$$

Le choix de  $I_B$  est dicté par  $V_{CC}$  (alimentation) et  $R_B$

- Equation du circuit de collecteur :

$$V_{CC} = I_C \cdot R_C + V_{CE} \quad \text{Droite de charge statique} \quad (3.6)$$

### I.3.2 Autopolarisation ou polarisation automatique

La polarisation se fera par pont et résistance de l'émetteur :

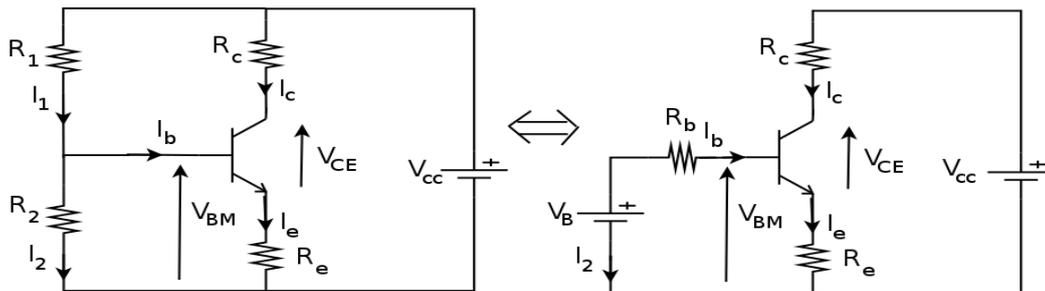


Figure 3. 9: Polarisation automatique d'un BJT

On a :

$$R_B = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \quad \text{et} \quad V_B = V_{CC} \cdot \frac{R_2}{R_2 + R_1}$$

- Equation du circuit de la base :

$$V_B = R_B \cdot I_B + V_{BE} + (\beta + 1) I_B \cdot R_E \quad (3.7)$$

$$I_B = \frac{V_B - V_{BE}}{R_B + (\beta + 1) R_E}$$

- Equation du circuit de collecteur :

$$V_{CC} = R_C \cdot I_C + V_{CE} + R_E \cdot I_C + R_E \cdot I_B \approx R_C \cdot I_C + V_{CE} + R_E \cdot I_C \quad (3.8)$$

$$V_{CE} = V_{CC} - (R_C + R_E)I_C$$

$$I_C = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_C + R_E}$$

#### 1.4 Notion de stabilité

Le réseau de sortie d'un BJT peut varier d'un transistor à un autre du même numéro de référence à cause des paramètres :  $I_{C0}$ ,  $\beta$  et  $V_{BE}$  qui sont en fonction de la température comme le montre le tableau suivant :

**Tableau 11:** Quelques valeurs de  $I_{C0}$ ,  $\beta$  et  $V_{BE}$  en fonction de la température

Température en °C		- 65	25	175
$I_{C0}$	BJT Si (nA)	$1,95 \cdot 10^{-3}$	1	$33 \cdot 10^3$
	Ge ( $\mu$ A)	$1,95 \cdot 10^{-3}$	1	$32 \cdot 10^3$
$\beta$	Si	25	55	100
	Ge	20	55	90
$V_{BE}$ (V)	Si	0,78	0,60	0,225
	Ge	0,38	0,20	0,10

##### 1.4.1 Facteur de stabilité

En dérivant (3.7), on a :

$$\frac{dI_B}{dI_C} = - \frac{R_E}{R_E + R_B}$$

Finalement, le facteur de stabilité est :

$$S = \frac{1+\beta}{1+\beta \frac{R_E}{R_E+R_B}} = (\beta + 1) \cdot \frac{1+\frac{R_B}{R_E}}{1+\beta+\frac{R_B}{R_E}} \quad (3.8)$$

S varie de 1 à  $1 + \beta$

##### 1.4.2 Exemple de calcul du facteur de stabilité

**Enoncé :**

On donne  $V_{CC} = 22$  V,  $R_C = 10$  k $\Omega$ ,  $R_E = 1,5$  k $\Omega$  ;  $R_1 = 39$  k $\Omega$  ;  $R_2 = 3,9$  k $\Omega$  ;  $\beta = 140$  et BJT au Si. Trouver les coordonnées du point de fonctionnement Q ( $V_{CE}$ ,  $I_C$ ) et calculer sa stabilité.

**Solution :**

$$R_B = \frac{39 \cdot 3,9}{39 + 3,9} = 3,55 \text{ k}\Omega$$

$$V_B = 22 \cdot \frac{3,9}{39 + 3,9} = 2 \text{ V}$$

$$I_B = \frac{V_B - V_{BE}}{R_B + (\beta + 1)R_E} = 6,05 \mu\text{A}$$

$$I_C = \beta \cdot I_B = 0,85 \text{ mA}$$

$$V_{CE} = -(R_C + R_E)I_C + V_{CC} = 21 \text{ V}$$

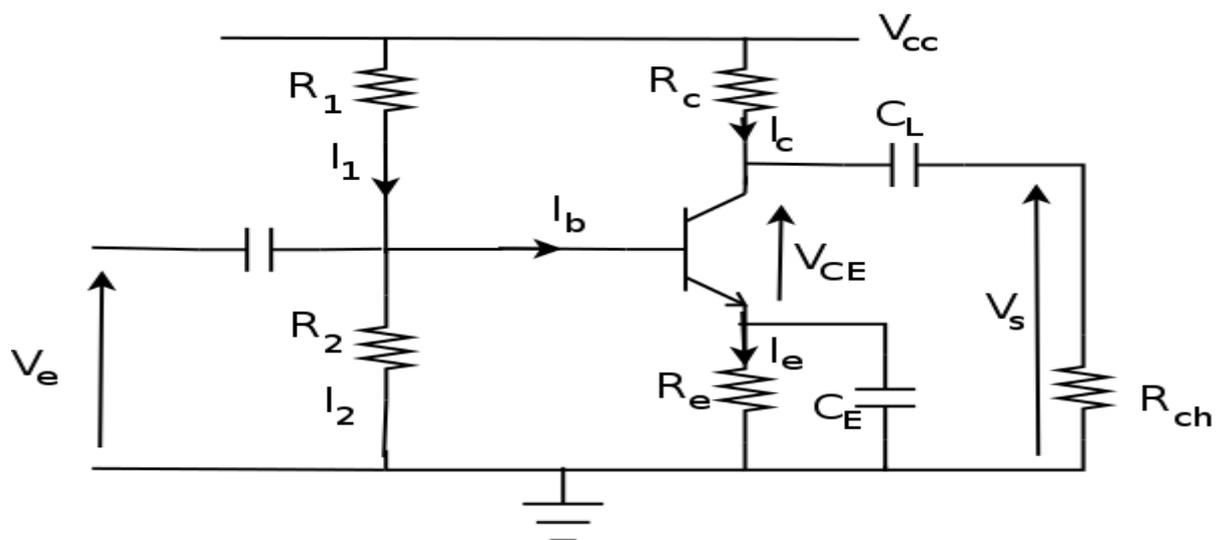
D'où Q ( $V_{CE}$ ,  $I_C$ ) = (21 V ; 0,85 mA)

$$S = (\beta + 1) \cdot \frac{1 + \frac{R_B}{R_E}}{1 + \beta + \frac{R_B}{R_E}} = 141 \cdot \frac{(1 + \frac{3,55}{1,5})}{141 + \frac{3,55}{1,5}} = 3,3$$

## I.5 Transistor en régime variable (petits signaux, fréquence intermédiaire)

### I.5.1 Montage en émetteur commun

La résistance  $R_E$  est indispensable pour obtenir un point de fonctionnement (point de repos) stable en température.



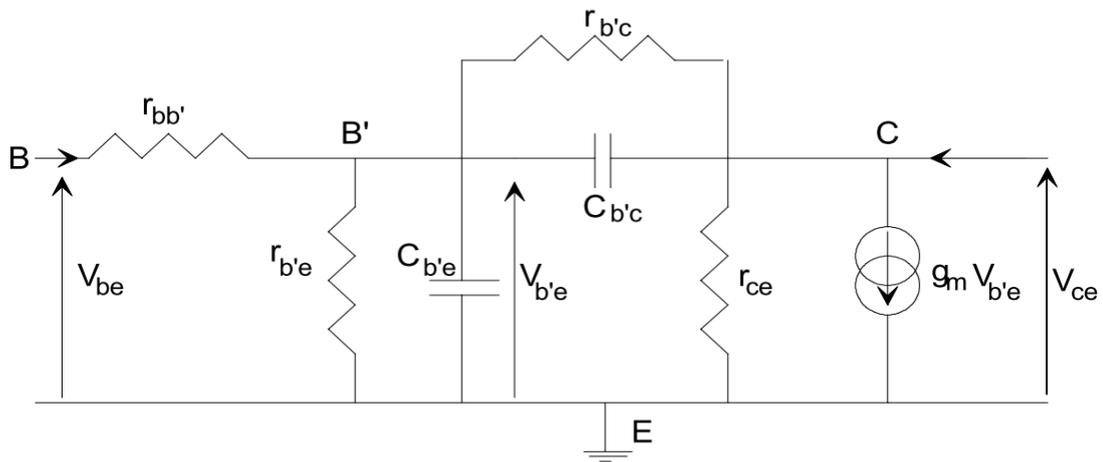
**Figure 3. 10:** Montage en émetteur commun pour le transistor en régime variable

$C_L$  : condensateur de blocage (pour que le courant continu de  $V_{CC}$  ne perturbe pas  $V_e$ )

$C_E$  : condensateur de couplage (en régime continu :  $C_E$  correspond à un circuit ouvert et  $R_E$  intervient pour la stabilité, en régime variable à la moyenne fréquence :  $C_E$  correspond à un court-circuit et  $R_E$  est éliminé)

### I.5.2 Représentation en régime variable avec le modèle naturel : modèle de GIACOLETTO ou modèle en $\Pi$ (pi)

Le circuit proposé par Giacoletto est un circuit équivalent « petits signaux » du transistor représenté suivant une structure de quadripôle en  $\Pi$  :



**Figure 3. 11:** Schéma équivalent de Giacometto du BJT monté en émetteur commun

$C_{\mu} = C_{b'c}$  : condensateur dû à la jonction  $J_C$  (polarisation en sens inverse)

$C_{\pi} = C_{b'e}$  : condensateur dû à la jonction  $J_E$  (polarisé en sens direct)

$r_{\pi} = r_{b'e}$  : résistance interne de la jonction  $J_E$

$r_x = r_{bb'}$  : résistance de base (dans le BJT intégré,  $b'$  contrôle le fonctionnement mais pas  $b$ ).

$r_0 = r_{ce} \rightarrow \infty$

$C_{\mu}$  et  $C_{\pi}$  sont de l'ordre de 20 à 1000 pF

Dans le schéma équivalent en régime variable à la moyenne fréquence :

- On représente  $C_L$  par un court-circuit
- $C_{\mu}$  et  $C_{\pi}$  sont considérés comme des circuits ouverts
- Les sources de tension ( $V_{CC}$ ,  $V_B$ ) sont court-circuitées vers la masse

Pour un transistor en Ge :

$r_x = 100 \Omega$  ;  $r_{\pi} = 1k\Omega$  ;  $C_{\mu} = 3 \text{ pF}$  ;  $C_{\pi} = 100 \text{ pF}$  ;  $g_{ce} = 25 \mu\text{S}$  ;  $\beta = g_m \cdot r_{\pi}$  avec  $g_m = I_C / 26 \text{ mV}$  à  $25^{\circ}\text{C}$  ;  $r_{\mu} \rightarrow \infty$

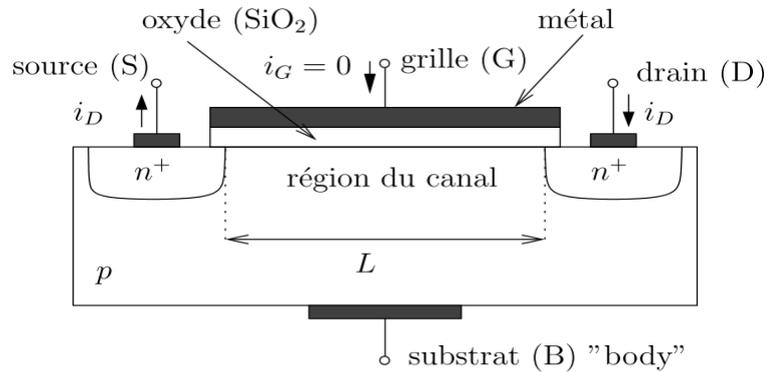
## II. Les F.E.T. ou Field Effect Transistor (Transistor à effet de champs)

Pour un **F.E.T.**, l'état de conduction et l'intensité du courant sont contrôlés par la tension appliquée à une électrode de grille. Ce sont des transistors unipolaires (par opposition aux transistors bipolaires), car le courant n'est transporté que par un seul type de porteur de charge (électrons ou trous) [28].

Il en existe une grande variété : les **JFET** ou **Jonction Field Effect Transistors** dans lesquels la tension de grille contrôle la largeur de la région de déplétion d'une jonction pn, les **MESFET** ou **Metal Semiconductor FET**, dans lesquels la jonction pn est remplacée par une jonction métal- semi-conducteur, et enfin les **MOSFET** ou **Metal Oxyde FET**, dans lesquels la grille est séparée du semi-conducteur par un oxyde, jouant le rôle d'un isolant.

## II.1 Le MOSFET

### II.1.1 Structure et fonctionnement



**Figure 3. 12:** Schéma de principe d'un MOSFET à canal n

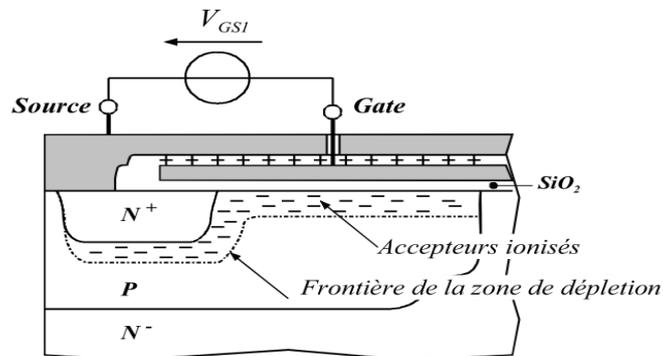
- (i) Si on applique  $V_{GS} > 0$ , le champ appliqué à la grille doit se terminer sur une charge négative. Ces électrons sont extraits des régions  $n^+$

D'où la naissance d'un canal conducteur formé par ces électrons induit près de la surface du substrat. On peut contrôler l'épaisseur de ce canal par  $V_{GS}$

- (ii) Si on applique alors  $V_{DS} > 0$ , les électrons de la source peuvent traverser ce canal pour aller vers le drain d'où  $I_D$ .

- (iii) Remarque :

- La tension  $V_C$  varie linéairement dans le canal : 0 V du côté de la source,  $V_{DS}$  du côté du drain.



**Figure 3. 13:** Formation du canal : zone de déplétion

Il y a donc un champ  $E$  qui se forme tel que :

$$|\vec{E}| = \frac{V_G - V_c}{e} \quad (3.9)$$

$e$ : épaisseur de l'oxyde ( $SiO_2$ )

Le champ est plus intense du côté de la source donc le canal y est plus épais :

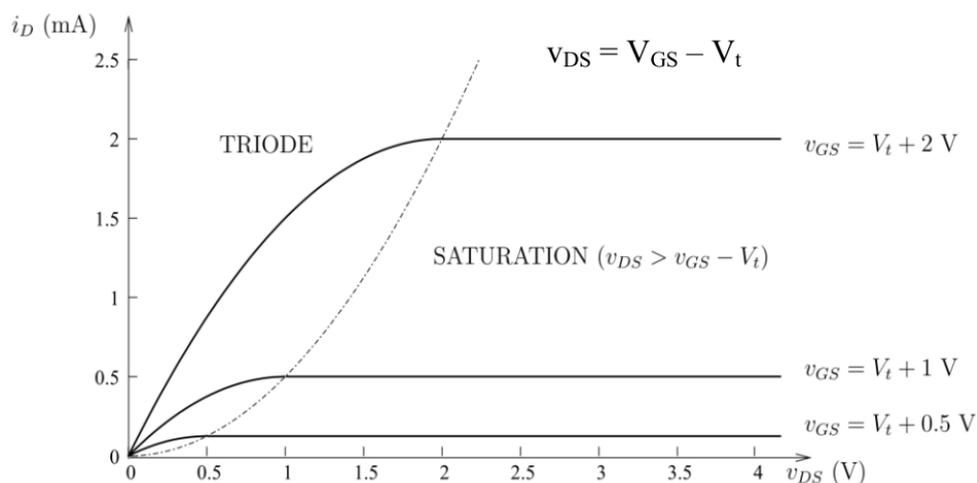
$$|\vec{E}|_S = \frac{V_G - 0}{e} > |\vec{E}|_D = \frac{V_G - V_{DS}}{e} \quad (3.10)$$

- On a besoin de  $V_t$  : tension de seuil (threshold) juste pour créer le canal avec  $V_t > 0$  pour un n- MOSFET
- Lorsque  $V_{DS}$  devient assez fort, le canal recule vers le coté de la source mais à ce moment, les électrons dotés d'assez d'énergie peuvent toujours atteindre la région du drain. On atteint la région de saturation

### II.1.2 Caractéristiques

Les expressions des caractéristiques  $i_D - v_{DS}$  sont :

- **Régime de blocage** : on a  $i_D = 0$  lorsque  $v_{GS} < V_t$
- **Régime de triode ou ohmique** : pour  $v_{GS} > V_t$  et  $v_{DS} < v_{DS-sat}$
- **Tension de saturation** : on a :  $v_{DS-sat} = v_{GS} - V_t$
- **Régime de saturation** : pour  $v_{GS} > V_t$  et  $v_{DS} > v_{DS-sat}$



**Figure 3. 14:** Réseau de caractéristiques  $i_D - v_{DS}$  pour des tensions  $v_{GS}$  fixées au-dessus de  $V_t$

### II.1.3 Type de MOSFET

#### (i) MOSFET par enrichissement

Dispositif normalement OFF, il faut appliquer  $V_{GS}$  pour induire le canal conducteur : si  $|V_{GS}|$  augmente alors  $|I_D|$  augmente aussi.

#### (ii) MOSFET par appauvrissement ou MOSFET par déplétion

On incorpore un canal conducteur (région légèrement dopé entre les 2 régions de la source et du drain qui sont fortement dopé), on diminue l'épaisseur du canal conducteur en appliquant  $V_{GS}$  dans le sens inverse qui a pour effet d'augmenter la z.c.e (vide de porteur de charge). C'est un dispositif normalement ON

## II.1.4 Symbole

Voici les symboles des MOSFET :

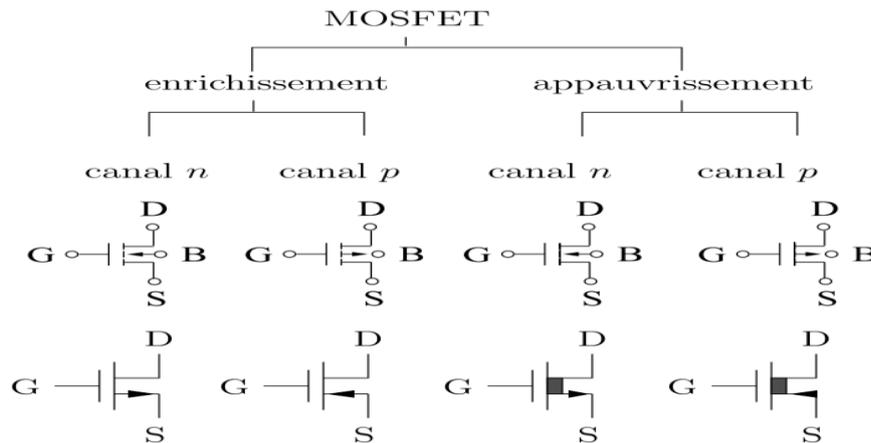


Figure 3. 15: Symboles des MOSFET par enrichissement et par appauvrissement

## II.2 Le JFET

### II.2.1 Structure, fonctionnement et symboles

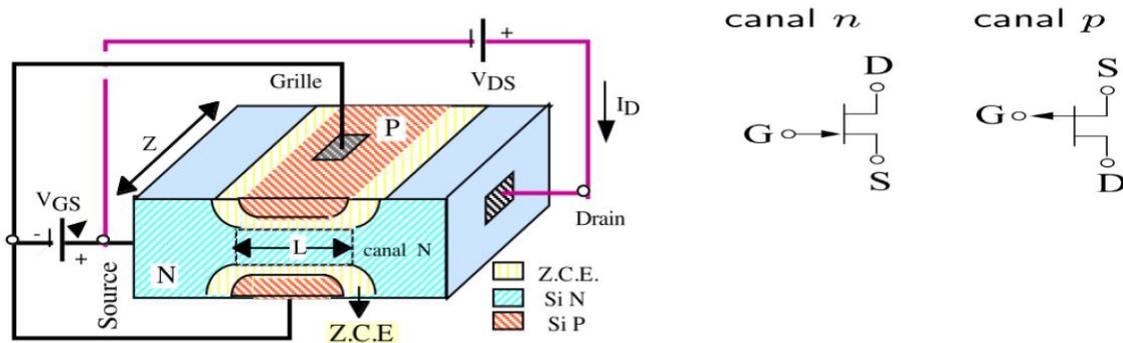


Figure 3. 16: Un JFET à canal N et symboles d'un JFET

Pour  $V_{GS} = 0$  :

- Le canal drain – source conduit proportionnellement avec l'augmentation de la tension  $V_{DS}$  (0 V du côté de la source et  $V_{DS}$  du côté du drain) : le transistor se comporte comme une résistance (**zone ohmique**)
- Pour une certaine valeur de  $V_{DS}$ , le courant de drain  $I_D$  cesse de croître et devient constant. C'est la tension de pincement ou  $V_p$  (tension de pinch-off) qui correspond au courant de saturation  $I_D$  que l'on appelle  $I_{DSS}$  : **zone de saturation**

En présence d'une tension  $V_{GS}$  :

- Si maintenant on applique une tension  $V_{GS}$  à l'espace grille – source (polarisation de la jonction en inverse) et que l'on relève la valeur de  $I_D$  en fonction de  $V_{DS}$ , on constate pour ce courant des valeurs plus faibles.
- La tension  $V_p$  est atteinte plus tôt et devient  $V_p' = V_p - V_{GS}$ . Plus  $V_{GS}$  augmente, plus le courant  $I_D$  diminue. A partir d'un certain seuil de  $V_{GS}$ , le courant  $I_D$  s'annule.

Tout se passe comme si le champ électrique, créé par la tension de polarisation inverse de la jonction grille-source, diminuait la largeur de conduction du canal : effet de pincement du canal.

### II.2.2 Caractéristique

Voici les courbes caractéristiques du JFET :

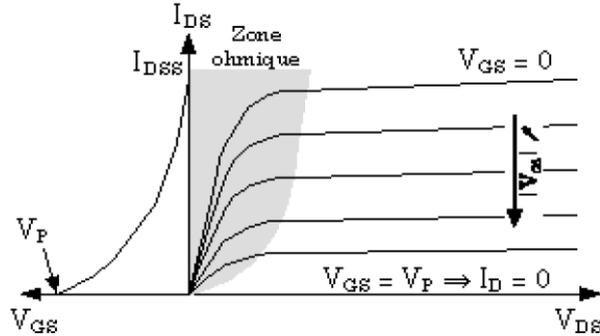


Figure 3. 17: Caractéristique du JFET :  $I_{DS} = f(V_{GS})$  et  $I_{DS} = f(V_{DS}, V_{GS})$

### II.2.3 Polarisation des JFET

On a  $I_{Dmax} = I_{DSS}$  : courant de saturation pour  $V_{GS} = 0$ ,

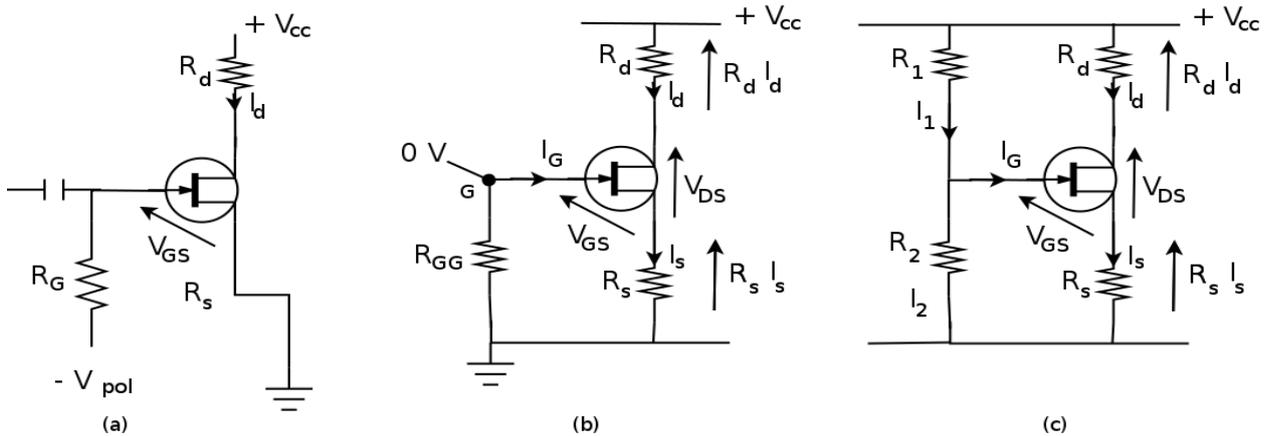


Figure 3. 18: Polarisation des JFET, (a) : polarisation fixée, (b) : autopolarisation de la source et (c) : polarisation par pont

Pour (a) : On utilise  $-V_{pol}$  pour obtenir une gate polarisée dans le sens inverse.

$$I_G = 0 \text{ et } V_{GS} = V_G - V_S = V_{pol}$$

$$I_D = I_{DSS} \cdot \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_p}\right)^2 \quad (3.11)$$

$$V_{CC} = I_D \cdot R_d + V_{DS}$$

Pour (b) :

$$I_G = 0 \text{ et } V_G = I_G \cdot R_G = 0 \text{ donc } V_{GS} = -I_D \cdot R_D$$

$$I_D = I_{DSS} \cdot \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_p}\right)^2$$

Pour  $I_D$  donné,

$$V_{CC} = I_D \cdot R_D + V_{DS} + I_D \cdot R_S$$

Et enfin pour (c) :

$$V_{GG} = V_G = V_{DD} \cdot \frac{R_2}{R_2 + R_1}$$

$$V_{GS} = V_G - I_D \cdot R_S$$

$$I_D = I_{DSS} \cdot \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_p}\right)^2$$

### III. Modèle thermique d'un composant de puissance

#### III.1 Modèle électrique équivalent

Rappelons que l'équation de la propagation de la chaleur peut être écrite par :

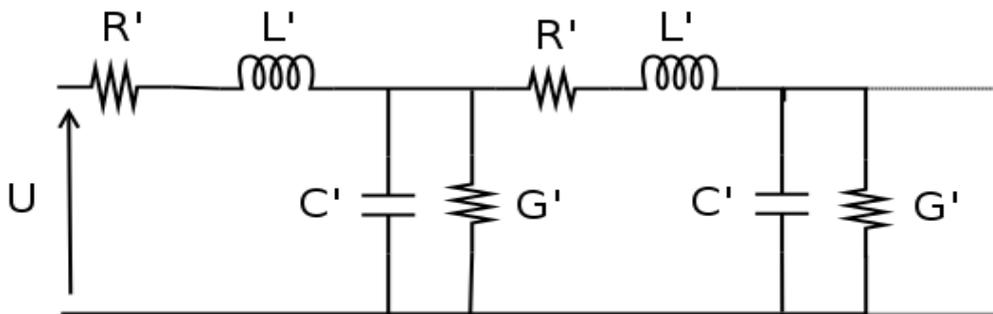
$$\frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} = \frac{\rho \cdot c}{\lambda_{th}} \cdot \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} \quad (3.12)$$

Avec :

- $\lambda_{th}$ : conductivité thermique du matériau [W/m.°K]
- $c$  : capacité thermique spécifique [J/kg.°K]
- $\rho$  : masse volumique du matériau [kg/m<sup>3</sup>]

La recherche d'un modèle électrique correspondant nous amène à considérer une ligne de transmission représentée sous la forme :

$$\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} = C'L' \cdot \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} + (C'R' + G'L') \cdot \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} + G'R'u(x,t) \quad (3.13)$$



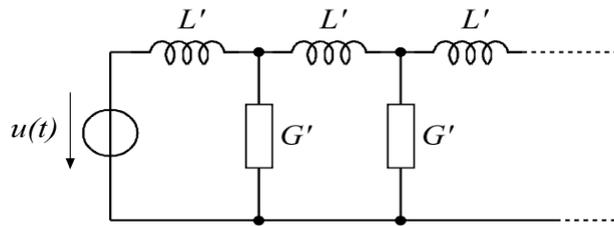
**Figure 3. 19:** Ligne de transmission [29]

- $C'$  : capacité linéique ([F/m] = [As/(V.m)])
- $R'$  : résistance linéique ([Ω/m] = [V/(A.m)])
- $G'$  : conductance transverse linéique ([1/(Ω.m)] = [A/(V.m)])
- $L'$  : inductance linéique ([H/m] = [V.s/(A.m)])

En posant la capacité linéique  $C'$  et la résistance linéique  $R'$  nulles, on obtient :

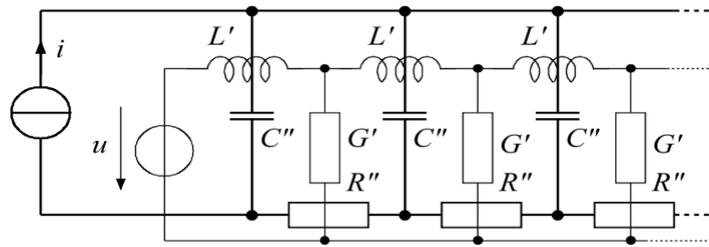
$$\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} = L'G' \cdot \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} \quad (3.14)$$

Le modèle électrique de la ligne de transmission devient :



**Figure 3. 20:** Modèle électrique simplifié de la ligne de transmission

Par le principe de dualité, on peut transformer le modèle de la figure 3.20 sous la forme suivante :



**Figure 3. 21:** Transformation par le principe de dualité

Et la relation (3.14) devient :

$$\frac{\partial^2 i(x,t)}{\partial x^2} = R'' C'' \frac{\partial i(x,t)}{\partial t} \quad (3.15)$$

La structure de la relation (3.15) est semblable à celle de la transmission de la chaleur dans un milieu homogène.

### III.2 Equivalence entre grandeurs électriques et grandeurs thermiques

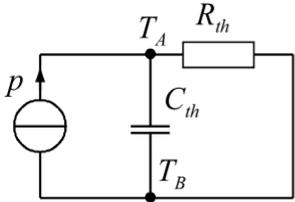
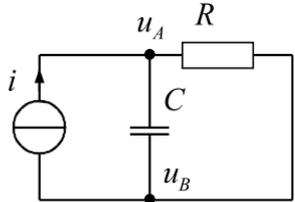
L'équivalence entre grandeurs thermiques et électriques peut être définie par le tableau suivant :

**Tableau 12:** Définition des grandeurs physiques

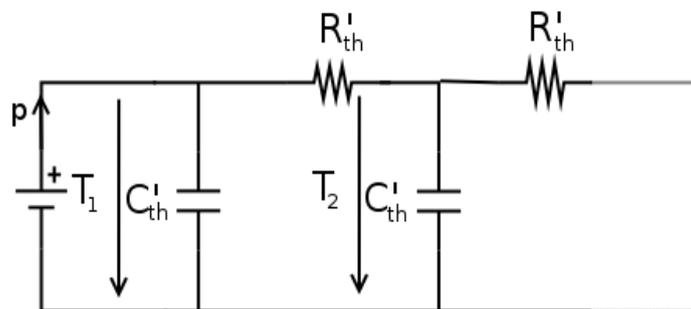
Grandeurs thermiques			Grandeurs électriques		
T :	Température	[°K]	U	Tension	[V]
J	Flux de chaleur	[W/m <sup>2</sup> ]	J	Densité de courant	[A/m <sup>2</sup> ]
P	Chaleur	[W]	I	Courant	[A]
Q	Quantité de chaleur	[J]=[W·s]	Q	Charge	[C]=[A·s]
$\lambda_{th}$	Conductivité	[W/(°K·m)]	$\sigma$	Conductivité	[1/( $\Omega$ ·m)]
$R_{th}$	Résistance	[°K/W]	R	Résistance	[V/A] = [ $\Omega$ ]
$C_{th}$	Capacité	[W·s/°K]	C	Capacité	[A·s/V] = [F]

Les relations principales sont définies comme :

**Tableau 13:** Relations entre grandeurs physiques [29]

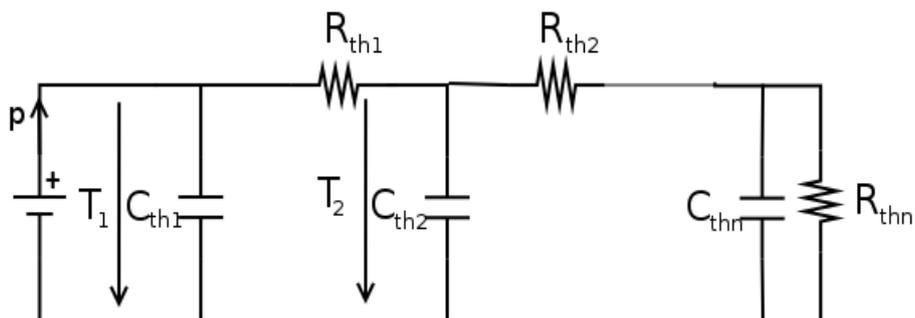
Grandeurs thermiques	Grandeurs électriques
$C_{th} = \frac{dQ}{dT}$	$C = \frac{dQ}{dU}$
$C_{th} = c \cdot \rho \cdot d \cdot S$	$C = \varepsilon \cdot \frac{S}{d}$
$R_{th} = \frac{d}{\lambda_{th} \cdot S}$	$R = \frac{d}{\sigma \cdot S}$
$Q(t) = \int_0^t p(t) \cdot dt$	$Q(t) = \int_0^t i(t) \cdot dt$
	
$p(t) = \frac{T_A(t) - T_B(t)}{R_{th}} + C_{th} \frac{d}{dt}(T_A(t) - T_B(t))$	$i(t) = \frac{u_A(t) - u_B(t)}{R} + C \frac{d}{dt}(u_A(t) - u_B(t))$

Pour le schéma thermique équivalent, on considère comme positif la chaleur sortant du dipôle représenté par la source de chaleur p.



**Figure 3. 22:** Modèle thermique

Il est possible de simplifier le modèle en considérant chaque condensateur et chaque résistance thermique comme des éléments décrivant un volume homogène.



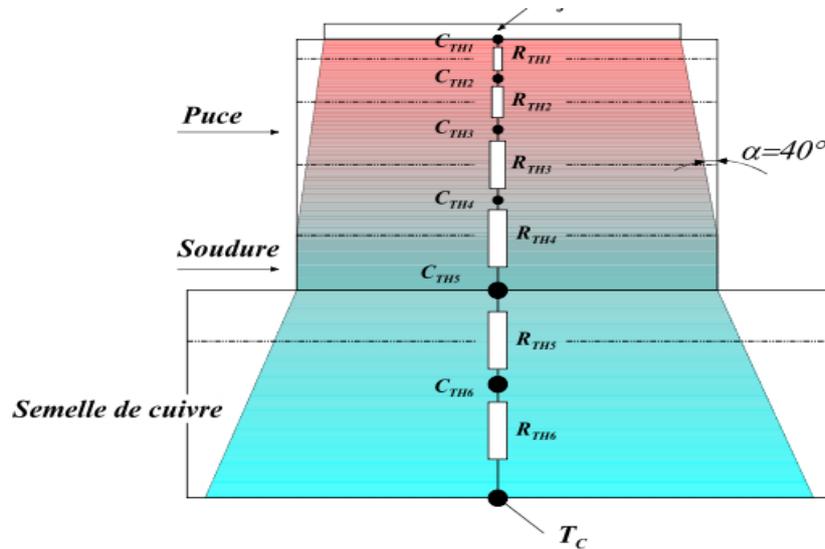
**Figure 3. 23:** Modèle thermique segmenté d'un cas réel

### III.3 Modèle thermique élaboré

#### III.3.1 Structure segmentée du modèle thermique

##### a- Hypothèses et contraintes

1. L'épaisseur et la succession des couches doivent être choisies de manière à ce que la constante thermique de chacune d'elles aille dans le sens croissant ( $\tau_{th} = C_{th} \cdot R_{th}$ ) dans la direction de propagation de chaleur.
2. La surface du silicium où est produite la chaleur est petite. Si les matériaux prévus pour le refroidissement par conduction sont homogènes, il y a un effet de diffusion latérale décrite par un angle  $\alpha = 40^\circ$ .



**Figure 3. 24:** Structure du modèle thermique d'un semi-conducteur de puissance [30]

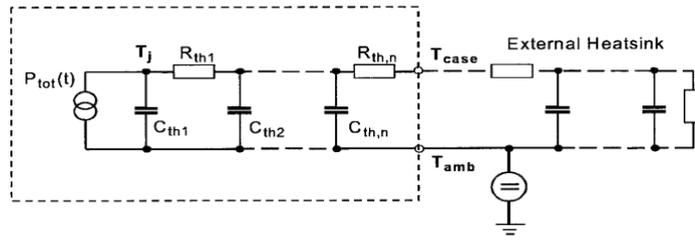
3. Les dimensions et les caractéristiques thermiques de chaque élément de volume traversé par le flux de chaleur doivent être déterminées précisément. Dans les MOSFET de puissance, les premières couches correspondant à la zone N<sup>-</sup> épitaxiale sont sources de chaleur.

##### b- Circuit équivalent naturel

Le circuit de conduction de la chaleur équivalent dit naturel est dérivé de la théorie des lignes de transmission. Le tableau suivant ainsi que la figure 3.25 montre un exemple extrait d'un data sheet.

**Tableau 14 :** Datasheet montrant le « Transient Thermal Charactistics »

Transient Thermal Characteristics					
Symbol	Value	Unit	Symbol	Value	Unit
	typ.			typ.	
Thermal resistance			Thermal capacitance		
$R_{th1}$	0.00746	K/W	$C_{th1}$	0.000439	Ws/K
$R_{th2}$	0.017		$C_{th2}$	0.00145	
$R_{th3}$	0.028		$C_{th3}$	0.00239	
$R_{th4}$	0.065		$C_{th4}$	0.00499	
$R_{th5}$	0.081		$C_{th5}$	0.021	
$R_{th6}$	0.037		$C_{th6}$	0.146	



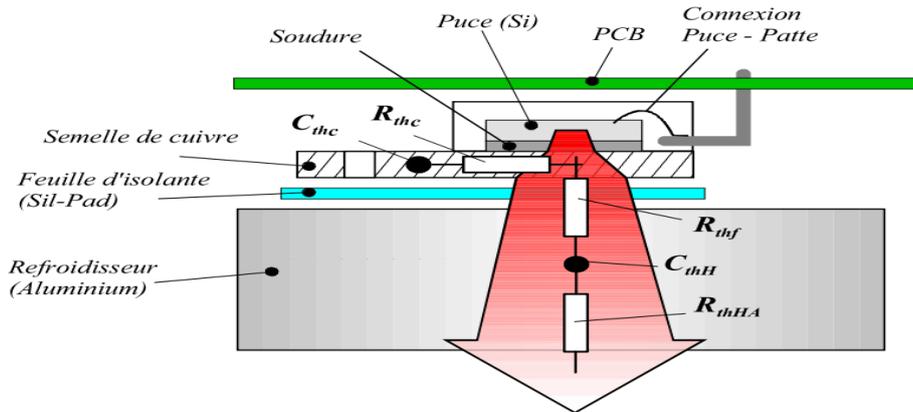
**Figure 3. 25:** Paramètre du modèle thermique d'un MOSFET

La fonction de transfert est donnée sous la forme :

$$Z_{th}(s) = \frac{1}{sC_{th1} + \frac{1}{R_{th1} + \frac{1}{sC_{th2} + \frac{1}{R_{th2} + \frac{1}{sC_{th3} + \dots + \frac{1}{R_{thn}}}}}}} \quad (3.16)$$

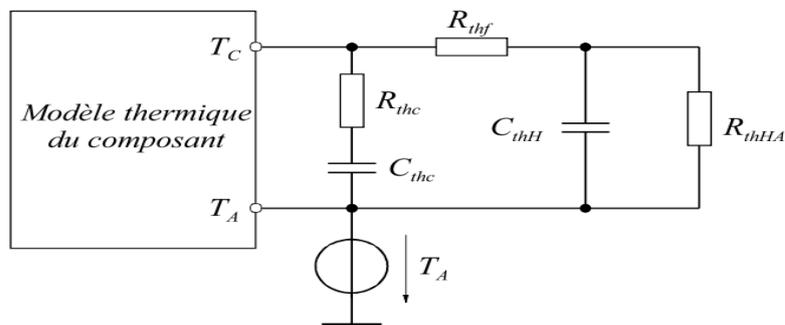
### III.3.2 Interface composant – refroidisseur

L'interface composant – refroidisseur, constitué d'une feuille isolante ne répond pas aux exigences sur la croissance de la constante de temps entre deux couches successives. On peut contourner ce point de la manière suivante :



**Figure 3. 26:** Exemple de montage d'un composant de puissance

L'effet d'accumulation provoqué par la résistance thermique « élevée » de la feuille isolante peut se modéliser selon la forme illustrée par la figure 3.27



**Figure 3. 27:** Modèle thermique de l'interface et du refroidisseur

### III.4 Exemple : modélisation d'un MOSFET en tenant compte des effets de la température

#### III.4.1 Définition du problème

La plupart des MOSFET de puissance sont réalisés sur la base d'une structure verticale de type DMOSFET. La température a un impact important sur les paramètres suivants :

- La mobilité  $\mu_e$  des électrons (transconductance  $g_{fs}$ )
- La tension de seuil  $V_{GS(th)}$
- La résistance  $R_{DSON}$

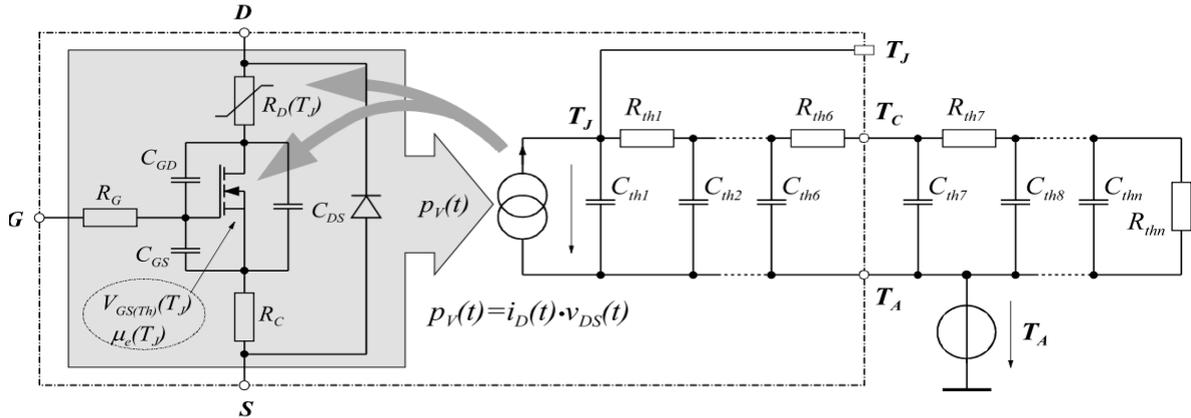


Figure 3. 28: Modèle thermique d'un MOSFET

La puissance dissipée dans le MOSFET, définie par le produit de la tension Drain – Source par le courant de Drain en valeurs instantanées, est représentée par une source de courant contrôlée. Cette source de courant alimente un réseau RC modélisant le comportement thermique du MOSFET et de son refroidisseur.

#### III.4.2 Relations des paramètres électriques avec la température

La variation des paramètres électriques en fonction de la température est directement liée à la technologie. On a par exemples :

- Variation de la transconductance avec la température

$$g_{fs}(T_j) = g_{fs(300^{\circ}K)} \left( \frac{T_j}{300} \right)^{-\frac{3}{2}} \quad \text{avec } T_j \text{ en } [^{\circ}K] \quad (3.17)$$

- Variation de la tension de seuil avec la température

$$V_{GS(th)}(T_j) = V_{GS(th)}(300^{\circ}C) + \vartheta(T_j - 300^{\circ}C) \quad (3.18)$$

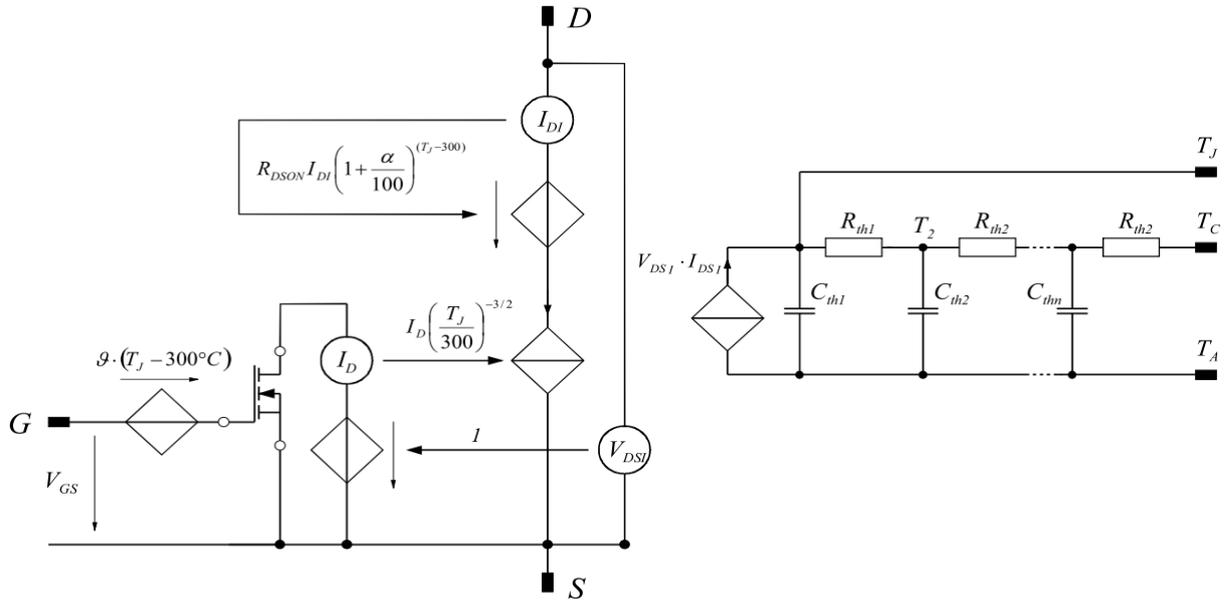
Avec  $\vartheta = - 8.5 \text{ mV}/^{\circ}K$

- Variation de la résistance  $R_{DSON}$  avec la température

$$R_{DSON}(T_j) = R_{DSON(300^{\circ}K)} \cdot \left( 1 + \frac{\alpha}{100} \right)^{(T_j - 300)} \quad (3.19)$$

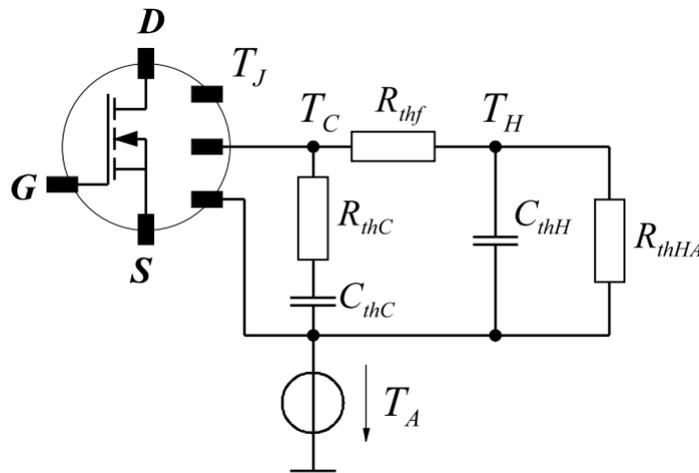
### III.4.3 Modèle de simulation : exemple d'une dépendance des paramètres à la température

Il est possible de créer un modèle de simulation à partir d'un modèle de composant donné sous forme standard (SPICE, SAUBER, SIMPLORER).



**Figure 3. 29:** Modèle de simulation

On peut donc créer un nouveau modèle de simulation auquel on pourra ajouter un circuit thermique équivalent naturel.



**Figure 3. 30:** Modèle de simulation avec un circuit thermique équivalent naturel

La modélisation des composants de puissance avec l'aide des données constructeurs facilitent l'étude de refroidissement de ces composants toutefois pour la majorité, l'utilisation d'une ailette thermique est plus que nécessaire donc voyons maintenant comment se comporte cette dernière physiquement et procédons ensuite à une simulation.

# Chapitre IV : REALISATION ET SIMULATION

## I. Ailettes thermiques

### I.1 Généralités

#### I.1.1 Définition et applications des ailettes thermiques

Le rôle des ailettes thermiques est de favoriser l'échange de chaleur entre deux milieux, or le nombre de domaines mettant en jeu des échanges thermiques est impressionnant. Étudions le rôle précis des ailettes thermiques dans certains systèmes de notre vie quotidienne [31].

Les systèmes de chauffage des particuliers mettent en jeu des systèmes d'ailettes thermiques afin de transmettre la chaleur issue d'une résistance (dans le cas du chauffage électrique), ou d'un fluide caloporteur (porteur de chaleur) en circulation, à l'air ambiant.

Sur la figure 4.1, on a une résistance chauffante composée de la résistance électrique (tube en « U ») cerclée par une ailette thermique en forme de spirale. Il aurait été possible de remplacer la résistance électrique par un tube dans lequel circulerait un fluide caloporteur.



**Figure 4. 1:** Ailette en forme de spirale

Le domaine des appareils de chauffage ne se limite pas aux installations visibles dans les habitations particulières. Ces systèmes servent également dans l'industrie, dès lors qu'il est nécessaire de chauffer un fluide. En effet, les ailettes ont pour rôle de favoriser les échanges thermiques entre un élément solide et un fluide. L'élément solide peut très bien être un tube dans lequel circule un second fluide, afin d'autoriser les échanges d'énergie sans pour autant mélanger ces derniers : c'est le principe des échangeurs de chaleur utilisés pour transmettre l'énergie entre plusieurs circuits de fluides caloporteurs.

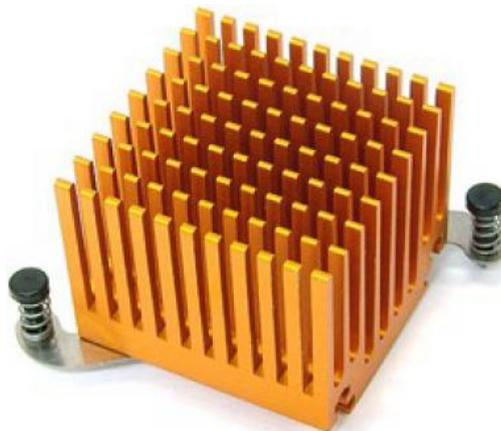
Les ailettes thermiques peuvent aussi être nommées radiateurs. Leur but est alors de refroidir un élément, en transmettant l'excédent de chaleur au milieu extérieur, c'est à dire l'air dans la plupart des cas.

Le radiateur d'une voiture (figure 4.2) permet de refroidir le moteur. Le liquide de refroidissement circule dans des tubes auxquels sont associées des ailettes thermiques qui transmettent cette chaleur à l'air. La circulation de l'air est assurée par la vitesse du véhicule, ce qui assure un phénomène de convection suffisant.



**Figure 4. 2:** Le radiateur d'une voiture

Les microprocesseurs des ordinateurs génèrent beaucoup de chaleur lors de leur fonctionnement. Afin d'éviter que ceux-ci soient endommagés par une surchauffe, ils sont parfois recouverts par un radiateur (figure 4.3). Le plus souvent en aluminium, ce système d'ailettes transmet directement la chaleur du processeur à l'air.



**Figure 4. 3:** L'ailette sur les microprocesseurs

Ainsi, même si leur forme peut beaucoup varier, les ailettes thermiques sont indispensables pour améliorer le rendement de tout échangeur de chaleur. Que le but soit de refroidir un élément en transmettant sa chaleur à l'air ambiant, ou au contraire de chauffer un fluide grâce à une résistance électrique, le principe des échangeurs reste toujours le même, et des ailettes thermiques y sont presque toujours associées.

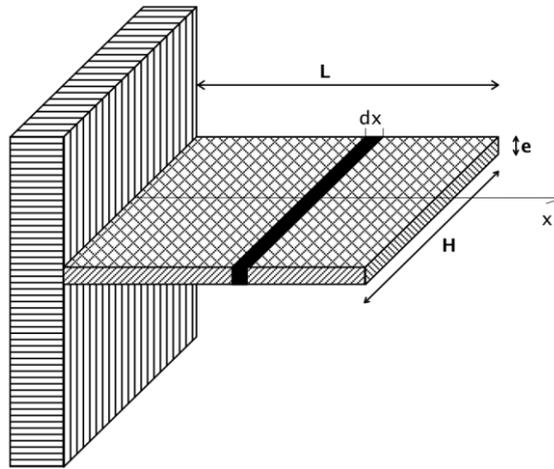
### ***1.1.2 Problème de l'ailette***

L'ailette a pour fonction d'amplifier les échanges de chaleur entre un mur plan et un fluide extérieur. Le transfert entre l'ailette et le mur se fait par conduction, alors que les échanges avec le fluide extérieur ont lieu par convection [32].

Un exemple très contemporain de ce type d'application est le refroidissement des microprocesseurs, dont la tendance à l'échauffement est combattue par un abaissement de la tension de fonctionnement, d'une part, et par des radiateurs à ailettes, d'autre part.

Considérons une ailette d'épaisseur  $e$ , de longueur  $L$ , de largeur  $H$ . L'épaisseur est supposée être petite par rapport à la longueur et la largeur. On néglige toutes les variations de température sur une section droite de l'ailette, et on suppose que  $T$  est fonction de la seule distance  $x$  par rapport au mur. On pose :

- $T_F$  : température du fluide extérieur
- $T_0$  : température du mur, et donc de l'ailette en  $x = 0$
- $\lambda$  : conductivité thermique de l'ailette
- $h$  : coefficient d'échange moyen entre l'ailette et l'air



**Figure 4. 4:** Mise en évidence du problème des ailettes

Soit le petit volume en forme de parallélépipède de largeur  $H$ , d'épaisseur  $e$  et de longueur  $dx$  :

- Il reçoit de la chaleur **par conduction**, du côté du mur, sur une surface  $\Omega = H \times e$ .
- Il cède de la chaleur **par conduction** par la face opposée, sur la même surface  $\Omega$ .
- Il cède de la chaleur **par convection** sur une surface  $S = P \, dx$  où  $P = 2(H + e)$  est le périmètre.

Sur ce petit volume, le bilan thermique va s'écrire :

$$\varphi_x \cdot \Omega - \varphi_{x+dx} \cdot \Omega - h \cdot S \cdot (T_x - T_F) = 0 \quad (4.1)$$

Or:  $\varphi_{x+dx} = \varphi_x + \frac{\partial \varphi_x}{\partial x} \cdot dx$  et  $\varphi = -\lambda \cdot \frac{dT_x}{dx}$

Soit :  $\varphi_x - \varphi_{x+dx} = -\frac{\partial \varphi_x}{\partial x} \cdot dx$  et  $\frac{\partial \varphi}{\partial x} = -\lambda \cdot \frac{d^2 T_x}{dx^2}$

Ce qui donne :  $\lambda \cdot \frac{d^2 T_x}{dx^2} \cdot dx \cdot \Omega - h \cdot P \cdot dx \cdot (T_x - T_F) = 0$

$$\frac{d^2 T_x}{dx^2} - \frac{h \cdot P}{\lambda \cdot \Omega} \cdot (T - T_F) = 0 \quad (4.2)$$

Remarquons que l'expression  $\frac{\lambda \cdot \Omega}{h \cdot P}$  a la dimension d'une surface.

Posons  $\theta = T - T_F$   $m = \sqrt{\frac{\lambda \cdot \Omega}{h \cdot P}}$  et  $X = \frac{x}{m}$

Notons que  $\theta$  a la dimension d'une température, alors que  $X$  est sans dimension.

La solution de l'équation différentielle du second ordre est du type :

$$\theta = A \cdot ch(x) + B \cdot sh(x) \quad (4.3)$$

On détermine A et B à partir des conditions aux limites :

- $x = 0$  donne  $X = 0$  et  $\theta = T_0 - T_F = \theta_0$  donc  $A = \theta_0$
- $x = L$  donne  $X = \frac{L}{m}$  et  $\frac{d\theta}{dx} = 0$  (en négligeant la transmission de chaleur en bout d'ailette)

$$\text{Soit : } \left. \frac{d\theta}{dx} \right|_{X=\frac{L}{m}} = \theta_0 \cdot sh \frac{L}{m} + B \cdot ch \frac{L}{m} = 0$$

La distribution de température s'écrit alors :

$$\theta = \theta_0 \cdot \left( ch X - \frac{sh \frac{L}{m}}{ch \frac{L}{m}} \cdot sh X \right) = \theta \cdot \frac{ch(\frac{L}{m} - X)}{ch \frac{L}{m}} \quad (4.4)$$

$$T = T_F + (T_0 - T_F) \cdot \frac{ch \frac{L-x}{m}}{ch \frac{L}{m}} \quad (4.5)$$

La température à l'extrémité ( $x = L$ ) s'écrit :

$$T_L = T_F + \frac{T_0 - T_F}{ch \frac{L}{m}} \quad (4.6)$$

L'écoulement de chaleur à l'intérieur de l'ailette, pour  $x = 0$  est donné par :

$$\phi_0 = -\lambda \cdot \Omega \cdot \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=0} = \lambda \cdot \Omega \cdot \frac{T_0 - T_F}{m} \cdot \left. \frac{sh \frac{L-x}{m}}{ch \frac{L}{m}} \right|_{x=0}$$

$$\phi_0 = \frac{\lambda \cdot \Omega}{m} \cdot (T_0 - T_F) \cdot th \frac{L}{m} = \sqrt{\lambda \cdot \Omega \cdot h \cdot P} \cdot (T_0 - T_F) \cdot th \left( L \cdot \sqrt{\frac{h \cdot P}{\lambda \cdot \Omega}} \right) \quad (4.7)$$

Le **rendement** d'une ailette est défini comme étant le rapport entre la chaleur réellement transmise à travers l'ailette et la chaleur qui serait transmise par convection ou rayonnement à partir de la surface de base de la tige, si l'ailette était supprimée.

$$\eta = \frac{\frac{h \cdot \Omega}{m} \cdot (T_0 - T_F) \cdot th \frac{L}{m}}{h \cdot \Omega \cdot (T_0 - T_F)} = \sqrt{\frac{P \cdot \lambda}{\Omega \cdot h}} \cdot th \left( L \cdot \sqrt{\frac{h \cdot P}{\lambda \cdot \Omega}} \right) \quad (4.8)$$

Ou encore, en remarquant que ( $e \ll H$ ) :  $\frac{P}{\Omega} = \frac{2 \cdot (H+e)}{H \cdot e} \approx \frac{2 \cdot H}{H \cdot e} = \frac{2}{e}$

$$\eta = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{e \cdot h}} \cdot th \left( \sqrt{\frac{2 \cdot h}{e \cdot \lambda}} \right) \quad (4.9)$$

## I.2 Modèle théorique

### I.2.1 Equation de l'ailette thermique

On sait que :

$$\frac{d^2 T}{dx^2} - \frac{h \cdot P}{\lambda \cdot \Omega} \cdot (T_x - T_f) = 0$$

Ce qui donne :

$$\frac{d^2 \theta(x)}{dx^2} - \alpha^2 \theta(x) = 0$$

Les solutions de cette équation différentielle sont de la forme :

$$\begin{aligned} \theta(x) &= A \cdot ch(\alpha x) + B \cdot sh(\alpha x) \\ \theta(x) &= C \cdot \exp(-\alpha x) + D \cdot \exp(\alpha x) \end{aligned} \quad (4.10)$$

Afin de résoudre notre problème [33], nous disposons de 2 conditions limites : la première est donnée par  $T_0$  en  $x = 0$ . En ce qui concerne la seconde, nous devons distinguer 3 hypothèses :

- ailette de longueur infinie
- Flux en  $x = L$  est nul
- Flux convectif échangé au bout de l'ailette

#### Modèle 1 :

On utilise la condition limite :  $L \rightarrow \infty$  donc  $\theta(x) \rightarrow 0$  (ailette de longueur infinie)

En utilisant l'équation différentielle précédente, on a :

$$\theta(L) = C \cdot \exp(-\alpha \cdot L) + D \cdot \exp(\alpha \cdot L) = 0$$

Quand  $L \rightarrow \infty$ ,  $\exp(\alpha \cdot L) \rightarrow \infty$  donc il faut que  $D$  soit nul pour que  $\theta(L) \rightarrow 0$  dans ces conditions.

L'équation devient :  $\theta(L) = C \cdot \exp(-\alpha \cdot L) = 0$  ; quand  $x = 0$ ,  $\theta(0) = C \cdot \exp(0) = C$ .

On obtient donc pour le modèle 1 l'équation suivante :

$$\theta(x) = \theta(0) \cdot e^{-\alpha x} \quad (4.11)$$

## Modèle 2 :

On utilise la condition limite :

$$\Psi(x = L) = 0 \text{ (flux nul traversant l'extrémité)}$$

Ainsi :

$$\frac{d\theta(L)}{dx} = A * \alpha * sh(\alpha * L) + B * \alpha * ch(\alpha * L) = 0$$

$$\text{Or } A = \theta(0) \text{ donc } B = - \frac{\theta(0) * sh(\alpha L)}{ch(\alpha L)}$$

On a donc :

$$\theta(x) = \theta(0) \cdot \frac{ch(\alpha x) \cdot ch(\alpha L) - sh(\alpha x) \cdot sh(\alpha L)}{ch(\alpha L)}$$

D'où finalement :

$$\theta(x) = \theta(0) \cdot \frac{ch(\alpha L - \alpha x)}{ch(\alpha L)} \quad (4.12)$$

## Modèle 3 :

On considère un flux convectif échangé au bout de l'ailette :

$$\Phi(L) = h \cdot S \cdot (T(L) - T_e) = -\lambda \cdot S \cdot \frac{\partial \theta(L)}{\partial x}$$

$$h \cdot \theta(L) = -\lambda \cdot \theta'(L)$$

$$h \cdot [\theta(0) \cdot ch(\alpha L) + B \cdot sh(\alpha L)] = -\lambda \cdot \alpha \cdot [\theta(0) \cdot sh(\alpha L) + B \cdot ch(\alpha L)]$$

On trouve B :

$$B = \theta(0) \cdot \frac{-h \cdot ch(\alpha L) - \lambda \cdot \alpha \cdot sh(\alpha L)}{h \cdot sh(\alpha L) + \lambda \cdot \alpha \cdot ch(\alpha L)}$$

L'équation obtenue pour le modèle 3 est :

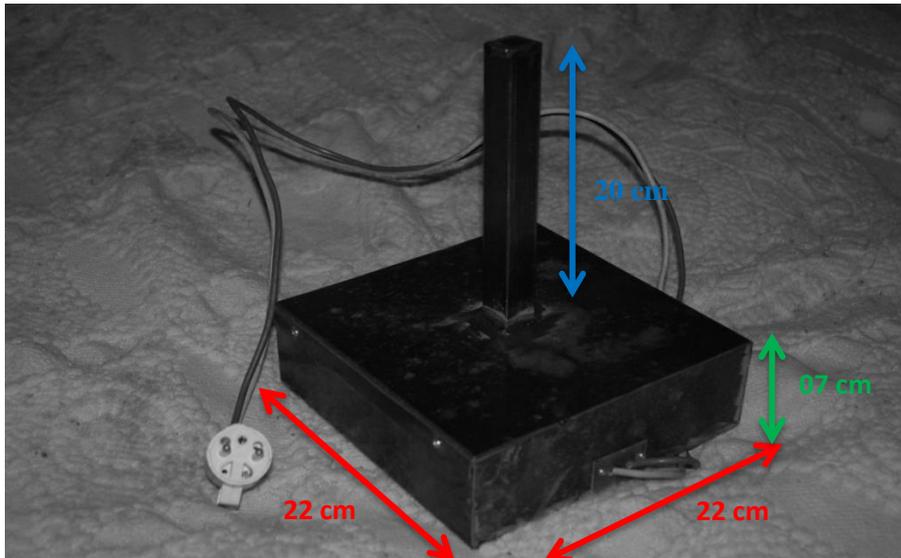
$$\theta(x) = \theta(0) \cdot \frac{h \cdot sh(\alpha(L-x)) + \alpha \cdot \lambda \cdot ch(\alpha(L-x))}{h \cdot sh(\alpha L) + \alpha \cdot \lambda \cdot ch(\alpha L)} \quad (4.13)$$

### 1.2.2 Etudes expérimentales

#### a- Expérience 1

Notre module expérimental peut être considéré comme un assemblage d'un circuit électronique au-dessus duquel on a placé une ailette de longueur moyenne de 20 cm et de surface de base  $e \times e = 2.3 \text{ cm} \times 2.3 \text{ cm} = 5.3 \text{ cm}^2$ .

Le circuit électronique proprement a une dimension de longueur  $L =$  largeur  $l = 22 \text{ cm}$  et de hauteur  $h = 7 \text{ cm}$ . On prendra  $\varepsilon = 0.85$  puisque l'on utilise du TPN ou Tôle Plane Noire.



**Figure 4. 5:** Schéma du dispositif expérimental n°1

Au début de notre expérience, on a pris une résistance de 1000 W juste pour vérifier si notre dispositif fonctionne et au bout de quelques minutes seulement, la température de l'ensemble du boîtier avec ailette s'est uniformisée c'est-à-dire que tout l'air contenu dans notre dispositif ne peut plus assurer une conduction naturelle et que si c'était le cas d'un composant électronique c'est sûr que ce dernier serait détruit.

Après quelque modification, la puissance dissipée par les composants à l'intérieure du boîtier est 300 W ce que l'on garderait dans la suite.

Après 5 mn d'alimentation, la température aux alentours du boîtier est de 25 °C et dans le boîtier aux alentours 100 °C ; l'autre extrémité de l'ailette donne  $T_f = 20$  °C ; on a :

$$\dot{Q}_{conv} = \varphi_{conv} = h_{conv} * A_S * \Delta T = h_{conv} * A_S (T_S - T_{fluide})$$

$A_S$  : Surface d'échange [ $m^2$ ]

- Calculons séparément le flux de transfert de la convection naturelle et celui de la radiation :
- On peut considérer les 4 côtés de la boîte comme étant des surfaces verticales de hauteur 7cm :

$$L_c = 0.07 \text{ m}$$

$$A_c = ((2 * 0.22) + (2 * 0.22)) * 0.07 = 0.06 \text{ m}^2$$

$$h_{conv} = 1.42 * \left( \frac{100 - 25}{0.07} \right)^{0.25} = 8.12 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\dot{Q}_c = h_{conv} * A_c * \Delta T = 8.12 * 0.06 * 75 = 36.54 \text{ W}$$

- La surface en haut est assimilable à une plaque horizontale chauffant vers le haut :

$$h_{conv} = 1.32 * \left(\frac{\Delta T}{L_h}\right)^{0.25}$$

$$L_h = \frac{4 * A_S}{P} = \frac{4 * 0.22 * 0.22}{2(0.22 + 0.22)} = 0.22 \text{ m}$$

$$A_h = 0.22 * 0.22 = 0.0484 \text{ m}^2$$

$$h_{conv,top} = 1.32 * \left(\frac{100 - 25}{0.22}\right)^{0.25} = 4.30 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

$$\dot{Q}_{conv,top} = h_{conv,top} * A_h * \Delta T = 4.30 * 0.05 * 75 = 16.12 \text{ W}$$

- La boîte étant placée dans la chambre, la température de ses alentours est donc égale à la température de l'air dans la chambre (i.e. 25°C = 298 °K). Le taux de transfert de la chaleur par radiation est donc :

$$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon * A * \sigma * (T_S^4 - T_{alentours}^4)$$

$$A = A_c + A_h = 0.05 + 0.06 = 0.11 \text{ m}^2$$

$$\dot{Q}_{rad} = 0.85 * 0.11 * 5.67 \cdot 10^{-8} * (373^4 - 298^4) = 60.81 \text{ W}$$

Le flux total de la chaleur est alors :

$$\dot{Q}_{total} = \dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{rad} = 36.54 + 16.12 + 60.81 = 113.5 \text{ W}$$

Cela ne suffit pas à refroidir le composant.

Maintenant au bout de 15 mn d'alimentation, la température à l'intérieur du boîtier atteint les 200 °C et aux alentours du boîtier 35 °C.

- Le flux par convection naturelle devient :

Pour la surface verticale

$$L_c = 0.07 \text{ m}$$

$$A_c = ((2*0.22) + (2*0.22))*0.07 = 0.06 \text{ m}^2$$

$$h_{conv} = 1.42 * \left(\frac{200 - 35}{0.07}\right)^{0.25} = 9.897 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

$$\dot{Q}_c = h_{conv} * A_c * \Delta T = 9.897 * 0.06 * 165 = 97.98 \text{ W} \approx 98 \text{ W}$$

Pour la surface en haut :

$$h_{conv} = 1.32 * \left(\frac{\Delta T}{L_h}\right)^{0.25}$$

$$L_h = \frac{4 * A_S}{P} = \frac{4 * 0.22 * 0.22}{2(0.22 + 0.22)} = 0.22 \text{ m}$$

$$A_h = 0.22 * 0.22 = 0.0484 \text{ m}^2$$

$$h_{conv,top} = 1.32 * \left( \frac{200 - 35}{0.22} \right)^{0.25} = 4.30 \text{ W/m}^2\text{C}$$

$$\dot{Q}_{conv,top} = h_{conv,top} * A_h * \Delta T = 4.30 * 0.05 * 75 = 56.98 \text{ W} \approx 57 \text{ W}$$

- La boîte étant placée dans la chambre, la température de ses alentours est donc égale à la température de l'air dans la chambre (i.e. 25°C = 298 °K). Le taux de transfert de la chaleur par radiation est donc :

$$\dot{Q}_{rad} = \epsilon * A * \sigma * (T_S^4 - T_{alentours}^4)$$

$$A = A_c + A_h = 0.05 + 0.06 = 0.11 \text{ m}^2$$

$$\dot{Q}_{rad} = 0.85 * 0.11 * 5.67 \cdot 10^{-8} * (473^4 - 298^4) = 223.55 \text{ W}$$

Le flux total de la chaleur est alors :

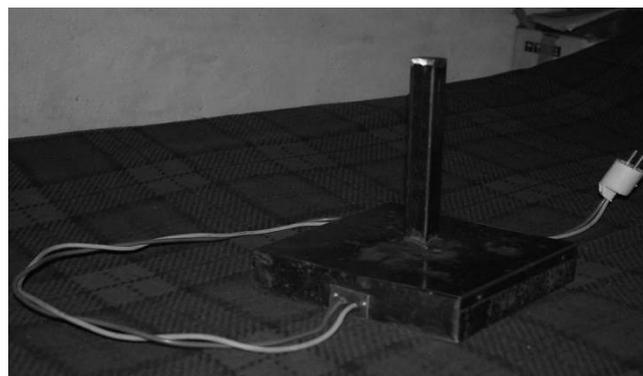
$$\dot{Q}_{total} = \dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{rad} = 98 + 57 + 223.55 = 378.57 \text{ W}$$

On peut donc conclure que la conduction naturelle à l'intérieure du boîtier suffit à refroidir le composant électronique ce qui n'arrange pas nos affaires car notre but est de voir si le dispositif expérimental fonctionne.

## b- Expérience 2

Refaisant notre expérience avec cette fois ci, on va diminuer la hauteur du dispositif de 2.5 cm, soit au final une dimension de longueur L = largeur l = 22 cm et de hauteur h = 4.5 cm. La valeur d'  $\epsilon = 0.85$  ne changera pas. On placera toujours une ailette de longueur moyenne de 20 cm et de surface de base  $e \times e = 2.3 \text{ cm} \times 2.3 \text{ cm} = 5.3 \text{ cm}^2$  au-dessus du dispositif.

On a aussi diminué la puissance dissipée par le composant à environ 200 W.



**Figure 4. 6:** Schéma du dispositif expérimental n°2

La température à l'intérieure du dispositif atteint les 200 °C et la température aux alentours de 150 °C ; à l'extrême bout de l'ailette, la température atteint 40 °C.

On aurait comme résultat :

- Pour la surface verticale

$$L_c = 0.04 \text{ m}$$

$$A_c = ((2*0.22) + (2*0.22))*0.04 = 0.03 \text{ m}^2$$

$$h_{conv} = 1.42 * \left( \frac{200 - 150}{0.04} \right)^{0.25} = 8.45 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\dot{Q}_c = h_{conv} * A_c * \Delta T = 8.45 * 0.03 * 50 = 12.68 \text{ W}$$

- Pour la surface en haut

$$L_h = \frac{4 * A_s}{P} = \frac{4 * 0.22 * 0.22}{2(0.22 + 0.22)} = 0.22 \text{ m}$$

$$A_h = 0.22 * 0.22 = 0.0484 \text{ m}^2$$

$$h_{conv,top} = 1.32 * \left( \frac{200 - 150}{0.22} \right)^{0.25} = 5.12 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\dot{Q}_{conv,top} = h_{conv,top} * A_h * \Delta T = 5.12 * 0.05 * 50 = 56.98 \text{ W} \approx 12.8 \text{ W}$$

- Le taux de transfert de la chaleur par radiation est donc :

$$A = A_c + A_h = 0.05 + 0.03 = 0.08 \text{ m}^2$$

$$\dot{Q}_{rad} = 0.85 * 0.08 * 5.67 * 10^{-8} * (473^4 - 423^4) = 69.55 \text{ W}$$

Le flux total de la chaleur est alors :

$$\dot{Q}_{total} = \dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{rad} = 12.68 + 12.8 + 69.55 = 95 \text{ W}$$

On constate que l'ailette fait bien son travail puisque la différence de température entre les deux bout de l'ailette est de 150 °C - 40 °C = 110 °C

Ainsi la résistance thermique de notre ailette est  $R_{th} = \frac{150 - 40}{220} \approx 0.5 \text{ } ^\circ\text{C/W}$  ce qui est assez satisfaisante.

Procédons maintenant à une simulation sur ComsolMultiphysics 4.3 pour vérifier notre donnée expérimentale et comparons les résultats.

## II. Simulation

### II.1 Introduction à ComsolMultiphysics

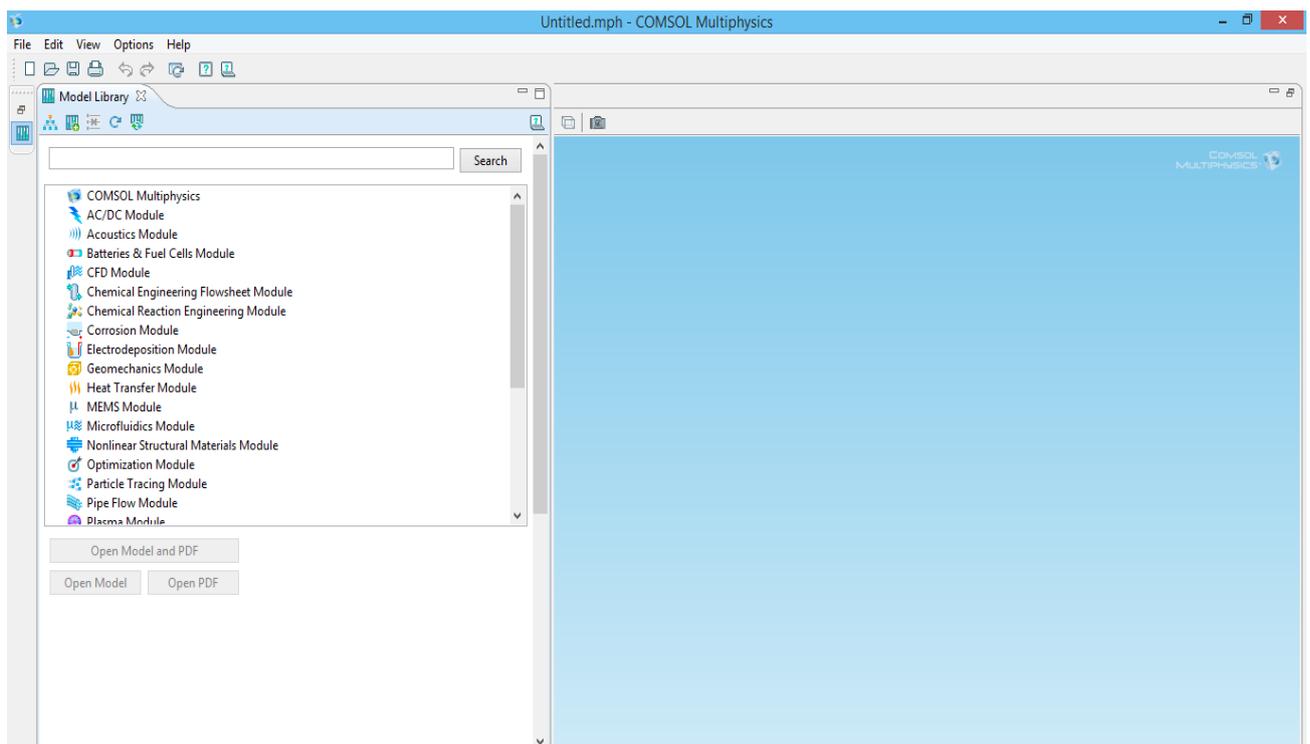
Le COMSOL Multiphysics est un logiciel interactif puissant servant à modéliser et résoudre toutes sortes de problèmes scientifiques et d'ingénierie avec une rapidité de résolution étonnante.

Ce logiciel est autonome mais utilise une interface utilisateur graphique flexible avec un langage de programmation compatible avec MATLAB. La structure mathématique fondamentale dans COMSOL Multiphysics est un système des équations partielles [34].

La famille de produit de COMSOL 4.3 inclut les modules suivants:

- AC/DC Module
- Chemical Engineering Module
- Earth Science Module
- Heat Transfer Module
- MEMS Module
- RF Module
- Structural Mechanics Module

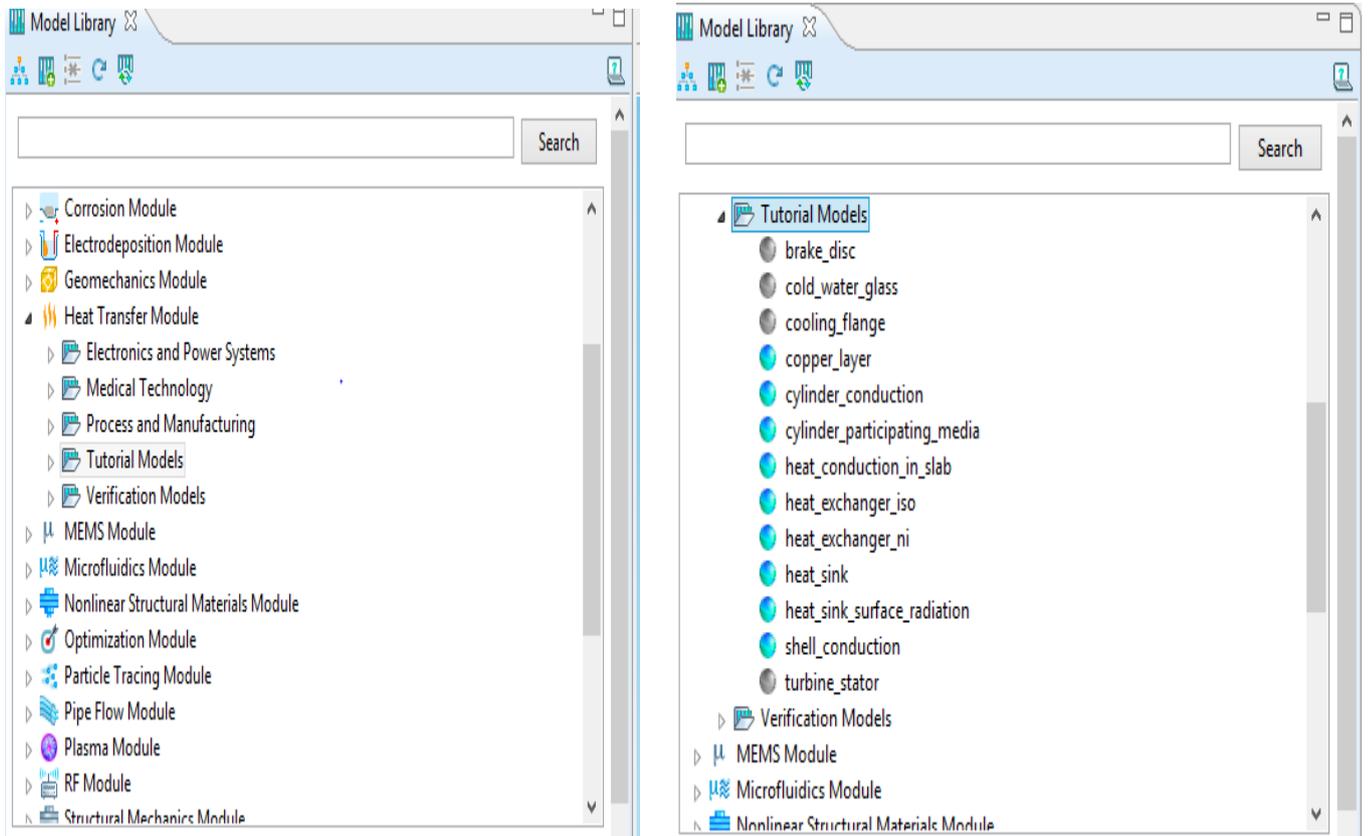
COMSOL Multiphysics nous laisse choisir des modes de dimension et d'application de l'espace pour commencer à travailler sur un nouveau modèle, ouvrir un modèle existant que nous avons déjà créé, ou entré dans la bibliothèque modèle [35].



**Figure 4. 7:** Exemple d'interface dans ComsolMultiphysics

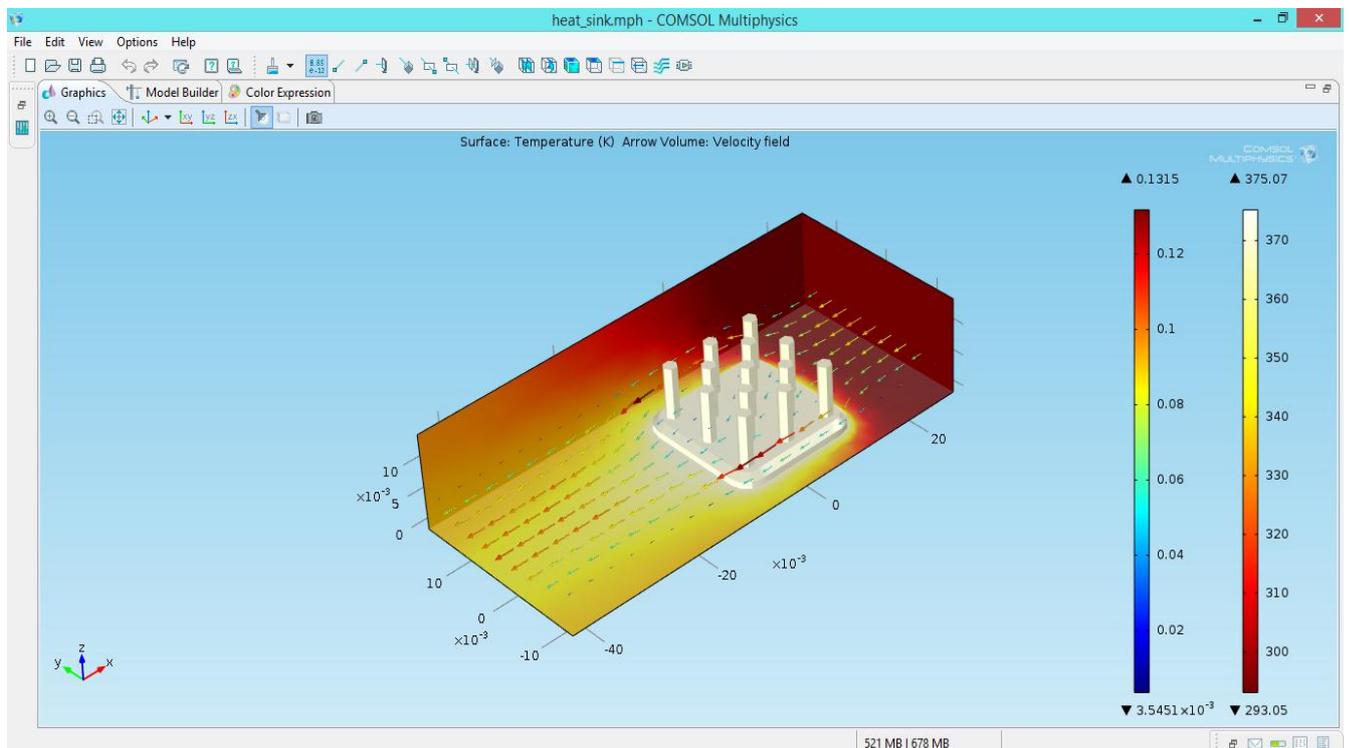
Ce logiciel touche ainsi beaucoup de domaine mais ce qui nous intéresse c'est celui du transfert thermique donc cliquons sur Heat transfer Module ou sur Pipe Flow module.

Déjà à l'intérieur de Heat transfer, il y a encore plusieurs domaines d'application à savoir : Electronics and Power Systèmes, Medical Technology, Process and Manufacturing, Tutorial Models et Verification Models. Entrant dans le tutorial Models :



**Figure 4. 8:** Les sous options dans Heat Transfer Module

Intéressons à ce qui se passe si on clique sur heat\_sink :



**Figure 4. 9:** Comportement d'une Heat\_sink dans ComsolMultiphysics

Simulons maintenant notre module expérimentale n°2 puisque on voit bien que le logiciel peut modéliser le comportement thermique de notre dispositif.

## II.2 Simulation de notre dispositif à ailette thermique via le Comsol Multiphysics 4.3

Rappelons les caractéristiques de notre dispositif d'abord :

- Circuit de base : longueur = largeur = 22 cm ; hauteur = 4.5 cm
- Ailette : hauteur = 20 cm ; surface de base = 2.3 cm \* 2.3 cm

Entrant en premier lieu en mode Model Wizard.

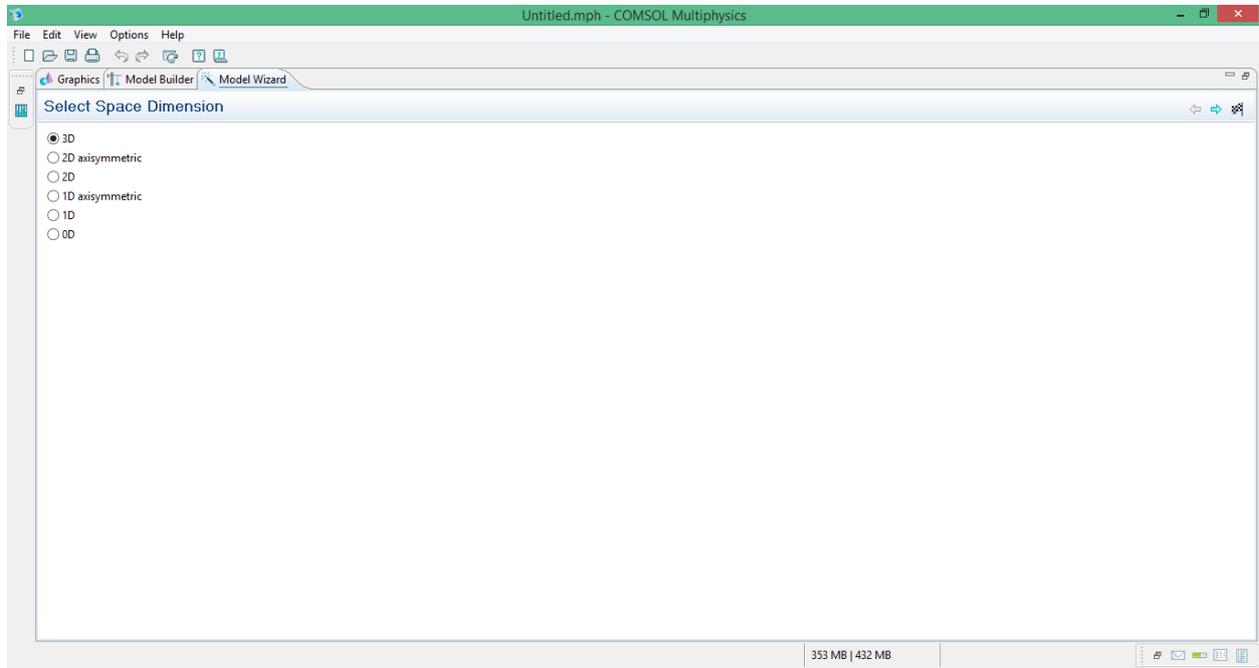


Figure 4. 10: Selection du Model Wizard

Puis suivant le patch :  $\Delta u$  Mathematics/  $\Delta u$  PDE Interfaces/  $\Delta u$  Coefficient Form PDE(c) et validant le résultat :

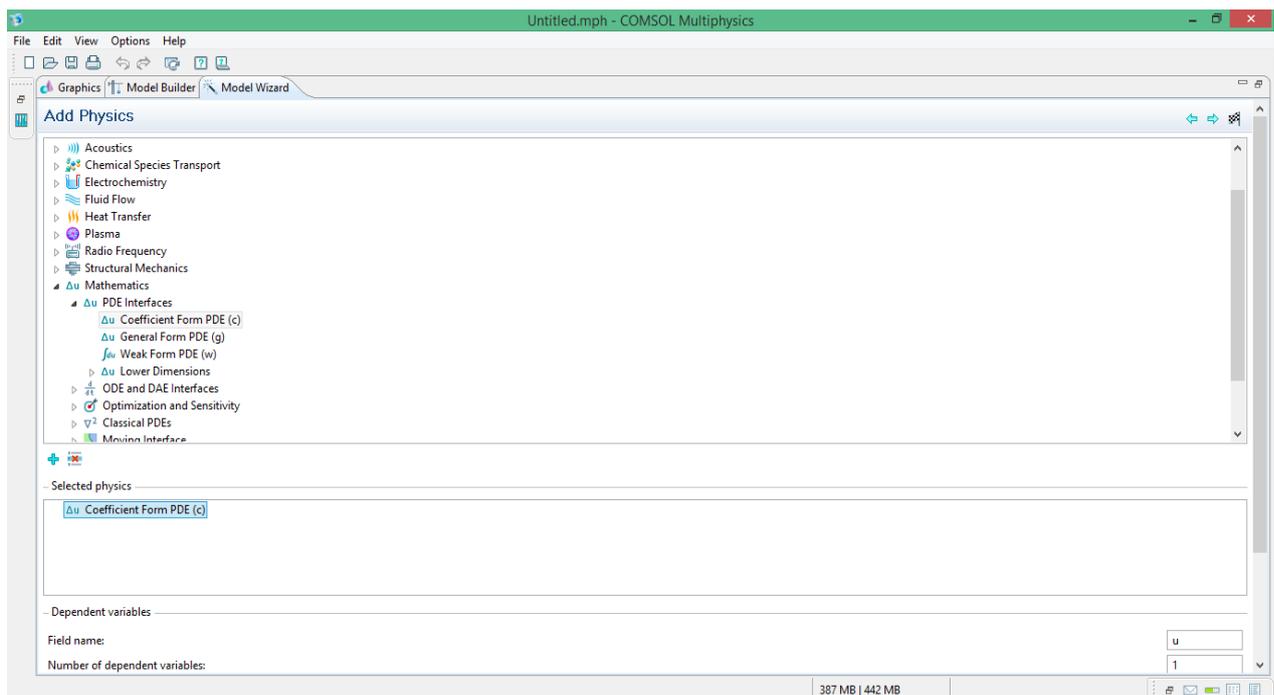
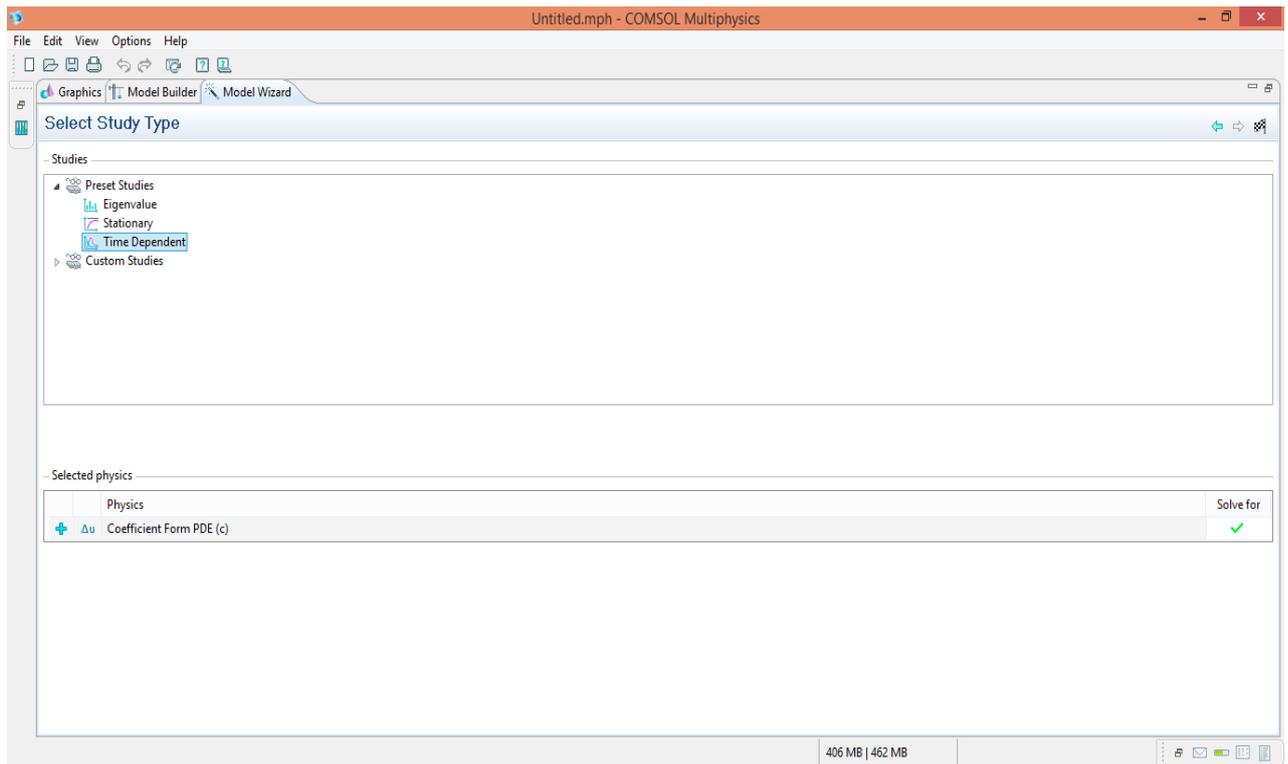


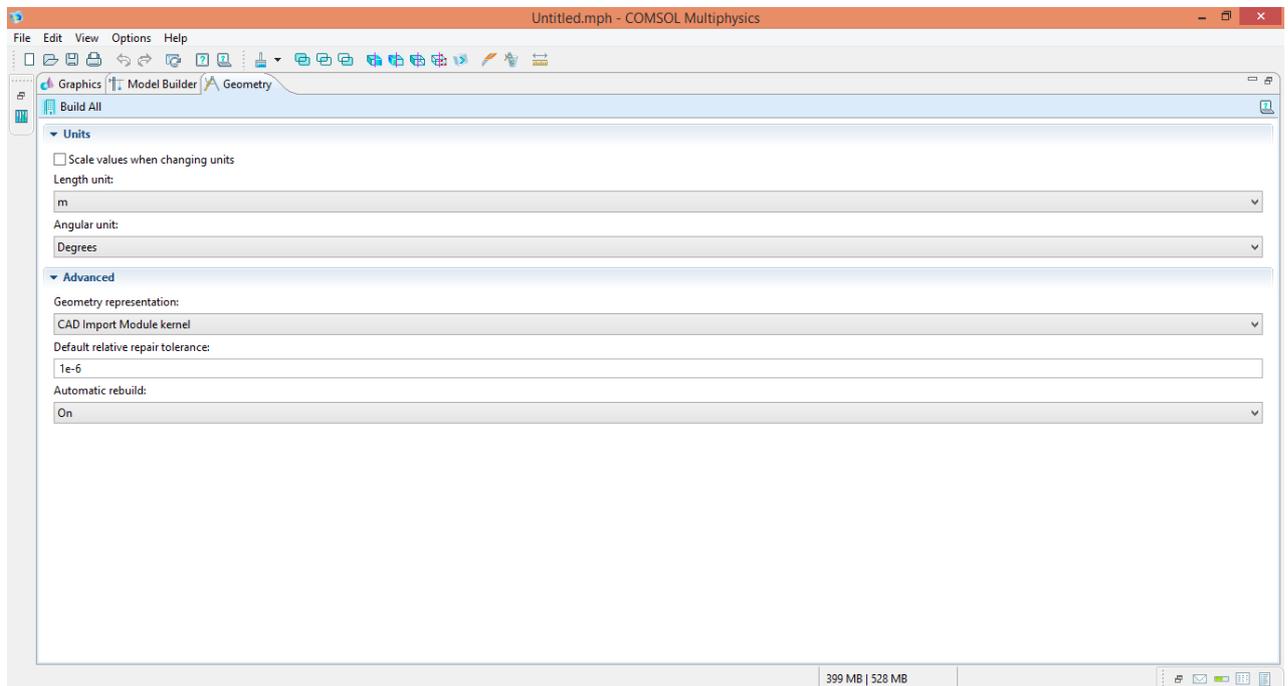
Figure 4. 11: Le mode  $\Delta u$  Mathematics

Pour valider le résultat, cliquons sur Time Dependent puis sur le drapeau



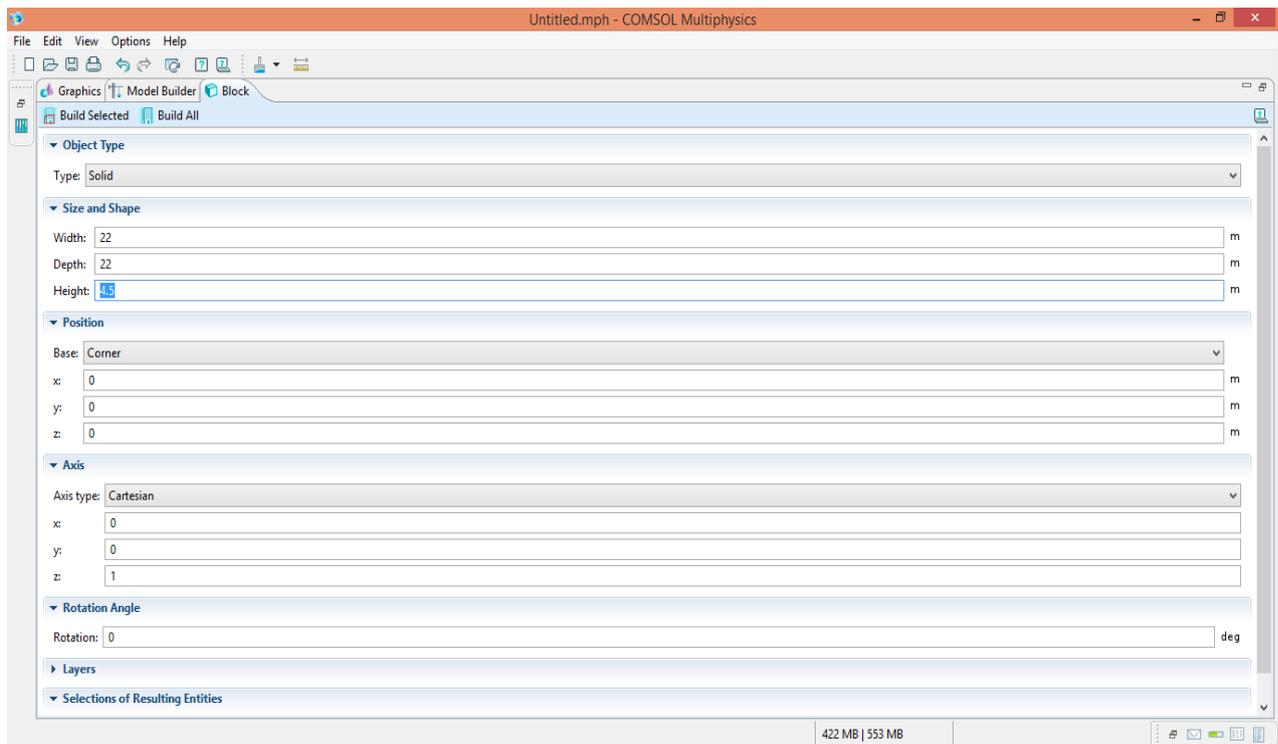
**Figure 4. 12:** Le mode Time Dependent

On aura :



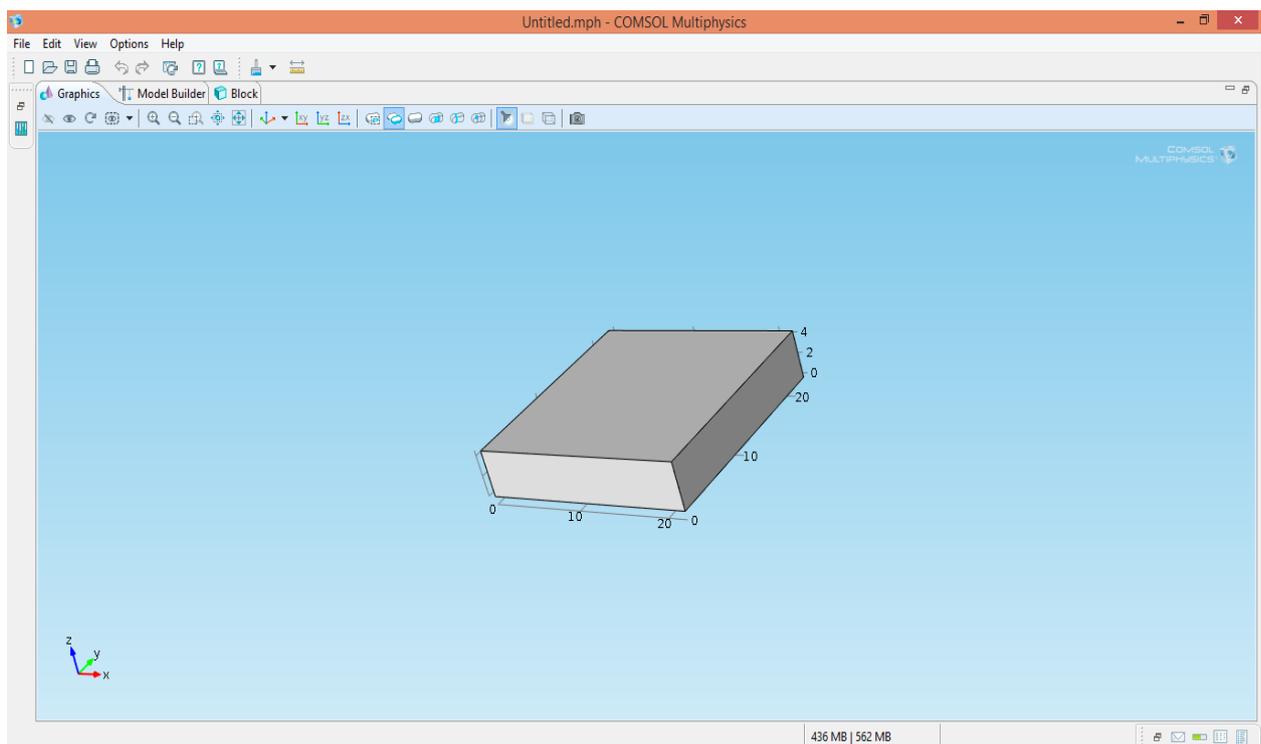
**Figure 4. 13:** Le mode Geometry sur ComsolMultiphysics

Ici l'icône Graphics sert à visualiser notre schéma en plusieurs dimensions ; l'icône Model Builder pour revoir le chemin ou patch que l'on a pris. Faisons maintenant un clic droit sur Geometry et ensuite cliquons sur Block. Paramétron les données pour être identique à celui de notre dispositif expérimental :



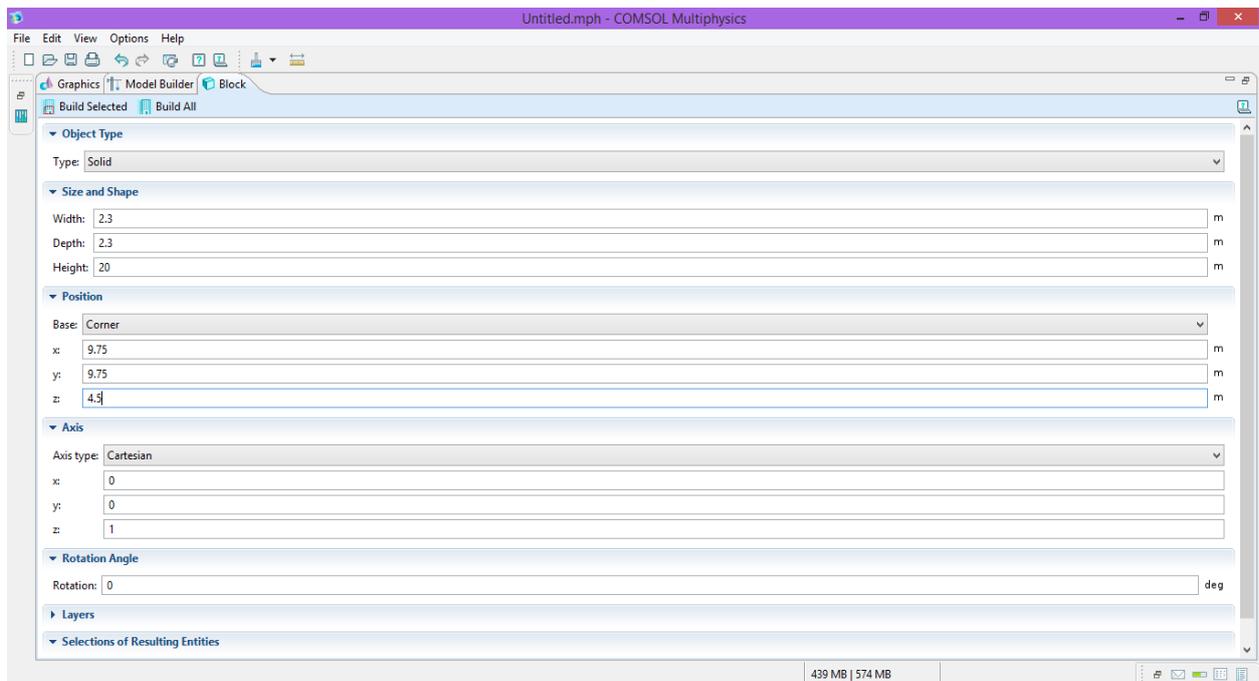
**Figure 4. 14:** Sélection et création d'un Block

Pour valider, on clique sur Build All et on aura :



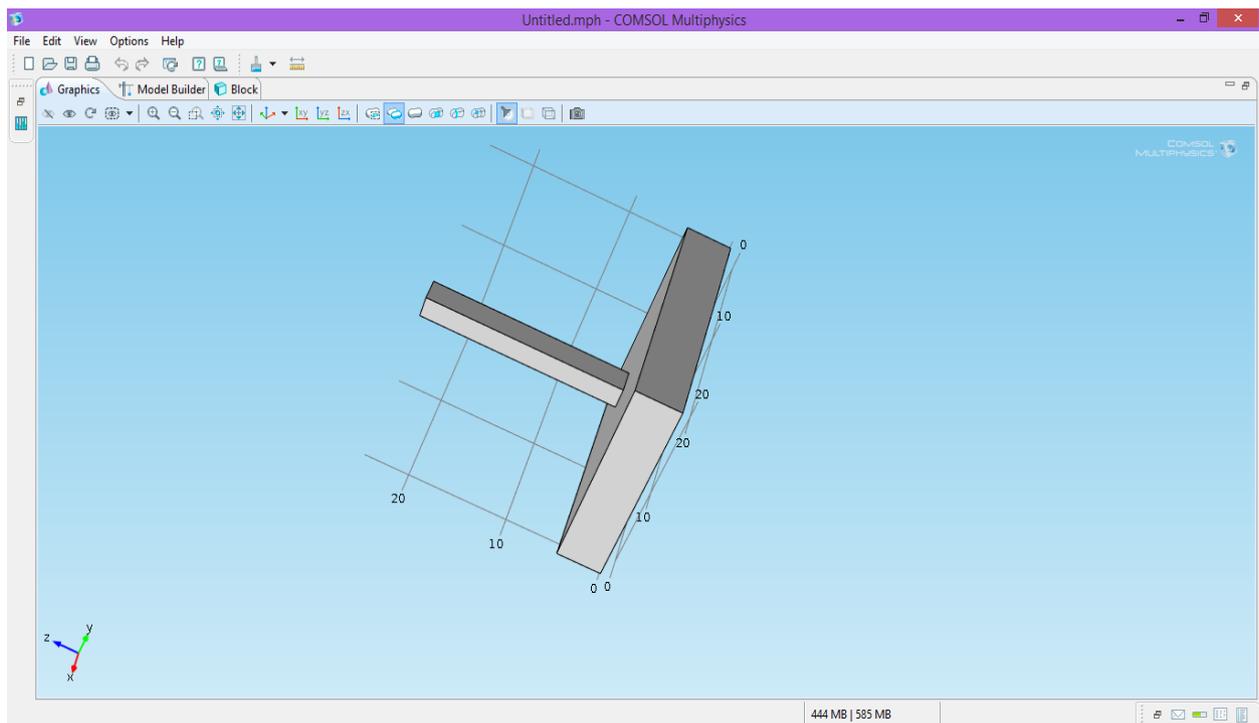
**Figure 4. 15:** Le circuit de base de notre dispositif expérimental

Ainsi, jusqu'ici on a obtenu un dessin en 3D assez conforme à notre dispositif. On va refaire les mêmes étapes pour créer le modèle d'ailette mais toute en s'assurant que celui se poserait bien au centre et au-dessus du premier bloc donc on aurait comme paramétrage :



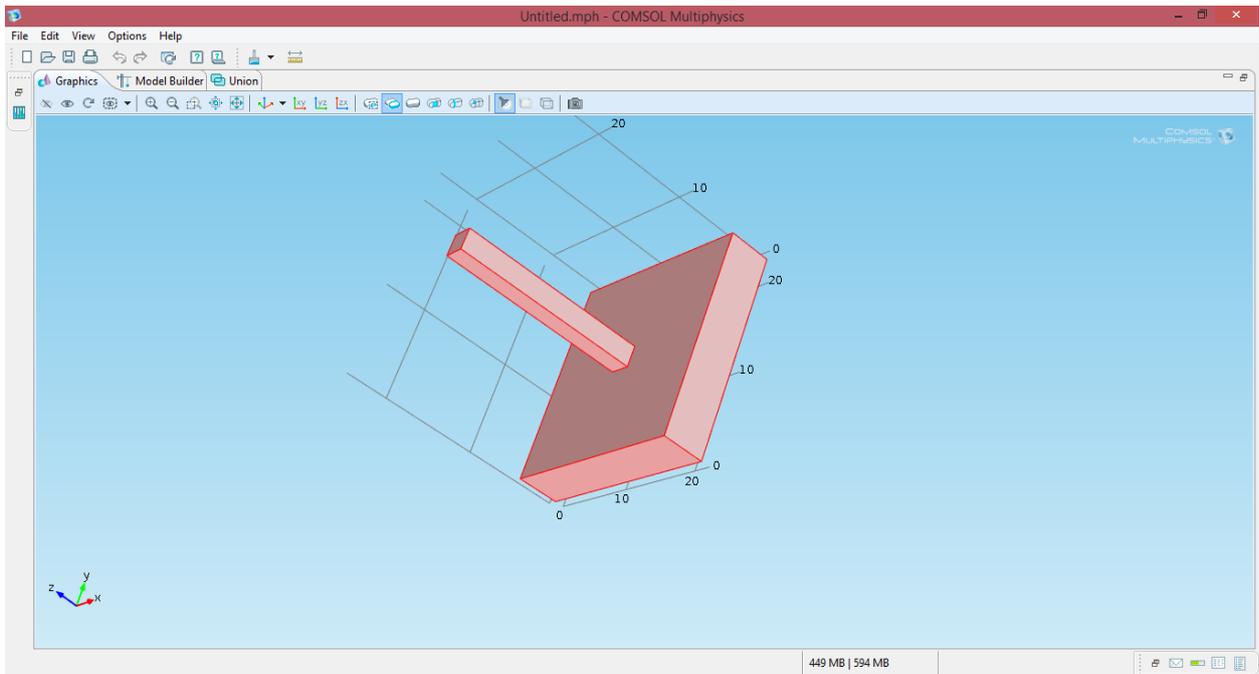
**Figure 4. 16:** Le Paramétrage du second Block

On va valider ces données puis voir le résultat :



**Figure 4. 17:** Résultat obtenu après validation des données

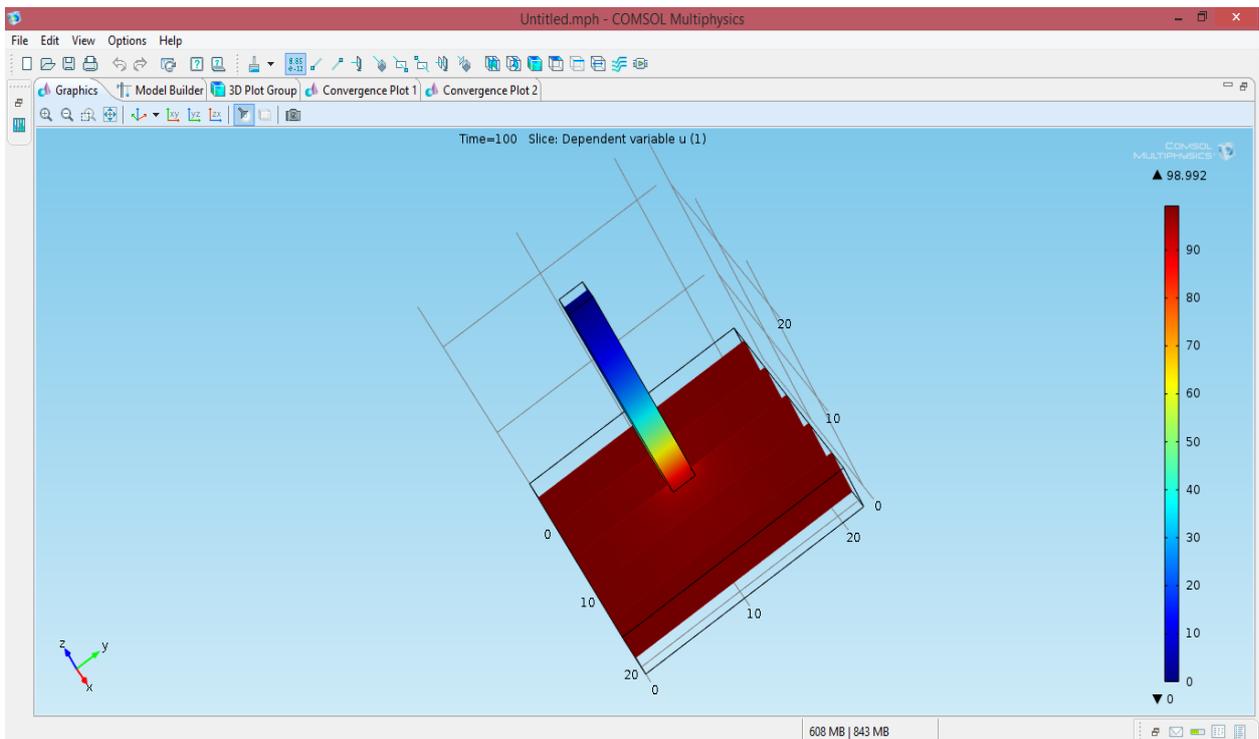
Ici, on pourrait se laisser croire que notre travail est fini mais si on clique sur ces deux Blocks, on verrait qu'ils ne sont pas liés donc pour les unir, il faut faire un clic droit sur Geometry/Boolean Operations/union. Ensuite, il faut sélectionner un par un les deux Blocks puis valider dans Build All. Pour vérifier si cela a marché, cliquer sur le Block, l'ensemble virera au rouge si l'union aura bien marché sinon l'un des deux seulement sera rouge.



**Figure 4. 18:** Schéma des deux Block unis

Maintenant que les blocs sont unis ; on pourrait enfin simuler le comportement thermique de notre dispositif en sachant que la source chaude est le circuit de base.

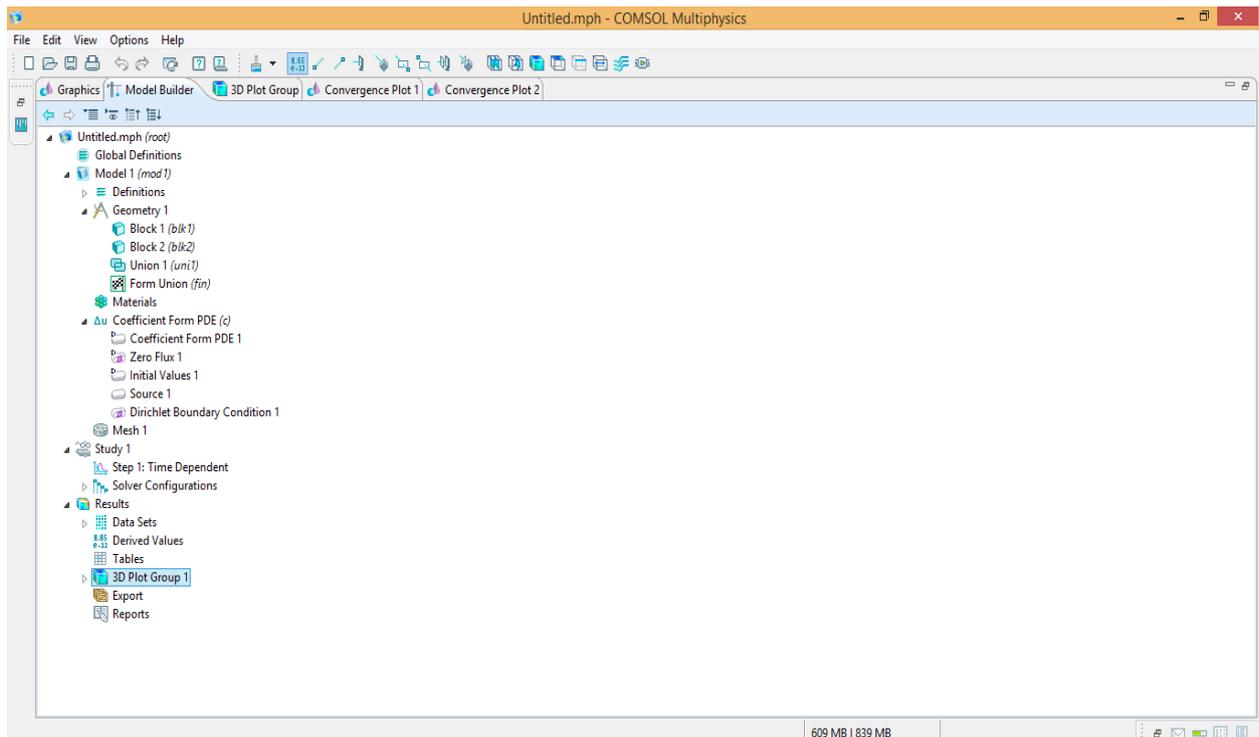
Après avoir paramétré et entré quelques données, on a :



**Figure 4. 19:** Résultat obtenu après paramétrage de la source chaude

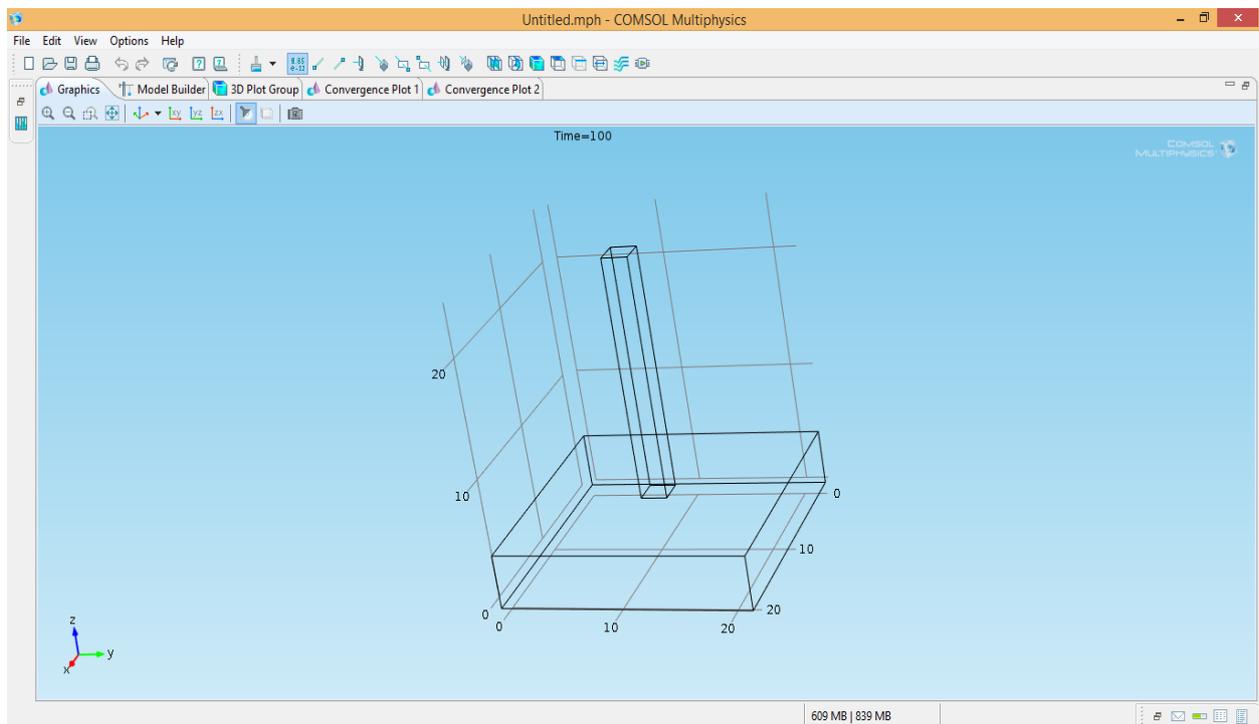
Ici le résultat est déjà satisfaisant, puisque c'est conforme à notre étude expérimentale et d'ailleurs, on voit très bien la différence de température entre sur plusieurs parties de notre dispositif.

Après tout ceci, dans Model Builder on aura :



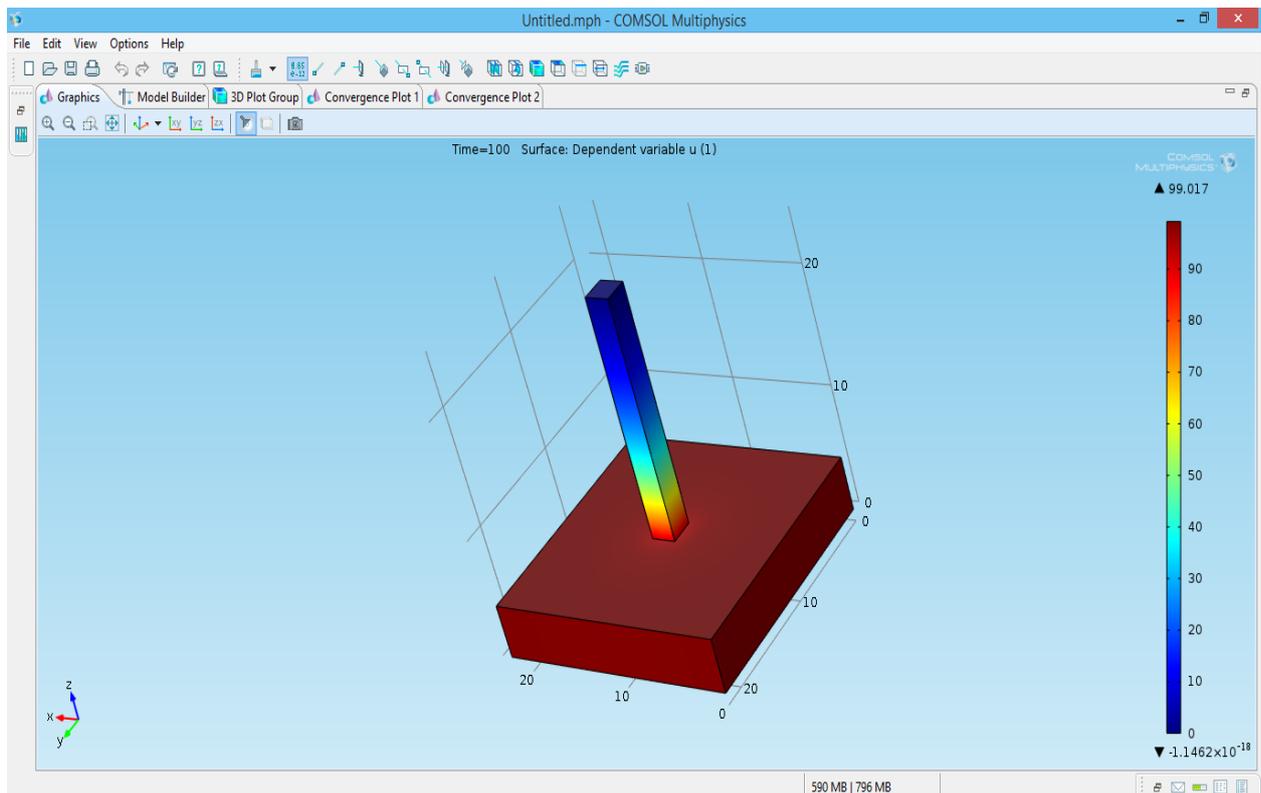
**Figure 4. 20:** Le nouveau Patch dans Model Builder

Cliquons sur Results/3D Plot Group et on aura sur Graphics :



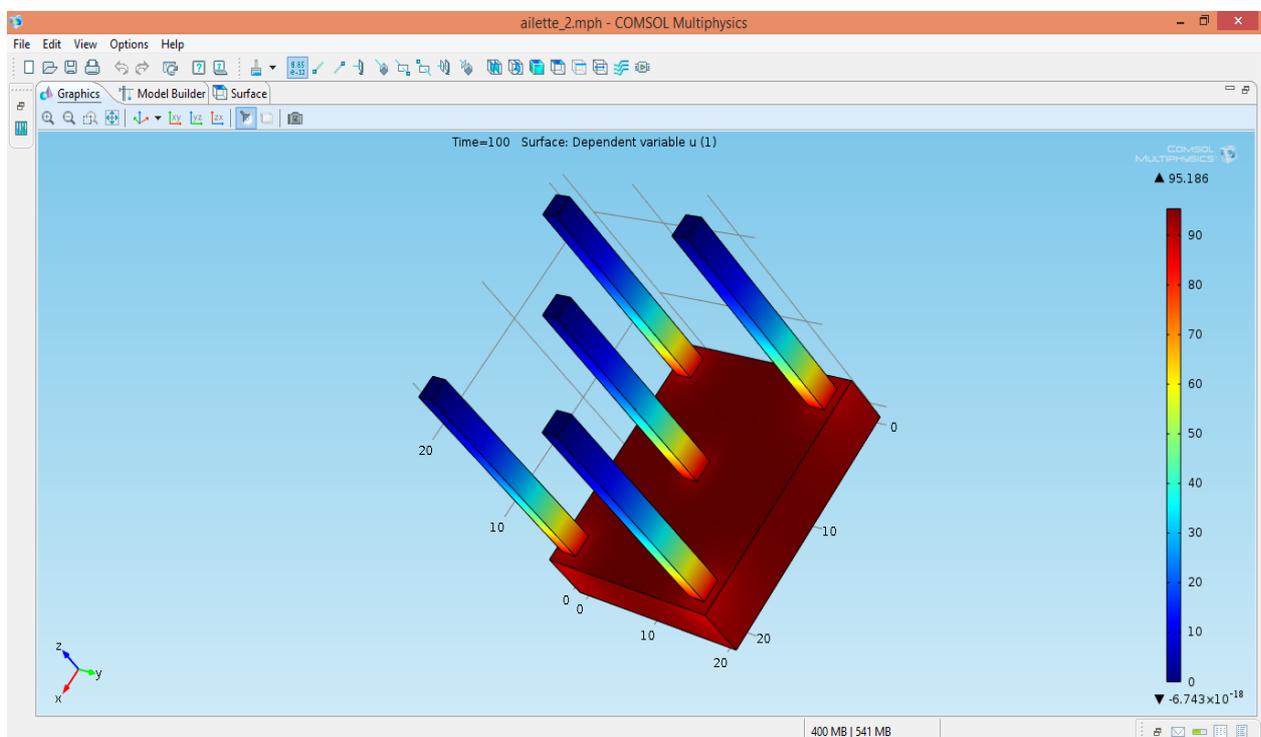
**Figure 4. 21:** Résultat du Mode 3D Plot Group

Maintenant, on va uniformiser notre modèle donc après paramétrage, on aura le résultat final attendu mais il faut cliquer sur Results/ 3D Plot Group2/ Surfaces et on aura finalement :



**Figure 4. 22:** Résultat final du comportement thermique de notre dispositif expérimental

Le résultat est satisfaisant et on pourrait même créer un dispositif avec plusieurs ailettes sur la face qui favoriseraient la rapidité du refroidissement.



**Figure 4. 23:** Résultat obtenu avec cinq ailettes

# CONCLUSION

Le travail présenté dans ce rapport porte essentiellement sur la réalisation, le comportement et la simulation d'une ailette thermique pour protéger les composants électroniques de puissance comme les MOSFET. Le but était de faire connaître aux « utilisateurs » l'importance du transfert thermique cause essentielle du non fonctionnement des composants. La partie théorique a permis de connaître les différents types de transfert thermique, les systèmes de refroidissement innovants ainsi que la modélisation thermique d'un composant de puissance.

Dans le premier chapitre, les modes de transfert thermique ont été décrits et illustrés par quelques exemples courants. Dans le second chapitre, on a vu les essentiels sur le procédé de refroidissement des composants ou circuits électroniques avec mise en évidence de la résistance thermique. Dans le troisième chapitre, la modélisation thermique d'un composant de puissance se concrétise par analogie avec la modélisation électrique de ces composants. Dans le dernier chapitre, il s'agit surtout de se consacrer à l'expérimentation et aux simulations.

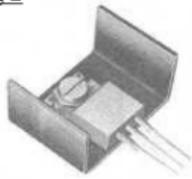
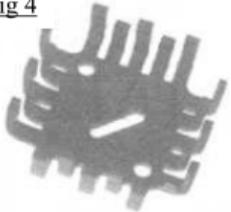
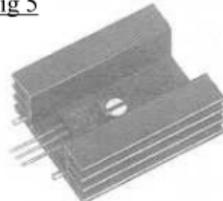
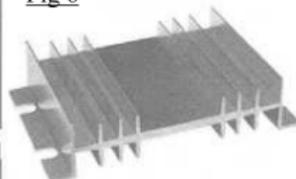
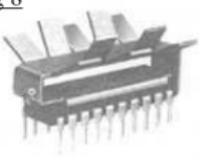
Les résultats obtenus ont démontré l'efficacité et l'importance d'une ailette thermique sur le refroidissement des composants de puissance. Pourtant, les constatations montrent qu'il y a encore beaucoup de facteurs à mettre en cause comme la mesure précise de la différence de température à partir d'un certain moment, la rapidité du refroidissement. Dans l'avenir, on peut élargir cette étude pour trouver des solutions afin de corriger ces problèmes en combinant différents dissipateurs et à l'aide des thermocouples.

## Annexe 1 : EMISSIVITE DES METAUX

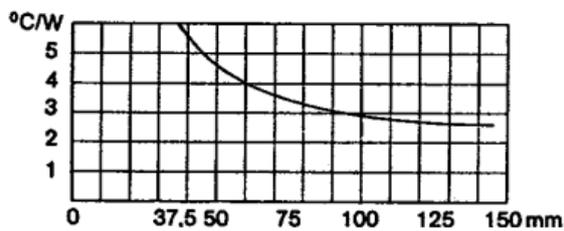
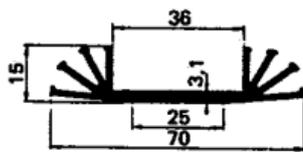
**Tableau 15:** Emissivité des métaux en haute température

Métaux	Spécification	°C	$\varepsilon$
Acier inoxydable	Laminé	700	0.45
Acier inoxydable	Alliage 8% Ni, 18% Cr	500	0.35
Acier inoxydable	Sablé	700	0.7
Aluminium	Fortement oxydé	50-500	0.2-0.3
Argent	Pur, poli	200-600	0.02-0.03
Chrome	Poli	500-1000	0.28-0.38
Cuivre	Fondu	1100-1300	0.13-0.15
Fer et acier	Tôle poncée	950-1100	0.55-0.61
Fer et acier	Oxydés	125-525	0.78-0.82
Fer et acier	Oxydés	200-600	0.8
Fer et acier	oxydés	1227	0.89
Fer et acier	Poli	400-1000	0.14-0.38
Fer et acier	Tôle polie	750-1050	0.52-0.56
Fonte de fer	Traitée	800-1000	0.60-0.70
Fonte de fer	Liquide	1300	0.28
Fonte de fer	Blocs de fonte de fer	1000	0.95
Fonte de fer	Oxydée	538	0.76
Fonte de fer	Oxydée à 600°C	200-600	0.64-0.78
Fonte de fer	Non traitée	900-1100	0.87-0.95
Laiton	Oxydé à 600°C	200-600	0.59-0.61
Molybdène		600-1000	0.08-0.13
Molybdène		1500-2200	0.19-0.26
Molybdène	Fil	700-2500	0.1-0.3
Nickel	Fil	200-1000	0.1-0.2
Nickel	oxydé	1227	0.85
Nickel	Oxydé à 600°C	200-600	0.37-0.48
Nickel-chrome	Fil, nu	500-1000	0.71-0.79
Nickel-chrome	Fil, oxydé	50-500	0.95-0.98
Nickel-chrome	Laminé	700	0.25
Nickel-chrome	Sablé	700	0.7
Or	Fini spéculaire	200-600	0.02-0.03
Platine		1000-1500	0.14-0.18
Platine		1094	0.18
Platine	Bande	900-1100	0.12-0.17
platine	Fil	500-1000	0.10-0.16
platine	Fil	1400	0.18
Platine	Pur, poli	200-600	0.05-0.10
Titane	Oxydée à 540°C	500	0.5
Titane	Oxydée à 540°C	1000	0.6
Titane	Poli	500	0.2
Titane	Poli	1000	0.36
Zinc	Surface oxydée	1000-1200	0.50-0.60

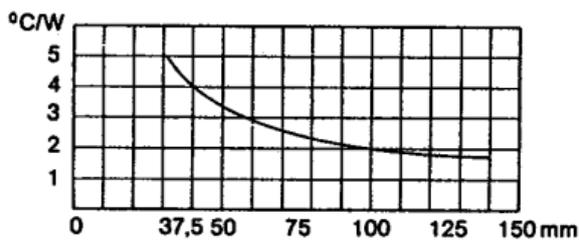
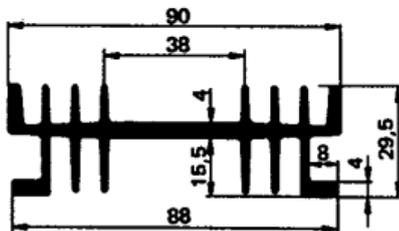
## Annexe 2 : DISSIPATEURS THERMIQUES USUELS

<p><b>Fig1</b></p>  <p>Boîtiers TO 5 - TO 99 <math>R_{th} 60\text{ °C/W}</math></p>	<p><b>Fig2</b></p>  <p>Boîtier TO 220 <math>R_{th} 15\text{ °C/W}</math></p>	<p><b>Fig3</b></p>  <p>Boîtiers TO 3 - TO 66 <math>R_{th} 7,7\text{ °C/W}</math></p>	<p><b>Fig4</b></p>  <p>Boîtiers TO 220 - TO 3 <math>R_{th} 7\text{ °C/W}</math></p>
<p><b>Fig5</b></p>  <p>Boîtier TOP 3 <math>R_{th} 5\text{ °C/W}</math></p>	<p><b>Fig6</b></p>  <p>Boîtier TO 3 <math>R_{th} 1,5\text{ °C/W}</math></p>	<p><b>Fig7</b></p>  <p>Longueur standard 19 mm Dual in line <math>R_{th} 24\text{ °C/W}</math></p>	<p><b>Fig8</b></p>  <p>Boîtiers CI 8, 14, 16, 20, 24, 40 broches <math>R_{th} 42\text{ à }20\text{ °C/W}</math></p>

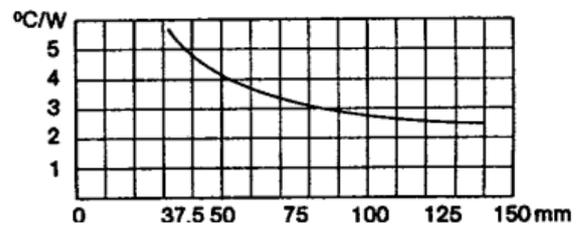
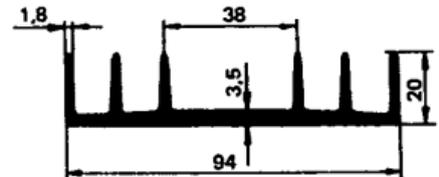
**WA 116**



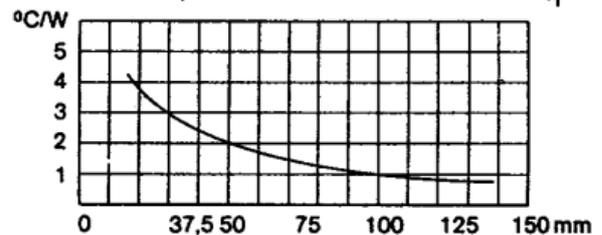
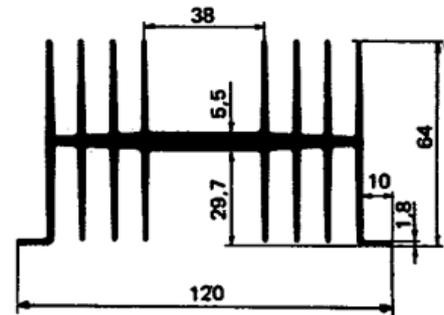
**WA 136**

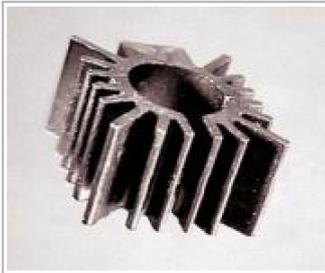


**WA 121**



**WA 141**

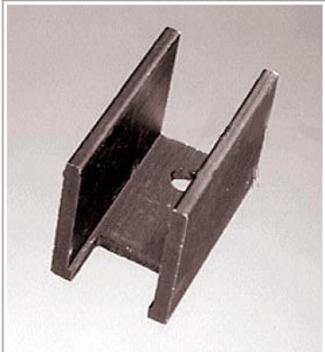




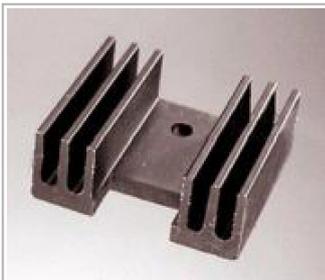
Radiateur pour boîtier TO5 (transistor 2N2219 par exemple),  
modèle ML61,  
 $R_{th} = 55^{\circ}\text{C}/\text{W}$



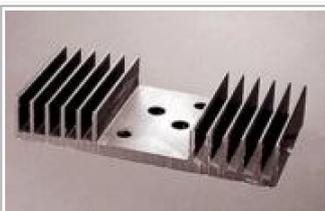
Radiateur pour boîtier TO5 (transistor 2N2219 par exemple),  
modèle CO180,  
 $R_{th} = 28^{\circ}\text{C}/\text{W}$ . Au vu de la résistance thermique de ce radiateur, on voit  
tout de suite que le refroidissement sera meilleur qu'avec le ML61, présenté  
juste avant.



Radiateur pour boîtier T0220 (triac type TIC226 ou régulateur de tension  
type LM7805 par exemple),  
modèle ML26,  
 $R_{th} = 15^{\circ}\text{C}/\text{W}$ . Modèle assez typique et très utilisé.



Radiateur pour boîtier T0220 (triac type TIC226 ou régulateur de tension  
type LM7805 par exemple),  
modèle ML24,  
 $R_{th} = 17^{\circ}\text{C}/\text{W}$ . Modèle assez typique et très utilisé.



Radiateur pour boîtier TO3 (2N3055 par exemple),  
modèle ML25 simple,  
 $R_{th} = 2,4^{\circ}\text{C}/\text{W}$



Radiateur pour **deux** boîtier TO3 (2N3055 par exemple),  
modèle ML25 double,  
 $R_{th} = 2,4^{\circ}\text{C}/\text{W}$

# Annexe 3 : GENERALITES SUR LES SEMI- CONDUCTEURS ET LES TRANSISTORS

## I. Généralités

### I.1 Conduction d'électricité dans un solide

La conduction d'électricité est assurée par les porteurs de charge libre ou mobile. Pour évaluer la conductivité d'un matériau, il y a la notion de résistivité. La conduction est élevée si la résistivité est faible :

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad (1)$$

$\rho$ : Résistivité [ $\Omega \cdot m$ ]

$l$ : Longueur du fil par exemple [m]

$S$ : Section du câble [ $m^2$ ]

### I.2 Semi-conducteur

#### I.2.1 Mauvais conducteur

C'est un mauvais isolant à la température ordinaire : quand la température augmente alors la résistivité diminue

**Tableau 16:** Quelques valeurs de  $\rho$  et  $n$  pour divers éléments à 300°K

	Cu	Ge	Si	Mica
$\rho$ en $\Omega \cdot cm$	$10^{-6}$	50	$50 \cdot 10^{-3}$	$10^{12}$
$n$ (concentration en électron à 300°C)		$10^{28}/m^3$		$10^7/m^3$

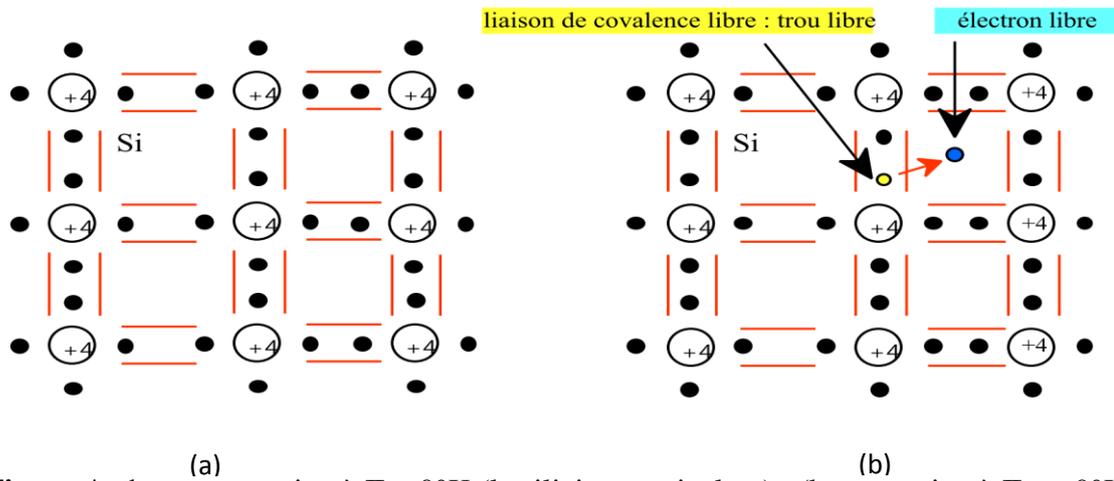
Dans un matériau semi-conducteur, l'énergie  $E_g$  nécessaire pour couper une liaison (covalente) pour créer un électron libre est faible :

A 300°K, pour Si :  $E_g = 1.12$  eV ; pour Ge :  $E_g = 0.7$  eV et pour le Diamant :  $E_g = 6$  eV

#### I.2.2 Semi-conducteur pur ou intrinsèque

Ex : Si appartient au Groupe IV de la classification périodique des éléments c'est-à-dire 4 électrons externes dans sa structure cristallographique. Il y a mise en commun des électrons externes pour former 4 liaisons covalentes.

Quand la température augmente, il y a rupture de liaison à cause de l'énergie thermique :



**Figure A. 1:** (a) : situation à  $T = 0^\circ\text{K}$  (le silicium est isolant) ; (b) : situation à  $T \gg 0^\circ\text{K}$

Si : fixe

$e^-$  : porteur de charge mobile

À  $300^\circ\text{K}$ , on a  $5.10^{28}$  atome Si/ $\text{m}^3$

$n$  : concentration en électron libre =  $1,5.10^{10}/\text{cm}^3$

$\Rightarrow$  3 atomes sur 10 milliards ont une liaison coupée

Pour le Ge :  $4,4.10^{22}$  at/ $\text{m}^3$

$n \sim 10^{13}/\text{cm}^3$

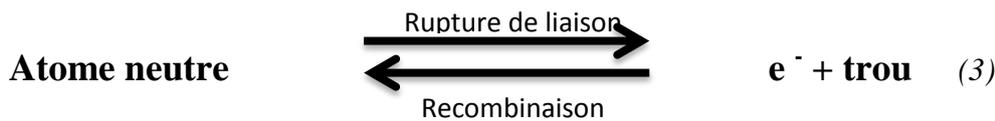
**(i)**

Pour un cristalle donné à une température donnée  $n_i$  (concentration en électron dans un matériau intrinsèque) égale constante. C'est une condition d'équilibre car un électron libéré passant près d'un ion positive peut être capturé.

**(ii) Notion de trou**

Quand un électron est libéré, il laisse derrière lui un vide « trou » qui peut soit capturer un électron libre soit capturer un électron d'une liaison voisine (dans ce cas, il y a changement de position du trou). Le transport d'électron peut être décrit soit par le mouvement des électrons soit par celui des trous

$$n_i = p_i \text{ (concentration en trous)} \quad (2)$$



$$n_i^2 = n_i \cdot p_i = A_0 \cdot T^3 \cdot \exp\left(\frac{-E_g}{kT}\right) \quad (4)$$

$A_0 = 2, 59.10^{30}$  Ge

$= 5, 37.10^{31}$  Si

k: constant de Boltzmann =  $8,62. 10^{-5}$  eV/K

### I.2.3 Semi-conducteur extrinsèque

#### Dopage ou contamination

C'est l'introduction d'impureté convenable dans un semi-conducteur, le dopage d'un matériau semi-conducteur peut changer ses propriétés électriques.

##### (i) Semi-conducteur du type n

On dope le Si dopé avec As (groupe V). La dose est 1 As pour  $10^6$  Si soit  $10^{16}$  As/cm<sup>3</sup>. Le 5eme électron utilisé dans les liaisons devient très facilement électron libre :



C'est un « donneur » comme le cas des éléments du groupe V.

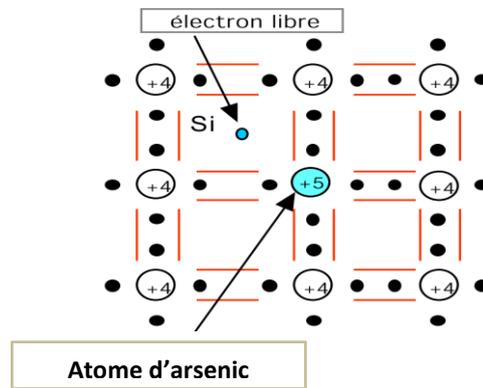


Figure A. 2: Semi-conducteur extrinsèque de type n

A 300°K, tous les atomes d'As sont tous ionisés

$$N_d^+ = N_d = n : \text{concentration en donneur} \quad (5)$$

Pour une température donnée et pour un matériau donné, on a la relation :

$$n \cdot p = n_i \cdot p_i = n_i^2 \quad (6)$$

Dans le cas ici :  $n \gg p$  les électrons deviennent des porteur majoritaires  
 les trous des porteurs minoritaires  
 matériau de type n

##### (ii) Semi-conducteur du type p

C'est le cas du Si dopé avec un atome du groupe III (B, Al, Ga, In) doté de 3 électrons dans la couche externe.

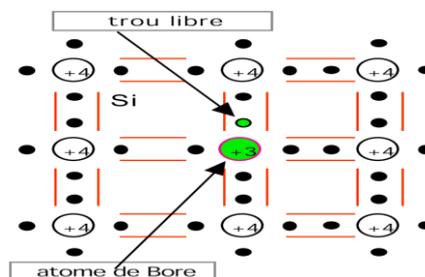


Figure A. 3: Semi-conducteur extrinsèque de type p

Le Bore va capturer un électron pour compléter la 4<sup>ème</sup> liaison :  $B \rightarrow B^-$  (accepteur)

Un électron a été capturé et un trou a été libéré dans ce cas  $p \gg n$  donc les trous sont les porteurs majoritaires. A 300°K :

$$p = N_a^+ = N_a : \text{concentration en accepteur} \quad (7)$$

### (iii) Semi-conducteur dopé avec $N_a$ et $N_d$ : surdopage

Le semi-conducteur sera du type p ou n selon les valeurs de  $N_a$  ou  $N_d$ .

Si  $N_a > N_d$  : semi-conducteur du type p

$$p \sim N_a - N_d$$

*Neutralité électrique*

$$n + N_a^- = p + N_d^+ \quad (8)$$

$$\begin{array}{l} \text{A } 300 \text{ °K} \\ n + N_a = p + N_d \\ n \cdot p = n_i^2 \end{array} \quad (9)$$

## I.3 Expression de la conductivité électrique (conductibilité)

### I.3.1 Vitesse de l'électron dû à l'agitation thermique

La vitesse d'électron dû à l'agitation thermique est :

$$\frac{1}{2} \cdot m^* \cdot v_{th}^2 = \frac{3}{2} \cdot k \cdot T \quad (10)$$

$m^*$  = masse effective ou masse apparente (l'électron se déplace dans un réseau)

$$m^* = 0,26 m_0 \text{ pour l'électron du Si à } 300 \text{ °K avec } m_0 = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

$$v_{th} \approx 10^7 \text{ m/s}$$

T : température en °K

k: constante de Boltzmann

$$\langle v_{th} \rangle = 0 \text{ (valeur moyenne)} \Rightarrow I_{th} = 0$$

### I.3.2 Vitesse de dérive, vitesse sous l'effet d'un champ $\vec{E}$ , vitesse drift

Considérons un semi-conducteur isolé. Les porteurs de charges mobiles s'y déplacent en tous sens et comme aucune direction n'est privilégiée, on n'observe aucune circulation de charges à l'échelle macroscopique. Appliquons au semi-conducteur une différence de potentiel V. Compte tenu de la relation champ-potential :  $\vec{E} = -\overrightarrow{grad} V$ , il apparaît dans le semi-conducteur un champ électrique  $\vec{E}$  qui favorise le déplacement des trous dans le sens du champ électrique et le déplacement des électrons mobiles dans le sens opposé.

$$\vec{v}_n = \mu_n \cdot \vec{E} \quad (11)$$

$$\vec{v}_p = \mu_p \cdot \vec{E} \quad (12)$$

$\mu_i$ : mobilité du porteur  $i$  = vitesse par unité de champs [ $m^2/V.s$ ]

Si  $\vec{E}$  augmente ( $\vec{E} > \vec{E}_{max}$ ), on atteint une vitesse de saturation due à des collisions dans le cristal.

A 300°K :

**Tableau 17:** Valeurs de la mobilité des trous et des électrons ainsi que  $E_{max}$  à 300°K

	Ge	Si	GaAs
$\mu_n$ ( $cm^2/Vs$ )	3009	1200	8500
$\mu_p$ ( $cm^2/Vs$ )	1009	500	400
$E_{max}$ (V/cm)	$3 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^4$	-

### I.3.3 Conductivité

La quantité d'électricité ou intensité du courant  $I$  traversant une région par unité de temps est :

$$I = q \cdot n \cdot v \cdot A \quad (13)$$

$q$ : charge transportée par chaque porteur =  $1,6 \cdot 10^{-19}$  C

$n$  : concentration en électron

$v$  : vitesse

$A$  : section

On note, densité de courant, le rapport :

$$J = \frac{I}{A} \quad (14)$$

Pour les deux types de porteurs :

$$J = J_n + J_p = q \cdot n \cdot \mu_n \cdot E + q \cdot p \cdot \mu_p \cdot E \quad (15)$$

D'où la loi d'Ohm :

$$V = R \cdot I \quad \text{ou} \quad J = \sigma \cdot E \quad (16)$$

Avec  $\sigma$  : conductivité est égale à :

$$\sigma = q \cdot (n\mu_n + p\mu_p) \quad (17)$$

## I.4 Densité de courant de diffusion des semi-conducteurs

### I.4.1 Diffusion des électrons

Considérons un barreau de S.C. de type P soumis à une source lumineuse intense sur une de ses faces (fig. A.4). Cette source lumineuse va produire, par apport d'énergie, une génération locale de paires électrons- trous.

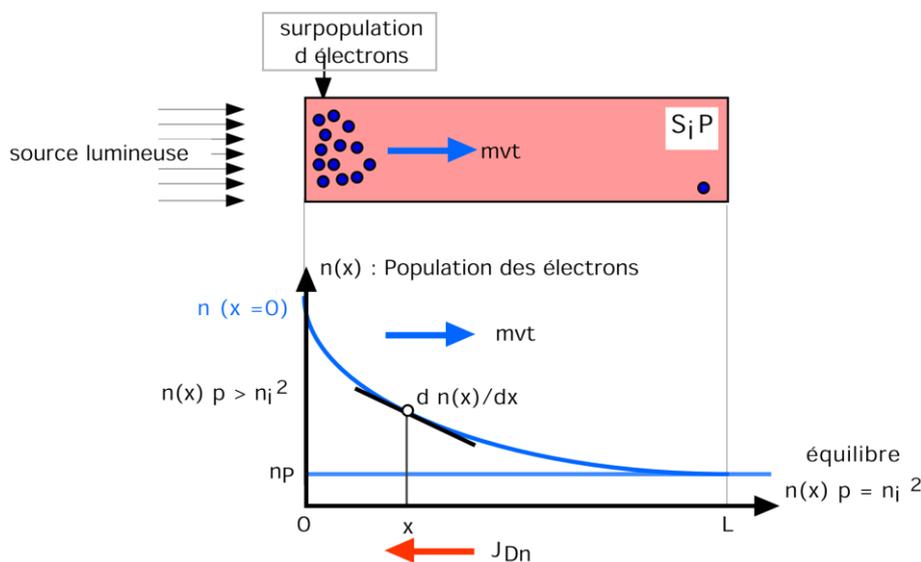
En effet, au niveau de la surface éclairée, on crée une **surpopulation d'électrons  $n(x = 0)$  par rapport à l'équilibre** où  $n(L) = n_i^2/p$ . Les électrons en surplus, vont diffuser de la gauche vers la droite du barreau. Ces électrons supplémentaires sont recombinés par la forte population des trous du Si P et leur population diminue en fonction de  $x$  selon :

$$n(x) = n(0) \cdot \exp\left(-\frac{x}{L_n}\right) \quad (18)$$

$L_n$  : longueur de diffusion des électrons

On définit en  $x$  une **densité de courant de diffusion** des électrons :  $J_{Dn}$  proportionnelle au gradient de concentration ( $Dn$  [ $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ] est la constante de diffusion des électrons dans le Si) :

$$J_{Dn} = q \cdot D_n \cdot \frac{dn(x)}{dx} \quad \text{où} \quad D_n = \mu_n \cdot \frac{kT}{q} \quad (19)$$



**Figure A. 4:** Diffusion des électrons dans le silicium P non homogène

#### 1.4.2 Diffusion des trous

Considérons un barreau de type N soumis à une source lumineuse intense sur une de ses faces (fig.A.5). Comme précédemment, on obtient un phénomène de diffusion des trous excédentaires avec :

$$p(x) = p(0) \cdot \exp\left(-\frac{x}{L_p}\right) \quad (20)$$

$L_p$  : longueur de diffusion des trous

Conduisant à définir une **densité de courant de diffusion** des trous :  $J_{Dp}$  proportionnelle au gradient de concentration ( $Dp$  en  $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  est la constante de diffusion des trous dans le silicium) :

$$J_{Dp} = -q \cdot D_p \cdot \frac{dp(x)}{dx} \quad \text{où} \quad D_p = \mu_p \cdot \frac{kT}{q} \quad (21)$$

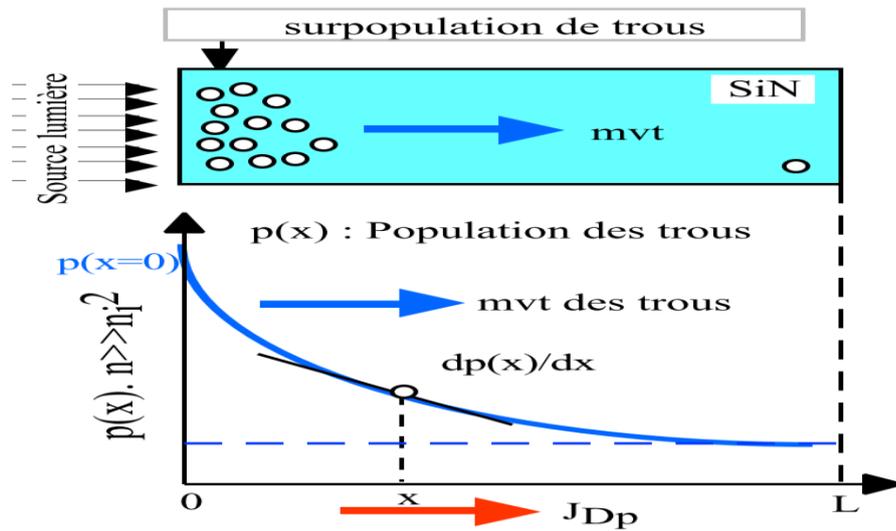


Figure A. 5: Diffusion des trous dans le silicium N non homogène

## II. Les diodes à jonction pn

### II.1 La jonction pn

#### II.1.1 Préparation

Par exemple à partir d'un matériau du type n, on peut obtenir une région p par surdopage c'est-à-dire ajout d'accepteur supplémentaire, soit par :

- Jonction alliée (par alliage)
- Technologie planar

#### II.1.2 La jonction pn en circuit ouvert

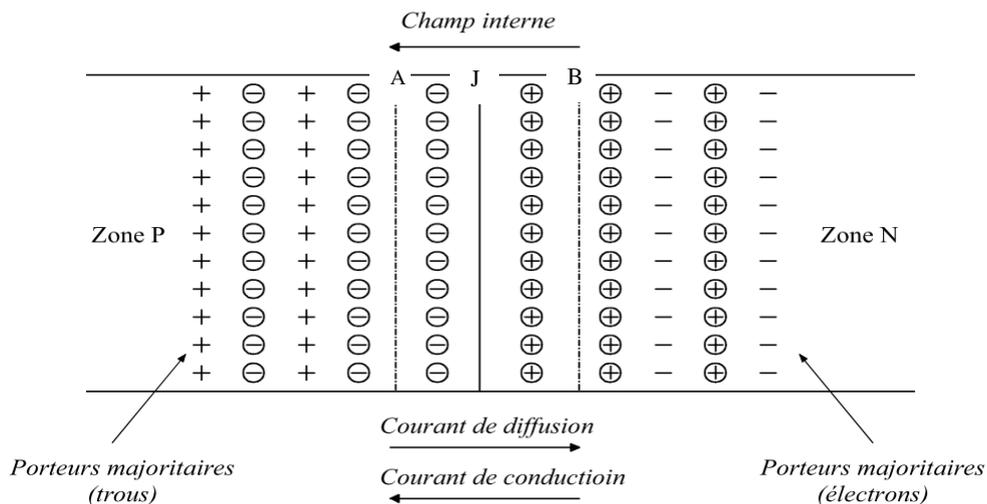


Figure A. 6: Etat d'équilibre d'une jonction PN

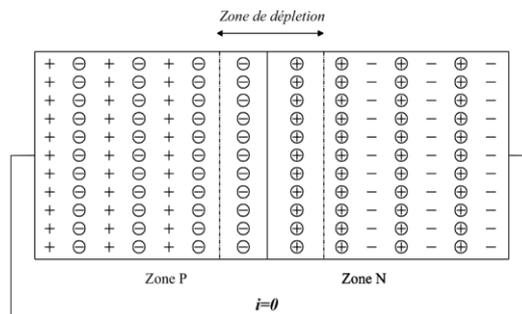
- (i) A la jonction J, les trous majoritaires de la région P se diffuse vers la région N, de même pour les électrons de la région N vers la région P. Mais il laisse derrière eux **des ions immobiles** : ions négatives pour les trous et ions positives pour les électrons.

- (ii) D'où l'existence d'un champ  $\vec{E}$  qui va tendre à stopper ses diffusions de porteur tel que  $V_A - V_B = \psi$  : potentiel de contact. Les porteurs majoritaires sont repoussés vers leurs régions de départ par  $\vec{E}$  sauf ceux qui ont une énergie cinétique suffisante pour monter le champ. Ces derniers forment *le courant de diffusion*  $I_D$ .
- (iii) S'il y a des porteurs minoritaires à la frontière de la zone entre A et B que l'on nomme **Zone de Charge d'Espace** ou **Z.C.E.** (par exemple : électrons dans la zone P nés par excitation thermique), ils seront soumis à  $E$  et propulser vers l'autre région (région N pour les électrons). Ils forment un courant  $I_S$  ou **courant de saturation**.
- (iv) A l'équilibre, on a :

$$I = 0 \Rightarrow |I_D| = |I_S| = f(+\infty) \quad (21)$$

### II.1.3 La jonction pn en court-circuit

A cause de la barrière de potentiel, les électrons qui tentent de diffuser de la zone N vers la zone P se voient repoussés vers la zone N. Il en va de même des trous qui tentent de diffuser vers la zone N. Comme le courant électrique issu de la barrière sert à produire le courant de conduction qui compense le courant de diffusion, il n'y a aucune circulation de courant dans le circuit extérieur si on relie par un court-circuit les extrémités des zones P et N.

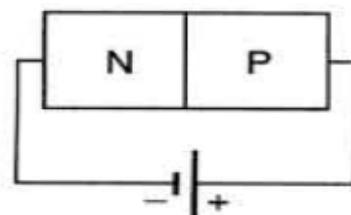


**Figure A. 7:** Jonction pn en court-circuit

$I = 0$  donc la somme algébrique de tension de contact est nulle

### II.1.4 Polarisation dans le sens direct

La tension appliquée augmente le potentiel de la région P, ce qui revient à diminuer  $V_B - V_A < \psi$ . Donc  $I_D$  augmente car il faut au porteur majoritaire moins d'énergie pour traverser la Z.C.E.



**Figure A. 8:** Jonction pn polarisée en direct

$$I_D > I_S \text{ et } I = I_D - I_S \quad (22)$$

En d'autre terme, on peut dire que l'épaisseur de la z.c.e. diminue

### II.1.5 Polarisation dans le sens inverse

On a  $V_B - V_A > \psi$ .  $I_D$  tend vers 0 ou décroît rapidement quand on applique une tension en sens inverse mais  $I_S$  est seulement fonction de la température.

$$I_D = 0 \text{ et } I_S = f(T) \quad (23)$$

En d'autre terme, on peut dire qu'il y a augmentation de l'épaisseur de la z.c.e

## II.2 Caractéristiques générales d'une diode

### II.2.1 Symbole et courant dans la diode

La diode est constitué par l'association de S.C de type P et N (silicium ou Germanium). Les diodes au silicium sont les plus fréquemment utilisées.

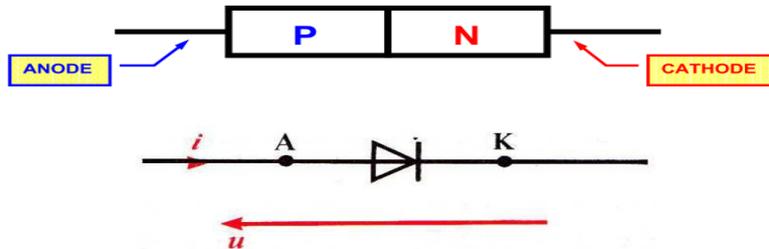


Figure A. 9: Symbole d'une diode

Le courant traversant la diode est :

$$i = I_S \cdot \left[ \exp\left(\frac{u}{nV_T}\right) - 1 \right] \quad (24)$$

$n = 1$  pour le Ge et  $n = 2$  pour le Si

$V_T$  : potentiel thermodynamique = 26 mV à 300°K

$I_S$  : courant de saturation

$u$  (ou  $v$ ) : tension aux bornes de la diode

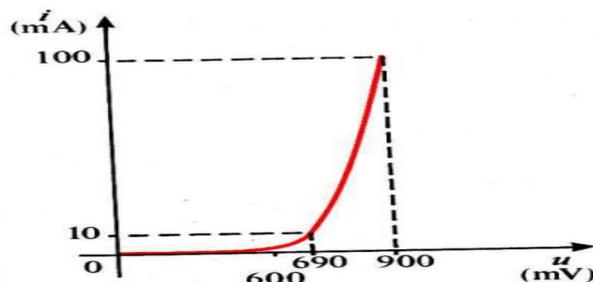


Figure A. 10: Caractéristique directe à température de jonction constante

L'intensité du courant direct apparaît très faible tant que la tension directe ne dépasse pas **0,6 V**.

Au-delà, l'intensité du courant croît rapidement et la tension  $u$  varie peu.

## II.2.2 La diode idéale ou parfaite

Très souvent, pour analyser et comprendre le fonctionnement de montages électroniques comportant des diodes, un modèle très simplifié suffit.

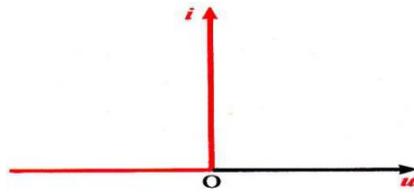


Figure A. 11: Caractéristique  $i(u)$  d'une diode parfaite

On admet alors que :

$$\begin{cases} \text{pour } u \leq 0 \Rightarrow i = 0 : \text{état OFF} \\ \text{pour } i > 0 \Rightarrow u = 0 : \text{état ON} \end{cases} \quad (25)$$

Cette modélisation conduit aux schémas équivalents de la figure A.12 :

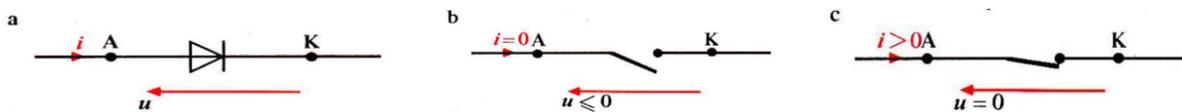


Figure A. 12: a) Symbole général ; b) Diode parfaite dans l'état bloqué et c) Diode parfaite dans l'état passant

## II.2.3 Résistance statique

La résistance statique d'une diode est donnée par :

$$r_D = \frac{V_D}{I_D} \quad (26)$$

Par exemple sur la fig A.10 :  $i_d = 100 \text{ mA}$  et  $v_d = 0,9 \text{ V}$  donc  $r_d = 9 \Omega$

$i_d = 10 \text{ mA}$  et  $v_d = 0,7 \text{ V}$  donc  $r_d = 70 \Omega$

Pour une polarisation inverse :

$$r_{inv} = \frac{|V_d|}{|I_d|} \quad (27)$$

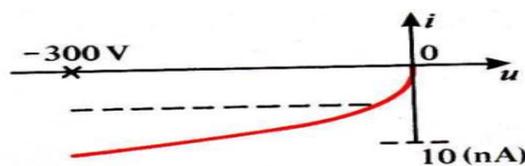


Figure A. 13: Courant inverse de la diode

## II.2.4 La résistance dynamique

La tension aux bornes de la diode est :

$$v_D = V_D + v_d \quad (28)$$

total  $\rightarrow$   $v_D = V_D + v_d$   $\leftarrow$  Faible variation autour de  $V_D$   
 Valeur fixe  $\uparrow$  97

La résistance dynamique s'exprime par :

$$r_d = \frac{\Delta v_D}{\Delta i_D} = \frac{v_D}{i_D} \quad (29)$$

La résistance dynamique est due à une faible variation de  $v_D$  :

$$\frac{dv_D}{di_D} = \lim_{\Delta i_D \rightarrow 0} \frac{\Delta v_D}{\Delta i_D} \quad ; \quad r_d = \left[ \frac{dv_D}{di_D} \right]_{i_D=I_D} \quad (30)$$

$$\Rightarrow r_d = \frac{V_T}{I_D} \quad (31)$$

## II.3 Circuit équivalent

### III.3.1 Représentation complexe

On peut obtenir un modèle ou circuit équivalent en rapprochant la courbe  $i(V)$  par des segments de droite, on obtiendra alors un modèle linéaire par morceau.

Le courant passant dans la diode ne sera appréciable qu'après la **tension seuil** :  $V_{D0}$  ou  $V_\gamma$  qui est de l'ordre de 0,6 V – 0,7 V pour le Si et de 0,2 V – 0,3 V pour le Ge.

Pour  $v_D < v_{D0}$  D : OFF (bloquée)

$v_D > v_{D0}$  D : ON (conductrice)

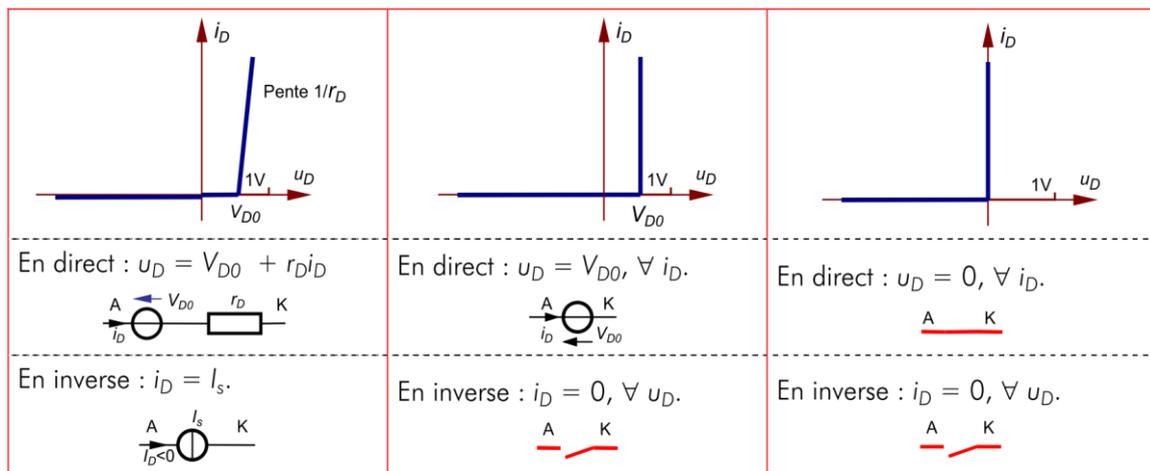


Figure A. 14 : Les modèles les plus simples de la diode

### III.3.2 Capacité de transition et diffusion

Les dispositifs électroniques sont sensibles à la haute fréquence. Par exemple, les effets capacitifs peuvent être négligés dans les basses fréquences car la réactance est très grande (court-circuit) :

$$X_c = \frac{1}{2\pi \cdot f_c} \text{ avec } X_c \rightarrow +\infty \text{ et } f_c \rightarrow 0$$

Pour la haute fréquence :  $X_c \rightarrow 0$  : ~ circuit fermée

- (i) Lorsque la jonction pn est polarisée dans le sens inverse, la z.c.e. se comporte comme un isolant entre deux couches de charges opposés



## REFERENCE :

- [1] : Antoine Laurent de Lavoisier et Pierre-Simon de Laplace. « Mémoire sur la chaleur ». In : Mémoire de mathématiques et de physique de l'Académie des Sciences (1780), p. 355–408.
- [2] : Sadi CARNOT. « Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance ». Bachelier, 1824.
- [3] : James Prescott JOULE. « On the Changes of Temperature Produced by the Rarefaction and Condensation of Air ». Anglais. In : The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science 26.174 (1845), p. 369–383.
- [4] : Yannick HERVE. « Histoire de l'Electronique (numérique) v2.6. Docteur en informatique et électronique, Maître de Conférences à l'ULP Strasbourg.
- [5] : Hannemann, R, Bar-Cohen, A, and Oktay, S., High Heat from a Small Package, Mechanical Engineering, October 1986.
- [6] : RAMILISON Jean Masy. « Transferts thermiques dans les équipements électroniques ». ESPA Vontovorona, Master à visée de recherche 2013-2014.
- [7] : Jean-Luc BATTAGLIA, Andrzej KUSIAK, Jean-Rodolphe PUIGGALI. « Introduction aux transferts thermiques, Cours et exercices corrigés ». Université Bordeaux 1. Dunod, Paris, 2010.
- [8] : Michel HOUDE. « Cours\_transfert\_de\_chaleur ». Université de Technologie Compiègne (UTC). 14 décembre 2015.
- [9] : « Design Manual of Cooling Methods for Electronic Equipment ». NAVSHIPS 900-190. Department of the Navy, Bureau of Ships, March 1955.
- [10] : John H. LIENHARD IV, John H. LIENHARD V. « A Heat Transfer Textbook ». Fourth edition. Phlogston Press, Cambridge Massachusetts. Version 2.03, dated march 12, 2015.
- [11] : Warren M. Rohsenow, James P. Hartnett, Young I. Cho. « Handbook of heat transfer ». Third Edition. MCGRAW-HILL, ISBN 0-07-053555-8,1998.
- [12] : Yves JANNOT. « Transferts thermiques ». Ecole des Mines Nancy, 2012.
- [13] : Yvan C. « Protection thermique des composants de puissance ». Septembre 05-V2.6, 2007.
- [14] : Ludovic Lambin. « Les dissipateurs thermiques ».webmaster@lelectronique.com. 2002.
- [15] : HANNEQUIN B. « Notion de résistance thermique ». 25 septembre 2001.
- [16] : Joël REDOUTEY. « Semi-conducteurs de puissance ». Centrale Marseille, Rev 10/2010.
- [17] : Hasna Louahlia (LUSAC) et M. Sébastien Yon (AREELIS Technologies). « Dissipation thermique dans les composants/systèmes électroniques ». Rapport NAE-1214-01-R1A du 27 juillet 2015.
- [18] : <http://www.france.asus.com>. « Refroidissement ultra-silencieux ». CATALOGUE 2008.

- [19] : Onoriu Puscasu. « Dispositifs innovants pour la récupération de l'énergie thermique. INSA de Lyon, 2014.
- [20] : R. Baviere. « Etude de l'hydrodynamique et des transferts de chaleur dans des microcanaux ». Université Joseph Fourier, Grenoble I.
- [21] : Samuel HERMANN, Benjamin BERGIA. « Réalisation d'un système de refroidissement liquide (watercooling) ». vendredi 10 mars 2006.
- [22] : K.A. Estes and I. Mudawar. « Correlation of sauter mean diameter and critical heat flux for spray cooling of small surfaces ». Int. J. Heat Mass Transf. 38, 2985–2996 (1995).
- [23] : D .Thibault. Etude du refroidissement par impact de jets à travers une paroi mince et avec un écoulement cisailant. ISAE-ENSMA- Poitiers (2009).
- [24] : Cyril Romestant. « Etudes théoriques et expérimentales de caloducs et de thermosiphons soumis à de fortes accélérations ». Université de Poitiers, 2000.
- [25] : A.Veillere. « Drains thermiques adaptatif : Cuivre allié / Fibre de Carbone ». Université Sciences et Technologies - Bordeaux I (2009).
- [26] : Mounir AMOKRANE. Etude et mise en œuvre de couplage thermoélectrique en vue de l'intensification d'échange de chaleur par morphing électroactif. Thèse Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse. Le mercredi 03 juillet 2013.
- [27] : E201. Cours d'électronique, deuxième année. Département Electronique, ESPA Vontovorona. 2008-2009.
- [28] : E402. Physiques des semi-conducteurs, quatrième année. Département Electronique, ESPA Vontovorona. 2010-2011.
- [29] : Marc Correvo. « Modélisation thermique des composants de puissance, chap. 9 ». Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton du Vaud- Suisse. Mars 2016.
- [30] : Their Ibrahim. « Contribution au développement de modèles pour l'électronique de puissance en VHDL-AMS ». Thèse, le 18 septembre 2015.
- [31] : Christophe BOUVIER, Estelle GERVAIS, Baptiste O'JEANSON, Antoine SALAÛN. « Ailettes thermiques, Projet de Physique STPI/P6/2013 – 28 ». INSA Rouen. Le 17 juin 2013.
- [32] : Sandra FRANKO, Elise NICOLAS, Yann CHAMBRELAN, Thibaud VANNIER, Aubin TOUZO. « Ailettes thermiques, Projet de Physique STPI/P6/2014 – 24 ». INSA Rouen. Le 16 juin 2014.
- [33] : Kotler Vivien, Unfer Aurélien. « Étude thermique des ailettes ». 2AP – ENSGSI, le 08 mars 2016.
- [34] : RANDRIAMAROSON Rivo Mahandrisoa. « ComsolMultiphysics et VHDL ». ESPA Vontovorona, Master à visée de recherche 2013-2014.
- [35] : ComsolMultiphysics. Quick Start and Quick Reference. Version 4.3. Novembre 2015.

**Titre : Refroidissement d'un dispositif électronique par ailette thermique.**

**Auteur : RASOLOFOMANANA Tolotra Iarivony Nirina.**

Nombre de pages : 99

Nombre de figures : 117

Nombre de tableaux : 17

---

**Résumé :**

Tout composant semi-conducteur admet une température maximale de fonctionnement, appelée température maximale de jonction, dépendant du type de matériau utilisé et de la technologie de réalisation. Cette température maximale de jonction reste une donnée importante puisque c'est elle qui permet d'estimer le niveau de refroidissement nécessaire au bon fonctionnement du composant.

Pour refroidir un composant électronique de puissance, une ailette thermique est nécessaire ; dans ce mémoire, on a étudié le comportement théorique et physique de cette ailette et finalement des simulations ont été faites en utilisant un modèle d'ailette conçue avec COMSOL Multiphysics 4.3.

---

**Mots clés :** Transfert thermique, semiconducteur, dissipateurs, ailette thermique.

---

**Encadreur :** Mr RATSIMBA Mamy Nirina.

---

**Contact Auteur :** [tolotrarivonynirina@gmail.com](mailto:tolotrarivonynirina@gmail.com)