

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEURE ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE ECHAHID HAMMA LAKHDAR D'EL-OUED
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE



Mémoire de fin d'étude
Présenté pour l'obtention du diplôme de
MASTER ACADEMIQUE

Domaine: Sciences et Technologies
Filière: Génie mécanique
Spécialité: Electromécanique

Thème:

***Etude Expérimentale du Refroidissement d'un MOSFET de
Puissance par Caloducs***

Encadré par:

* Dr. MENECEUR Redha

Présenté par:

* HOUIDI Bilal

* KHEZZANI Youcef

* AHMED SALEH Khaled

* NAOUI Madjdi

Le jury:

Dr. Labiod Mhouaib	M.CA	Président
Dr. MENECEUR Redha	M.CA	Encadré
Dr. Zenina Med Laid	M.CA	Examineur

2022-2023

Remerciements

D'abord je remercie le Dieu le tout puissant qui nous a donné

La volonté, le Courage et la patience pour bien

Mener ce travail.

Je tiens à exprimer mes plus vifs remerciements à mon

Encadreur Monsieur Meneceur Réda

*Pour son entière disposition, ses judicieux conseils et son
patience, au long de ce mémoire*

*Mes remerciements vont aux membres de jury qui ont pris
Soin d'examiner le travail présenté dans ce mémoire.*

*Enfin, j'exprime mes remerciements
À tous ceux qui ont
Contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.*

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à ma chère mère,

à mon cher père, pour tous ce qui ont fait pour moi,

Et pour leurs sacrifices et leur soutien durant ma vie.

A ma chère femme qui m'a soutenu le long de ce mémoire,

A mes chers frères,

À toute ma famille

Résumé:

Cette étude expérimentale vise à évaluer l'efficacité du refroidissement d'un MOSFET de puissance à l'aide de caloducs. Les MOSFET de puissance génèrent une quantité importante de chaleur pendant leur fonctionnement, ce qui nécessite une dissipation thermique efficace pour garantir leur bon fonctionnement et leur fiabilité.

Les caloducs, en tant que dispositifs de transfert de chaleur passifs, offrent une solution prometteuse pour le refroidissement des MOSFET de puissance. Ils permettent une dissipation efficace de la chaleur grâce à leur capacité élevée de transfert de chaleur et à leur distribution uniforme de la chaleur sur la surface du dissipateur thermique.

L'objectif de cette étude est d'évaluer expérimentalement l'efficacité des caloducs dans le refroidissement des MOSFET de puissance. Pour ce faire, un MOSFET de puissance est monté sur un dissipateur thermique relié à un ou plusieurs caloducs. Des mesures de température sont effectuées à différents emplacements du MOSFET, du dissipateur thermique et du caloduc pour évaluer la réduction de la température obtenue grâce à l'utilisation des caloducs.

Les résultats de cette étude permettent de déterminer l'efficacité du refroidissement par caloducs pour les MOSFET de puissance. Ils fournissent des informations sur la réduction de la température et la distribution de chaleur obtenues, comparées à d'autres méthodes de refroidissement. Ces résultats contribuent à l'amélioration de la dissipation thermique des MOSFET de puissance, ce qui est essentiel pour garantir leur bon fonctionnement et leur durée de vie.

MOTS-CLES : caloducs, MOSFET, expérimentale, refroidissement, dissipateur thermiques, phénomènes physiques

Abstract

This experimental study aims to evaluate the cooling efficiency of a power MOSFET using heat pipes. Power MOSFETs generate a significant amount of heat during operation, which requires efficient heat dissipation to ensure proper operation and reliability.

Heat pipes, as passive heat transfer devices, offer a promising solution for cooling power MOSFETs. They provide efficient heat dissipation due to their high heat transfer capability and even heat distribution across the surface of the heat sink.

The objective of this study is to experimentally evaluate the efficiency of heat pipes in cooling power MOSFETs. To do this, a power MOSFET is mounted on a heat sink connected to one or more heat pipes. Temperature measurements are made at various locations of the MOSFET, heat sink, and heat pipe to gauge the temperature reduction achieved through the use of the heat pipes.

The results of this study help determine the efficiency of heat pipe cooling for power MOSFETs. They provide information on the temperature reduction and heat distribution achieved compared to other cooling methods. These results contribute to the improved heat dissipation of power MOSFETs, which is essential to ensure their proper operation and lifetime.

Keywords: heat pipes, MOSFETs, experimental, cooling, heat sink, physical phenomena

ملخص:

تهدف هذه الدراسة التجريبية إلى تقييم كفاءة تبريد دوائر MOSFET ذات القدرة باستخدام الأنابيب الحرارية. تولد وحدات الطاقة MOSFET كمية كبيرة من الحرارة أثناء التشغيل، الأمر الذي يتطلب تبديدًا فعالاً للحرارة لضمان التشغيل السليم والموثوقية.

توفر الأنابيب الحرارية، باعتبارها أجهزة نقل الحرارة السلبية، حلاً واعدًا لتبريد الدوائر المتكاملة منخفضة المقاومة (MOSFET) لطاقة التبريد. إنها توفر تبديدًا فعالاً للحرارة نظرًا لقدرتها العالية على نقل الحرارة وحتى توزيع الحرارة عبر سطح المشتت الحراري.

الهدف من هذه الدراسة هو التقييم التجريبي لكفاءة الأنابيب الحرارية في دوائر MOSFET ذات طاقة التبريد. للقيام بذلك، يتم تركيب MOSFET الطاقة على المشتت الحراري المتصل بواحد أو أكثر من أنابيب الحرارة. يتم إجراء قياسات درجة الحرارة في مواقع مختلفة من MOSFET والمشتت الحراري وأنابيب الحرارة لقياس انخفاض درجة الحرارة الذي تم تحقيقه من خلال استخدام أنابيب الحرارة.

تساعد نتائج هذه الدراسة في تحديد كفاءة تبريد الأنابيب الحرارية لدوائر الطاقة MOSFET. أنها توفر معلومات عن انخفاض درجة الحرارة وتوزيع الحرارة الذي تم تحقيقه مقارنة بطرق التبريد الأخرى. تساهم هذه النتائج في تحسين تبديد الحرارة لدوائر الطاقة MOSFET ، وهو أمر ضروري لضمان تشغيلها بشكل سليم وعمرها الافتراضي.

الكلمات المفتاحية: الأنابيب الحرارية، الدوائر المتكاملة منخفضة المقاومة، التجريبية، التبريد، المشتت الحراري، الظواهر الفيزيائية

Sommaire

RESUME:	III
SOMMAIRE	VI
LISTE DES FIGURES	VIII
LISTE DES TABLEAUX	IX
NOMENCLATURE	X
INTRODUCTION	1
CHAPITRE I: REVUE BIBLIOGRAPHIQUE	
Introduction	5
I.2 État de l'art et Revue bibliographique	5
I.2.1 État de l'art sur les HP	5
I.2.2 Revue bibliographique sur les systèmes caloducs (Heat Pipe)	7
I.2.2.1 Les fluides de travail	11
I.2.3 Revue bibliographique de HP	12
I.2 MOSFET	12
I.2.1 Conventionnel MOSFET.....	12
I.2.2 Silicium sur Isolant (DONC JE) MOSFET	13
I.2.3 Double portail MOSFET	14
I.2.4 Multi - porte MOSFET.....	14
I.2.5 Entourer portail MOSFET	15
I.2.6 Silicium matériel propriétés	15
I.2.7 Le réduction de fonctionnalité taille.....	16
CHAPITRE II: GENERALITES SUR LES SYSTEMES DE REFROIDISSEMENT ET PROTECTION THERMIQUE DES COMPOSANTS ELECTRONIQUES	
Introduction	31
II.1 Origines des pertes dans les composants	31
II.1.1 Pertes en conduction	31
II.1.2 Pertes en commutation.....	31
II.1.3 Nécessité de la protection des éléments	32
II.2 Dissipateurs thermiques	32
II.2.1 Analogie en modèle électrique et modèle thermique.....	32
II.2.2 Schéma thermique analogique avec un circuit électrique.....	33
II.2.2.1 Sans dissipateur thermique	33
II.2.2.2 Avec dissipateur thermique.....	33
II.2.3 Modèle du dissipateur	34
II.3 Notion de résistance thermique	34
II.3.1 Définition	34
II.3.2 Applications : mise en évidence de l'importance des dissipateurs thermiques pour un transistor	37
II.4 Systèmes de refroidissement pour l'électronique de puissance	37
II.4.1 Les éléments électroniques	37
II.4.2 Les composants électriques.....	38
II.4.3 Importance du refroidissement électronique.....	38
II.4.4 Gestion thermique des composants électroniques de puissance	38
II.4.5 Présentation des systèmes de refroidissement	39
II.4.5.2 Système de refroidissement liquide	40
II.4.5.3 Système de refroidissement par caloduc.....	41
II.4.5.4 Le refroidissement par micro-canaux	41
II.4.5.5 Refroidissement des matériaux poreux	42

**CHAPITRE III: MODÉLISATION MATHÉMATIQUE D'UN SYSTÈME DE
REFROIDISSEMENT À BASE DE CALODUCS ET THERMIQUES DES
COMPOSANTS ELECTRONIQUE (LE MOSFET)**

Introduction	44
III.1. Configuration choisie.....	44
III.2 Description qualitative de la propagation de la chaleur	45
III.3 Modèle analytique pour de la modèle thermo-hydraulique du caloduc/MOSFET .	45
III.3.1 Modélisation du caloduc.....	45
III.3.2 Hypothèses	46
III.3.1.1 Bilan d'énergie sur l'évaporateur	47
III.3.1.2 Bilan énergétique au niveau du condenseur	50
III.4 Modélisation thermique du MOSFET :.....	53
CHAPITRE IV:	51
RESULTATS ET DISCUSSIONS	51
Introduction	52
IV.1 Mise en place du banc de test.....	52
IV.1.1 Banc de test	52
IV.1.2 Étude paramétrique.....	52
IV.2 Présentation des résultats expérimentaux :	53
IV.3.1 Analyse des résultats	55
IV.2.1.1 Température de l'air en convection forcée : 15 °	56
IV.2.1.2 Température de l'air en convection forcée : 15 °	58
CONCLUSION GENERALE.....	51
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	63

Liste des figures

Figure I-1 : HP plane à section circulaire et HP cylindrique..... 7

Figure I-2: Mèche frittée en poudre métallique..... 8

Figure I-3: Mèche rainurée. 8

Figure I-4 : Mèche en grillage 8

Figure I-5 : Schématique de un conventionnel MOS appareil [9]..... 13

Figure I-6 : La Coupe transversale de un DONC JE MOSFET [16]..... 14

Figure I-7 : Coupe transversale de un double portail transistor [16]..... 14

Figure I-8 : Tri-Gate 3D transistor [18] 15

Figure I-9 : MOSFET à grille périphérique ultime..... 15

Figure I-10: Taille de l'entité en tant que fonction de temps [20] 16

Figure II-1: Modèle en conduction 31

Figure II-2: Le dissipateur thermique 32

Figure II-3: Modèle thermique 32

Figure II-4: Circuit électrique sans dissipateur thermique 33

Figure II-5: Circuit électrique avec dissipateur thermique 33

Figure II-6 : Le radiateur et modèle thermique équivalent..... 34

Figure II-7 : Une résistance électrique 35

Figure II-8 : Dissipation de puissance thermique à travers un matériau 35

Figure II-9: Empilage des résistances thermiques..... 36

Figure II-10: Les différents domaines d'application de l'électronique de puissance..... 38

Figure II-11 : Sandwich thermique. [27] 39

Figure II-12 : Le refroidissement par l'air. (a) convection naturelle et (b) convection Forcée 40

Figure II-13 : Le refroidissement par liquide 41

Figure II-14 : Le refroidissement par un caloduc [24]. 41

Figure II-15 : Le refroidissement par micro-canaux [23]..... 42

Figure II-16 : Le refroidissement par matériaux poreux [20]..... 42

Figure III-1: Dissipateur à ailettes droites en convection forcée associé à ventilateur. 44

Figure III-2 : Schéma en coupe du système de refroidissement modélisé. 45

Figure. III-3 : schéma de caloduc et analogie électrique 47

Figure III-4: Représentation de la vue en coupe du dissipateur à ailettes associée à des caloducs 50

Figure III-5 : schéma du condenseur 50

Figure III-6 : condenseur, dimensions du radiateur..... 51

Figure III-7: Modèle thermique simplifié du MOSFET. 53

Figure IV-1: Une courbe graphique représentant les changements de température en fonction du temps..... 53

Figure. IV-2. Modèle thermique du caloduc incluant les sources de chaleur et de refroidissement 55

Figure IV-2: les changements de température en fonction de tension 56

Figure IV-3: les changements de température en fonction de puissance 57

Figure IV-4: L'évolution de la valeur de la résistance de vapeur en fonction de puissance..... 57

Figure IV-5: L'évolution de la valeur du courant en fonction de tension..... 58

Figure IV-6: les changements de température en fonction de tension 59

Figure IV-7: les changements de température en fonction de puissance 59

Figure IV-8: l'évolution de la valeur de la résistance en fonction de puissance..... 60

Figure IV-9: l'évolution de la valeur du courant en fonction de tension 60

Figure IV-10: L'évolution des températures de la MOSFET en fonction de tension..... 61

Liste des tableaux

Tableau I-1: Comparaison des différentes structures capillaires9
Tableau I-2: Propriétés du fluide de travail du caloduc..... 11
Tableau I-3: Quelques propriétés de Silicium [17, 35] 15
Tableau II-1: Valeur de la résistance thermique de quelques transistors usuels36
Tableau IV-1: Température de l'air en convection forcée : $15^\circ / \theta = 0^\circ$ 56

Nomenclature

A	surface	[m ²]
A _w	section de la structure capillaire du caloduc	[m ²]
C _{pt}	Capacité thermique spécifique	[J/Kg°C]
D	Diamètre	[m]
f	facteur de frottement	[-]
F	coefficient de frottement	[-]
g	accélération gravitationnelle	[m/s ²]
h	coefficients de transfert de chaleur	[W/°Cm ²]
k	conductivité thermique	[W/°C m]
K	perméabilité de la mèche	[m ²]
L	Longueur	[m]
\dot{m}	Débit massique de fluide du travail	[Kg/s]
M	nombre de Mach	[-]
P	pression	[Pa]
P _c	pression capillaire	[Pa]
P _{c,max}	pression capillaire maximale	[Pa]
P _g	pression de gravitaire	[Pa]
P _l	pression de liquide	[Pa]
P _v	pression de vapeur	[Pa]
Q	puissance dissipée	[W]
Pr	nombre de Prandtl	[-]
r	rayon	[m]
R	résistance thermique	[°C/W]
Re	Nombre de Reynolds	[-]
T	Température,	[°C]
u	la vitesse	[m/s]

Lettres grecques

α	variable définie	[-]
β	angle de contact dans la mèche	[-]
γ_v	rapport de chaleur spécifique de la vapeur	[-]
δ	épaisseur de couche	[m]
ε	porosité d'un milieu poreux	[%]

Nomenclature

Γ	débit massique par unité de largeur	[Kg/ms]
μ	viscosité dynamique	[Pa.s]
ρ	masse volumique	[kg.m ⁻³]
σ	tension superficielle de l'interface liquide/vapeur	[N.m ⁻¹]
τ	contrainte de cisaillement	[N/m ²]
ϕ	angle d'inclinaison du caloduc	[°]

Indices

Cf	liquide de refroidissement
Cond	condenseur
eva	évaporateur
Eff	effective
HP	caloducs
l	liquide
lf	liquide film
v	vapeur
vl	line de vapeur
w	mèche
wall	Structure du caloducs

Introduction

Introduction Générale

Les MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistors) de puissance sont des dispositifs électroniques largement utilisés dans de nombreuses applications, notamment dans les convertisseurs de puissance, les alimentations à découpage et les onduleurs. Ces composants sont capables de gérer des niveaux de puissance élevés, mais ils génèrent également une quantité importante de chaleur pendant leur fonctionnement.

La dissipation thermique efficace est essentielle pour garantir le bon fonctionnement et la fiabilité des MOSFET de puissance. L'accumulation de chaleur peut entraîner une augmentation de la température de jonction, ce qui peut réduire les performances du dispositif, voire causer des défaillances à long terme. Par conséquent, des techniques de refroidissement appropriées sont nécessaires pour maintenir les MOSFET de puissance dans des plages de température acceptables.

Dans cette optique, les caloducs, en tant que dispositifs de transfert de chaleur passifs, ont été étudiés comme une méthode de refroidissement potentielle pour les MOSFET de puissance. Les caloducs exploitent les principes de la thermodynamique et du changement de phase pour transporter efficacement la chaleur d'une source chaude à un dissipateur thermique.

L'utilisation de caloducs pour refroidir les MOSFET de puissance présente plusieurs avantages. Tout d'abord, les caloducs offrent une capacité de transfert de chaleur élevée, permettant de dissiper des quantités importantes de chaleur avec des gradients de température relativement faibles. De plus, ils permettent une distribution uniforme de la chaleur sur la surface du dissipateur thermique, prévenant ainsi les points chauds localisés. Les caloducs sont également compacts, légers et fonctionnent sans bruit, ce qui les rend adaptés aux applications électroniques où l'espace et le silence sont des facteurs importants.

Cependant, malgré les avantages potentiels des caloducs pour le refroidissement des MOSFET de puissance, il est essentiel de mener des études expérimentales approfondies pour évaluer leur efficacité et leur performance dans ce contexte spécifique.

Dans cette étude expérimentale, notre objectif est donc de caractériser le refroidissement d'un MOSFET de puissance à l'aide de caloducs. Nous cherchons à évaluer l'efficacité des caloducs pour dissiper la chaleur générée par le MOSFET de puissance et à analyser leurs performances par rapport à d'autres méthodes de refroidissement, telles que l'utilisation de dissipateurs thermiques traditionnels.

Pour atteindre cet objectif, nous avons mis en place une expérience où un MOSFET de puissance est monté sur un dissipateur thermique relié à un ou plusieurs caloducs. Des mesures de température seront effectuées à différents emplacements du MOSFET, du dissipateur thermique et du caloduc afin d'évaluer la réduction de la température obtenue grâce à l'utilisation des caloducs. Au cœur de ce mémoire, nous allons étudier un système de refroidissement d'un

MOSFET de Puissance à base de Caloducs. Dans le premier chapitre une étude bibliographique que nous introduisons sur les caloducs, nous allons commencer par leurs principes de fonctionnement, les types des caloducs seront classés. Ensuite l'ensemble des limites de fonctionnement d'un caloduc. La dernière partie de ce **premier chapitre**, nous introduisons un MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistors) de puissance sont des dispositifs électroniques largement utilisés dans de nombreuses applications. Dans le **deuxième chapitre** nous vous présenté une généralité sur les systèmes de refroidissement et protection thermique des composants électroniques, Puis nous allons présenter dans **le chapitre trois** un modèle mathématique pour les caloducs ainsi les calculs et la simulation numérique en utilisant le Matlab. Dans **le chapitre les dernier** nous allons faire une étude expérimentale dont l'objet est étude des systèmes de refroidissement des caloducs et leur performance en basant sur l'effet de la capacité des caloducs à dissiper efficacement la chaleur et à prévenir une surchauffe du MOSFET et l'inclinaison du caloduc. Les résultats de cette étude expérimentale fourniront des informations précieuses sur l'efficacité du refroidissement des MOSFET de puissance par caloducs.

Chapitre I:

Revue bibliographique

Introduction

Ce chapitre présente, les différents travaux numériques et expérimentaux qui ont été réalisés afin de comprendre le comportement thermo-hydraulique et la performance thermique de caloduc en boucle, ces dernières sont utilisées dans des dissipateurs thermiques pour les différentes applications de refroidissement des appareils électroniques dans un environnement de convection thermique provoqué par les différents fluides de refroidissement.

Bien que on pourrait dire que l'ère de l'électronique a commencé avec Tube à rayons cathodiques de Braun (1897) et le redresseur à tube à vide de Fleming (1904), la véritable ère de l'électronique a commencé avec Lee de Forest triode, où ils transformé de Fleming redresseur comme un amplificateur. Le utiliser de triode (amplificateur) dans. dans le champ de communication dirigé pour incroyable succès et communication devenu un réalité, mais Un problème qui est apparu dans cet appareil est la consommation d'une grande quantité d'énergie. Au milieu des années 1920, Julius Lilienfeld a commencé son travail sur découverte un état solide remplacement pour la triode [1].

Dans 1930 et 1933, Jules Lilienfeld obtenu brevets pour dispositifs ressembler d'aujourd'hui MESFET et MOSFET, respectivement. En 1934, Oskar Heil a fait une théorie travaillé sur le contrôle capacitif pour Effet de champ transistors (FET) [2]. Quand fabrication un MOSFET, nous devoir donner Importance de l'effet du transport de chaleur en raison de la région du canal bas et de la réduction taille de l'appareil en particulier depuis il a devenir sur à l'échelle nanométrique [3, 4].

I.2 État de l'art et Revue bibliographique

I.2.1 État de l'art sur les HP

Les industries électroniques et de télécommunications tendent vers une miniaturisation toujours plus poussée des systèmes électroniques et vers l'augmentation de leur fréquence d'horloge, ce qui conduit à une augmentation des densités de flux à dissiper. Ainsi, le refroidissement des composants électroniques constitue actuellement un défi majeur, dont le but est de maintenir leur durée de vie à un niveau acceptable. Le caloduc (HP) a été inventé au début des années 1970 en Union Soviétique, en réponse aux besoins croissants de l'industrie électronique en matière de refroidissement. De plus, l'industrie spatiale était demandeuse de systèmes de refroidissement performants et de grande fiabilité. Les caloducs peuvent répondre à ces exigences puisqu'elles permettent d'évacuer de fortes densités de flux, sur des distances de plusieurs dizaines de centimètres, avec une faible résistance thermique, de l'ordre de 0,1 à 0,2 K/W. De plus, comme les transferts de chaleur ont lieu par changement de phase, un tel système est également capable d'uniformiser la température du composant et d'éliminer les points chauds. Les caloducs offrent plusieurs avantages par rapport aux caloducs classiques: elles ont un fonctionnement plus robuste, en particulier lorsqu'elles sont soumises à des forces volumiques externes de gravité ou d'accélération, la densité de flux maximale est plus élevée et elles sont plus facilement intégrables dans des systèmes électroniques de géométrie complexe.

La première caractéristique est particulièrement intéressante pour les systèmes électroniques embarqués. Ainsi, la principale application des caloducs est le refroidissement de composants électroniques, pour l'industrie spatiale ou électronique. Par exemple, un système de régulation de température comprenant six HP a été installé à bord de l'engin spatial russe «Mars 96». Dans le satellite météorologique chinois FY-IC, les batteries sont refroidies par des caloducs. Soixante-deux HP à ammoniac sont installés dans les satellites américains Hughes-702. Dans l'engin spatial américain I César, l'altimètre GLAS est refroidi par deux HP fonctionnant avec du propylène. Les premières applications terrestres de HP concernaient l'électronique de puissance (transistors, convertisseurs). Actuellement, les caloducs sont envisagés pour le refroidissement des ordinateurs portables. Dans ce type d'applications, les caloducs, de taille miniature, s'opposent à d'autres technologies concurrentes comme les mini-caloducs, les micro-caloducs ou les diffuseurs thermiques diphasiques. Usuellement, un HP est considéré comme miniature si le diamètre externe de l'évaporateur est inférieur à 8 mm, le diamètre des conduites inférieur à 3 mm, et la longueur effective comprise entre 200 et 1000 mm.

Il existe plusieurs types de mini-HP, qui se distinguent par la géométrie de l'évaporateur, cylindrique ou plane (figure I-1). Lorsque l'évaporateur est plan, la surface en contact avec le composant peut être rectangulaire ou circulaire. Les évaporateurs plans sont plaqués directement contre le composant à refroidir alors que dans le cas d'un évaporateur cylindrique, il est nécessaire d'interposer une semelle entre les deux parois, ce qui crée une résistance thermique supplémentaire. Deux HPs cylindriques ont été testées par Maydanik (2004). La première HP acier inox/ammoniac, munie d'une structure capillaire en titane, a un diamètre externe 5 mm et transfère une puissance maximale de 95 W sur une distance de 200 mm. La seconde, un HP cuivre/eau à structure capillaire en cuivre, a un diamètre externe de 6 mm et transfère une puissance de 150 W sur cette distance. Un HP cuivre / eau à évaporateur plan, de dimensions $20 \times 18 \times 3,2 \text{ mm}^3$, a également été développée.

Elle transfère une puissance de 160 W sur la même distance. Singh et al. (2007) ont testé un HP cuivre / eau, à structure capillaire en nickel, dont l'évaporateur plan à surface circulaire a une épaisseur de 10 mm et un diamètre de 30 mm. Les résultats montrent que ce système est capable de transférer une puissance de 70 W sur une distance d'environ 200 mm. Les travaux récents s'intéressent au comportement oscillatoire des LHP miniatures. Veshinin et Maydanik (2007) ont montré l'influence de la charge sur l'apparition des oscillations de température, alors que Chen et al. (2006) mettent en évidence l'influence de l'orientation du condenseur par rapport à l'évaporateur (élévation) et du réservoir par rapport à l'évaporateur (inclinaison).

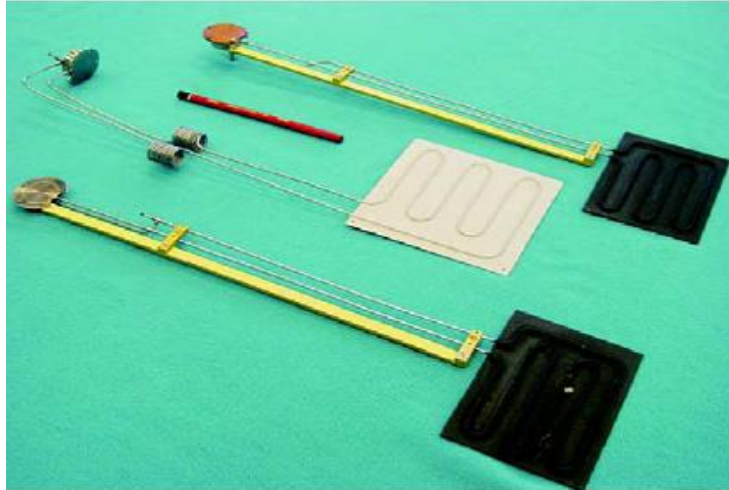


Figure 0-1 : HP plane à section circulaire et HP cylindrique

Les études expérimentales montrent que le HP est un système complexe, dans lequel les mécanismes thermiques et hydrodynamiques entre les différents composants de la boucle sont fortement couplés. Par exemple, des instabilités de température et de pression sont parfois observées après un changement des conditions de fonctionnement (puissance imposée ou température de la source froide), ou au démarrage. Dans certaines conditions, le HP atteint un régime stationnaire. De tels comportements peuvent induire des surchauffes au niveau de paroi de l'évaporateur, qui sont néfastes au bon fonctionnement des composants électroniques.

De nombreux travaux de recherche portant sur les caloducs peuvent être recensés dans la littérature. Il existe des synthèses bibliographiques sur ce sujet, comme celles de Ku (1999), Maydanik (2005), et Launay et al. (2007). Dans le cadre du PFE, nous nous intéresserons à la comparaison entre les HP et les LHP, au principe de fonctionnement d'un HP et à ses limites de fonctionnement. Nous étudierons également les méthodes de détermination de la conductivité thermique des mèches poreuses.

I.2.2 Revue bibliographique sur les systèmes caloducs (Heat Pipe)

Les composants des caloducs : Pour obtenir des informations suffisantes sur un caloduc, les chercheurs doivent étudier ses composants de base, qui jouent un rôle important dans l'efficacité du tube. De nombreux chercheurs ont concentré leurs recherches sur les aspects les plus importants de ces composants, tels que le récipient du caloduc, la structure de la mèche et le fluide de travail. Les études de ces composants ont été réalisées par l'analyse expérimentale et numérique.

Le récipient ou la paroi d'un caloduc : Le récipient est un joint métallique, capable de transférer la chaleur au fluide de travail. Ce métal a une bonne conductivité thermique. De nombreux facteurs influent sur le choix du matériau dès le récipient, par exemple mouillabilité, rapport résistance/poids, usinabilité et ductilité, compatibilité avec l'environnement extérieur et le fluide de travail, conductivité thermique, soudabilité et porosité. Le matériau du récipient doit

posséder un rapport résistance/poids élevé, il doit être non poreux pour éviter toute diffusion de particules de vapeur et, en même temps, il doit garantir une différence de température minimale entre la partie mèche et la source de chaleur en raison de sa plus grande conductivité thermique.

Structure à maille ou capillaire : La structure de la mèche est le composant le plus important d'un caloduc. Elle est responsable du retour du liquide de la section condenseur à la section évaporateur par la propriété capillaire, même contre la direction de la gravité. Ainsi, la présence de la mèche permet aux caloducs de fonctionner dans toutes les orientations. La mèche rainurée, la mèche frittée et la mèche grillagée sont les types de mèches les plus étudiés, Types de mèches les plus étudiés. Ces types de mèches sont largement utilisés dans l'industrie électronique.

Mèche frittée en poudre métallique : Comme le montre la figure I-2, ce type de mèche a des pores de petite taille, ce qui se traduit par une faible perméabilité de la mèche, ce qui permet de générer des forces capillaires élevées pour les applications anti gravité. Le caloduc qui porte ce type de mèche donne de petites différences de température entre section de l'évaporateur et celle du condenseur. Cela réduit la résistance thermique et augmente la conductivité thermique effective du caloduc [5].

Mèche rainurée : La mèche rainurée est illustrée à la Figure I-3; ce type de mèche génère une petite force d'entraînement capillaire, mais elle est appropriée ou suffisante pour les caloducs de faible puissance, qui fonctionnent horizontalement. Capillaire, mais elle est appropriée ou suffisante pour les caloducs de faible puissance, qui fonctionnent horizontalement ou dans le sens de la gravité. Ou dans le sens de la gravité



Figure 0-2: Mèche frittée en poudre métallique.



Figure 0-3: Mèche rainurée.



Figure 0-4 : Mèche en grillage

Mèche en grillage : La figure I-4 montre la mèche en grillage, qui est utilisée dans de nombreux produits, et ils ont démontré des caractéristiques utiles en ce qui concerne le transport de l'énergie et la sensibilité à l'orientation.

Les études sur les types de mèches aboutissent aux principales conclusions suivantes :

La mèche frittée en poudre métallique a une petite taille de pore, ce qui entraîne une faible perméabilité. Ceci permet de générer des forces capillaires élevées pour les applications anti gravité. Le caloduc qui ce type de mèche produit de faibles différences de température entre l'évaporateur et le condenseur. Par conséquent, la résistance thermique est réduite et la conductivité thermique effective du caloduc est augmentée.

La mèche rainurée génère une petite force capillaire, qui est appropriée ou suffisante pour les caloducs de faible puissance. Pour les caloducs de faible puissance, qui fonctionnent horizontalement ou dans le sens de la gravité.

L'efficacité d'un caloduc avec une mèche en treillis dépend du nombre de couches et du nombre de mailles utilisées car il présente des caractéristiques facilement variables en termes de transport de chaleur et de sensibilité d'orientation.


Les études sur les types de mèches aboutissent aux principales conclusions suivantes :

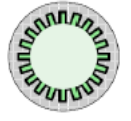

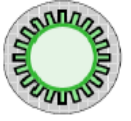

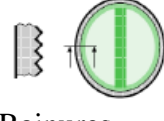
La mèche frittée en poudre métallique a une petite taille de pore, ce qui entraîne une faible perméabilité. Ceci permet de générer des forces capillaires élevées pour les applications anti gravités. Le caloduc qui ce type de mèche produit de faibles différences de température entre l'évaporateur et le condenseur. Par conséquent, la résistance thermique est réduite et la conductivité thermique effective du caloduc est augmentée.

La mèche rainurée génère une petite force capillaire, qui est appropriée ou suffisante pour les caloducs de faible puissance. Pour les caloducs de faible puissance, qui fonctionnent horizontalement ou dans le sens de la gravité.

L'efficacité d'un caloduc avec une mèche en treillis dépend du nombre de couches et du nombre de mailles utilisées car il présente des caractéristiques facilement variables en termes de transport de chaleur et de sensibilité d'orientation. Le Tableau1: Permet de comparer les différentes structures selon les critères de Faghri.

Tableau I-1: Comparaison des différentes structures capillaires

TYPE	Pompage Capillaire	Coefficient d'échange thermique	Perméabilité	Remarques
	Elevé	Faible	Faible à Moyenne	Le diamètre moyen des pores de la trame peut être ajusté.

<p>Mèches composites</p>					<p>Fabrication très facile Mauvaise reproductibilité</p>
 <p>Rainures longitudinales</p>	Faible	Très élevé	Moyenne à Elevée	Il existe de nombreux profils :	<ul style="list-style-type: none"> -rectangulaire, -triangulaire, -circulaire, -trapézoïdale, <p>Fabrication de série facile et bon marché.</p>
 <p>Métal fritté</p>	Très élevé	Moyen	Faible à Moyenne		<p>Le diamètre moyen des pores peuvent être ajustés. Fabrication assez délicate mais coût pouvant être faible.</p>
 <p>Rainures longitudinales et mèches</p>	Elevé à Très élevé	Elevé	Moyenne à Elevée		<p>Fabrication délicate (positionnement de la mèche). Risques important de création de bulles de vapeur ou de gaz dans les rainures</p>
 <p>Métal fritté avec artère liquide intégrée</p>	Elevé à Très élevé	Moyen	Moyenne à Elevée		<p>Le diamètre moyen des pores peuvent être ajusté ainsi que la section du canal liquide. Fabrication délicate.</p>
 <p>Rainures radiales et milieu poreux central</p>	Elevé à Très élevé	Elevé à Très élevé	Moyenne à Elevée		<p>Difficulté importante pour la réalisation de rainures radiales sur de grandes longueurs. Difficulté de maintien</p>

I.2.2.1 Les fluides de travail

La sélection du fluide de travail dépend principalement de la plage de température de vapeur de fonctionnement. La raison est que la base du fonctionnement du caloduc est le processus d'évaporation et de condensation du fluide de travail. La sélection du fluide de travail approprié doit être effectuée avec soin, en tenant compte des facteurs suivants [5].

- Doit avoir une tension superficielle très élevée;
- Doit présenter une bonne stabilité thermique;
- Mouillabilité des matériaux de la paroi et de la mèche;
- Doit avoir une chaleur latente élevée;
- Doit posséder une conductivité thermique élevée;
- Doit avoir une faible viscosité des liquides et des vapeurs; et
- Il doit être compatible avec les matériaux de la paroi et la mèche.

La propriété la plus importante du fluide de travail est une tension de surface élevée, de sorte que le caloduc fonctionne contre la gravité en générant une force élevée de la caractéristique de capillarité. Tableau 2 résume les propriétés de certains fluides de travail avec leurs plages de température utiles :

Tableau I-2: Propriétés du fluide de travail du caloduc.

<i>Milieu</i>	<i>Point de fusion (°C)</i>	<i>Point d'ébullition (°C)</i>	<i>Plage utile (°C)</i>
Hélium	-271	-261	-271 à -269
Azote	-210	-196	-203 à -160
Ammoniac	-78	-33	-60 à 100
Acétone	-95	57	0 à 120
Méthanol	-98	64	10 à 130
Flutec PP2	-50	76	10 à 160
Éthanol	-112	78	0 à 130
Eau	0	100	30 à 200
Toluène	-95	110	50 à 200
Mercure	-39	361	25 à 650

L'eau distillée est le fluide le plus approprié pour les caloducs utilisés pour le refroidissement des équipements électroniques. Cependant, peu de chercheurs ont tenté d'améliorer la performance thermique des caloducs en ajoutant des nanoparticules métalliques, qui sont de bons conducteurs thermiques, comme l'argent, l'oxyde de fer et le titane, à l'eau distillée. Ce fluide étant connu sous le nom de nano fluides.

I.2.3 Revue bibliographique de HP

Plusieurs chercheurs ont étudié expérimentalement et numériquement les performances thermo-hydrauliques des mousses métalliques utilisées pour le refroidissement des composants électroniques [6-7].

ont étudié expérimentalement les caractéristiques d'écoulement de fluide et de transfert de chaleur de trois nouveaux dissipateurs thermiques en mousse de cuivre à ailettes soumis à un refroidissement par impact par jet à fente rectangulaire et ventilateur axial. Ils ont découvert que l'utilisation de mousse de cuivre améliore les performances thermiques des dissipateurs thermiques à ailettes exposés à l'impact des jets. De plus, les performances thermiques des mousses de cuivre à ailettes avec 20 et 30 PPI surpassent même celles d'un dissipateur thermique à ailettes traditionnel, indiquant un potentiel élevé pour remplacer les dissipateurs thermiques à ailettes traditionnels. ont réalisé une étude expérimentale à partir d'un dissipateur thermique en mousse d'aluminium placé sur un radiateur dans un canal.

Le dissipateur thermique en mousse d'aluminium peut augmenter jusqu'à 28 % les performances thermiques par rapport à un dissipateur thermique traditionnel à plaques parallèles de mêmes dimensions. ont étudié numériquement le dissipateur thermique à ailettes en mousse métallique (MFPFHS) et l'ont comparé au dissipateur thermique à ailettes solides conventionnel (SPFHS) sous un régime turbulent. Ils ont constaté que l'utilisation du MFPPF, par rapport au solide pin-fin (SPF), permet une augmentation significative des performances de transfert de chaleur et une diminution des pertes par frottement. Hung et al. ont examiné les performances thermiques des micro-canaux (MCHS) avec des milieux poreux insérés et ont montré que les matériaux en mousse offrent de meilleures performances de transfert de chaleur. ont analysé numériquement les performances d'écoulement de fluide et de transfert de chaleur d'un dissipateur thermique en mousse métallique à ailettes à broches ajoutées (dissipateur thermique MFPPH). En raison de l'ajout d'ailettes à broches dans la mousse métallique, ils ont observé que le rapport de performance thermo hydraulique est 1,6 fois meilleur qu'un dissipateur thermique PF conventionnel. De plus, cette amélioration est due à une conduction thermique et une convection thermique améliorées, ainsi qu'à une résistance à l'écoulement accrue.

I.2 MOSFET

I.2.1 Conventionnel MOSFET

La FigI.1 montre un schéma d'un dispositif MOS conventionnel. Cet appareil est composé d'un canal reliant la source au drain, une grille située au-dessus du canal, une grille oxyde (isolant) entre la grille et le canal, ce qui bloque le passage du courant de la grille au canal [8].

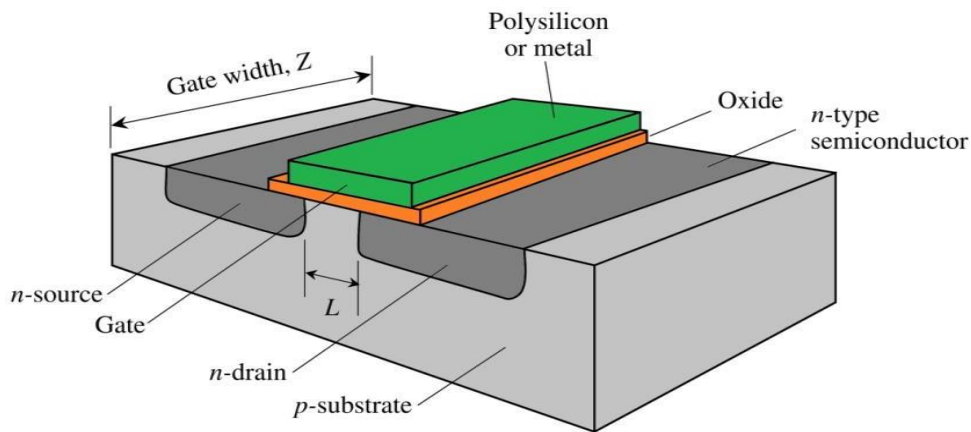


Figure 0-5 : Schématisation d'un conventionnel MOS appareil [9]

I.2.2 Silicium sur Isolant (DONC JE) MOSFET

C'est comme un MOSFET classique mais une couche d'isolant (SiO_2) est ajoutée à réduire le courant Fuite de la jonction drain/source vers le substrat (FigI-6) [10]. La couche d'isolation introduit inférieur couplage capacitance depuis le conduire canaliser pour le substrat par rapport pour MOSFET conventionnels [11],[12]. On voit que l'utilisation de SOI MOSFET réduit la dissipation de puissance jusqu'à 66% par rapport au MOSFET conventionnel. Et, pour une même puissance dissipée, jusqu'à Une amélioration de 35 % de la fréquence de fonctionnement peut être obtenue [13]. L'avantage du SOI est la facilité d'isolation électrique d'un appareil du reste du circuit intégré, ce qui augmente l'encombrement densité. De plus, le zone de source et drain jonctions est important réduit, ainsi décroissant parasite capacités. Enfin, l'épuisement largeur est limité par le Si corps épaisseur; Par conséquent, il est largement admis que le SOI aide à réduire les effets des canaux courts à moins que le couplage source-drain via canal et BOX ne peut être négligé. Les propriétés du SOI Les appareils sont améliorés avec la réduction de l'épaisseur du corps. On pense que l'ultra-corps mince DONC JE (FD UTB DONC JE) est un des meilleures mises à l'échelle solutions. Exigible pour excellent portail contrôle du canal, ces dispositifs peuvent être non dopés ou très faiblement dopés. De cette façon, la mobilité n'est pas dégradé et seuil tension est moins dépendant sur la fluctuation de se doper concentration [14]. Un autre avantage de DONC JE est-ce il facilite développement de nouveau appareil notions [15].

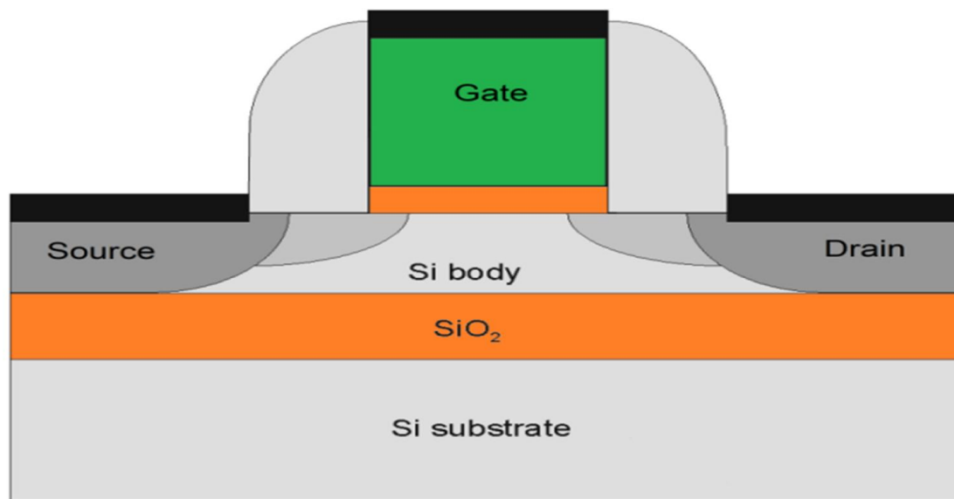


Figure 0-6 : La Coupe transversale de un DONC JE MOSFET [16]

I.2.3 Double portail MOSFET

Cet appareil a deux portes de liaison entre eux comme montré dans. Dans le Fig I-7. Les deux portes sont cadeau pour contrôle (simultanément) le actuel couler. Les deux portes sont cadeau à le devant et l'arrière fin. [17].

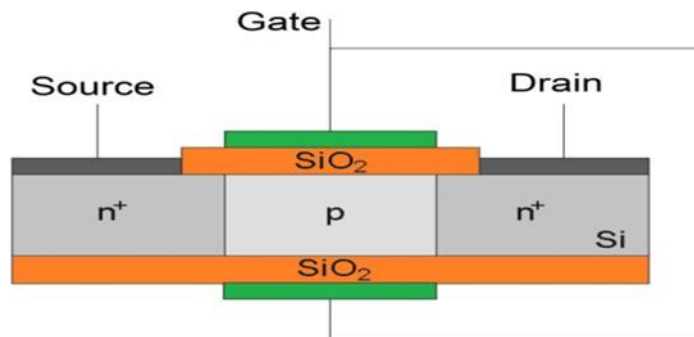


Figure 0-7 : Coupe transversale de un double portail transistor [16]

I.2.4 Multi - porte MOSFET

Ce dispositif comporte plus de deux grilles telles que trois grilles (FigI-8) d'où la multiplication des grillespermettre à contrôler le flux de charger dans le chaîne [18].

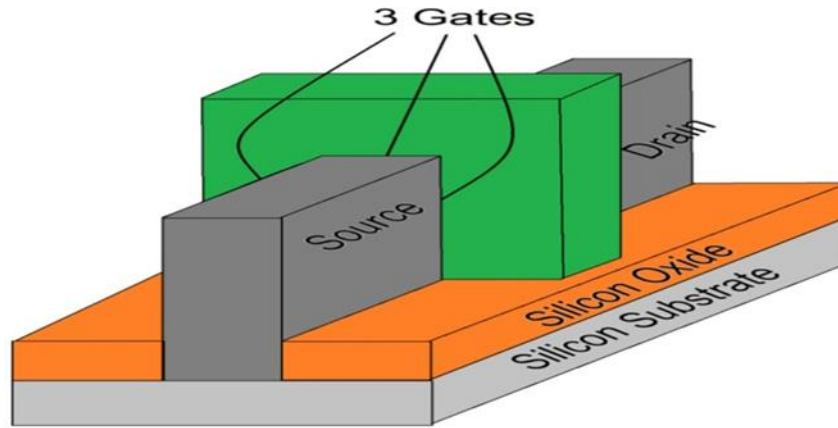


Figure 0-8 : Tri-Gate 3D transistor [18]

I.2.5 Entourer portail MOSFET

Dans entourer portail MOSFET, canaliser est couvert par portail depuis tous côtés. Est Il est d'une manière ou d'une autre similaire à un transistor à effet de champ à ailettes (Fin Fet). Ce dispositif permet de mieux contrôler le flux de charge dans le canaliser que d'autres appareils [18]. FigI-9 illustrations Structure de base de porte d'entourage.

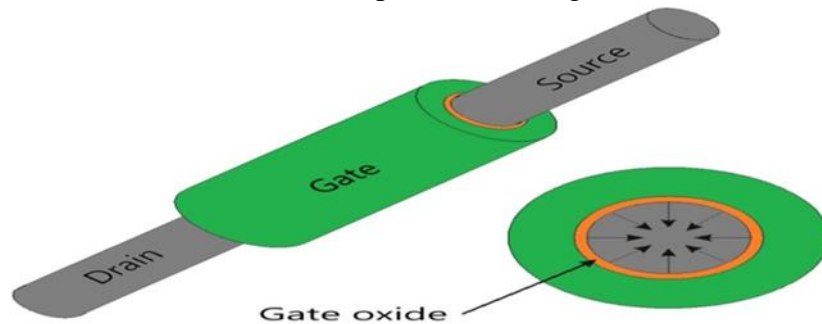


Figure 0-9 : MOSFET à grille périphérique ultime.

I.2.6 Silicium matériel propriétés

Les matériaux les plus couramment utilisés dans les industries électroniques sont les matériaux semi-conducteurs. Dans le Ces dernières années, le silicium (Si) était le semi-conducteur le plus utilisé pour les dispositifs microélectroniques. Cependant, les dispositifs à base de silicium atteignent leurs limites matérielles en raison de la miniaturisation [11]. Tableau I.1 donne quelques propriétés de Silicium.

Tableau I-3: Quelques propriétés de Silicium [11]

Propriété	Valeur
Conductivité thermique	$150 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
moyenne Gratuit Chemin (MFP)	100 nm
Vitesse de groupe	3000 SP

Volumétrie chaleur capacité	$1.5E+6 \text{ Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$
Électron repos masse (m e)	$9.1095E-28 \text{ g}$
efficace électron masse	0,32 moi _
Densité	2.33 g/cm^3
longitudinal son vitesse	$9.18E+5 \text{ cm/s}$
acoustique phonons déformation potentiel	9 eV
non parabolique facteur	$0,5 \text{ eV}^{-1}$
relatif diélectrique constant	11.7
vide diélectrique constant	$8.85E-18 \text{ C/V } \mu\text{m}$

I.2.7 Le réduction de fonctionnalité taille

La miniaturisation de l'électronique a atteint l'échelle nanométrique et vous vous en doutez, avec Des centaines de millions de semi-conducteurs assemblés sur une surface de puce ne dépassant pas quelques carrés centimètres et le plus petit latéral tailles des fonctionnalités de l'appareil approche dix nm [1].

Bien que Aujourd'hui plus de 90% des circuits intégrés sont fabriqués en Technologie MOSFET (CMOS), la loi de Moore est toujours vraie dans de nombreux aspects du développement tendances de la microélectronique des semi-conducteurs. Le MOSFET a été amélioré d'innombrables fois il a été minimisé au-delà de l'imagination. Le réduction de taille de l'entité, comme il représenté dans Fig I-10, a été plus ou moins exponentiel [1].

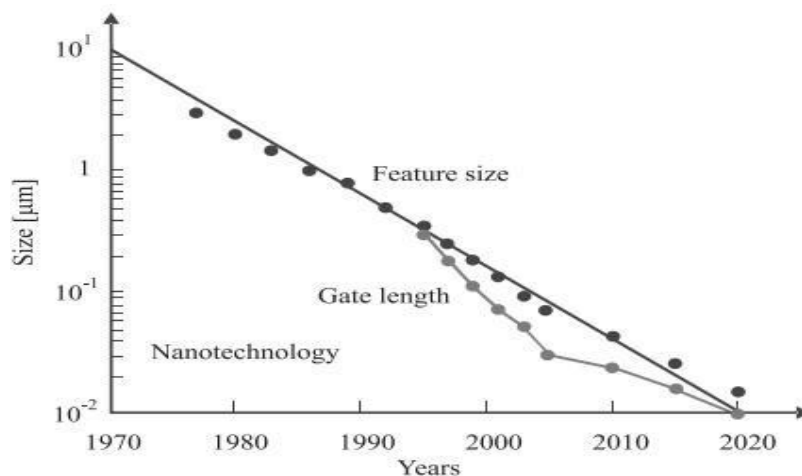


Figure 0-10: Taille de l'entité en tant que fonction de temps [20]

Chapitre II:

Généralités sur les Systèmes de Refroidissement et Protection Thermique des Composants Electroniques

Introduction

Les dissipateurs thermiques sont présentés et brièvement expliqués dans ce chapitre. Ils sont décrits avec leurs caractéristiques particulières qui les distinguent des autres matériaux. Ce chapitre présente une description des matériaux cellulaires et leurs classifications ainsi que les différents types de mousses métalliques, leurs propriétés géométriques et leurs procédures de fabrication. Enfin, et en vue des caractéristiques physiques et mécaniques distinctives de ces matériaux cellulaires, une brève description de leurs applications dans les divers secteurs industriels et technologiques est citée.

II.1 Origines des pertes dans les composants

II.1.1 Pertes en conduction

Dans le contexte de la conduction [21], lorsque le courant électrique circule à travers le matériau semi-conducteur d'un composant de puissance, il entraîne une augmentation de la température de ce dernier en raison de l'effet Joule. La puissance dissipée qui en résulte peut être calculée en utilisant les composants du modèle électrique équivalent en conduction. Pour la diode et le thyristor, ce modèle est représenté dans la figure II. 1.

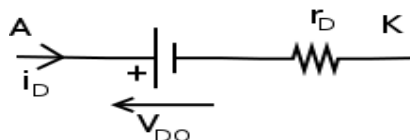


Figure II-1: Modèle en conduction

La puissance dissipée en conduction peut être exprimée par la formule suivante:

$$P = I^2 * R \quad (2.1)$$

Où

- P est la puissance dissipée en conduction,
- I est le courant traversant le composant,
- R est la résistance du composant.

En résumé, pour évaluer la puissance dissipée, il est nécessaire de déterminer les courants moyen et efficace à travers le composant.

II.1.2 Pertes en commutation

La puissance dissipée provient également des pertes par commutations, qui correspondent aux changements d'état du composant entre les états bloqué et passant. Cette puissance dissipée peut être exprimée par la relation suivante:

$$P = (P_{OFF-ON} * t_{mi} + P_{ON-OFF} * t_{di}) * I_D * V * f \quad (2.2)$$

où:

P_{OFF-ON} est la puissance dissipée lors de la mise en conduction,

t_{mi} est la durée de montée du courant,

P_{ON-OFF} est la puissance dissipée lors du blocage,

t_{di} est la durée de descente du courant,

I_D est le courant à établir ou à couper,

V est la tension du réseau,

f est la fréquence des commutations.

II.1.3 Nécessité de la protection des éléments

Lorsque la somme des deux puissances mentionnées précédemment augmente, cela entraîne une élévation de la température de fonctionnement du composant, ce qui peut réduire sa durée de vie et éventuellement entraîner sa destruction. Pour limiter la température du composant, on utilise des dissipateurs thermiques (radiateurs) qui aident à évacuer la chaleur produite. Ces dissipateurs thermiques favorisent la conduction et la convection thermiques, permettant ainsi de maintenir la température du composant dans des limites acceptables.

II.2 Dissipateurs thermiques

Tout à fait, ce type de refroidissement repose sur le transfert thermique par convection naturelle. L'utilisation d'un dissipateur thermique à ailettes est un exemple courant de cette méthode [22]. Le dissipateur thermique se compose d'un bloc de métal fabriqué ou extrudé qui est fixé à la partie du composant qui nécessite le refroidissement. Pour améliorer la conductivité thermique entre le composant et le dissipateur thermique, une pâte thermique peut être appliquée. La conception à ailettes du dissipateur thermique permet d'augmenter la surface de dissipation thermique, favorisant ainsi une meilleure dissipation de la chaleur par convection naturelle.



Figure II-2: Le dissipateur thermique

II.2.1 Analogie en modèle électrique et modèle thermique

L'analogie présentée dans le modèle thermique de la figure II-3 illustre le flux thermique P_d (exprimé en watts) qui doit être dissipé, correspondant à la puissance générée par l'effet Joule. Ce flux thermique est assimilé à un courant électrique qui circule à travers la résistance thermique R_{th} (mesurée en degrés Celsius par watt). La capacité thermique C_{th} (mesurée en joules par degré Celsius) reflète l'aspect transitoire du phénomène, caractérisé par sa constante de temps $R_{th}C_{th}$.

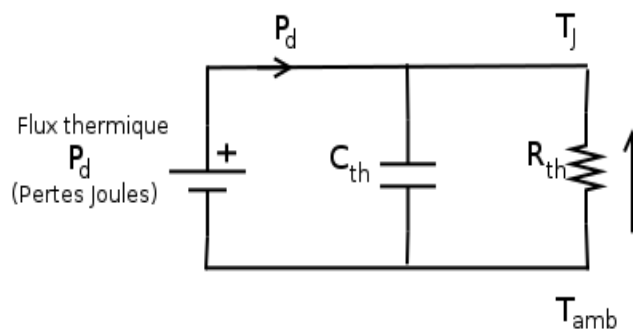


Figure II-3: Modèle thermique

II.2.2 Schéma thermique analogique avec un circuit électrique

II.2.2.1 Sans dissipateur thermique

Malheureusement, en tant que modèle de langage textuel, je ne suis pas capable de visualiser ou de traiter des schémas ou des images. Je suis uniquement capable de traiter du texte et de fournir des informations basées sur celui-ci. Si vous avez une description textuelle du schéma thermique équivalent, je serais heureux de vous aider à le comprendre ou à vous fournir des informations supplémentaires à ce sujet.

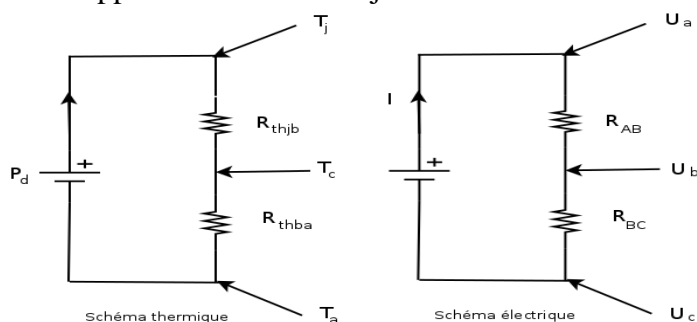


Figure II-4: Circuit électrique sans dissipateur thermique

- T_j ($^{\circ}\text{C}$): température de jonction ($T_{j,\text{max}}$ donné par le constructeur de 120 à 250 $^{\circ}\text{C}$);
- T_c ou T_b en ($^{\circ}\text{C}$) : température du boîtier;
- T_a en ($^{\circ}\text{C}$) : température de l'air ambiant;
- R_{thjb} ou R_{thjc} ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$): résistance thermique jonction boîtier donné par le constructeur;
- R_{thba} en ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$) : résistance thermique boîtier air ambiant.

Les constructeurs indiquent également la valeur R_{thja} sans radiateur.

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

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

II.2.2.2 Avec dissipateur thermique

Dans le circuit avec un dissipateur thermique, différents composants de résistance thermique sont pris en compte. Voici leur description:

R_{thbr} : Résistance thermique boîtier-radiateur, qui dépend du mode de fixation du dissipateur thermique. Cela peut inclure l'utilisation de mica ou de graisse à la silicone pour améliorer la conductivité thermique entre le boîtier du composant et le radiateur.

R_{thra} : Résistance thermique radiateur-air ambiant, qui dépend de la surface du radiateur utilisé. Une plus grande surface de radiateur permet une meilleure dissipation de la chaleur dans l'air ambiant.

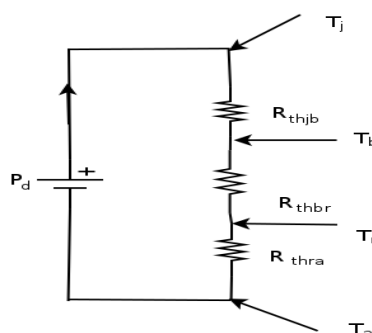


Figure II-5: Circuit électrique avec dissipateur thermique

La différence de température entre la jonction du composant (T_j) et l'air ambiant (T_d) peut être calculée en utilisant la formule suivante:

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

où:

- P_d représente le flux thermique à évacuer (puissance provenant de l'effet Joule),
- ΣR_{th} est la somme des résistances thermiques, comprenant R_{thjb} , R_{thbr} et R_{thra} .

En résumé, cette formule permet de calculer la différence de température entre la jonction du composant et l'air ambiant en fonction du flux thermique dissipé et des résistances thermiques du boîtier, du radiateur et de l'air ambiant.

II.2.3 Modèle du dissipateur

Sans prendre en compte l'évolution transitoire, le flux thermique P_d qui se déplace de la jonction du composant vers l'air ambiant traverse différentes résistances thermiques qui sont connectées en série. Dans le but de favoriser l'évacuation de la chaleur, il est nécessaire de minimiser la résistance totale en augmentant la surface de dissipation, en améliorant la nature des matériaux utilisés ou en favorisant la convection par le biais de la ventilation. Le comportement thermique suit les lois de Kirchhoff des circuits linéaires et peut être classiquement modélisé, comme illustré dans la figure II-6.

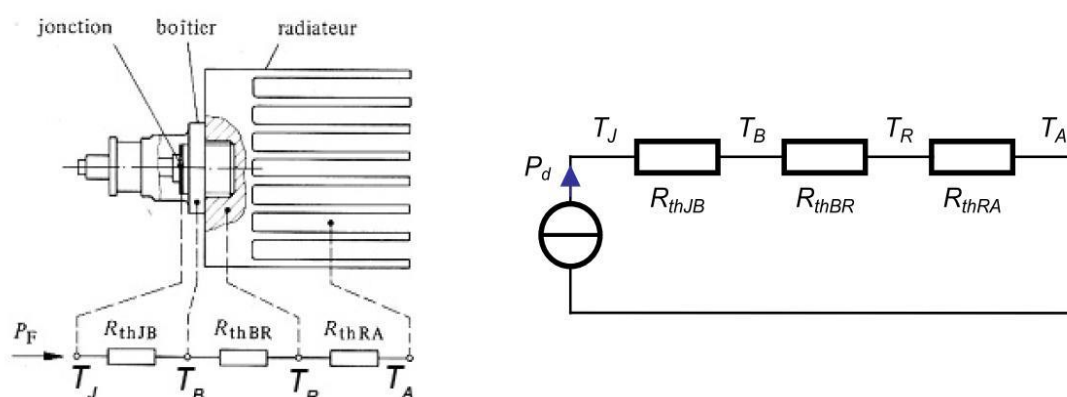


Figure II-6 : Le radiateur et modèle thermique équivalent.

II.3 Notion de résistance thermique

II.3.1 Définition

Effectivement, une résistance électrique est définie comme le rapport entre la différence de tension (la tension aux bornes) à travers un élément et le courant qui le traverse. La résistance électrique (exprimée en ohms) est une mesure de l'opposition d'un matériau ou d'un composant au passage du courant électrique. Plus la résistance est élevée, plus le matériau ou le composant entrave le flux du courant électrique. Cette relation est décrite par la loi d'Ohm, qui énonce que la tension (V) aux bornes d'une résistance est égale au produit du courant (I) qui la traverse et de sa valeur en ohms (R) : $V = I * R$.

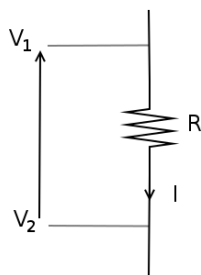


Figure II-7 : Une résistance électrique

Nous pouvons faire une analogie pour définir la résistance thermique.

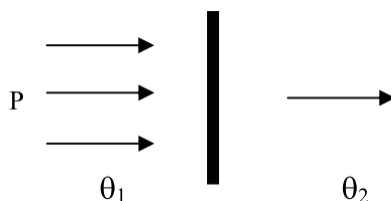


Figure II-8 : Dissipation de puissance thermique à travers un matériau

En effet, lorsque de la puissance P doit être dissipée, cela entraîne une augmentation de la température θ_1 à l'intérieur du matériau. À l'extérieur du matériau, la température θ_2 sera inférieure à θ_1 .

Il est compréhensible que plus la résistance thermique du matériau est élevée, moins il aura tendance à transférer sa chaleur vers le milieu ambiant.

L'expression de la résistance thermique est la suivante:

$$R_{th} = (\theta_1 - \theta_2) / P \text{ (}^\circ\text{C/W)}$$

où:

- R_{th} est la résistance thermique du matériau,
- θ_1 est la température à l'intérieur du matériau,
- θ_2 est la température à l'extérieur du matériau,
- P est la puissance à dissiper.

Cette formule permet de quantifier la résistance thermique d'un matériau en fonction de la différence de température et de la puissance à dissiper. Une résistance thermique plus élevée indique une plus faible capacité du matériau à transférer la chaleur vers l'extérieur.

La résistance thermique d'un matériau, selon la référence [23], dépend principalement des facteurs suivants :

- 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 :

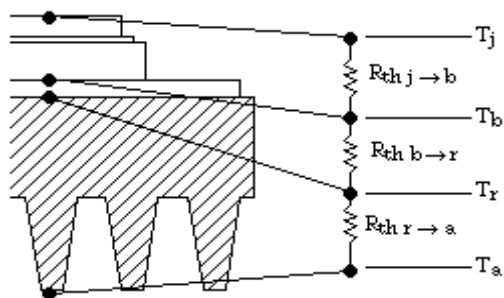


Figure II-9: Empilage des résistances thermiques.

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

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

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

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

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 II-1: 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

II.3.2 Applications : mise en évidence de l'importance des dissipateurs thermiques pour un transistor

L'utilisation de dissipateurs thermiques est d'une importance capitale pour assurer le bon fonctionnement des transistors et éviter les problèmes de surchauffe.

Voici quelques exemples qui illustrent l'importance des dissipateurs thermiques pour les transistors:

1. **Applications à haute puissance:** Dans les applications où les transistors fonctionnent à des puissances élevées, ils génèrent une quantité significative de chaleur. Sans un dissipateur thermique adéquat, cette chaleur peut s'accumuler rapidement et provoquer une surchauffe du transistor. Cela peut entraîner des dysfonctionnements, une dégradation des performances ou même une défaillance complète du composant.

2. **Transistors de puissance :** Les transistors de puissance, tels que les MOSFET et les transistors bipolaires, sont souvent utilisés dans des applications de commutation ou d'amplification de puissance. Ces transistors peuvent dissiper des quantités importantes de chaleur lorsqu'ils sont soumis à de fortes tensions ou courants. Les dissipateurs thermiques sont essentiels pour évacuer efficacement cette chaleur et maintenir les températures de fonctionnement dans des limites acceptables.

3. **Applications à longue durée de fonctionnement:** Dans certaines applications, les transistors doivent fonctionner pendant de longues périodes de temps, par exemple dans les systèmes de télécommunications, les équipements industriels ou les systèmes de contrôle. Sans un dissipateur thermique approprié, la chaleur accumulée peut progressivement élever la température du transistor, ce qui peut réduire sa durée de vie ou entraîner des pannes prématurées.

4. **Environnements à température élevée:** Dans les environnements où la température ambiante est élevée, tels que les applications automobiles ou les environnements industriels, les dissipateurs thermiques sont encore plus essentiels. Ils aident à maintenir les températures des transistors à des niveaux sûrs en éliminant efficacement la chaleur excédentaire.

En résumé, l'utilisation de dissipateurs thermiques pour les transistors est cruciale pour évacuer la chaleur générée et maintenir des températures de fonctionnement sûres. Cela garantit une performance fiable, une durée de vie prolongée et une prévention des pannes thermiques. Il est important de choisir et de dimensionner correctement les dissipateurs thermiques en fonction des exigences spécifiques de l'application et des caractéristiques thermiques du transistor utilisé.

II.4 Systèmes de refroidissement pour l'électronique de puissance

II.4.1 Les éléments électroniques

Il existe trois échelles différentes pour prendre en compte les problèmes de dissipation thermique des éléments électriques : l'échelle du composant (puce, diode...), celle du système (onduleur, KERS...), et celle des applications (automobile, avion, ...). Pour donner une idée des secteurs dans lesquels l'électronique de puissance est utilisée, la figure (I.1) montre Les différents domaines d'application de l'électronique de puissance. De la dizaine d'hertz pour des applications utilisant plusieurs mégawatts, jusqu'à plusieurs centaines de kHz (les transistors MOS les plus rapides) à faible puissance (de l'ordre du watt). L'intervalle de

puissance va donc du watt jusqu'à la centaine de mégawatts pour les applications les plus puissantes (par exemple les fours à arc électriques) [4].

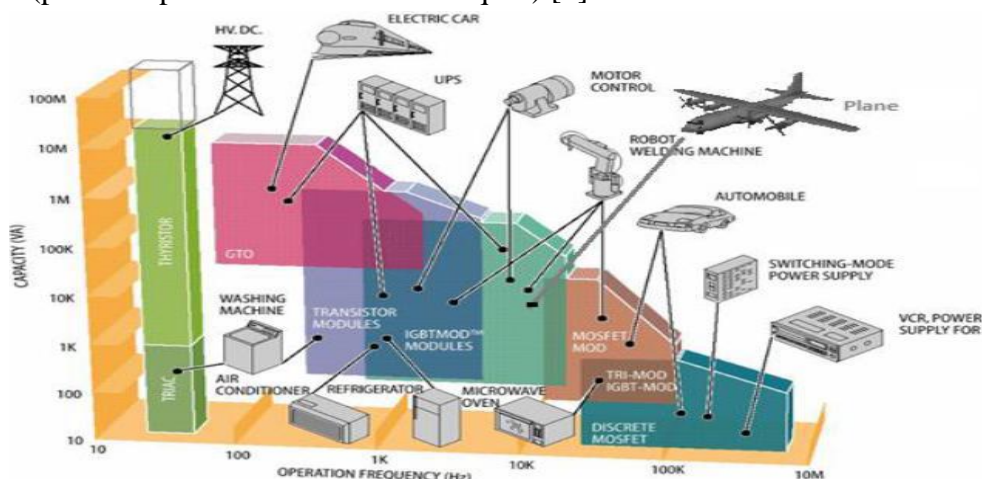


Figure II-10: Les différents domaines d'application de l'électronique de puissance.

II.4.2 Les composants électriques

L'électronique de puissance est née avec l'apparition des composants de puissance à jonctions comme les diodes, les transistors bipolaires et les thyristors [24]. Leur taille varie du micromètre au centimètre. Leurs puissances thermiques à évacuer sont généralement faibles (une dizaine de watts au maximum), un refroidissement par convection naturelle est suffisant. Mais leur nombre important au sein d'un système électrique nécessite un refroidissement global [25].

II.4.3 Importance du refroidissement électronique

Dans de nombreuses applications d'ingénierie, la dissipation de puissance crée de la chaleur en tant que sous-produit, ce qui peut entraîner des défaillances du système dans ces appareils en raison d'une surchauffe grave. Cela est principalement dû aux certaines limites de température requises pour que presque toutes les applications fonctionnent dans des conditions appropriées. Actuellement, à mesure que les appareils électroniques diminuent en taille, leurs pertes de puissance thermique augmentent. De plus, la convection forcée des dissipateurs thermiques couvre un large éventail d'applications industrielles afin de surmonter les effets néfastes de la surchauffe ou de la combustion [26].

II.4.4 Gestion thermique des composants électroniques de puissance

La chaleur est la forme d'énergie qui est transférée d'un objet à température élevée à un objet à température plus basse. En général, il existe trois mécanismes physiques de transfert de chaleur : la conduction, la convection et le rayonnement. La conduction décrit le transfert de chaleur via l'oscillation des molécules, c'est-à-dire le contact direct des objets. De même, la convection décrit le transfert de chaleur entre un solide et un fluide en mouvement s'il existe un gradient de température entre les deux milieux. Le fluide en mouvement peut être un liquide, un gaz ou un plasma. Enfin, le rayonnement est le transfert de chaleur via des ondes électromagnétiques. Pour les applications d'électronique de puissance, la chaleur dissipée dans l'air ambiant par rayonnement est insignifiante et souvent négligée, à moins qu'une méthode de convection ne soit utilisée pour refroidir les composants électroniques [27]. La figure II-11

montre une coupe caractéristique d'un composant électronique monté sur un dissipateur. Cette coupe présente quatre parties essentielles : la semelle, la puce qui sert de support à cette dernière et qui permet, comme nous le verrons plus tard, d'évacuer et d'épanouir le flux de chaleur, le radiateur et l'interface thermique entre la semelle et ce radiateur [24].

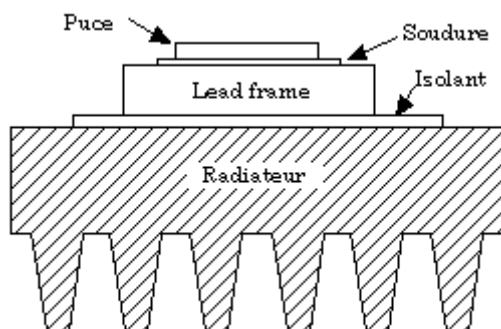


Figure II-11 : Sandwich thermique. [27]

II.4.5 Présentation des systèmes de refroidissement

Pour maintenir la température d'un équipement électronique sous les limites de fonctionnement, l'excès de chaleur est éliminé à l'aide de dissipateurs thermiques. En fonction de l'ampleur de l'excès de chaleur à éliminer, de la sécurité de l'appareil, des considérations d'espace, du coût, de la fiabilité, de la facilité d'utilisation, d'entretien, de la productibilité, de la compatibilité et des performances [27]. Dans cette section, une revue générale des solutions de refroidissement sera effectuée. Il n'est pas possible d'examiner en détail toutes les méthodes possibles, c'est pourquoi la concentration sera mise sur certaines des plus courantes et des plus utiles [27].

II.4.5.1 Système de refroidissement à l'air

Dans les situations où les composants ne sont que faiblement contraints sur le plan thermique, la méthode de dissipation la plus couramment utilisée est le dissipateur thermique à air. Dans ce cas, l'échange thermique entre le dissipateur et l'environnement ambiant se fait par convection et par rayonnement. Il peut être utilisé avec un ventilateur pour forcer la convection ou sans ventilateur pour laisser place à la convection naturelle, où le mouvement de l'air est induit simplement par une différence de température.

Dans le cas de la convection naturelle, pour les températures qui nous intéressent, le coefficient d'échange thermique équivalent ne dépasse généralement pas $15 \text{ W/m}^2\text{K}$. Pour avoir une idée de l'efficacité de ce type d'échange thermique, prenons l'exemple d'une dissipation de 1 W sur une surface de 100 cm^2 , qui est de l'ordre de grandeur d'un petit module de puissance. Dans ce cas, l'élévation de température est d'au moins $66 \text{ }^\circ\text{C}$.

Afin de répondre à une demande d'augmentation de la puissance dissipée, il est nécessaire d'augmenter la surface d'échange entre le dispositif et l'environnement ambiant. La solution la plus couramment utilisée est le radiateur à ailettes (voir figure II-12(a)), mais il existe également d'autres types de dissipateurs thermiques à air, tels que les dissipateurs en nid d'abeille (voir figure II-12(b)), qui ont un coefficient d'échange thermique équivalent

d'environ $300 \text{ W/m}^2\text{K}$. Cela correspond à une réduction d'un facteur 20 de l'élévation de température.

Pour la convection forcée utilisant des ventilateurs et en utilisant des dissipateurs thermiques à ailettes de grande taille, le coefficient d'échange thermique équivalent peut atteindre jusqu'à $2000 \text{ W/m}^2\text{K}$, selon la société Aavid, spécialisée dans le refroidissement des composants électroniques [5].

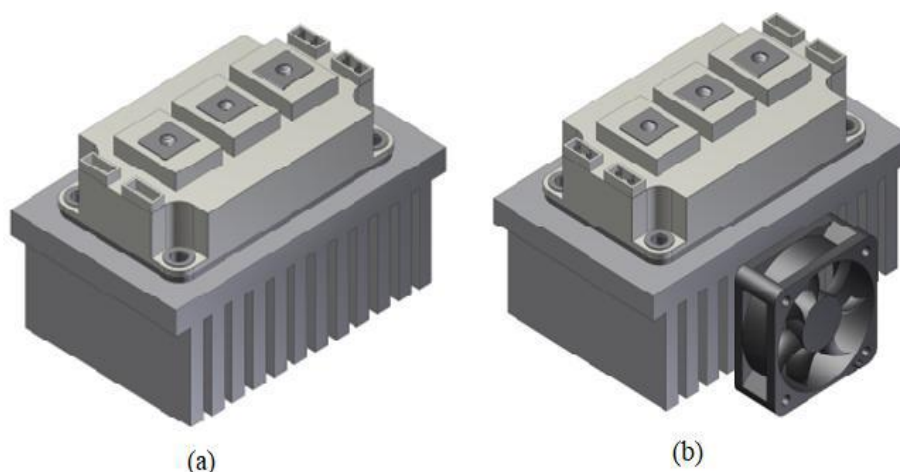


Figure II-12 : Le refroidissement par l'air. (a) convection naturelle et (b) convection Forcée [26].

II.4.5.2 Système de refroidissement liquide

Pour le refroidissement des flux de chaleur qui dépassent les capacités du refroidissement par air, des liquides peuvent être utilisés à la place. Les propriétés matérielles des liquides les rendent souvent mieux adaptés à une utilisation comme liquide de refroidissement. Le coefficient de transfert de chaleur pouvant être atteint avec la convection forcée est au maximum d'environ $100 \text{ W/m}^2\text{K}$. Cependant, pour la convection forcée d'eau, les coefficients de transfert de chaleur peuvent aller jusqu'à environ $10\,000 \text{ W/m}^2\text{K}$ (sans bouillir). Les systèmes de refroidissement liquide nécessitent un système en boucle fermée pour contenir le liquide de refroidissement, voir figure II-13. Le refroidissement liquide est donc plus compliqué que le refroidissement par air pour lequel une boucle ouverte suffit. Les principaux éléments de la boucle de refroidissement sont le dissipateur de chaleur, l'échangeur de chaleur secondaire, la pompe et les tubes. L'échangeur de chaleur liquide-air secondaire est nécessaire pour évacuer la chaleur vers l'environnement. Tout comme pour les dissipateurs thermiques refroidis par air, un ventilateur est fixé pour fournir un débit d'air suffisant à travers l'échangeur de chaleur. Des composants supplémentaires tels que des vannes, des filtres et des réservoirs peuvent être nécessaires. Une étanchéité fiable de toute la boucle de liquide de refroidissement est indispensable [26].

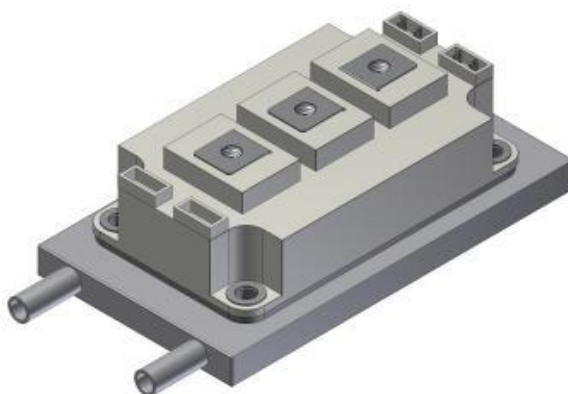


Figure II-13 : Le refroidissement par liquide

II.4.5.3 Système de refroidissement par caloduc

Le caloduc est un système de refroidissement diphasique passif fermé, souvent présenté sous la forme d'un tube de cuivre. La chaleur est prélevée en un point, appelé évaporateur et est transportée vers le condenseur. Ce transport se fait sans pompe, ou autre moyen de transport de fluide, mais par changement de phase d'un fluide caloporteur qui s'évapore au niveau de l'entrée de chaleur et se condense sous forme liquide à l'autre bout. Grâce au réseau capillaire, le fluide retourne vers l'évaporateur. La troisième zone du caloduc est appelée zone adiabatique et permet au fluide devenu gaz de se déplacer et de transporter la chaleur jusqu'au condenseur, comme on peut le voir figure (II-14) [24].

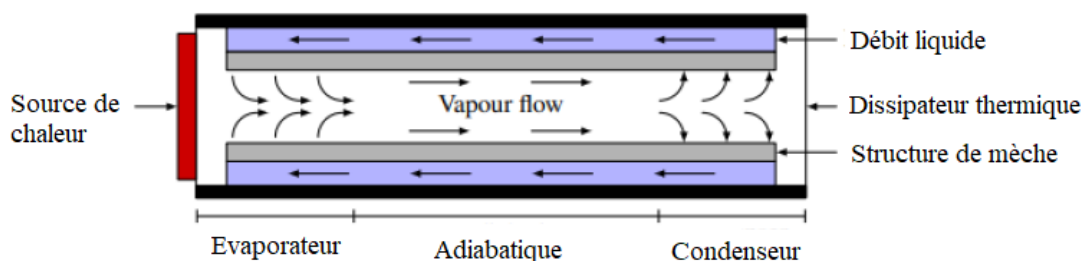


Figure II-14 : Le refroidissement par un caloduc [24].

II.4.5.4 Le refroidissement par micro-canaux

Le refroidissement par micro-canaux a aujourd'hui prouvé qu'il constitue un moyen très intéressant pour la gestion thermique de l'électronique de puissance. En effet, des densités de flux de chaleur de plusieurs centaines de W/cm^2 peuvent être évacuées grâce à cette technique. Les micro-canaux peuvent être de forme plus ou moins élaborée suivant l'effet recherché et la technologie de fabrication utilisée. La forme la plus simple est constituée par des canaux rectangulaires axiaux en parallèle. La figure II-15 présente le principe de cette technique. Dans ce cas, les canaux sont de forme rectangulaire. La puissance est imposée sur la surface et l'écoulement du fluide se fait dans les canaux entre les ailettes. Les ailettes ont pour rôle d'augmenter la surface d'échange avec le fluide. En pratique, on peut dire que, lorsque le débit est faible dans les canaux, l'écoulement est en régime laminaire, le coefficient

de transfert thermique est inversement proportionnel au diamètre hydraulique. Cela signifie donc que, plus le canal est petit, plus le coefficient de transfert thermique est grand [26].

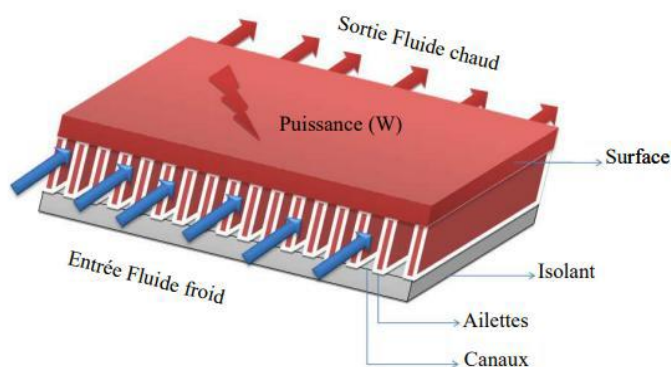


Figure II-15 : Le refroidissement par micro-canaux [23].

II.4.5.5 Refroidissement des matériaux poreux

De même manière que les micro-canaux, les matériaux poreux tels que les mousses métalliques présentent l'avantage d'une surface spécifique considérablement augmentée, par rapport aux autres solutions de refroidissement. Cela en fait un choix idéal lorsque des taux élevés de dissipation thermique sont requis et que seul un espace limité est disponible. De plus, le transfert de chaleur est amélioré en raison de la structure tortueuse des matériaux poreux qui génère des turbulences d'écoulement et améliore les transferts de chaleur par convection dans le liquide de refroidissement. Il y a aussi des avantages de fabrication. Par exemple, les mousses métalliques peuvent être fabriquées en grande quantité, en tronçons de dimensions de l'ordre de 1m, et peuvent être ensuite simplement découpées à la taille souhaitée. Il est également relativement simple de fabriquer des mousses avec des caractéristiques géométriques jusqu'à l'ordre de $10\ \mu\text{m}$, ce qui est considérablement plus difficile et plus coûteux à faire avec des micro-canaux. Cependant, tout comme les autres options de taux de transfert de chaleur élevé, l'inconvénient est la perte de pression plus élevée à travers le matériau poreux [20].

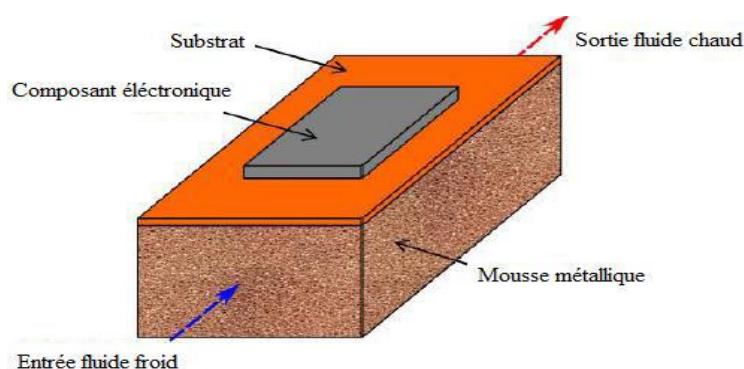


Figure II-16 : Le refroidissement par matériaux poreux [20].

Chapitre III:

Modélisation Mathématique d'un système de refroidissement à base de caloducs et Thermiques des Composants Electronique (le MOSFET)

Introduction

La modélisation de ce système de refroidissement combiné devra prendre en compte les caractéristiques spécifiques du caloduc, y compris la circulation du fluide et la condensation/évaporation dans le caloduc, ainsi que les mécanismes de convection et de conduction thermique dans les ailettes du dissipateur. Des équations appropriées devront être utilisées pour représenter ces mécanismes et obtenir une description précise du comportement thermique du système.

Ces hypothèses permettent de simplifier le problème physique complexe du caloduc et de formuler les équations mathématiques appropriées en utilisant les lois physiques fondamentales telles que les équations de conservation de la masse, de l'énergie et de la quantité de mouvement. Il est important de noter que ces hypothèses peuvent introduire des limitations dans la modélisation du système réel, et il convient de les prendre en compte lors de l'interprétation des résultats obtenus à partir du modèle mathématique.

III.1. Configuration choisie

Nous avons opté parmi toutes les technologies présentées dans la section 1.2 du chapitre 2 pour un système de refroidissement qui associe un dissipateur à ailettes droites en convection forcée et un caloduc. La configuration spécifique choisie est illustrée dans la Figure III.1. Dans cette configuration, le caloduc est généralement pressé et inséré de manière forcée dans la semelle du dissipateur, ou intégré à l'intérieur de la semelle. Un contact optimal est établi pour minimiser la résistance de contact entre les différentes parties du dissipateur.



Figure III-1: Dissipateur à ailettes droites en convection forcée associé à ventilateur.

Dans cette configuration, le dissipateur à ailettes est composé d'une semelle en métal solide dans laquelle un ou plusieurs caloducs en forme de U ou de L sont insérés. Des ailettes droites en métal sont positionnées le long du ou des caloducs de manière à ce que celui-ci (ou ceux-ci) traverse(nt) toute la pile formée par les ailettes. Un ventilateur est disposé parallèlement au caloduc, et l'air produit circule entre les différentes ailettes. La disposition du ventilateur par rapport aux ailettes permet que l'ensemble des canaux inter-ailettes ne soit pas obstrué. Une ou plusieurs sources de chaleur peuvent être placées sur la surface de la semelle

du dissipateur.

III.2 Description qualitative de la propagation de la chaleur

La modélisation de ce système de refroidissement devra prendre en compte les mécanismes de changement de phase dans le caloduc, la conduction de la chaleur dans les ailettes, ainsi que la convection et le rayonnement thermique associés à la dissipation de chaleur dans l'air ambiant. Des équations spécifiques à chaque mécanisme devront être utilisées pour représenter ces processus et obtenir une description complète du comportement thermique du système.

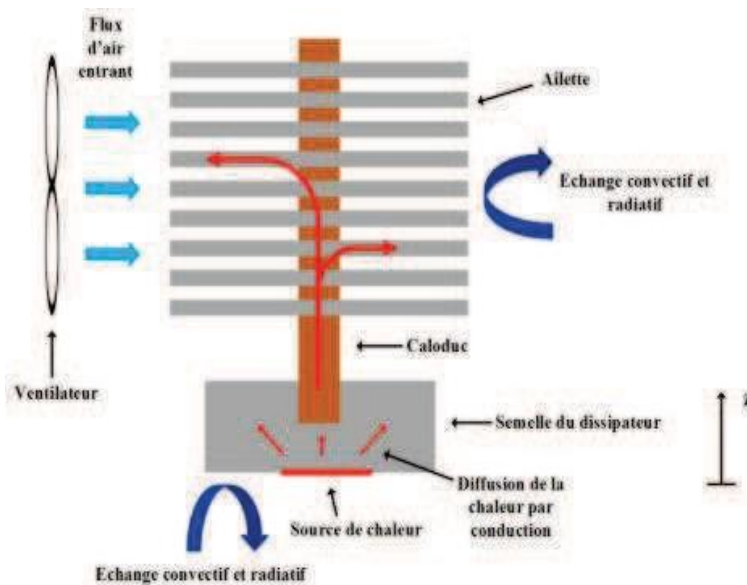


Figure III-2 : Schéma en coupe du système de refroidissement modélisé.

Dans le système de refroidissement décrit, le flux d'air généré par le ventilateur s'écoule entre deux plaques ouvertes au lieu de circuler dans un canal fermé. Cette configuration ne modifie pas le fait qu'une zone d'établissement se forme initialement, où le régime d'écoulement se stabilise et l'échange thermique devient uniforme le long de l'ailette.

III.3 Modèle analytique pour de la modèle thermo-hydraulique du caloduc/MOSFET

Le modèle analytique pour le système caloduc HP/MOSFET est basé sur les principes de transfert de chaleur et de transfert de masse dans le caloduc, ainsi que sur les caractéristiques thermiques du MOSFET. Il comprend deux parties principales : la modélisation du caloduc et la modélisation thermique du MOSFET.

III.3.1 Modélisation du caloduc

La méthode nodale est une approche couramment utilisée en modélisation thermique et hydraulique des systèmes diphasiques tels que les systèmes de distribution d'eau. Elle consiste à diviser le système en différents nœuds, représentant les différents composants ou sections du système.

Dans le cas spécifique de la boucle diphasique, les nœuds sont placés aux emplacements stratégiques de la boucle, correspondant aux composants principaux tels que l'évaporateur, le condenseur. Chaque nœud est caractérisé par des équations qui décrivent les transferts de chaleur, de masse et de quantité de mouvement qui se produisent à cet endroit.

En reliant ces nœuds les uns aux autres à l'aide de relations appropriées, il est possible de modéliser le comportement global de la boucle diphasique et d'analyser son fonctionnement. Les équations qui décrivent les transferts entre les nœuds sont basées sur les principes fondamentaux de la thermodynamique, de la mécanique des fluides et de la transfert de chaleur.

Cette approche de modélisation nodale permet de simuler et d'optimiser le fonctionnement de la boucle diphasique, en prenant en compte les interactions entre les différents composants. Elle permet également d'évaluer l'impact de différentes conditions de fonctionnement, de géométries ou de paramètres sur les performances du système.

III.3.2 Hypothèses

Les hypothèses énoncées dans le modèle en régime permanent basé sur les bilans de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie, ainsi que les relations thermodynamiques, sont les suivantes :

- 1- La température du fluide dans le réservoir est considérée comme constante : Cela signifie que la température du fluide à l'intérieur du réservoir ne varie pas, et donc les effets de la variation de température dans le réservoir sont négligés.
- 2- Une partie du flux à évacuer est transférée par la paroi de l'évaporateur par conduction longitudinale et une autre partie vers l'interface liquide-vapeur par conduction transversale : Cette hypothèse suppose que le transfert de chaleur de l'évaporateur se produit à la fois par conduction longitudinale à travers la paroi de l'évaporateur et par conduction transversale à travers l'interface liquide-vapeur.
- 3- Les différents écoulements sont considérés comme incompressibles : Cette hypothèse suppose que les variations de densité dues à la compression ou à l'expansion des fluides dans la boucle diphasique sont négligeables. Ainsi, la densité du fluide est considérée comme constante dans les calculs.
- 4- Les variations des propriétés thermo physiques en fonction de la température sont considérées : Cette hypothèse suppose que les propriétés thermiques et physiques du fluide, telles que la conductivité thermique, la viscosité, la capacité thermique, etc., varient en fonction de la température. Par conséquent, ces variations sont prises en compte dans les équations du modèle.
- 5- Au niveau du condenseur, la longueur de désurchauffe est négligée et la condensation est supposée isobare : La longueur de désurchauffe, qui correspond à la région où la vapeur se refroidit à une température inférieure à celle de la saturation, est négligée. De plus, la condensation du fluide est supposée se produire à pression constante (isobare).

III.3.1.1 Bilan d'énergie sur l'évaporateur

Le bilan d'énergie sur l'évaporateur est une équation fondamentale utilisée pour modéliser le transfert de chaleur dans cette partie du caloduc. Il permet de décrire l'équilibre entre les flux de chaleur entrant et sortant de l'évaporateur. Voici le bilan d'énergie sur l'évaporateur :

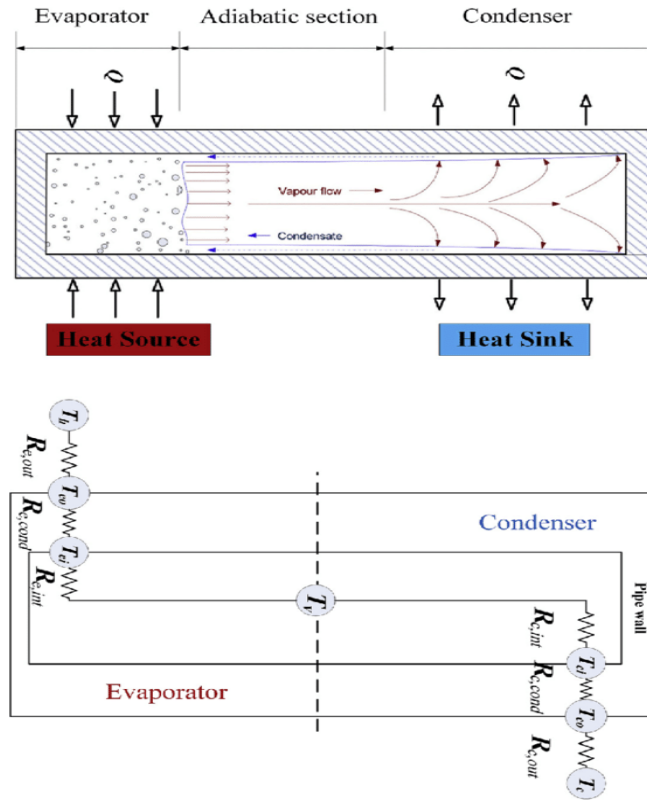


Figure. III-3 : schéma de caloduc et analogie électrique

Le bilan d'énergie sur l'évaporateur permet de calculer la puissance de chauffe requise pour maintenir le transfert de chaleur adéquat dans l'évaporateur, en fonction des propriétés du fluide, du débit massique et des conditions opérationnelles.

a- Bilan massique

Les composants électroniques (le MOSFET) embarqués génèrent une quantité de chaleur qu'il faut pouvoir évacuer pour éviter leur dégradation. C'est le calcul de ce flux ou encore du débit massique associé qui permet de dimensionner le système de refroidissement, soit :

$$\dot{m} = \frac{Q_E - Q_f}{\Delta h_v} \quad (\text{III.1})$$

La chaleur dissipée dans l'évaporateur va soit être transférée vers l'interface liquide-vapeur, soit être transmise à la mèche après avoir traversé longitudinalement la paroi de l'évaporateur. Le flux dissipé par le composant électronique s'exprime alors de la manière suivante :

$$Q_e = \underbrace{\frac{T_{Em}-T_v}{R_{vap}}}_{\text{Flux arrivant à l'interface L/V}} + \underbrace{\frac{T_{Em}-T_W}{R_{ax}}}_{\text{Flux de fuite longitudinal à travers la paroi}} \quad (III.2)$$

Le flux de chaleur arrivant à l'interface se partage en trois flux distincts (Figure III.3) : une partie correspond au changement de phase du fluide caloporteur, une autre correspond au chauffage par chaleur sensible du liquide s'écoulant à travers la structure poreuse, et le dernier représente le flux de fuite transféré par conduction transversale vers la mèche. Le premier terme de l'équation (2) se décompose alors de la manière suivante :

$$\frac{T_{Em}-T_v}{R_{vap}} = \underbrace{\dot{m}\Delta h_v}_{\text{Partie du flux permettant l'évaporation du liquide}} + \underbrace{\dot{m}C_p(T_v - T_W)}_{\text{Partie du flux permettant le chauffage du liquide jusqu'à saturation}} + \underbrace{\frac{T_v-T_W}{R_{cap}}}_{\text{Partie du flux transféré vers la mèche à travers la structure poreuse}} \quad (III.3)$$

b- Démonstration

Le modèle de l'évaporateur est adapté d'une analyse d'Hamdan, décrite dans ce qui suit. Dans la mèche, la chaleur est transférée par évaporation à l'interface liquide-vapeur et par conduction dans le sens opposé au débit :

$$\frac{T_E-T_v}{R_{vap}} = Q_{latent} + Q_{sensible} + Q_{fuite} \quad (III.4)$$

Dans l'approche d'Hamdan, le courant de fuite est le flux conductif de chaleur quittant la surface de la mèche au contact avec la structure poreuse ($x = 0$) :

$$\lambda_{eff} A \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = Q_{fuite} \quad (III.5)$$

Dans une autre approche nous pourrions considérer le courant de fuite comme étant le flux de chaleur transféré par conduction-convection à la surface de la mèche en contact avec la paroi de l'évaporateur ($x = e_w$). En supposant que l'équilibre thermique local est assuré dans chaque portion de la mèche, le bilan énergétique local est :

$$\dot{m}c_p T_x + \lambda_{eff} A \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_x = \dot{m}c_p T_{x+dx} + \lambda_{eff} A \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x+dx} \quad (III.6)$$

De là :

(III.7)

La solution de cette équation est :

$$T = C_1 + C_2 \exp\left(\frac{\dot{m}c_p}{\lambda_{eff} A} x\right) = 0 \quad (III.8)$$

Les conditions aux limites sont exprimées par un flux de chaleur connu du côté de la paroi de l'évaporateur ($x = e_w$) et une température connue du côté du structure poreuse ($x = 0$) :

$$\lambda_{eff} A \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=e_w} = \frac{T_E-T_v}{R_E} - \dot{m}\Delta h_v = Q_{fuite} \quad (III.9)$$

Avec $T_{x=0} = T_w$

Les conditions aux limites permettent la détermination des constantes :

$$C_1 = T_W - C_2$$

$$C_2 = \frac{1}{\dot{m}c_p} \exp\left(-\frac{\dot{m}c_p}{\lambda_{eff}A}\right) \left(\frac{T_E - T_V}{R_E} - \dot{m}\Delta h_v\right) \quad (III.10)$$

Le bilan énergétique de la mèche permet de dire que $T_{x=e_w} = T_V$

$$T_V = C_1 + C_2 \exp\left(\frac{\dot{m}c_p}{\lambda_{eff}A} e_w\right) \Rightarrow \frac{T_V - T_W}{1 - \exp\left(-\frac{\dot{m}c_p}{\lambda_{eff}A} e_w\right)} = \frac{T_E - T_V}{R_E} - \dot{m}\Delta h_v \quad (III.11)$$

$$\text{Ainsi } \frac{T_E - T_V}{R_{vap}} = \dot{m}\Delta h_v + \frac{T_V - T_W}{R_W}, \quad \text{avec } R_W = \frac{1 - \exp\left(-\frac{\dot{m}c_p}{\lambda_{eff}A} e_w\right)}{\dot{m}c_p}$$

Dans l'approche d'Hamdan, dire que le flux de fuite correspond au flux de chaleur dissipée en $x = 0$, conduit à :

$$Q_{fuite} = \dot{m}c_p C_2 = \exp\left(-\frac{\dot{m}c_p}{\lambda_{eff}A} e_w\right) \left(\frac{T_E - T_V}{R_{vap}} - \dot{m}\Delta h_v\right) \quad (III.12)$$

En combinant cette expression avec l'équation (a), obtient :

$$Q_{fuite} = \frac{T_V - T_W}{\frac{\exp\left(-\frac{\dot{m}c_p}{\lambda_{eff}A} e_w\right) - 1}{\dot{m}c_p}} \quad (III.13)$$

Et de là :

$$\frac{T_E - T_V}{R_{vap}} = \dot{m}\Delta h_v + \dot{m}c_p (T_V - T_W) + \frac{T_V - T_W}{\frac{\exp\left(-\frac{\dot{m}c_p}{\lambda_{eff}A} e_w\right) - 1}{\dot{m}c_p}} \quad (III.14)$$

Soit :

$$R_{cap} = \frac{\exp\left(\frac{\dot{m}c_p}{\lambda_{eff}A} e_w\right) - 1}{\dot{m}c_p} \quad (III.15)$$

Le flux de chaleur reçu par la paroi de l'évaporateur est représenté par Q_e en watts. Les températures de la paroi à l'évaporateur et au condenseur sont supposées identiques. De plus, dans cette première approximation, on peut considérer que la conductance thermique entre la paroi et l'évaporateur est infinie. Le modèle analytique global approximatif qui sera présenté concerne donc ce système spécifique, tel qu'illustré dans la figure III.4

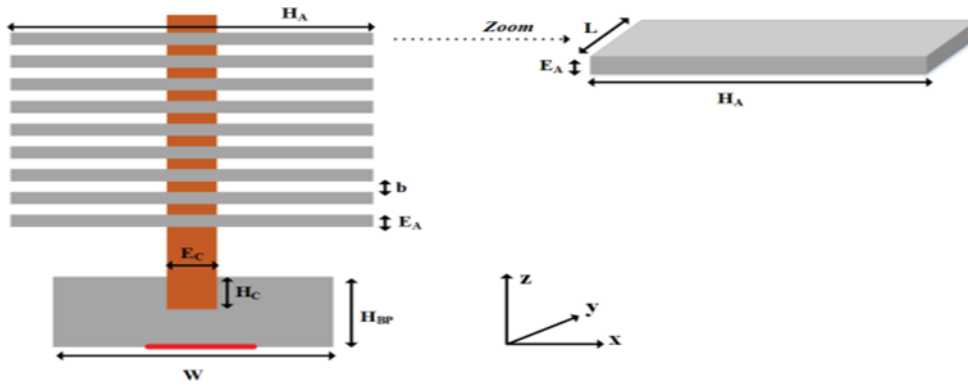


Figure III-4: Représentation de la vue en coupe du dissipateur à ailettes associé à des caloducs

III.3.1.2 Bilan énergétique au niveau du condenseur

Le condenseur permet l'évacuation du flux vers la source froide. Il comporte généralement trois zones correspondant à des états différents du fluide caloporteur. Dans la zone de désurchauffe, la vapeur perd de la chaleur sensible jusqu'à atteindre l'état de saturation. Ensuite, dans la zone diphasique, le fluide se condense progressivement. La longueur totale de condensation est appelée « longueur diphasique ». Dans la zone de sous-refroidissement les transferts thermiques ont lieu par chaleur sensible.

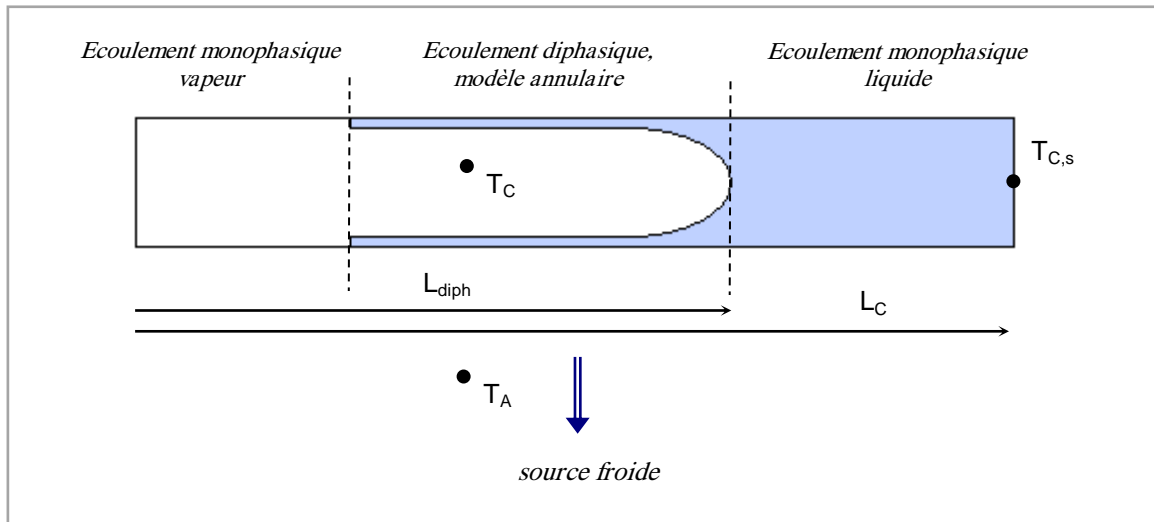


Figure III-51 : schéma du condenseur

Afin de faciliter l'étude, on se propose de décomposer le condenseur en deux parties :

Echange dans la zone diphasique :

$$Q_C = \dot{m} \Delta h_w = K_{glob-cond} \pi D_C L_{diph} (T_C - T_{SF}) \quad (III.16)$$

$$\text{avec : } K_{glob-cond} = \frac{1}{\frac{1}{h_{cond}} + \frac{1}{h_{SF}}}$$

Dans notre modèle de condenseur, nous avons utilisé la différence de température (TC-TSF) au lieu de la différence de température logarithmique. Toutefois, l'erreur due à cette approximation est très faible. Le transfert thermique conductif à travers la paroi du condenseur est également négligé, car la résistance thermique correspondante est faible par rapport à la résistance thermique due aux échanges avec la source froide. Le calcul du coefficient d'échange par condensation h_{cond} dépend du nombre de Reynolds, qui détermine le type d'écoulement diphasique. Les deux principaux types d'écoulement sont :

l'écoulement stratifié, où le liquide est situé dans la partie inférieure du tube et la vapeur dans la partie supérieure. Il a lieu soit pour des écoulements de faible débit, soit lorsque le tube est de grand diamètre.

l'écoulement annulaire, où le liquide est situé sur la périphérie du tube et la vapeur dans la partie centrale. Il a lieu soit pour des écoulements de fort débit, soit lorsque le tube est de faible diamètre.

Le calcul du coefficient d'échange thermique h_{SF} dépend du type d'échangeur, de la nature du fluide de refroidissement et de sa vitesse. Il fait appel à des corrélations spécifiques. Dans le cas d'un refroidissement par convection d'air, naturelle ou forcée, les échangeurs sont souvent munis d'ailettes.

Détermination des coefficients d'échange au niveau du condenseur :

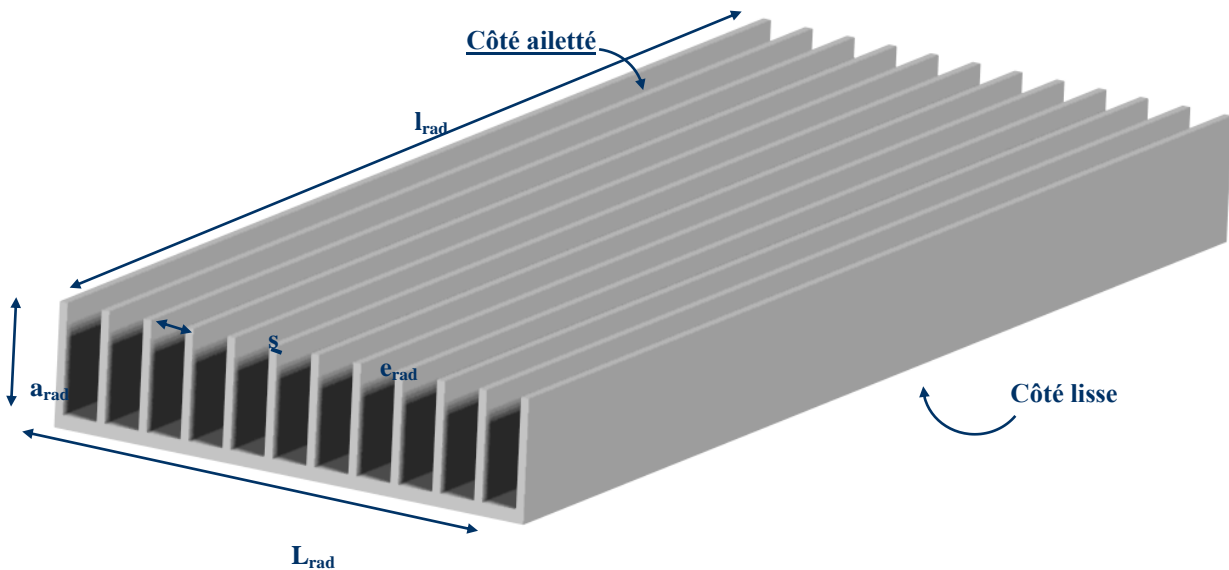


Figure III-6 : condenseur, dimensions du radiateur

Détermination des coefficients d'échange thermique de convection naturelle et rayonnement au niveau du condenseur en zone diphasique pour différentes inclinaisons :

- Le coefficient d'échange h_{condr} côté ailetté avec l'air ambiant
- Le coefficient d'échange h_{condl} côté lisse avec l'air ambiant

- Le coefficient d'échange hcondensation par condensation

$$Gr_c = \frac{g \cdot \beta_A \cdot |T_p - T_A| \cdot b_{rad}^3}{\nu_A^2} \quad (III.17)$$

$$Nu_{ref} = 0,112 \cdot \left(Gr_c \cdot Pr_l \cdot \frac{s}{l_{rad}} \right)^{0,534} \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{129}{Gr_b \cdot Pr_l \cdot s \cdot l_{rad}} \right) \right)^{0,284} \quad (III.18)$$

$$h_{ref} = Nu_{ref} \cdot \frac{\lambda_A}{s} \quad (III.19)$$

$$\varepsilon = \frac{1}{1 + \frac{2}{3} \cdot h_{ref} \cdot a_{rad}^2 \cdot \frac{1}{\lambda_{rad} \cdot e_{rad}}} \quad (III.20)$$

En position verticale :

$$h_{cond,v} = h_{ref} \cdot \left(\frac{Sp_{rad}}{St_{rad}} + \varepsilon \cdot \left(1 - \frac{Sp_{rad}}{St_{rad}} \right) \right) \quad (III.21)$$

En position horizontale :

$$h_{cond,H} = \frac{\lambda_A}{s} \cdot 6,7 \cdot 10^{-4} \cdot Gr_c \cdot Pr_l \cdot \left(1 - \exp\left(-\left(\frac{0,746 \cdot 10^4}{Gr_c \cdot Pr_l} \right)^{0,44} \right) \right)^{1,7} \quad (III.22)$$

En position intermédiaire :

$$h_{cond,r} = \frac{h_{cond,H} \cdot (0,647 - |H|) + h_{cond,v} \cdot |H|}{0,647} \quad (III.23)$$

Echange côté lisse du condenseur (avec rayonnement) :

$$h_{cond,l} = \frac{\lambda_{amb}}{l_{rad}} \cdot 0,68 \cdot \left(\frac{Pr_l^2}{Pr_l + \frac{20}{21}} \cdot Gr_c \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} \cdot \left(1 + \frac{H}{0,647} \right) \right) \right)^{0,25} + \underbrace{\varepsilon_{rad} \cdot \sigma_{st} \cdot (T_p^2 + T_{amb}^2) \cdot (T_p + T_{amb})}_{\text{Terme radiatif}} \quad (III.24)$$

Le coefficient total d'échange entre le condenseur et l'air ambiant et le coefficient d'échange par condensation se calculent alors de la manière suivante :

$$h_{SF} = \frac{h_{cond,r} \cdot St_{rad} + h_{cond,l} \cdot (l_{rad} \cdot L_{rad})}{\pi \cdot D_c \cdot d_{c_{totale}}} \quad (III.25)$$

$$h_{condensation} = \frac{\lambda_l}{D_c} \cdot 0,555 \cdot \left(\frac{\rho_l \cdot g \cdot (\rho_l - \rho_v) D_c^3 \cdot l_v}{\lambda_l \cdot \mu_l \cdot |T_c - T_p|} \right)^{0,25} \quad (III.26)$$

Echange dans la zone sous-refroidie : dans la zone sous-refroidie, la température de sortie condenseur est calculée grâce au coefficient de transfert convectif hl ainsi que la température de la source froide :

$$\frac{T_{C,s} - T_{SF}}{T_C - T_{SF}} = \exp\left(-\frac{\pi D_C (L_C - L_{diph})}{\dot{m} C_{p,l}} K_{global-rad} \right) \quad (III.27)$$

$$\text{avec : } K_{glob-rad} = \frac{1}{\frac{1}{h_l} + \frac{1}{h_{SF}}}$$

Le coefficient de transfert convectif h_l entre le liquide et la paroi du tube est identique à celui qui sera calculé pour la ligne de liquide. Son calcul sera donc détaillé dans le paragraphe suivant.

III.4 Modélisation thermique du MOSFET :

La modélisation thermique du MOSFET consiste à décrire le transfert de chaleur à travers les différentes couches du composant, y compris la jonction semi-conductrice, le substrat et le boîtier. Les équations de conduction thermique sont utilisées pour chaque couche, prenant en compte les propriétés thermiques spécifiques de chaque matériau.

Le modèle prend en compte les termes de génération de chaleur à l'intérieur du MOSFET, principalement dus à la résistance interne lors du passage du courant électrique. Les conditions aux limites, telles que les températures ambiantes et les coefficients d'échange thermique avec l'environnement, sont également prises en compte dans le modèle.

En résolvant les équations de transfert de chaleur dans le caloduc et dans le MOSFET, le modèle analytique permet de prédire les profils de température du MOSFET en fonction des conditions de fonctionnement, des propriétés thermiques du caloduc et des caractéristiques thermiques du MOSFET lui-même.

▪ Circuit RC unique

Le MOSFET que nous considérons est le modèle 50JR22 fabriqué par Infineon Technologies. Les principales caractéristiques électriques et thermiques de ce composant sont fournies dans sa fiche technique [9]. Pour développer un modèle thermique simplifié de ce composant, nous pouvons utiliser l'analogie thermique-électrique présentée dans [10]. La Figure 4 illustre le modèle thermique simplifié du MOSFET.

La résistance thermique, notée R_{thJC} , est extraite de la fiche technique et a une valeur de 0,6 K/W. La capacité thermique, notée C_{thJC} , est calculée à partir de l'expression d'impédance présentée dans [10]. Par conséquent, la valeur de C_{thJC} est égale à 0,01 J/K.

En utilisant ce modèle thermique simplifié, nous serons en mesure de caractériser le comportement thermique du MOSFET 50JR22 et de prédire sa réponse à différentes conditions de fonctionnement. Ces informations seront essentielles pour évaluer l'efficacité du système de refroidissement à base de caloducs mentionné précédemment.

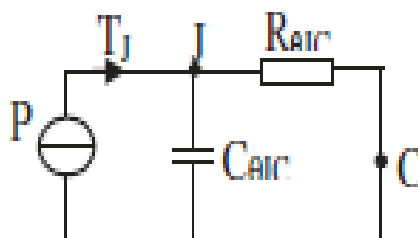


Figure III-7: Modèle thermique simplifié du MOSFET.

Chapitre IV:
RESULTATS ET
DISCUSSIONS

Introduction

L'utilisation de caloducs pour améliorer l'efficacité des MOSFET est une approche prometteuse dans le domaine de la gestion thermique des appareils électroniques. Les caloducs sont des dispositifs de transfert de chaleur passifs qui dissipent efficacement la chaleur générée par les MOSFET. En transférant la chaleur vers un dissipateur thermique, les caloducs maintiennent la température du MOSFET plus basse, améliorant ainsi ses performances et sa durée de vie. Cette technique offre une dissipation thermique améliorée, des contraintes thermiques réduites, des performances accrues et une plus grande compacité pour les MOSFET haute puissance et haute densité.

IV.1 Mise en place du banc de test

IV.1.1 Banc de test

La configuration du test de validation expérimentale est illustrée à la Figure IV.1. Elle consiste en un dissipateur thermique entièrement en aluminium avec des ailettes extrudées droites. Deux composants de puissance (MOSFET 50JR22) seront montés sur sa surface. Ils seront contrôlés en permanence par un tableau de commande pour assurer uniquement les pertes de conduction, ce qui les rend équivalents à une source de chaleur facilement réglable et mesurable avec précision. La mesure des pertes générées par un composant en conduction est simple en mesurant le courant traversant le composant et la tension à ses bornes. De plus, il est facile de régler la puissance souhaitée à dissiper. La configuration comprendra également un ventilateur (Sanyo 9GV3612G301). Le ventilateur choisi a une section carrée de 36 mm de côté et fonctionne en 12V DC. Ses caractéristiques de débit et de résistance (Q, R) sont présentées dans la figure IV-1.

IV.1.2 Étude paramétrique

- **Calibration des thermocouples.**

La procédure que vous avez décrite semble être une méthode courante pour la calibration des thermocouples. Voici un résumé de la procédure :

1. Préparez un bécher de 500 ml rempli d'eau distillée.
2. Utilisez une sonde de référence calibrée en usine pour mesurer la température de l'eau dans le bécher. Assurez-vous que les thermocouples ne sont pas encore installés.
3. Laissez les thermocouples reposer dans l'eau distillée pendant quelques secondes afin qu'ils atteignent la température de l'eau.
4. Mesurez la température de l'eau à l'aide des thermocouples pendant une période d'environ dix secondes pour obtenir une moyenne précise.
5. Chauffez le bécher à l'aide d'une plaque chauffante jusqu'à la température désirée pour la calibration. Assurez-vous que les thermocouples sont bien immergés dans l'eau.
6. Une fois que la température cible est atteinte, éteignez la plaque chauffante et ajoutez de l'eau distillée pour faire varier la température de l'eau dans le bécher. Cela vous permettra de vérifier la linéarité et la précision des thermocouples sur une plage de températures.

7. Répétez ces étapes pour différentes températures si nécessaire, en prenant soin de laisser suffisamment de temps aux thermocouples pour atteindre l'équilibre thermique à chaque fois.

Il est important de noter que pour obtenir des résultats de calibration précis, il est recommandé d'utiliser une sonde de référence calibrée en usine fiable et de suivre les bonnes pratiques de manipulation des thermocouples.

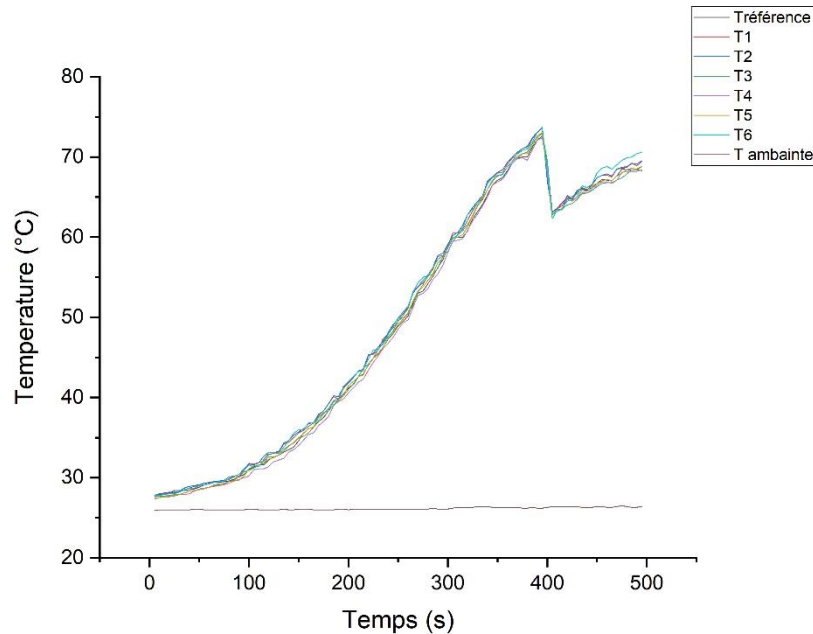


Figure IV-1: Une courbe graphique représentant les changements de température en fonction du temps.

IV.2 Présentation des résultats expérimentaux :

Dans ce chapitre, nous expliquerons l'expérience, en nous concentrant sur ses objectifs, sa méthodologie et les composants impliqués.

La présentation des résultats se divise comme suit :

- Analyse du changement de température en fonction de tension;
- Analyse de l'évolution de la puissance en fonction de tension;
- Analyse de l'évolution de la température en fonction de puissance;
- Analyse du changement de résistance en fonction de puissance;
- Analyse de l'évolution du courant en fonction de tension.

Dans cette section, nous présentons les résultats obtenus à partir de notre étude expérimentale sur le refroidissement d'un MOSFET de puissance par caloducs.

On se base dans un premier temps sur les valeurs expérimentales de la température du MOSFET pour déterminer la température de la vapeur au niveau de l'interface liquide-vapeur de l'évaporateur par la relation de Clausius-Clapeyron, comme démontré précédemment.

$$T_v = T_w \frac{\left(1 + \frac{(v_v - v_l) \Delta P_t}{2L_v}\right)}{\left(1 - \frac{(v_v - v_l) \Delta P_t}{2L_v}\right)} \quad (\text{IV.1})$$

Dans cette équation, la température du MOSFET est fournie par les résultats expérimentaux. $T_e = T_{moset}$. Les résultats ci-dessus sont ensuite utilisés pour évaluer la résistance thermique entre la paroi de l'évaporateur et l'interface liquide-vapeur :

$$R_{vap} = \frac{T_v - T_e}{\frac{T_e}{R_{ax}} - Q_e - \frac{T_w}{R_{ax}}} \quad (\text{IV.2})$$

En substituant la différence de température et la puissance thermique dans l'équation, on peut déterminer la résistance thermique entre la paroi de l'évaporateur et l'interface liquide-vapeur. Cette valeur de résistance fournit des informations sur l'efficacité du transfert de chaleur et peut être utilisée pour évaluer les performances thermiques du système. Il est important de noter que les détails spécifiques du système, tels que la géométrie, les matériaux et les conditions de fonctionnement, influencent la résistance thermique. Par conséquent, cette équation doit être appliquée dans le contexte du système de caloduc spécifique étudié. De plus, une validation expérimentale est essentielle pour confirmer l'exactitude de la résistance thermique calculée et s'assurer qu'elle correspond au comportement observé du système.

Dans la présente étude, la résistance thermique du système de caloduc en boucle (Heat Pipe) est évaluée en tenant compte de la résistance de l'évaporateur (R_e), de la résistance du condenseur (R_c) et de la résistance thermique globale du HP (RHP). Les équations de calcul de ces résistances sont les suivantes :

1. Résistance de l'évaporateur (R_e) : La résistance de l'évaporateur représente la résistance au transfert de chaleur dans la section évaporateur du HP. Elle peut être calculée à l'aide de l'équation suivante :

$$R_e = \frac{T_e - T_w}{Q_e} \quad (\text{IV.3})$$

où T_e est la température à la sortie de l'évaporateur, T_w est la température de la paroi de l'évaporateur et Q_e est la puissance thermique transférée dans la section évaporateur.

2. Résistance du condenseur (R_c) : La résistance du condenseur représente la résistance au transfert de chaleur dans la section condenseur du HP. Elle peut être calculée à l'aide de l'équation suivante :

$$R_c = \frac{T_w - T_c}{Q_c} \quad (\text{IV.4})$$

où T_w est la température de la paroi de l'évaporateur, T_c est la température à l'entrée du condenseur et Q_c est la puissance thermique transférée dans la section condenseur.

3. Résistance thermique du HP (RHP) : La résistance thermique globale du système HP, RHP, peut être calculée en additionnant les résistances de l'évaporateur et du condenseur :

$$R_{HP} = R_e + R_c \quad (IV.5)$$

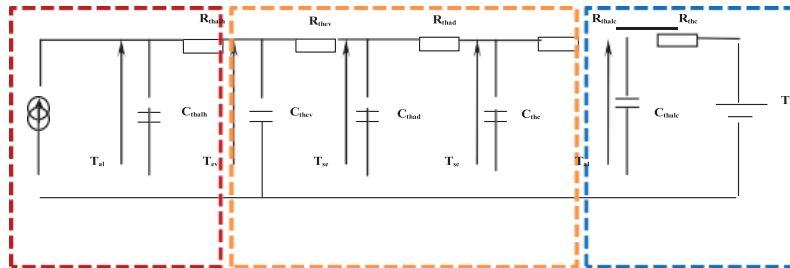
Cette résistance thermique représente la résistance combinée au transfert de chaleur dans les sections évaporateur et condenseur du HP. En évaluant ces résistances thermiques, il est possible d'évaluer les performances du système HP et d'identifier les domaines potentiels d'amélioration. Des valeurs plus faibles de résistance thermique indiquent une meilleure efficacité de transfert de chaleur et de meilleures performances globales.

Les performances du caloduc HP peuvent également être évaluées par la résistance thermique du système. Dans la présente étude, la résistance thermique du caloduc R_{HP} , la résistance de l'évaporateur R_e et la résistance du condenseur R_c sont calculées comme suit [14] :

IV.3.1 Analyse des résultats

Dans un précédent travail, des expériences ont été réalisées afin de caractériser thermiquement le fonctionnement du caloduc en régime transitoire et stationnaire. Le caloduc qui est considéré dans cette étude a les mêmes caractéristiques géométriques.

Un modèle décrivant le fonctionnement transitoire du caloduc a également été développé. Il comprend: l'évaporateur, le condenseur et le bloc de refroidissement en aluminium (Figure. IV-2). Les valeurs des résistances et capacités thermiques RC thermique sont listées dans le tableau.



Source de refroidissement
(Le bloc de refroidissement est contrôlé par un bain de circulation)

Heat Source

Heat Pipe avec ses différentes sections : zones évaporateur, et condenseur

Figure. IV-2. Modèle thermique du caloduc incluant les sources de chaleur et de refroidissement

IV.2.1.1 Température de l'air en convection forcée : 15 °

Inclinaison du système : $\theta = 0^\circ$

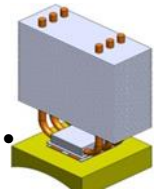


Tableau IV-1: Température de l'air en convection forcée : 15 ° / $\theta = 0^\circ$

Tension V (source)	Courant (A)	Puissance (W)	R_{vap} (K/W)	R_{EVAP} (K/W)	R_{COND} (K/W)	R_{TH} (K/W)	$C_{th.e}$ (J/K)	$C_{th.c}$ (J/K)
5	0.77	2.5179	0.1053788	0.0926922	14.466850	14.559542	9.26	85.48
10	1.19	8.4702	0.0343682	0.0275542	4.3004985	4.3280527	9.26	85.48
15	1.14	14.6608	0.014445	0.0159193	2.4845903	2.5005096	9.26	85.48
20	1.12	20.76	0.0091940	0.0112422	1.7546282	1.7658704	9.26	85.48
25	0.13	26.736	0.0067793	0.0087294	1.3624357	1.3711651	9.26	85.48

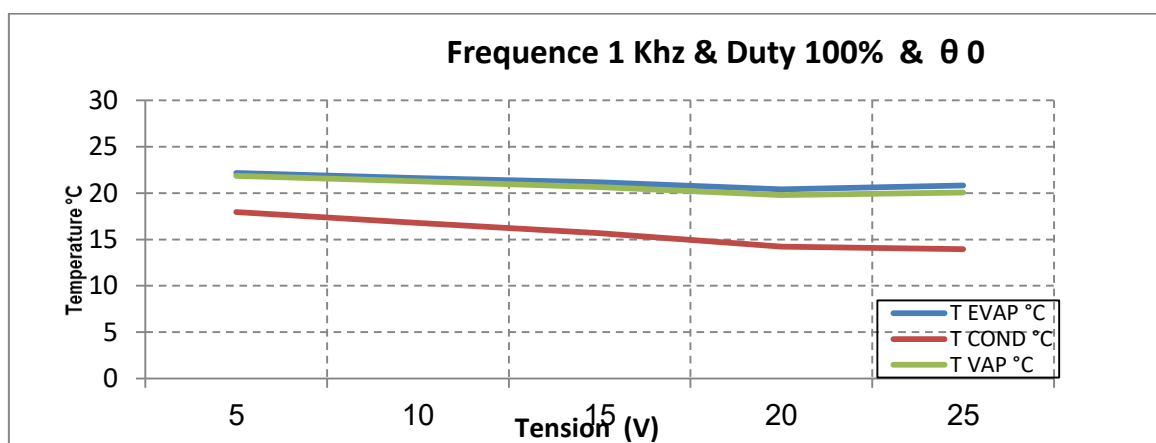
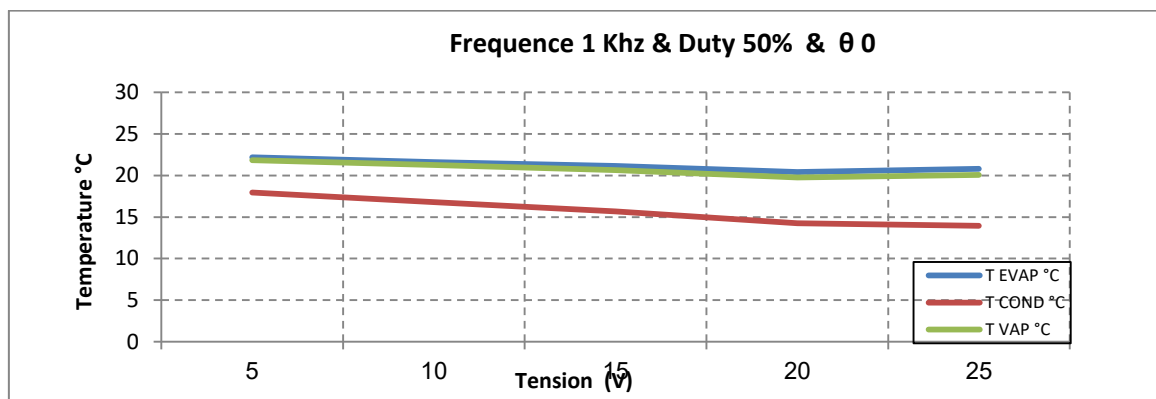


Figure IV-2: les changements de température en fonction de tension

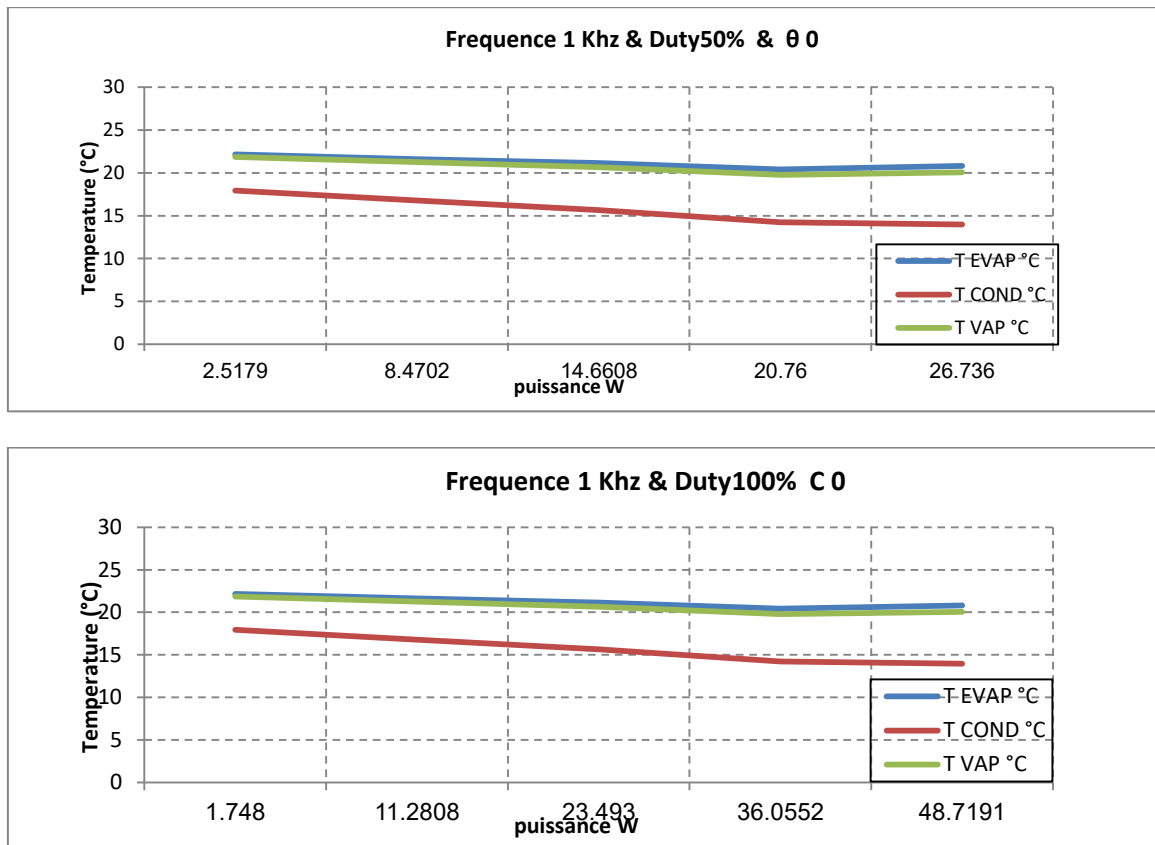


Figure IV-3: les changements de température en fonction de puissance

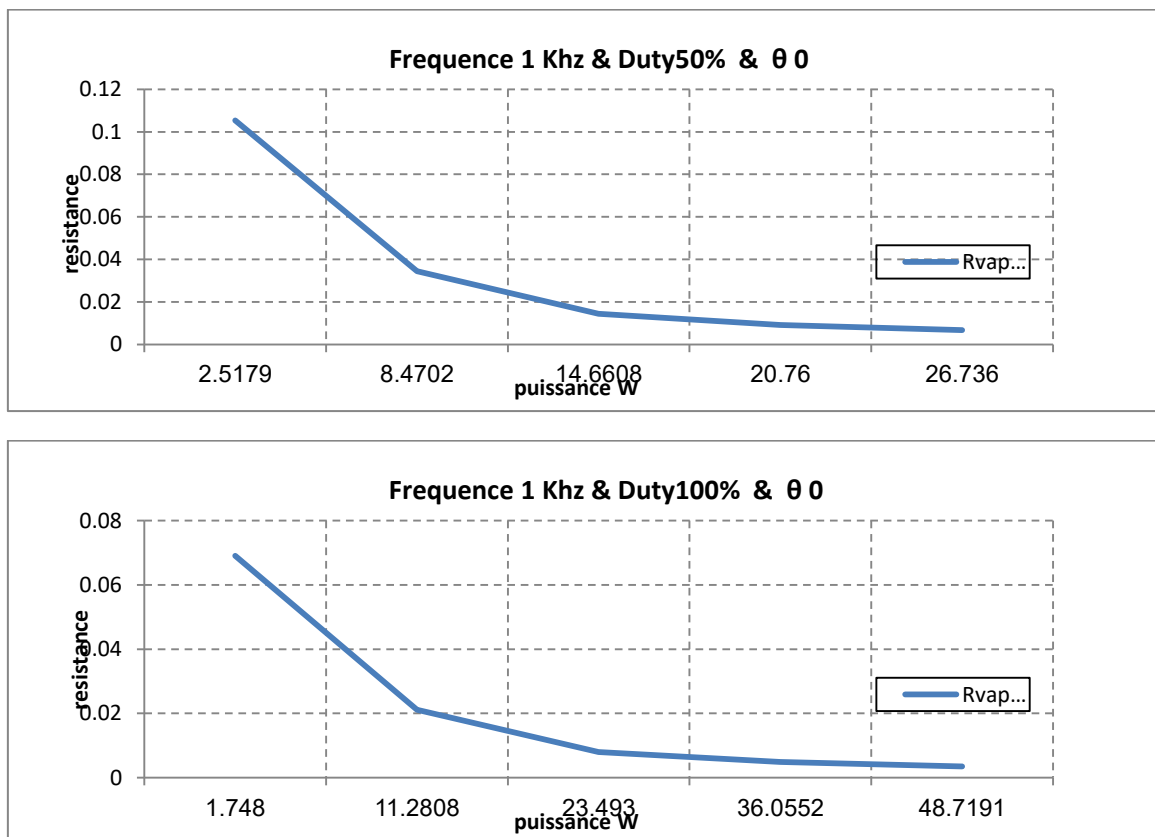


Figure IV-4: L'évolution de la valeur de la résistance de vapeur en fonction de puissance

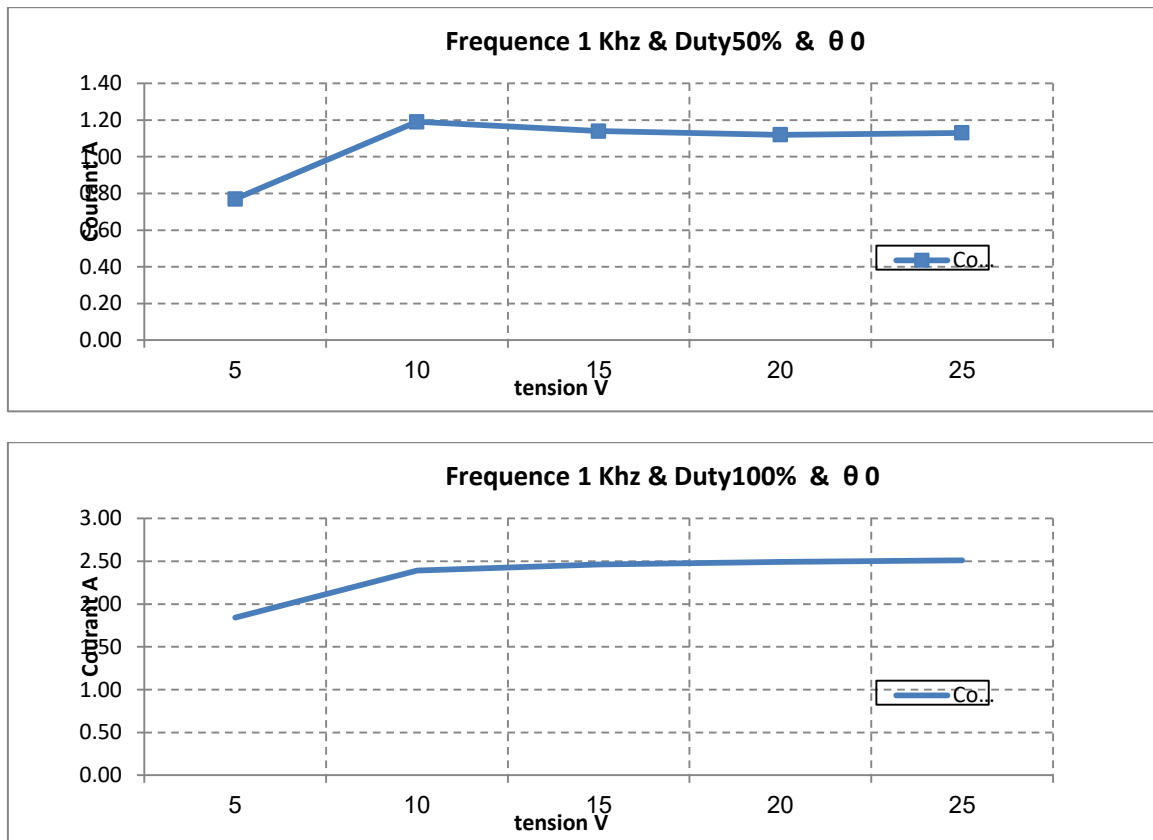
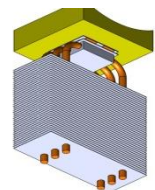


Figure IV-5: L'évolution de la valeur du courant en fonction de tension.

IV.2.1.2 Température de l'air en convection forcée : 15 °

Inclinaison du système : $\theta = 90^\circ$



Tension V (source)	Courant (A)	Puissance (W)	R_{vap} (K/W)	R_{EVAP} (K/W)	R_{COND} (K/W)	R_{TH} (K/W)	$C_{th.e}$ (J/K)	$C_{th.c}$ (J/K)
5	0.77	2.5179	0.2936942	1.2556395	12.726814	13.9824535	9.26	85.48
10	1.19	8.4702	0.5739865	0.3732585	3.7832455	4.156504	9.26	85.48
15	1.14	14.6608	0.7731664	0.2156481	2.1857502	2.4013983	9.26	85.48
20	1.12	20.76	0.5914353	0.1522916	1.5435860	1.6958776	9.26	85.48
25	0.13	26.736	0.2976081	0.1182515	1.1985654	1.3168169	9.26	85.48

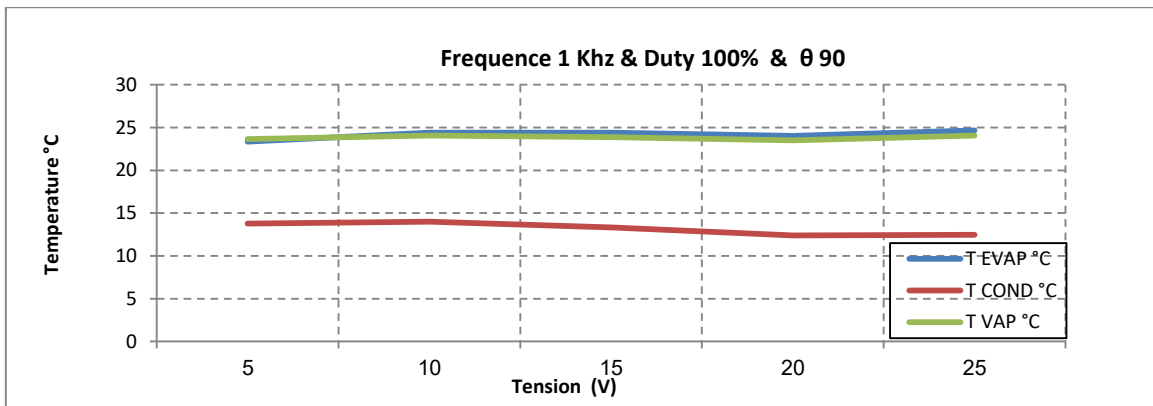
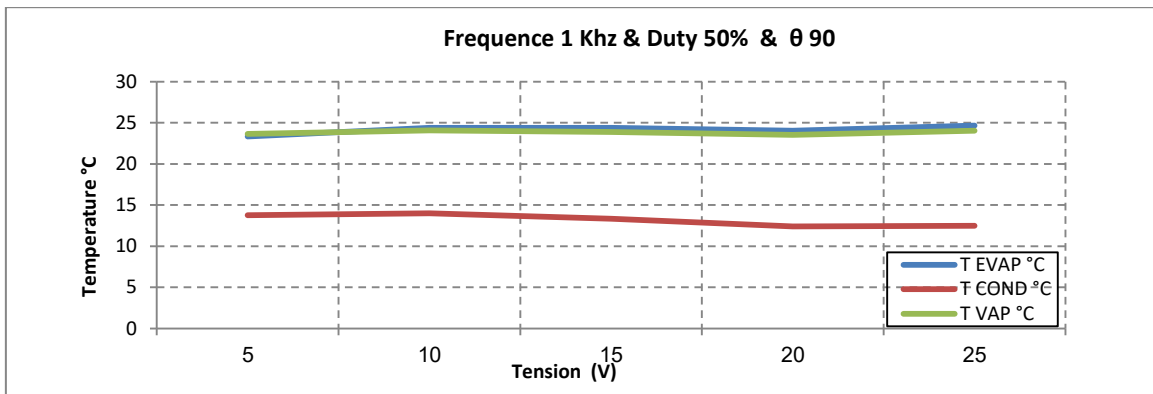


Figure IV-6: les changements de température en fonction de tension

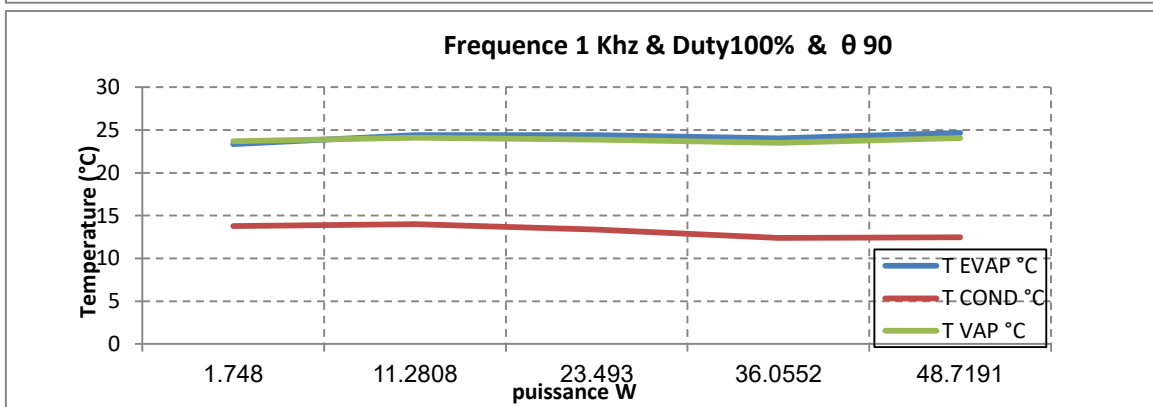
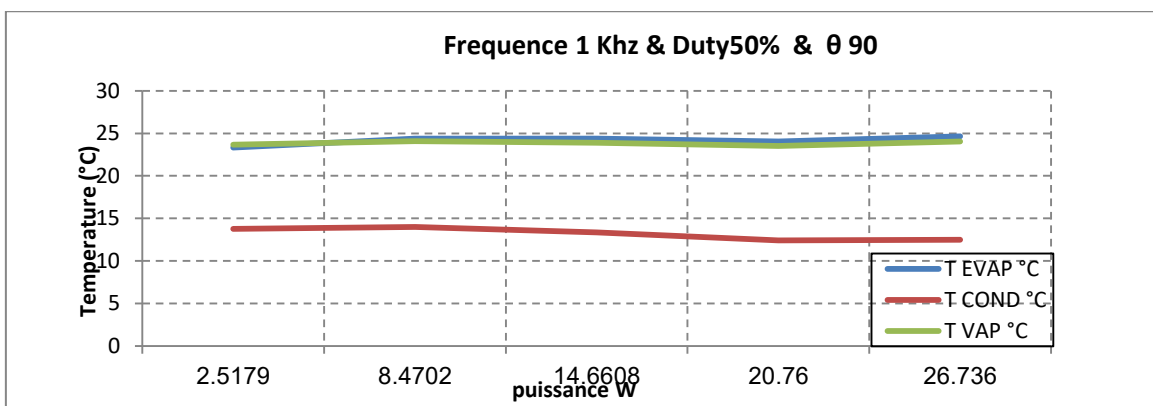


Figure IV-7: les changements de température en fonction de puissance

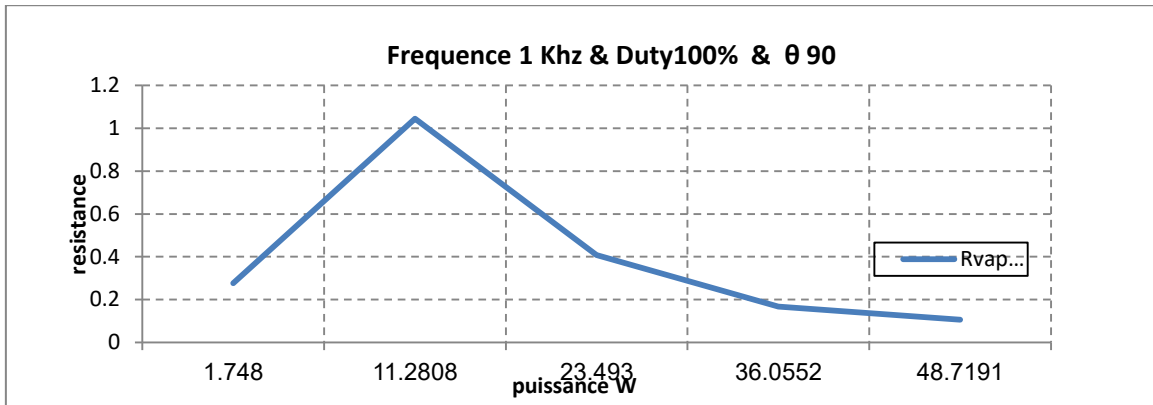
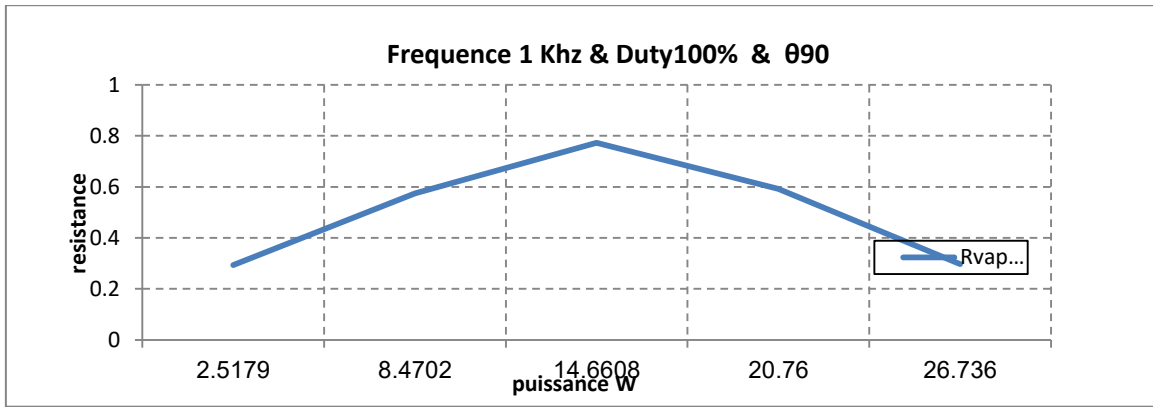


Figure IV-8: l'évolution de la valeur de la résistance en fonction de puissance

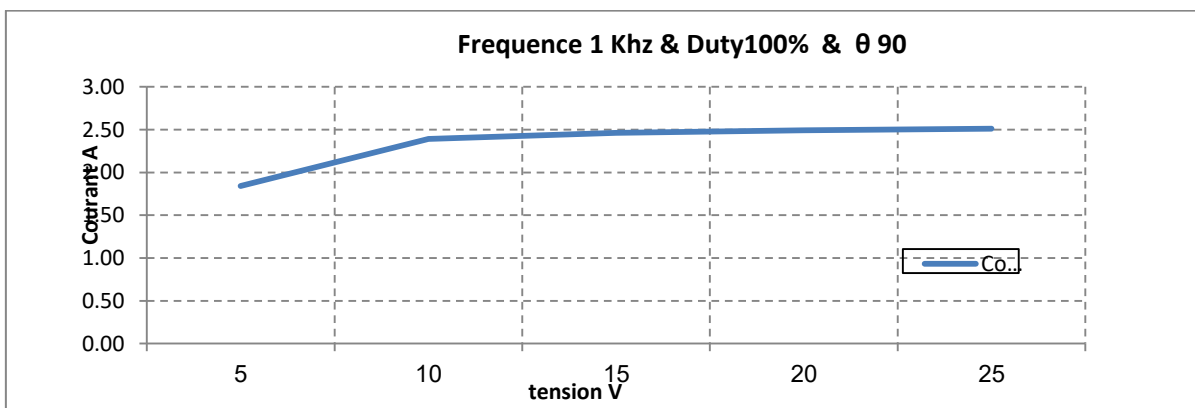
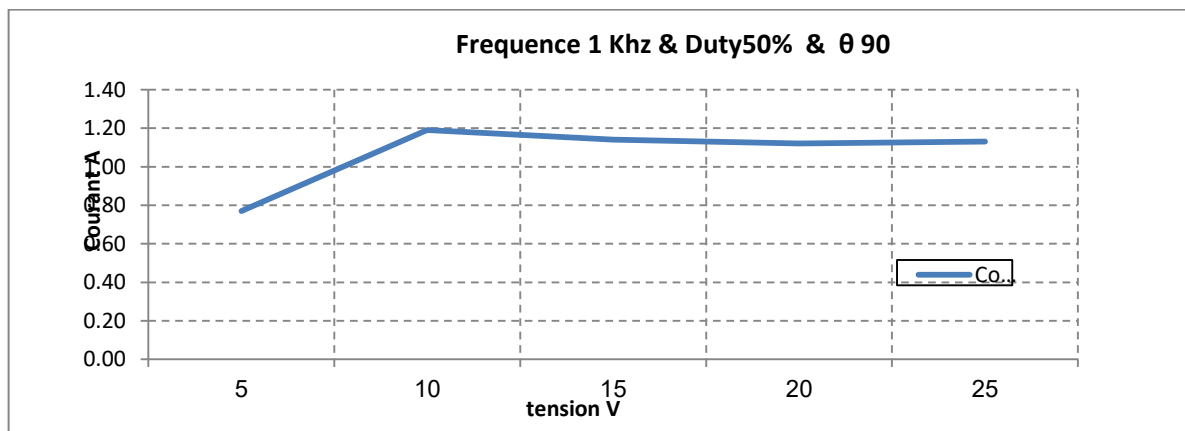


Figure IV-9: l'évolution de la valeur du courant en fonction de tension

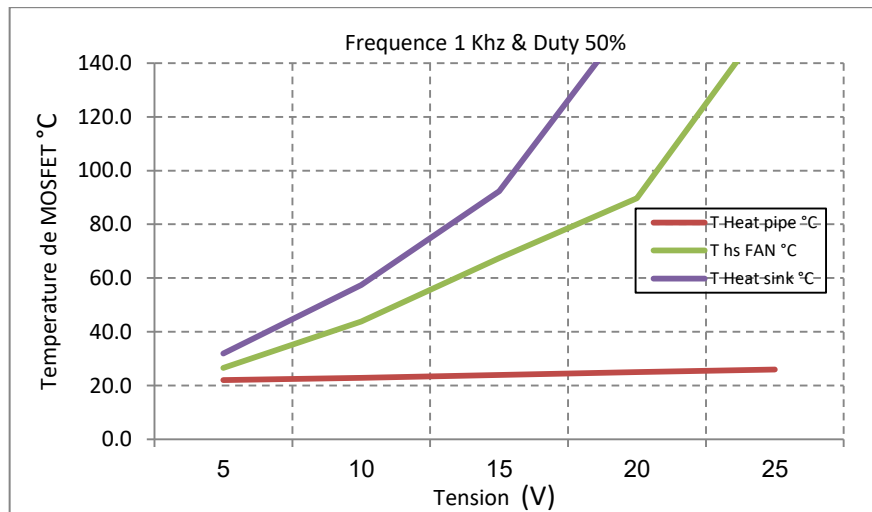
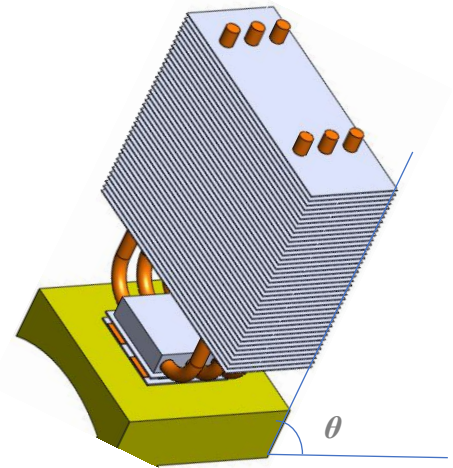


Figure IV-10: L'évolution des températures de la MOSFET en fonction de tension

La gravité peut influencer positivement ou négativement les performances de HP, selon son orientation. Le HP est souvent étudiée en inclinaison adverse, c'est-à-dire quand l'évaporateur est positionné au-dessus du condenseur. La gravité joue alors défavorablement sur les performances du système, car le liquide condensé doit vaincre les forces de pesanteur afin de regagner l'évaporateur. Il faut alors rajouter aux pertes de charge un terme de pression hydrostatique $\rho g H$. Dans cette configuration, l'inclinaison favorable de la ligne vapeur ajoute un terme de pression motrice, mais la différence de densité entre le liquide et la vapeur fait que ce terme est négligeable. La diminution des performances de HP en fonction de l'inclinaison est observable sur la figure III.3 et figure III.7. Plus l'inclinaison du système est élevée, plus la température moyenne de la paroi de l'évaporateur est importante. Cette inclinaison ralentit l'écoulement du liquide dans les canalisations à cause de l'effet de la pesanteur, qui s'oppose à la pression motrice capillaire. L'augmentation de la différence de pression entre le condenseur et l'évaporateur provoque une augmentation de la différence de température, qui explique l'augmentation de la température T_E . C'est donc dans la position la plus défavorable possible (inclinaison de 90°) qu'il faut veiller à ce que la température de l'évaporateur ne dépasse pas la limite admissible pour les composants électroniques. Les simulations présentées dans la figure III.3 et figure III.7 ont été réalisés en prenant un coefficient d'échange entre la paroi extérieure du condenseur et la source froide de $350 \text{ W/m}^2/\text{K}$. La résistance thermique correspondant au flux de fuite longitudinal R_{ax} a été identifiée à $0,3 \text{ K/W}$. Il y a une différence quasiment constante de 15 K entre la température de la vapeur théorique et la température expérimentale. Cette différence s'explique par le fait que l'on ne calcule pas la température de la vapeur au même point. Expérimentalement, la température de la vapeur est mesurée par un thermocouple placé sur la paroi de la ligne de vapeur, à la sortie de l'évaporateur, alors que théoriquement, elle est calculée à l'interface liquide-vapeur de la



Chapitre IV: RESULTATS ET DISCUSSIONS

mèche. Or, la température de la vapeur mesurée en sortie de l'évaporateur est plus élevée qu'à l'interface de vaporisation, du fait qu'elle est surchauffée lors de son passage à travers les canaux de vapeur. C'est ce que l'on retrouve dans les résultats comparatifs ci-dessus. La méthode des volumes finis est utilisée pour la discrétisation des équations du modèle. Les effets de la masse du liquide dans la cuve et sa nature ainsi que la puissance des composants électroniques sur le comportement thermo-hydraulique du caloduc sont discutés. La validation du modèle numérique est faite contre des résultats expérimentaux de la bibliographie et montre un parfait accord et une marge d'erreur maximale de 10 %.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'étude expérimentale du refroidissement d'un MOSFET de puissance par caloducs a permis de mettre en évidence plusieurs conclusions importantes. Voici quelques points clés à retenir :

Efficacité du refroidissement : L'utilisation de caloducs s'est avérée très efficace pour refroidir les MOSFET de puissance. Les caloducs sont des dispositifs de transfert de chaleur passifs qui exploitent les propriétés de l'évaporation et de la condensation des fluides pour éliminer la chaleur générée par les composants électroniques. Les résultats expérimentaux ont montré une diminution significative de la température du MOSFET lorsqu'il était refroidi par des caloducs par rapport aux méthodes de refroidissement traditionnelles telles que les dissipateurs thermiques.

Dissipation thermique améliorée : L'étude a démontré que l'utilisation de caloducs permettait une dissipation thermique plus efficace par rapport aux dissipateurs thermiques conventionnels. Les caloducs peuvent transférer la chaleur de manière plus efficace sur de plus grandes distances, ce qui facilite l'évacuation de la chaleur du MOSFET vers un dissipateur thermique plus éloigné ou un système de refroidissement externe. Cela contribue à maintenir des températures de fonctionnement plus basses et à prévenir la surchauffe du MOSFET.

Réduction des contraintes thermiques : L'un des avantages majeurs du refroidissement par caloducs est la réduction des contraintes thermiques exercées sur le MOSFET. En réduisant la température de fonctionnement, les caloducs contribuent à prolonger la durée de vie du composant et à améliorer sa fiabilité. Ils permettent également une meilleure gestion thermique, réduisant les risques de défaillance due à la surchauffe.

Adaptabilité et flexibilité : Les caloducs offrent une certaine adaptabilité et flexibilité en termes de conception et d'installation. Ils peuvent être intégrés dans des configurations spécifiques pour s'adapter aux contraintes d'espace ou aux besoins thermiques particuliers d'une application donnée. Cette flexibilité permet une utilisation optimale de l'espace disponible et une dissipation thermique efficace même dans des conditions contraignantes.

Limites et considérations supplémentaires : Malgré les avantages du refroidissement par caloducs, il est important de noter qu'il existe des limitations. La performance des caloducs peut être influencée par des facteurs tels que la charge thermique, la longueur du caloduc et l'orientation de son installation. Il est également nécessaire de prendre en compte les propriétés spécifiques du fluide de travail utilisé dans le caloduc, ainsi que les conditions environnementales.

En conclusion, l'étude expérimentale du refroidissement d'un MOSFET de puissance par caloducs démontre clairement l'efficacité et les avantages de cette méthode de dissipation thermique. Les caloducs offrent une solution prometteuse pour répondre aux défis de refroidissement dans les applications électroniques de puissance, contribuant ainsi à une meilleure performance et à une plus grande fiabilité des composants électroniques.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1] D.B. Tuckerman, R. Pease, *High-performance heat sinking for VLSI*, *IEEE Electron. Device Lett.* 2 (5) (1981) 126–129.
- [2] Jian Wang, Hui Kong, c, , Yaobin Xu, e , Jinsong Wu, *Experimental investigation of heat transfer and flow characteristics in finned copper foam heat sinks subjected to jet impingement cooling*, *Applied Energy* 241 (2019) 433–443.
- [3] S.Y Kim, J.W Paek, B.H Kang. *Thermal performance of aluminum-foam heat sinks by forced air-cooling*. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 26(2003), 262–267.
- [4] M.A. Alfellag, H.E. Ahmed, M.G. Jehad, M. Hameed, *Assessment of heat transfer and pressure drop of metal foam-pin-fin heat sink*, *International Journal of Thermal Sciences*, 170 (2021) 107109.
- [5] T.C. Hung, W.M. Yan, *Thermal performance enhancement of microchannel heat sinks with sintered porous media*, *Numer. Heat Transf. Part A* 63 (2013) 666–686.
- [6] T.C. Hung, Y.X. Huang, W.M. Yan, *Thermal performance of porous microchannel heat sink: effects of enlarging channel outlet*, *Int. Commun. Heat Mass Transf.* 48 (2013) 86–92.
- [7] Y. Li, L. Gong, M. Xu, Y. Joshi, *Hydraulic and thermal performances of metal foam and pin fin hybrid heat sink*, *Applied Thermal Engineering*, 166 (2020) 114665.
- [8] R. Samian, A. Abbassi, and J. Ghazanfarian, "Thermal investigation of common 2DFETs and new generation of 3D FETs using Boltzmann transport equation in nanoscale," *International Journal of Modern Physics C*, vol. 24, p. 1350064, 2013.
- [9] U. Mishra and J. Singh, *Semiconductor device physics and design*. Dordrecht: Springer 2008.
- [10] J. C. Woo, K. W. Terrill, and P. K. Vasudev, "Two-dimensional analytic modeling of very thin SOI MOSFETs," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 37, pp. 1999–2006, 1990.
- [11] L. Chang, Y.-k. Choi, D. Ha, P. Ranade, S. Xiong, J. Bokor, et al., "Extremely scaled silicon nano-CMOS devices," *Proceedings of the IEEE*, vol. 91, pp. 1860–1873, 2003.
- [12] S.-L. Jang, B.-R. Huang, and J.-J. Ju, "A unified analytical fully depleted and partially depleted SOI MOSFET model," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 46, pp. 1872–1876, 1999.
- [13] N. DasGupta and A. Dasgupta, *Semiconductor devices: modelling and technology*: PHI Learning Pvt. Ltd., 2004.
- [14] T. Skotnicki, J. A. Hutchby, T.-J. King, H.-S. Wong, and F. Boeuf, "The end of CMOS scaling: toward the introduction of new materials and structural changes to improve MOSFET performance," *IEEE Circuits and Devices Magazine*, vol. 21, pp. 16–26, 2005.

Références Bibliographiques

- [15] J.-P. Colinge, "Multiple-gate soi mosfets," *Solid-state electronics*, vol. 48, pp. 897-905, 2004.
- [16] A. Jakubowski and L. ukasiak, "CMOS evolution. Development limits," *Materials Science Poland*, vol. 26, pp. 5--20, 2008.
- [17] H.-K. Lim and J. G. Fossum, "Threshold voltage of thin-film silicon-on-insulator (SOI)MOSFET's," *IEEE Transactions on electron devices*, vol. 30, pp. 1244-1251, 1983.
- [18] A. Ashaf, M. Tyagi, and P. Mani, "To study high performance analysis of surround gate SOI MOSFET," *International Journal of Engineering & Technology*, vol. 7, pp. 191-194, 2018.
- [19] V. Romano and A. Rusakov, "2d numerical simulations of an electron-phonon hydrodynamical model based on the maximum entropy principle," *Computer methods in applied mechanics and engineering*, vol. 199, pp. 2741-2751, 2010.
- [20] International Technology Roadmap for Semiconductors, 2008. <http://www.itrs.net/Links/2008ITRS/home2008.htm>
- [21] TAWK, Mansour. *Etude et réalisation d'un système de refroidissement pour l'électronique de puissance basé sur la mise en mouvement d'un fluide conducteur électrique*. 2011. Thèse de doctorat. Université de Grenoble.
- [22] AL-DAMOOK, Amer Jameel Shareef. *Design Optimisation and Analysis of Heat Sinks for Electronic Cooling*. 2016. Thèse de doctorat. University of Leeds.
- [23] YERASIMOU, Yerasimos. *Heat sinks based on liquid metal for power electronics cooling applications*. 2020. Thèse de doctorat. Newcastle University.
- [24] MEHRA, Bineet. *Design and optimisation of innovative electronic cooling heat sinks with enhanced thermal performances using numerical and experimental methods*. 2019. Thèse de doctorat. Ecole nationale supérieure Mines-Télécom Lille Douai.
- [25] GLASS, Joseph. *Modelling and optimisation of metal foam integrated heat exchangers for power electronics cooling*. 2021. Thèse de doctorat. Université Grenoble Alpes.
- [26] VAN OEVELEN, Tijs. *Optimal heat sink design for liquid cooling of electronics*. 2014.
- [27] CASTELAN, Anne. *Modélisation de composants d'extraction de la chaleur: application à l'optimisation de système d'électronique de puissance*. 2017. Thèse de doctorat. Université Paul Sabatier-Toulouse III.