

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Abdel Hamid Ibn Badis de Mostaganem
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Électrique



N°D'ORDRE : M .../2014

MEMOIRE

Présenté pour obtenir

LE DIPLOME DE MAGISTER

SPECIALITE : ELECTRONIQUE

OPTION : Microélectronique et Nanoélectronique

Par

HARCHOUCH NABILA

*Etude et Simulation de l'Effet Thermique dans les Composants
Electroniques Multi-sources*

Soutenue le : / / 2014 devant le jury composé de

Président

Mr YAGOUBI Benabdellah PROFESSEUR U. Mostaganem

Examineurs

Mr BOUKORTT Abdelkader PROFESSEUR U. Mostaganem

Mr HADRI Baghdad PROFESSEUR U. Mostaganem

Encadreur

Mm HOCINE Rachida MAITRE DE CONFERENCE U. USTO Oran

REMERCIEMENTS

En premier lieu, nous tenons à remercier notre DIEU et à toutes les personnes qui nous ont aidés dans l'élaboration de cette modeste étude, en particulier :

Notre honorable encadreur et professeur Madame Hocine Rachida qui nous a consacré une grande partie de son précieux temps, pour ses bons conseils et orientations bénéfiques et son bon cœur en brulant toutes étapes protocolaires.

Nous adressons nos remerciements les plus respectueux au membre de jury d'avoir accepté d'évaluer notre travail. Nous remercions en premier le Prof Yakoubi pour présider mon jury et infiniment aussi Messieurs les Prof A. Boukortt et A.Hadri comme examinateurs de notre travail.

A tous les enseignants du département de génie électriques qui ont contribué à notre formation et graduation.

DEDICACES

Je dédie ce travail méthodologique à :

*Mon père et ma chère maman, pour m'avoir encouragée et soutenu durant tout
mon Long parcours.*

*Mon frère, mes sœurs, mes tantes, mes oncles, mes cousins et cousines, et à
toute ma grande famille.*

*Mes chers amis particulièrement
et Tous mes amis.*

NABILA

Résumé

Parmi les composants à hétérojonction, les transistors bipolaires AlGaAs / GaAs HBT présentent des avantages très intéressants pour les applications hyperfréquences, par exemple pour la transmission rapide des données, les applications micro-ondes rapides et les circuits optoélectroniques intégrés. L'étude des phénomènes thermiques dans ce genre de transistors est primordiale. Dans cette optique, nous avons engagé des travaux sur l'effet thermique des modules HBT comme modèle, pour cela connaître le principe physique et technologique de ce composant est très important pour prédire le comportement thermique et détecter les régions chaudes.

Dans ce mémoire, nous avons cité quelques méthodes pour la modélisation de l'effet thermique dans les composants électroniques en s'intéressant à la méthode analytique et la méthode TLM. Nous avons montré qu'il existe une équivalence entre l'équation de diffusion et l'équation d'une ligne de transmission et que par conséquent il est possible de modéliser un phénomène de diffusion par la propagation d'une impulsion delta dans un réseau de lignes de transmission (nœuds). Comme modèle, nous avons étudié la diffusion thermique dans une barre de matériau semi-conducteur puis pour un exemple d'un composant électronique le HBT.

L'application de la méthode TLM à la modélisation de la diffusion thermique dans un barre semi-conducteur, aussi bien pour le cas unidimensionnel que tridimensionnel, montrent que les résultats numériques sont en bon accord avec les résultats analytiques. Ce test positif nous permet d'élargir le champ d'application de la méthode TLM à l'étude thermique au composant HBT a un doigt ou trois doigts émetteurs. Les résultats montrent clairement que le dispositif de HBT sont capables de quantité considérable d'auto-génération de chaleur qui doit être dissipée très rapidement pour réduire l'effet de couplage électronique et augmenter la durée de vie du dispositif.

Abstract

Among the components, heterojunction bipolar transistors AlGaAs / GaAs HBT have very interesting advantages for microwave applications, fast microwave applications and integrated optoelectronic circuits. The study of thermal phenomena in such transistors is paramount. In this context, we initiate work on the thermal effect of HBT modules but know the physical and technology of this component is very important to predict the thermal behavior and detect hot areas.

In this paper, we mentioned various methods for modeling the thermal effect in the electronic components by the analytical method and the TLM method. We have shown that there is equivalence between the diffusion equation and the equation of a transmission line and therefore it is possible to model the phenomenon of diffusion by the propagation of a pulse in a delta network transmission lines (nodes). In first, we studied the thermal diffusion in a bar of semiconductor material and after for an HBT (Heterojunction Bipolar Transistor) component.

The application of the TLM method for modeling the thermal diffusion in a bar, both for the one-dimensional or three-dimensional cases, show that the numerical results are in good agreement with the analytical results. This positive test allows us to expand the scope of the TLM method to study HBT thermal component has a finger or three fingers issuers. The results clearly show that of the HBT device are capable of considerable amount of self-generation of heat which must be dissipated quickly to reduce thermo electronic effect coupling and increase the lifetime of the device.

ملخص

بين اهم الترانزستورات، مفرق الوصلة AlGaAs / GaAs HBT لها مزايا مثيرة جدا للاهتمام لتطبيقات الميكروويف، على سبيل المثال لنقل السريع للبيانات، الدوائر المتكاملة الضوئية. دراسة الظواهر الحرارية في مثل هذه الترانزستورات هو أساسي. في هذا السياق، قمنا بدراسة تأثير الحرارة في وحدات HBT كنموذج لمعرفة أن مبدأ المادية والتكنولوجيا لهذا العنصر مهم جدا للتنبؤ بسلوك الحرارة وكشف المناطق الساخنة.

في هذه المودكرة، ذكرنا عدد من الطرق لنمذجة تأثير الحرارة في المكونات الإلكترونية من خلال التركيز على الأسلوب التحليلي والأسلوب TLM. لقد أظهرنا أن هناك التكافؤ بين معادلة الانتشار و معادلة خط نقل، وبالتالي فمن الممكن تمثيل ظاهرة انتشار الحرارة مثل انتشار نبضة في شبكة خطوط نقل (العقد).

كنموذج، درسنا نشر الحرارة في قضيب من مادة شبه موصلة وتطبيق أسلوب TLM لنمذجة الانتشار الحراري في حالة أشباه الموصلات، سواء بالنسبة لحالة ثلاثية الأبعاد أو ذات بعد واحد تبين أن النتائج العددية هي في اتفاق جيد مع النتائج التحليلية. هذا الاختبار إيجابية تسمح لنا لتوسيع نطاق TLM طريقة لدراسة HBT المكون من إصبع أو ثلاثة أصابع باعث. النتائج تظهر بوضوح أن العنصر HBT قادر على خلق كمية كبيرة من الحرارة التي يجب أن تبديد بسرعة للحد من تأثير الاقتران الحراري وزيادة عمر وفعالية الجهاز.

Table des matières

| | |
|--|------------|
| DEDICACES | i |
| REMERCIEMENTS | ii |
| RESUME | iii |
| TABLE DES MATIERES | iv |
| LISTE DES FIGURES | vii |
| LISTE DES TABLEAUX | x |
| NOTATIONS ET ABREVIATIONS | xi |
| | |
| INTRODUCTION GENERALE | 1 |
| | |
| CHAPITRE I : L’EFFET THERMIQUE SUR LES COMPOSANTS ELECTRONIQUES | 4 |
| | |
| I.1 Introduction | 5 |
| I.2 L’EFFET DE LA TEMPERATURE SUR LES COMPOSANTS ELECTRONIQUES | 5 |
| I.3 Les lois fondamentales du transfert de chaleur..... | 9 |
| I.3.1 Transfert de chaleur par conduction..... | 10 |
| I.3.2 Transfert de chaleur par convection..... | 15 |
| I.3.2.1 Convection naturelle | 16 |
| I.3.2.2 CONVECTION FORCEE | 17 |
| I.3.3 Transfert de chaleur par Rayonnement..... | 18 |
| I.4 Les mécanismes de refroidissement des composants électroniques..... | 19 |
| I.4.1 Refroidissement à air..... | 20 |
| I.4.1.1 Convection naturelle..... | 20 |
| I.4.1.2 Convection forcée (à air actif)..... | 21 |
| I.4.2 Refroidissement par liquide caloporteur..... | 22 |

| | |
|---|-----------|
| I.4.2.1 Refroidissement par plaque à Eau..... | 23 |
| I.4.2.2 Refroidissement par microcanaux..... | 24 |
| I.4.3 Les caloducs miniatures..... | 25 |
| I.5 Notion de Boitier | 26 |
| I.6 Principaux modes de défaillances des modules électroniques..... | 29 |
| 1.6.1 Défaillances au niveau de l'assemblage..... | 29 |
| 1.6.1.1 Fatigue thermique des joints de brasures..... | 29 |
| 1.6.1.2 Défaillance du fil de câblage..... | 30 |
| 1.6.2 Défaillance au niveau de la puce de puissance..... | 31 |
| I.7 Conclusion..... | 31 |
| CHAPITRE II : DIFFERENTES METHODES DE RESOLUTION | 12 |
| DE L'EQUATION DE CHALEUR | |
| II.1 INTRODUCTION..... | 34 |
| II.2 Equation de la chaleur..... | 34 |
| II.3 Différentes méthodes de résolution de l'équation de chaleur..... | 37 |
| II.3.1 Solutions Analytiques..... | 37 |
| II.3.2 Solutions numériques..... | 38 |
| II.3.2.1 Les modèles numériques..... | 39 |
| II.3.2.2 Méthodes dynamique des fluides..... | 40 |
| II.3.3 Solutions électrothermiques..... | 40 |
| II.3.4 Méthodes de mesures de température pratiques..... | 41 |
| II.4 Modélisation numérique..... | 41 |
| II.4.1 Introduction..... | 41 |
| II.4.2 Exemple de logiciel et d'outils CAO pour analyser l'effet thermique dans les systèmes électroniques..... | 43 |
| II.5 Méthode Analytique : Séparation de variables..... | 45 |
| II.5.1 Méthode de séparation de variables à une dimension..... | 45 |
| II.5.2 Méthode de séparation de variables à deux dimensions..... | 48 |
| II.6 Méthode de Matrice de Ligne de Transmission TLM..... | 50 |
| II.6.1 Présentation..... | 50 |

| | | |
|--|--|-----------|
| II.6.2 | Origine de la méthode TLM..... | 51 |
| II.7 | Conclusion..... | 56 |
| CHAPITRE III : MODELISATION TLM DE LA DIFFUSION THERMIQUE | | |
| III.1 | Introduction..... | 58 |
| III.2 | Modélisation du phénomène de diffusion thermique dans une barre de AsGa..... | 58 |
| III.2.1 | Solution analytique..... | 58 |
| III.2.1.1 | Modélisation unidimensionnelle..... | 58 |
| III.2.1.2 | MODELISATION BIDIMENSIONNELLE ET TRIDIMENSIONNELLE..... | 60 |
| III.2.2 | SOLUTION NUMERIQUE..... | 63 |
| III.2.2.1 | Modélisation unidimensionnelle | 63 |
| III.2.2.2 | Modélisation tridimensionnelle..... | 68 |
| III.3 | Modélisation tridimensionnelle de la méthode TLM pour la diffusion thermique dans le HBT..... | 74 |
| III.3.1 | Généralités..... | 74 |
| III.3.2 | Introduction au Transistor bipolaire à hétérojonction..... | 74 |
| III.3.3 | Structure de base et conception..... | 75 |
| III.3.4 | Propriétés de d'hétérojonction et discontinuités de bandes..... | 76 |
| III.3.5 | Energie de quasi-niveau de Fermi dans une hétérojonction..... | 79 |
| III.4 | L'effet thermique dans le HBT (AlGaAs/GaAs)..... | 80 |
| III.4.1 | Effet auto-chauffage dans les HBT à seul émetteur..... | 83 |
| III.4.1.1 | Les concentrations des porteurs de charges libres à l'équilibre en haute température..... | 83 |
| III.4.1.2 | Densité du courant de collecteur et la température du réseau..... | 84 |
| III.4.2 | Les effets d'auto-échauffement et du couplage thermique dans les HBT à multi-émetteur..... | 86 |

| | |
|--|------------|
| III.5 Modélisation du phénomène de diffusion thermique dans un HBT | 86 |
| III.5.1 Présentation du modèle..... | 86 |
| III.5.2 Modélisation Analytique du phénomène de diffusion thermique dans un HBT..... | 88 |
| III.5.3 Modélisation par TLM-3D du phénomène de diffusion thermique pour un HBT.... | 89 |
| III.6 Simulation et Résultats..... | 95 |
| III.6.1 Modélisation par TLM-3D pour un HBT à un doigt | 95 |
| III.6.2 Modélisation par TLM-3D pour un HBT à trois doigts..... | 97 |
| III.6.3 Modélisation par la méthode analytique du HBT à trois doigts..... | 99 |
| III.6.4 Changement de dimension de l'épaisseur du substrat..... | 100 |
| III.7 Conclusion..... | 101 |
| | |
| CONCLUSION ET PERSPECTIVES | 103 |
| | |
| BIBLIOGRAPHIE | 105 |

Liste des Figures

Figure I.1 : Echauffement d'un microprocesseur dans son milieu de fonctionnement [4]

Figure I.2 : Causes principales de la défaillance électronique (Référence: USA Air Force Avionics Integrity Program)

Figure I.3 : Evolution de la puissance thermique dissipée pour un transistor (FETS et IGBTs) et un conducteur Smart [8]

Figure I.4 : Méthodes de transfert de chaleur

Figure I.5 : Transfert de chaleur par conduction

Figure I.6 : Conduction de la chaleur dans un barreau

Figure I.7 : Bilan de puissance thermique à l'instant t dans un élément de volume

Figure I.8 : Transfert de chaleur par convection

Figure I.9 : Transfert de chaleur par convection naturelle

Figure I.10 : Transfert de chaleur par convection forcée

Figure I.11 : Transfert de chaleur par rayonnement

Figure I.12 : Principe du rayonnement thermique

Figure I.13 : Système de refroidissement à air passif

Figure I.14 : Exemples de systèmes de refroidissement à air pulsé

Figure I.15 : Schéma simplifié de refroidissement par liquide

Figure I.16 : Structure de plaque à eau [19]

Figure I.17 : Mini-échangeur avec Microcanaux de 0.2mm de largeur

Figure I.18 : Principe de fonctionnement et utilisation d'un caloduc

Figure I.19 : Assemblage classique de puissance montée sur son radiateur

Figure I.20 : Composant Smart Power Freescale Semiconductor de type Quad (SPQ-15)[26]

Figure I.21 : Assemblage traditionnel d'un module de puissance à base de transistors verticaux (VDMOS, HDMOS, IGBT, ...)

Figure I.22 : Exemples types courants de boîtier de puissance[26]

Figure I.23 : Exemple de fissuration du joint de brasure entre la puce et l'isolant [27].

Figure I.24 : Défaillance du fil de câblage

Figure II.1 : Élément de volume infinitésimal

Figure II.2 : Circuit équivalent du model d'un nœud

Figure II.3 : Représentation d'un Nœud TLM-3D

Figure III.1 : Variation de la température dans une barre semi-infinie

Figure III.2 : Variation de la température dans une barre semi-infinie (source de chaleur au milieu)

Figure III.3 : Variation de la température dans une barre semi-infinie dan le cas

bidimensionnel (source de chaleur au milieu)

Figure III.4 : Variation de la température dans une barre semi-infinie (deux sources de chaleurs)

Figure III.5 : Variation de la température dans une barre semi-infinie (six sources de chaleurs).

Figure III.6 : Division de la barre de AsGa en nœuds

Figure III.7: Comparaison entre la solution analytique et celle modélisée par la méthode TLM Pour la barre en AsGa.

Figure III.8 : Organigramme de la méthode TLM-1D appliquée à la diffusion de chaleur à travers une barre de AsGa

Figure III.9 : Discrétisation volumique du barreau

Figure III.10 : Conditions aux limites

Figure III.11 : Visualisation tridimensionnelle de la variation de la température dans une barre en AsGa selon les quatres plans (a,b,c,d)

Figure III.12 : Organigramme de la méthode de TLM-3D appliquée au phénomène de diffusion thermique dans un barreau à semiconducteur.

Figure III.13 : Schéma du HBT N/P+/n AlGaAs/GaAs/GaAs

Figure III.14 : Diagramme de bande d'énergie pour le Transistor HBT

Figure III.15 : Diagramme d'énergie de bande pour une hétérojonction émetteur-base

Figure III.16: Structure d'un HBT à n doigts

Figure III.17 : Structure du composant de puissance HBT

Figure III.18 : Les surfaces de diffusion de chaleur dans un HBT de puissance

Figure III.19 : Structure du HBT utilité pour la simulation

Figure III.20 : Tension réfléchies au niveau de discontinuité d'impédance

Figure III.21 : Présentation tridimensionnel d'un nœud TLM.

Figure III.22 : La variation de la conductivité thermique en fonction de la température

Figure III.23 : Présentation du HBT

Figure III.24 : Modèle de structure d'un HBT à N doigts

Figure III.25 : Variation de la température pour un HBT opérant sous un courant de collecteur

$$I_c = 8.10^4 \text{ A/cm}^2$$

Figure III.26 : Variation de la température pour un HBT opérant sous un courant de collecteur

$$I_c = 10^5 \text{ A/cm}^2$$

Figure III.27 : Variation de la température pour un HBT à trois doigt opérant sous un courant

de collecteur $I_c = 8.10^4 \text{ A/cm}^2$

Figure III.28 : Zoom de la figure III.27

Figure III.29 : Variation analytique de la température pour un HBT à trois doigt opérant sous

un courant de collecteur $I_c = 8.10^4 \text{ A/cm}^2$

Figure III.30 : Variation de la température le long du canal pour deux cas d'épaisseurs du substrat.

Liste des Tableaux

Tableau I.1 Conductivités thermique de différents semi-conducteurs

Tableau I.2 L'équivalence entre grandeurs thermiques et électriques

Tableau II.1 Exemples de logiciels et d'outils CAO pour analyser l'effet thermique

Tableau II.2 Les valeurs de j , j' , u , v , et w utilisées dans les équations (II.50) et (II.51)

Tableau III.1 Caractéristique du composant HBT

Tableau III.2 Les propriétés thermiques et physiques

Nomenclature

| | |
|--------|---|
| AlGaAs | Aluminium Arsenic de Gallium |
| AsGa | Arsenic de Gallium |
| CAO | Computer Aided Optimisation |
| CM | Compact model |
| CFD | Computational Fluid Dynamic |
| HBT | Hetero-junction Bipolar Transistor |
| IGBT | Insulated Gate Bipolar Transistor |
| FDM | Finite Difference Method |
| FDTD | Finite Difference Time Domain |
| FEA | Finite Element Analysis |
| FEM | Finite Element Method |
| FETS | Field Effect Transistor |
| FSM | Fourier Series Method |
| FVM | Finite Volume Method |
| MoM | Method of Moments |
| MBE | Molecular Beam Epitaxy |
| MOCVD | Metal Organic Chemical Vapor Deposition |
| MOSFET | MOS a effet de champ |
| Ribal | Résistance de ballast |
| PEEC | Partial Element Equivalent Circuit |
| TM | Transformation Method |
| TVS | Système de vidéo thermique |
| TLM | Transmission Line Matrix |
| BJT | Bipolar Junction Transistor |
| CAD | Computer Aided Desig |
| MOS | Matal Oxyde Semiconductor |
| [O/C] | Open Circuit boundary condition |

Introduction générale

Pour pouvoir réaliser des composants électroniques performants à caractéristiques stables dans le temps, il est indispensable d'avoir une connaissance approfondie des phénomènes qui régissent les propriétés électroniques.

L'étude de la qualité d'un produit est d'une importance critique, dans un domaine de points comme la micro-électronique, ou la recherche de performances toujours accrues repousse rapidement les limites de la technologie.

La mesure de la qualité de composant s'appuie principalement sur les analyses de construction et de défaillance. La première consiste à une étude de la technologie employée avec décomposition des phases successives de fabrication du composant, la deuxième analyse teste la fiabilité et cherche les causes de défaillance qui peut être souvent thermique et essayer de cerner le mode de destruction, cet aspect d'analyse est appelé la qualité-assurance l'**AMDEC** (Analyse des Modes de défaillances, de leurs Effets et leur Criticité).

Quelques nouveaux composants peuvent maintenant offrir un potentiel considérable d'une haute vitesse et haute puissance en même temps, l'analyse thermique alors devienne importante et essentielle. Dans la conception d'un système électronique, il est important de connaître la gamme de températures dans laquelle doit fonctionner le système. On distingue en général, trois gammes :

- de 0°C à 55°C : produits grand public;
- de -25°C à 75°C : produits industriels;
- de -60°C à 125°C : utilisations militaires;
- de -160°C à +80°C : utilisations spatiales (cas des panneaux solaires).

A l'intérieur de chaque gamme on est appelé à faire face aux deux cas :

1. Le système est destiné à fonctionner dans une ambiance à température constante, le point de fonctionnement au repos peut être fourni par une étude rapide et simplifiée.
2. Dans le contraire, il faut, pour assurer la fiabilité du montage, une analyse rigoureuse qui consiste à :

- minimiser les effets des paramètres sensibles à la température;
- soit utiliser des éléments non linéaires dépendants de la température.

Les calculs de transfert de chaleur dans les équipements électroniques sont nécessaires quand des considérations de temps et d'argent empêchent la construction d'un modèle de laboratoire de l'équipement à concevoir. Ces calculs permettent de déterminer l'influence de la géométrie, des propriétés physiques des matériaux sur la répartition des températures dans l'équipement et de mettre en évidence certaines parties critiques. Ils permettent dans tous les cas de dégrossir les éléments d'un avant-projet.

Ces calculs sont malheureusement très souvent d'une grande complexité: les équipements électroniques ont des géométries irrégulières et contiennent de nombreuses sources de chaleur. L'importance de l'étude de la diffusion de ces sources est reliée directement à la fiabilité des composants et modules électroniques

L'étude du comportement thermique des composants électroniques et des assemblages de puissance tient aujourd'hui une place capitale dans la conception des fonctions électroniques soumises à environnement sévère. Un échauffement excessif dégrade les performances du composant, réduit sa durée de vie et peut provoquer la défaillance. L'étude du comportement thermique du composant aidera donc à prévoir sa fiabilité, sa durée de vie et l'évolution de ses performances dans le temps. Plusieurs méthodes de refroidissement ont été étudiées dans le but d'améliorer le transfert de chaleur et augmenter l'efficacité des systèmes de refroidissement. Ainsi, comprendre le processus d'échange et de diffusion de la chaleur est incontournable dans un grand nombre d'applications technologiques. Bien que ce problème soit étudié depuis fort longtemps, trouver une technique ou un outil d'aide à la conception simple et efficace, est toujours d'actualité, c'est le but de notre travail, qui sera structuré comme suit:

Dans le premier Chapitre, on commencera par présenter l'effet de la température sur les composants en particuliers et en équipements électroniques en générale. Ensuite, nous nous intéresserons à la problématique de la gestion thermique appelée aussi le management thermique des matériaux dans des composants ou modules électroniques pour avoir le meilleur fonctionnement. De plus, nous présenterons les différentes méthodes de refroidissements ainsi que les différents boîtiers conçus pour évacuer la chaleur interne générée dans les composants électroniques

Dans le deuxième Chapitre, nous citerons les principales méthodes utilisées ces dernières décennies pour améliorer la prise en compte des aspects thermiques dans la

conception et le fonctionnement des composants et circuits électroniques. Les modèles thermiques ont été sans cesse améliorés dans ces dernières années, cependant tous ne sont pas adaptés à toutes les étapes de la conception. Ainsi, pour répondre aux différents besoins des ingénieurs, plusieurs types de modèles sont développés (numériques, analytiques, analogiques et expérimentaux, ...) pour prédire la température et la performance thermique des composants et circuits électroniques. Ensuite, on montrera qu'il existe une équivalence entre l'équation de diffusion et l'équation d'une ligne de transmission et que par conséquent, il est possible de modéliser un phénomène de diffusion par la propagation d'une impulsion delta dans un réseau de lignes de transmissions (nœuds).

Dans le troisième chapitre, nous appliquerons la méthode TLM à la modélisation de la diffusion thermique dans une barre à base semi-conducteur aussi bien que dans le cas à une dimension qu'à trois dimensions. La même démarche sera faite pour le composant de puissance à micro-ondes, le HBT (Transistor Bipolar Heterojonction). Au début du chapitre nous rappellerons la physique du composant et ses différents régimes de fonctionnement ensuite on fait l'étude thermique en appliquant la méthode TLM-3D pour l'étude de la distribution tridimensionnelle de la température dans le composant HBT pour deux cas :

- Cas d'un HBT à un seul émetteur c'est-à-dire un seul doigt,
- Cas d'un HBT à trois émetteurs c'est-à-dire à trois doigts.

Nous présenterons les différents résultats et établirons des comparaisons avec les résultats issus de la résolution analytique, ceci pour valider notre travail. L'apparition de l'effet d'auto-échauffement et le phénomène de couplage thermoélectronique dans les composants de puissance a été pris en considération dans notre étude. Le choix de la méthode TLM est du qu'elle est inconditionnellement stable, elle a un grand intérêt dans la résolution des problèmes non linéaires avec une géométrie compliquée d'une part, et un niveau considérable dans la localisation des points de claquage ou la destruction des composants.

Pour terminer, il nous a semblé important de présenter une conclusion générale de notre travail.

I.1 Introduction

Le progrès en technologie s'accompagne d'une miniaturisation de plus en plus grande de composants électroniques. Il en découle une tension particulière aux problèmes de génération thermique interne qui peut avoir des conséquences considérables sur les propriétés électriques de ces derniers. La fiabilité du composant est intimement liée à la vitesse avec laquelle cette chaleur interne est dissipée. Cette vitesse est fonction de la nature de diffusion, du choix du matériau, de sa géométrie, et de l'environnement immédiat du composant.

Comprendre le processus d'échange et de diffusion de la chaleur est incontournable dans un grand nombre d'applications technologiques et couvre plusieurs applications tels les systèmes industriels, la médecine, le spatiale, les circuits et équipements électroniques, etc.... Bien que ce problème est étudié depuis fort longtemps, trouver une technique ou un outil d'aide à la conception simple et efficace, est toujours d'actualités[1].

L'étude du comportement thermique des composants électroniques et leur assemblage sous forme de modules tient aujourd'hui une place capitale dans la conception des fonctions électroniques de base. Un échauffement excessif dégrade les performances de tout composant, réduit sa durée de vie et peut provoquer sa défaillance, ainsi l'étude de son comportement thermique aidera donc à prévoir sa fiabilité, sa durée de vie et l'évolution de ses performances dans le temps. Plusieurs méthodes de refroidissement ont été proposées dans le but d'améliorer le transfert de chaleur et augmenter l'efficacité des systèmes de refroidissement [2]. Dans ce chapitre, on présentera l'effet de la température sur les composants en particuliers et en équipements électroniques en générale. De plus, nous présenterons les différentes modes de transfert ainsi que les différentes méthodes de refroidissements conçus pour évacuer la chaleur interne générée dans les composants électroniques.

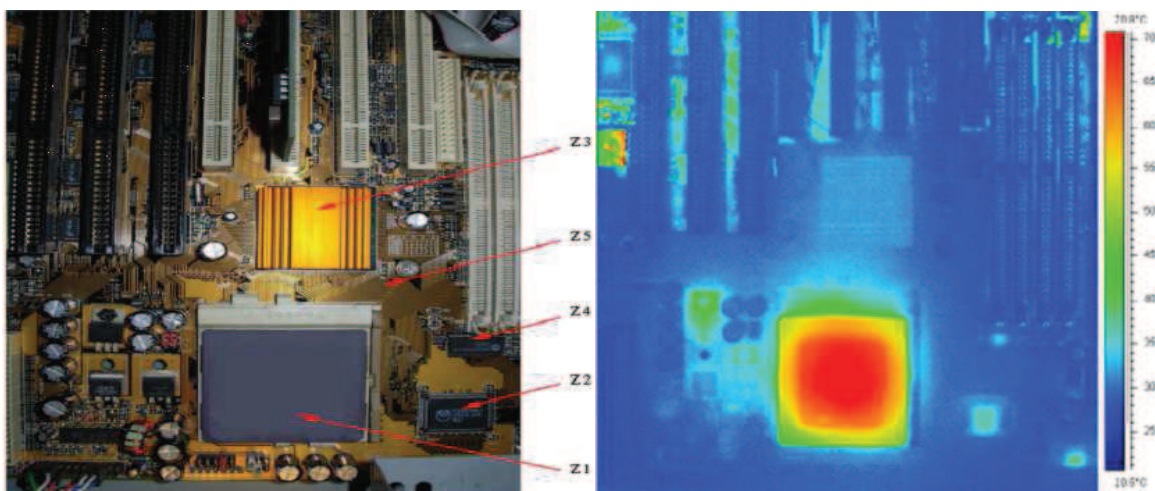
I.2 L'effet de la température sur les composants électroniques

La chaleur est un mode de transfert d'énergie qui concerne la structure atomique d'un matériau constituant tout système électronique. Lorsque ce système reçoit une certaine quantité de chaleur, l'agitation des particules qui le composent augmente. En électricité, le passage d'un courant électrique dans un conducteur provoque un dégagement de chaleur: c'est ce qu'on appelle l'effet Joule. Plus l'intensité est importante, plus la chaleur dissipée est grande. Du point de vue de la terminologie, on doit distinguer la chaleur, qui est une grandeur

d'échange d'énergie, et la température, qui est une grandeur, mesurée en °C, propre au corps considéré[3].

L'augmentation de la fréquence de fonctionnement et le développement en miniaturisation a engendré plusieurs problèmes dus à l'augmentation considérable du flux de chaleur généré dans les composants électroniques. Si la chaleur n'est pas dissipée en temps voulu, la température de jonction sera supérieure à la température de fonctionnement maximale mentionnée par le constructeur, le contrôle thermique devient donc de plus en plus immédiat et important.

M. Rebayet al. [4] ont montré par thermographie infrarouge que la température globale d'un microprocesseur ne reflète pas la topographie thermique réelle de la puce intégrée. Comme le montre la figure I-1, une partie dégage plus de chaleur que les autres. C'est ce que l'on appelle un point chaud ("hotspot"), représenté en rouge sur la figure. Ces pics de température risquent de causer de graves dégâts sur une zone précise du processeur.



(a) Image d'une carte mère

(b) Thermographie infrarouge

Figure I.1 Echauffement d'un microprocesseur dans son milieu de fonctionnement [4]

La température intéresse l'électronicien pour au moins deux raisons:

- ▶ Capturer, mesurer, réguler la température d'un système ou d'un lieu;
- ▶ Apprécier l'influence de la température sur le comportement d'un dispositif

En effet, l'élévation de température, ou échauffement, d'un composant peut modifier sensiblement son comportement ou ses performances. Il est donc important de refroidir suivant

le cas, certains appareils (par exemple, un régulateur ou un processeur). A cet effet, on veillera à assurer une aération suffisante et, au besoin, on adjoindra au composant un radiateur ou un ventilateur.

Un autre point auquel il convient d'être attentif est l'humidité, résultant de la condensation lors des variations de température. L'humidité, comme la poussière, sont des grand ennemis de l'électronique vu leur influences sur le fonctionnement normale des systèmes électroniques[5].

Les composants à base semi-conducteurs de type commercial fonctionnent normalement dans une plage de 0°C à 70 °C et ceux de type industriel supportent des températures allant de -65 °C à 150 °C. Dans les montages électroniques, dès lors qu'une certaine puissance est en jeu, il est important de veiller à la dissipation de la chaleur provoquée par le passage du courant dans certains composants, et en particulier les circuits intégrés (amplificateurs, régulateurs, etc...)

La probabilité de défaillance dans les systèmes électroniques est fortement dépendante de la température de fonctionnement, comme indiqué dans la Figure I.2. La surcharge thermique est la cause de défaillance la plus fréquente dans les systèmes électroniques modernes. Par conséquent, il est vraiment important de comprendre les caractéristiques thermiques statiques et dynamiques des modules électroniques, en particulier concernant la température de jonction[6].

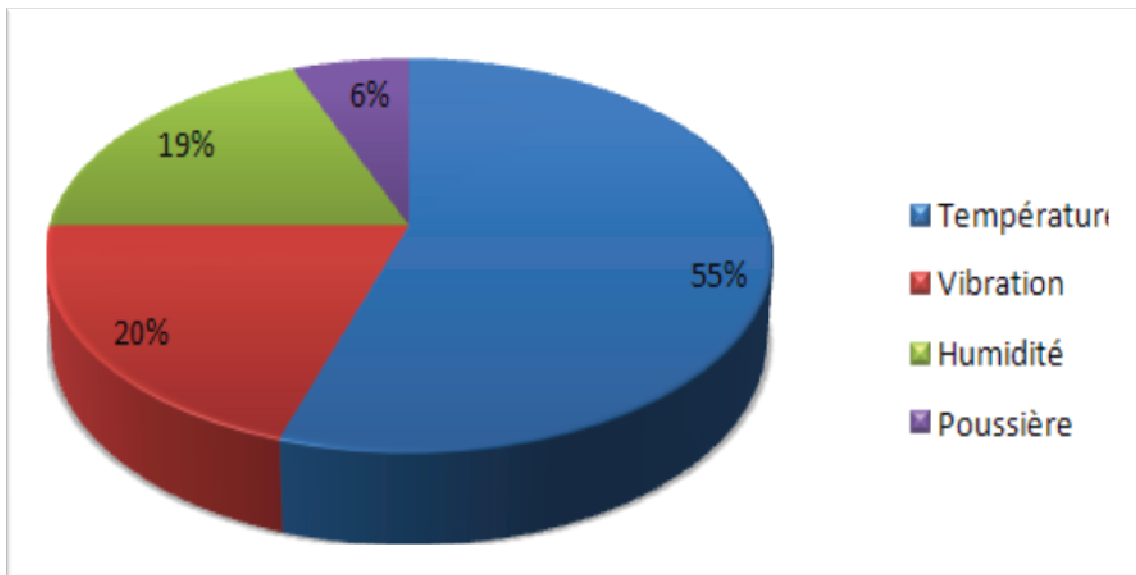


Figure I.2 Causes principales de la défaillance électronique (Référence: USA Air Force Avionics Integrity Program [6]).

L'élévation interne de la température se manifeste par[7]:

- Variation des performances électriques : la température peut être une valeur limite au-delà de laquelle le fonctionnement n'est pas garanti. La dérive des paramètres provoquent une diminution des performances pouvant aller plus ou moins brutalement jusqu'à la défaillance ;
- Le boîtier « packaging » qui est soumis à des gradients de température très importantes. Il existe des températures critiques pour lesquelles se produisent des changements d'état de structures même de boîtiers ;
- Les cycles thermiques ou le fonctionnement en mode impulsif, auxquels sont soumis les matériaux ayant des coefficients de dilatation différents, induisent des forces très importantes, peuvent conduire à une rupture instantanée ou créer une fatigue qui provoque une rupture à plus ou moins long terme exemples de soudures en modules électroniques.

Le packaging et la gestion thermique dans les équipements électroniques sont devenus des enjeux importants en raison de l'augmentation des niveaux de puissance et de la miniaturisation des dispositifs. Avec l'arrivée de conditionnements plus denses et des fréquences de fonctionnement plus élevées, le coût, la fiabilité et la taille ont été améliorés, mais, la gestion thermique n'a pas suivi suffisamment cette évolution. La figure I.3 présente l'évolution de la puissance thermique dissipée pour un transistor (FETS et IGBTs) et un conducteur Smart. Nous notons une augmentation considérable de la puissance thermique dissipée par les transistors. Nous remarquons également, une complexité de plus en plus importante en systèmes embarqués[8,9].

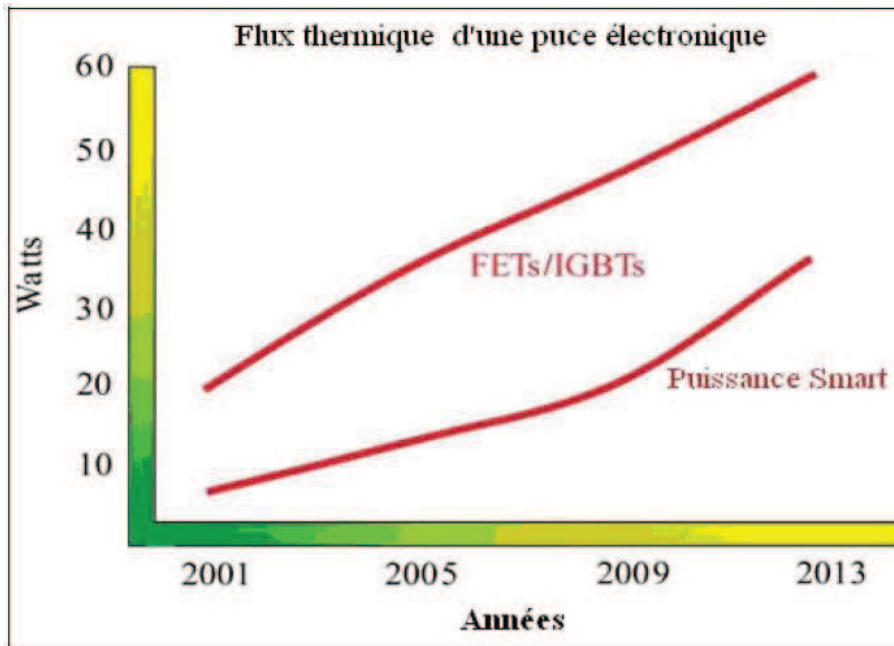


Figure I.3 Evolution de la puissance thermique dissipée pour un transistor (FETS et IGBTs) et un conducteur Smart [8]

La température est en général l'ennemi de l'électronique. La température des composants dépendra directement de la chaleur dissipée, du rendement voulu et du choix du bon boîtier.

I.3 Les lois fondamentales du transfert de chaleur

Le transfert thermique peut être défini comme un échange de chaleur lié à l'existence d'une différence de températures. Nous distinguons trois modes de transfert de chaleur : conduction, rayonnement et convection, Figure I.4.

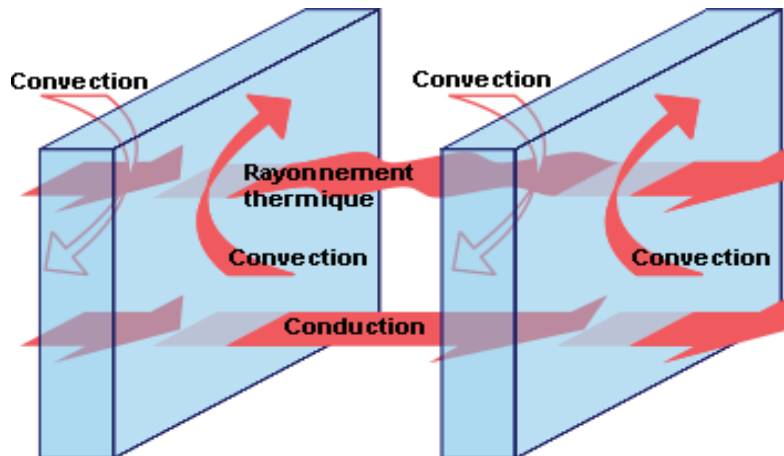


Figure I.4 Modes de transfert de chaleur

Dans le cas des circuits électroniques, l'évacuation de la chaleur générée au sein des composants (vers la face arrière) s'effectue principalement par conduction ; mais également par convection et rayonnement sur les parties supérieures ou latérales [2], [10].

I.3.1 Transfert de chaleur par conduction

C'est le mode de transfert qui apparaît toujours dans un fluide ou un solide dès qu'il y a un gradient de température. La conduction est un transfert de chaleur qui se produit à l'échelle des atomes ou des molécules. C'est un transfert par contact direct entre les molécules. Il s'agit d'un transfert thermique de proche en proche par chocs microscopiques entre particules d'énergie différente, les particules les plus énergétiques transmettant de l'énergie cinétique à celles qui en ont moins, Figure I.5. D'un point de vue phénoménologique elle est décrite par la loi de Fourier [11].

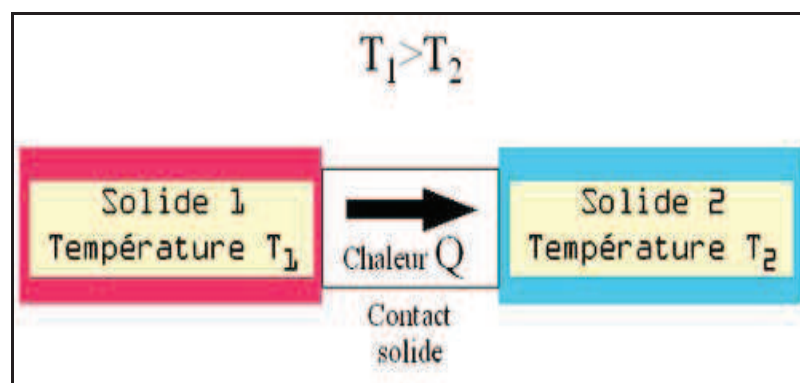


Figure I.5 Transfert de chaleur par conduction

a. La loi de Fourier

La nature de « la chaleur » n'a vraiment été comprise qu'à la fin du XIX^{ème} siècle avec le développement de la thermodynamique statistique.

Néanmoins, vers 1800, le mathématicien Joseph Fourier travailla sur l'étude de la transmission de la chaleur, sans en connaître sa nature exacte. Il supposa que la chaleur se propageait des zones chaudes aux zones froides perpendiculairement aux surfaces isothermes et proportionnellement à la différence de température. Ce mode de transfert est celui de la conduction, [12] :

$$q = -k \text{grad}(T) \quad (I.1)$$

ou :

q : est le flux de chaleur local exprimé en W/m^2 .

k : est la conductivité thermique en $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

T : est la température exprimée en K (ou en $^{\circ}\text{C}$).

$\text{grad}(T)$: est gradient de température local en K (ou en $^{\circ}\text{C}$).

Si l'on considère le cas particulier d'une diffusion à une dimension 1D avec des valeurs particulières : On arrive à une élévation de 1K (ou 1°C) après une diffusion de la chaleur par conduction sur une distance de 1m dans un matériau homogène en régime permanent (Figure I.6).

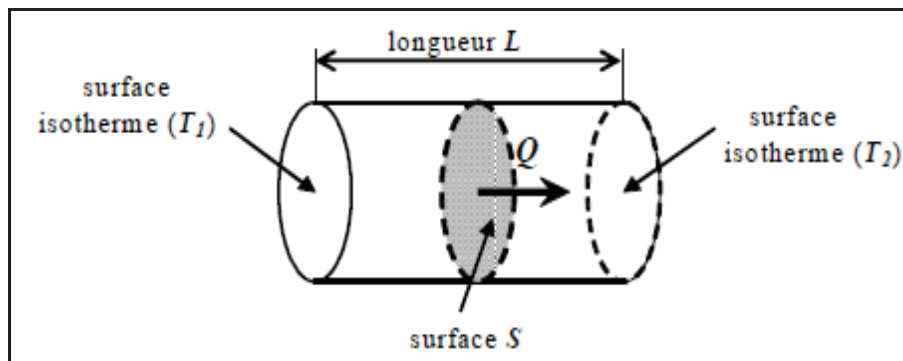


Figure I.6 Conduction de la chaleur dans un barreau

De façon macroscopique, le phénomène de conduction thermique en régime permanent suit l'équation suivante:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + Q_i \quad (I.2)$$

Où

ρ est la masse volumique en $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

c_p est la capacité calorifique en $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

k est la conductivité thermique en $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

T est la température exprimée en K (ou en $^{\circ}\text{C}$).

Q_i est la puissance volumique ($W \cdot m^{-3}$) générée dans le corps

Pour analyser le régime transitoire, il est plus simple de considérer dans un premier temps le cas 1D. Les hypothèses de l'équation de la chaleur : Flux de chaleur unidimensionnel appliqué en surface sur l'une des limites de l'élément de volume en question, dissipation locale volumique de puissance possible. Le bilan des puissances dans l'élément dz situé à la côte z donne : Puissance entrante + Dissipation locale = Puissance sortante + Part de la chaleur stockée, Figure I.7. Ce qui se traduit par :

$$p(z, t) S + Q_i(z, t) S dz = p(z + dz, t) S + \rho c_v \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) S dz \tag{I.3}$$

Où:

$p(z, t) S$: Puissance entrante.

$G(z, t) S dz$: Dissipation locale volumique.

$p(z+dz, t) S$ Puissance sortante.

$\rho c_v \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) S dz$: Part de la chaleur stockée.

Avec :

$T(z, t)$: température locale exprimée en K ou °C.

$Q_i(z, t)$: densité volumique de puissance dissipée en W/m^3 .

C_v : chaleur spécifique par unité de volume en J/m^3 .

S : section du barreau en m^2 .

z : variable d'espace en m.

t : temps en s.

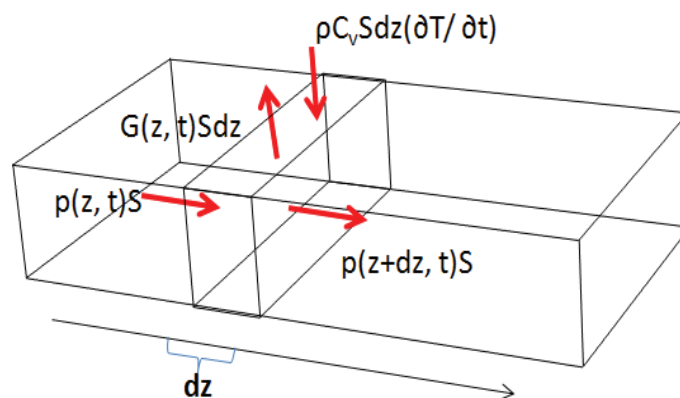


Figure I.7 Bilan de puissance thermique à l'instant t dans un élément de volume

De manière plus compacte, l'équation s'écrit comme suit :

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + G(z, t) = \rho c_v \frac{\partial T}{\partial t} \quad (I.4)$$

La conductivité thermique k ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$) d'un corps caractérise sa propriété à transmettre la chaleur. Généralement, les bons conducteurs thermiques sont aussi de bons conducteurs électriques.

b. Conductivité thermique

La conductivité thermique k exprime la quantité d'énergie sous forme de chaleur (en termes de flux donc de puissance exprimée en Watt) que peut transmettre une épaisseur de matériau (solide ou fluide au repos) soumis à une différence de température. Elle représente donc la quantité de chaleur transférée par unité de surface et par unité de temps sous un gradient de température.

La chaleur non dissipée provoque une élévation de la température du composant qui peut donc entraîner une baisse de la mobilité des électrons se traduisant par une diminution des performances électriques aux hautes fréquences. C'est pourquoi, pour des applications de puissance, une forte conductivité thermique est préférable [13] [14].

La loi de Wiedemann-Franz est la relation entre la conductivité électrique et la conductivité thermique : $k = L \cdot T \cdot \sigma$, où L est le nombre de Lorentz ($2,45 \cdot 10^{-8} W \cdot \Omega / K^2$), T est la température en K, σ la conductivité électrique en S/m et k la conductivité thermique en $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$

Cette relation traduit le fait qu'un matériau possédant une conductivité électrique importante possède également une conductivité thermique élevée. La conductivité thermique d'un matériau traduit donc sa capacité à dissiper la chaleur, or la résistance thermique (notée R_{th}) est inversement proportionnelle à la conductivité thermique et directement liée à la puissance

dissipée : $R_{th} \propto k$ et $R_{th} = \frac{\Delta T}{P_{diss}}$ où ΔT est l'élévation de la température en K et P_{diss} est la puissance dissipée en W.

Ainsi, la conductivité thermique du carbure de silicium et surtout celle du diamant sont largement supérieures à celles des autres matériaux comme on peut le voir dans le tableau I.1.

Ces matériaux représentent donc les meilleurs matériaux pour évacuer la chaleur et sont donc à privilégier pour les applications de puissance. Bien que plus faible, la conductivité thermique du GaN est supérieure à celle du GaAs et son association avec un substrat d'accueil SiC permet d'améliorer ses performances thermiques.

| Matériaux | Conductivité thermique K(WK ⁻¹ cm ⁻¹) |
|-----------|---|
| Ge | 0.6 |
| Si | 1.5 |
| GaAs | 0.5 |
| 3C-SiC | 4.5 |
| 6H-SiC | 4.5 |
| 4H-SiC | 4.5 |
| GaN | 1.3 |
| C | 20 |

Tableau I.1 Conductivités thermique de différents semi-conducteurs.

c. Diffusivité thermique

L'équation de conduction peut être réarrangée pour regrouper trois variables importantes ensemble: la densité, la capacité calorifique et la conductivité thermique.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1.5)$$

Dans laquelle la diffusivité thermique α est:

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \quad (1.6)$$

La diffusivité thermique est une propriété importante pour la conduction de chaleur, car elle détermine la rapidité avec laquelle un matériau peut dissiper sa température et s'adapter à son environnement thermique environnant.

d. Résistance thermique

La résistance thermique (R_{th}) quantifie le degré de difficulté opposé par le matériau à l'écoulement d'un flux de chaleur entre deux isothermes (T_H et T_B). Dans ce cas la loi de Fourier s'exprime :

$$\Delta T = R_{th} Q \quad (1.7)$$

Prenons l'exemple d'un barreau, la résistance thermique due à la conduction est égale à $L / (k.S)$, avec S la section de passage du flux de chaleur. Dans le cas de la convection la résistance thermique prend l'expression de grandeur exprimée en K/W ou °C/W. En considérant l'analogie électrique – thermique, on peut spécifier le Tableau I.2 suivant, [15].

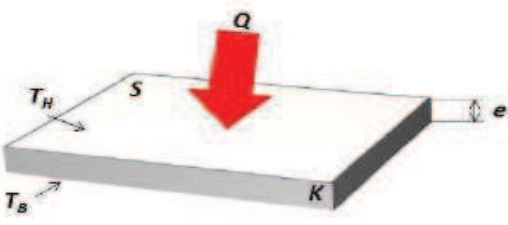
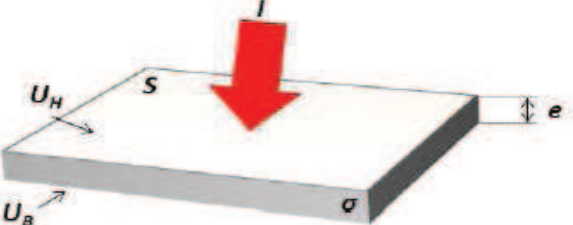
| symbole | Thermiques | unité | symbole | Electriques | unité |
|---|------------------------|------------------|--|-------------------------|---------------------|
| T | Température | K | U | Tension | V |
| q_0 | Densité de puissance | W/m ² | J | Densité de courant | A/m ² |
| Q | Puissance calorifique | W | I | Courant | A |
| k | Conductivité thermique | W/(K.m) | σ | Conductivité électrique | A/(V.m) =1/(Ω.m) |
| R_{th} | Résistance thermique | K/W | R | Résistance électrique | Ω |
| $R_{th} = \frac{e}{k \cdot S}$ | | | $R = \frac{e}{\sigma \cdot S}$ | | |
|  | | |  | | |

Tableau I.2 L'équivalence entre grandeurs thermiques et électriques

I.3.2 Transfert de chaleur par convection

Le transfert de chaleur par convection intervient à la limite de séparation de deux phases de natures différentes (air/liquide, air/solide, liquide/solide). La convection résulte de la combinaison du transfert de chaleur par conduction (diffusion) et du transport d'énergie par l'écoulement des particules fluides. Comme pour le mode de transfert par conduction, Figure I.8 [16]. Imaginons un solide baignant dans un fluide en mouvement. Si le solide et le fluide ne sont pas à la même température, la chaleur est échangée entre le solide et les particules fluides qui sont à son contact. Cet échange se fait par conduction. Mais la particule de fluide, dès qu'elle a échangé de la chaleur, se déplace et est remplacée, au contact du solide, par une autre particule. Par ailleurs, la particule fluide initiale rencontre, au cours de son déplacement, d'autres particules fluides avec lesquelles elle échange de la chaleur par conduction.

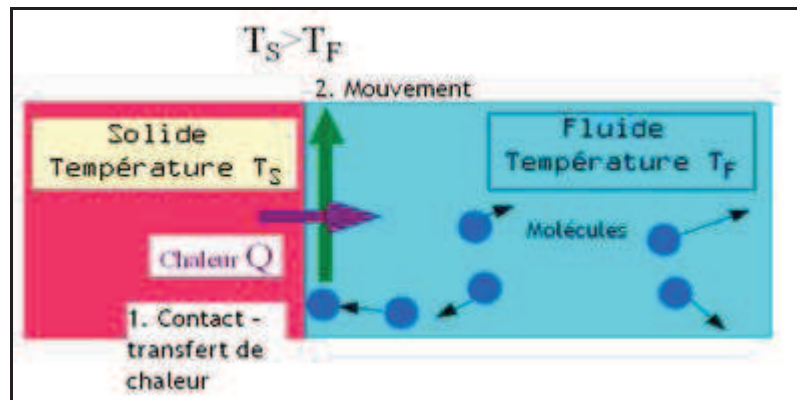


Figure I.8 Transfert de chaleur par convection

Le mécanisme élémentaire de transfert de chaleur est la conduction thermique mais le phénomène global, qui est la convection thermique, résulte de la combinaison de cette conduction avec les mouvements du fluide qui obéissent à des lois spécifiques [8]. On distingue deux types de convections :

I.3.2.1 Convection naturelle

Mise en mouvement du fluide sous l'action de la gravité. Dans laquelle le mouvement résulte de la variation de la masse volumique du fluide avec la température ; cette variation crée un champ de forces gravitationnelles qui conditionne les déplacements des particules du fluide, Figure I.9 [16].

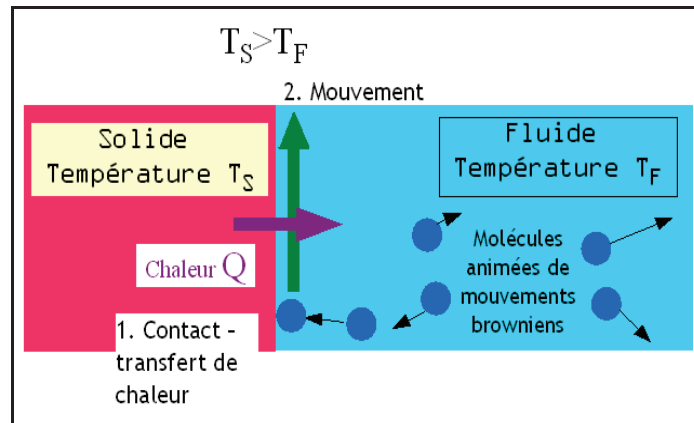


Figure I.9 Transfert de chaleur par convection naturelle

I.3.2.2 Convection forcée

Mise en mouvement du fluide par un moyen mécanique, dans laquelle le mouvement est provoqué par un procédé indépendant des phénomènes thermiques, Figure I.10; c'est donc un gradient de pression extérieur qui provoque les déplacements des particules dans le fluide. L'étude de la transmission de chaleur par convection est donc étroitement liée à celle de l'écoulement des fluides.

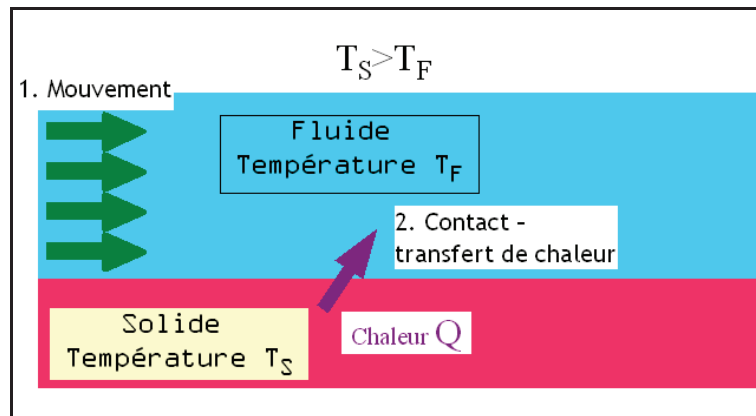


Figure I.10 Transfert de chaleur par convection forcée

Le flux de chaleur qui intervient entre une surface chaude et le milieu ambiant (fluide) est proportionnel à l'écart de température présente entre ces deux milieux. Pour cette raison on introduit un coefficient de proportionnalité h , appelé coefficient d'échange thermique par convection (ou coefficient de convection). On remarquera que ce flux est aussi proportionnel à la surface mise en contact avec le fluide. D'où l'équation de convection suivante [17]:

$$Q = h \cdot S(T_H - T_B) \text{ (I.8)}$$

Q : est flux de chaleur en W.

h : est coefficient de convection en $W/m^2 \cdot K$.

S : la surface d'échange entre le solide et le fluide en m^2

I.3.3 Transfert de chaleur par Rayonnement

Le transfert d'énergie par rayonnement, contrairement aux deux précédents, ne nécessite pas de milieu matériel. Le transport se fait par des ondes électromagnétiques. Un exemple typique de ce mode de transfert est l'échauffement de la terre par le soleil. La puissance transmise est en fonction de la température : $P \sim (T_1^4 - T_2^4)$.

Le rayonnement thermique concerne les ondes électromagnétiques dont la longueur d'onde couvre le spectre ultraviolet et le spectre infrarouge (de 0,01 à 100 μm) en passant par le spectre visible (0,38 à 0,76 μm), Figure I.11[18].

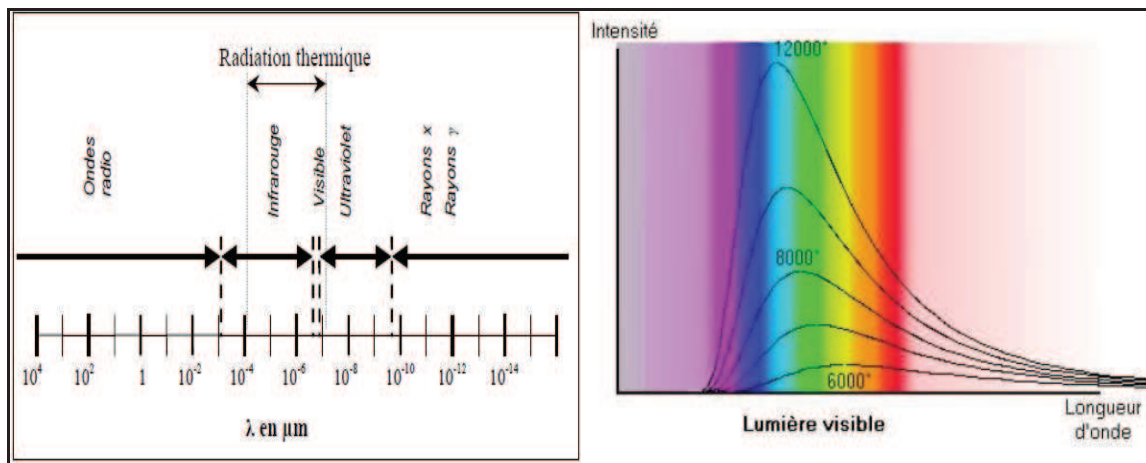


Figure I.11 Transfert de chaleur par convection forcée[18]

Le rayonnement peut être décomposé en radiations monochromatiques qui concernent une longueur d'onde déterminée. Lorsqu'un flux d'énergie rayonnée rencontre un corps, une partie de l'énergie est absorbée, une partie est réfléchi, une partie continue son trajet après avoir traversé le corps. Dans le cas des transferts thermiques, le rayonnement consiste à un

échange de chaleur entre deux parois séparées par un milieu transparent, Figure I.12. Pour deux plans parallèles, ce flux peut se mettre sous la forme[18] :

$$Q = \varepsilon_{12} \sigma_s S (T_1^4 - T_2^4) \quad (\text{I.9})$$

Q est flux de chaleur en W.

ε_{12} est l'émissivité équivalente de l'ensemble paroi A- paroi B.

σ_s est la constante de Stéfán en $\text{W/K}^4 \cdot \text{m}^2$

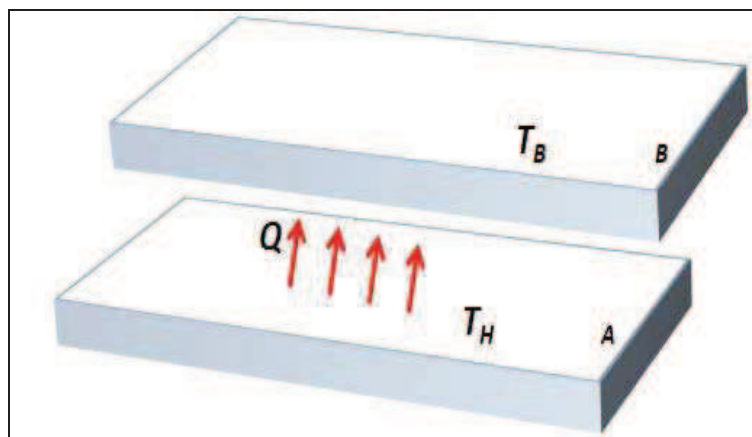


Figure I.12 Principe du rayonnement thermique

I.4 Les mécanismes de refroidissement des composants électroniques

Avec l'augmentation de la puissance dans les appareils électroniques et la réduction de leurs dimensions globales, la gestion thermique devient un élément de plus en plus important dans la conception de systèmes électroniques car la fiabilité, la performance et l'espérance de vie des équipements électroniques sont inversement proportionnels à la température.

La relation entre la fiabilité et la température de fonctionnement d'un dispositif à semi-conducteur de silicium typique montre qu'une diminution de la température correspond à une augmentation exponentielle de la fiabilité et de l'espérance de vie du dispositif. Par conséquent, longue durée de vie et une performance fiable d'un composant peuvent être obtenues en contrôlant efficacement la température de fonctionnement de l'appareil dans les limites fixées par la technologie de leur conception[5].

Les dissipateurs de chaleur sont des dispositifs qui augmentent la dissipation de chaleur à partir d'une surface chaude, en général le cas d'un composant de génération de chaleur, à une température ambiante basse température, généralement de l'air. Ceci permet de plus à dissiper la chaleur / ou à baisser la température de fonctionnement du dispositif.

Le but principal d'un dissipateur de chaleur est de maintenir la température de l'appareil en dessous de la température maximale admissible spécifiée par le fabricant de l'appareil. Pour les modules électroniques, plusieurs méthodes de refroidissement ont été proposées (plaques de refroidissement, dissipateurs thermiques en aluminium, ventilateur) [19,20].

I.4.1 Refroidissement à air

La technologie de refroidissement par air est l'une des plus communes et largement utilisée. On utilise l'air comme fluide caloporteur qui vient en contact avec des radiateurs sous forme naturelle (convection naturelle) ou pulsée (convection forcée) [16].

I.4.1.1 Convection naturelle

Les composants électroniques sont refroidis par circulation d'air libre. Cette technique est appliquée sur les systèmes, dont la chaleur dégagée est faible [1].

Le refroidissement passif indique qu'aucune pièce mécanique n'est en mouvement. Un simple dissipateur (un radiateur) est fixé sur le composant à refroidir, afin d'augmenter la surface de contact avec l'air ambiant, et donc de faciliter la dissipation thermique. Le refroidissement à air passif est d'abord constitué d'un dissipateur de chaleur (Figure I.13) dimensionné suivant la surface de refroidissement, celui-ci étant toujours choisi pour ses propriétés thermiques (bonne diffusivité et grande capacité thermiques, cuivre, aluminium). La chaleur émise par le composant s'épanouit dans le dissipateur thermique avant d'être dissipée dans l'air ambiant. L'ajout du dissipateur de chaleur peut donc grandement améliorer l'efficacité du refroidissement [18].

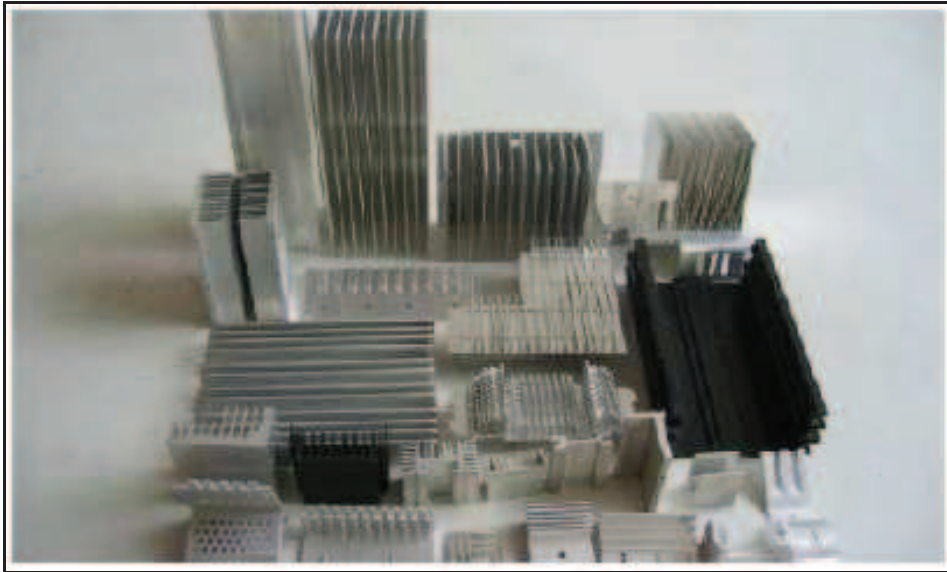


Figure I.13 : Système de refroidissement à air passif

I.4.1.2 Convection forcée

Pour améliorer le transfert thermique vers le milieu ambiant, on peut utiliser un ventilateur qui augmente le débit d'air à travers la surface d'échange afin de créer un flux d'air sur celui-ci et donc de faciliter le transfert thermique entre l'air et les ailettes du radiateur (Figure I.14). Ce système est devenu un standard pour le refroidissement des microprocesseurs. Le bloc formé par le dissipateur et le ventilateur est souvent appelé ventirad (Ventilateur-Radiateur), Figure I.14.

Certes, les radiateurs permettent d'évacuer vers l'air ambiant la chaleur qu'ils produisent, mais dans certains cas, il n'existe pas de radiateur pour évacuer toute la chaleur produite (cas des amplificateurs de très grande puissance). C'est pourquoi dans certains cas, on ne peut pas se contenter d'une évacuation de chaleur par méthode passive.

Les principaux défauts d'un refroidissement actif sont le bruit émis par le souffle du ventilateur, ainsi que l'accumulation de poussière.

La technologie de refroidissement à air présente plusieurs avantages : la sécurité du fait qu'aucun liquide n'est nécessaire (pas de risque de corrosion), le coût est limité et la durée de vie est satisfaisante. Toutefois, le consensus actuel sur la méthode traditionnelle de refroidissement par air à haute puissance atteindra vite ses limites et l'utilisation de

ventilateurs standards engendrent un niveau de bruit nuisible [21].

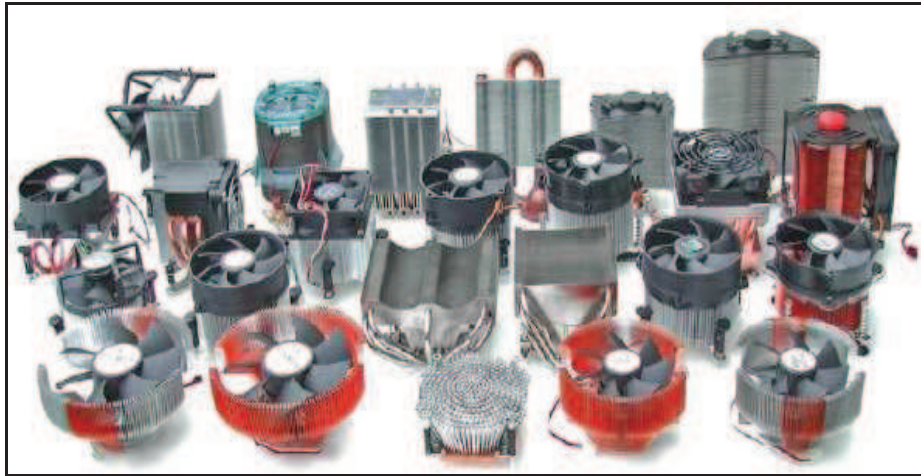


Figure I.14 Exemples de systèmes de refroidissement à air pulsé

I.4.2 Refroidissement par liquide

Le refroidissement par liquide (souvent de l'eau additionnée) est une autre méthode d'évacuation de la chaleur vers le milieu ambiant. Le principal mécanisme de refroidissement par liquide est le transfert de chaleur par convection tout comme pour l'air. Le refroidissement par liquide est couramment utilisé pour le refroidissement des moteurs à combustion interne et dans les grandes installations industrielles comme les centrales à vapeur, les générateurs hydroélectriques, les raffineries de pétrole et usines chimiques. D'autres utilisations incluent le refroidissement à huile lubrifiante dans les pompes, de même on peut trouver à l'intérieur des ordinateurs haut de gamme un refroidissement incluant un liquide.

Les avantages d'utiliser un liquide de refroidissement par rapport à l'air sont liés à la possibilité de tirer profit de plus grandes valeurs de chaleur spécifique, de densité et de conductivité thermique ainsi le coefficient d'échange convectif est beaucoup plus élevé [22].

Le système en Figure I.15 est plus efficace qu'un refroidissement à air et permet d'extraire la chaleur au plus près et la dissiper de façon déportée dans un radiateur qui peut être large et performant.

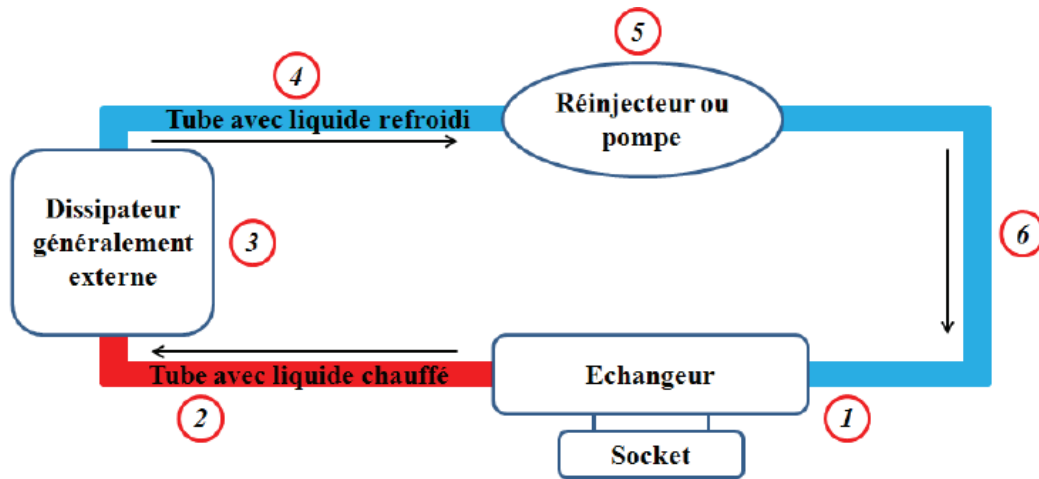


Figure I.15 Schéma simplifié de refroidissement par liquide

I.4.2.1 Refroidissement par plaque à Eau

Une technologie robuste consiste à utiliser une cavité assez proche de la source de chaleur dans laquelle le liquide circule de manière turbulente. Comme le liquide utilisé est souvent à base d'eau, cette technologie se nomme plaque à eau (Figure I.16).

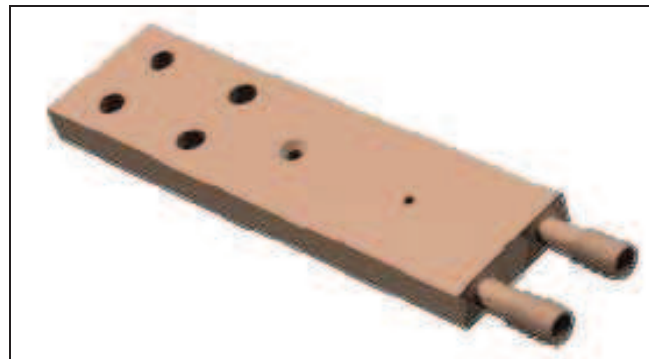


Figure I.16 Structure de plaque à eau [19].

Une pompe est nécessaire pour contraindre le passage d'un fluide entre deux plaques après son passage dans un canal étroit afin de créer de la turbulence. Les avantages de l'utilisation d'une plaque à eau [23] :

1. Efficacité du transfert de chaleur: les valeurs du coefficient de transfert de chaleur sont 3 à 5 fois plus élevées que celles d'une tubulaire simple.
2. Fonctionnement régulé : par le biais d'un contrôle précis de la température de sortie, le débit peut être régulé de façon à optimiser l'efficacité du refroidisseur.

I.4.2.2 Refroidissement par micro-canaux

Le développement rapide du domaine de la microélectronique et l'intégration croissante de transistors à haute vitesse dans les appareils électroniques, la densité de dissipation thermique visée devrait atteindre 500 W/cm^2 pour les applications futures [19], [24]. Les micro-canaux qui sont des dispositifs à refroidissement très performants utilisés en systèmes embarqués liés à l'aérospatiale par exemple et en électronique médicale, Figure I.17.

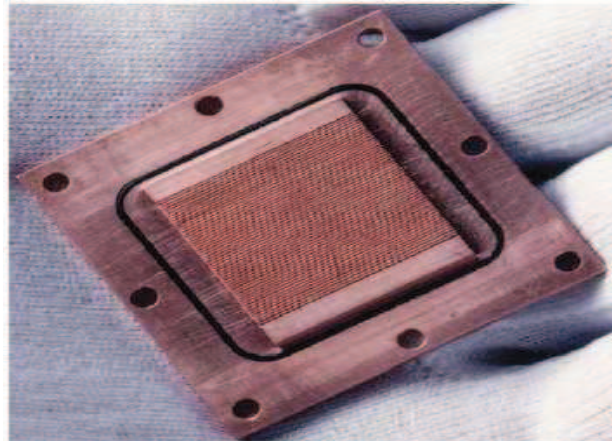


Figure I.17 Mini-échangeur avec micro-canaux de 0.2mm de largeur

Par rapport aux échangeurs de chaleur conventionnels, les échangeurs de chaleur à micro canaux n'offrent pas seulement un bon coefficient de transfert thermique, mais offre également une excellente robustesse notamment devant la pression du liquide [24].

Les principaux avantages :

1. Les micros canaux agissent comme plusieurs micro-plaque-ailettes. Ils augmentent la surface d'échange. la résistance thermique de convection est donc réduite.
2. Pour utiliser les micro-canaux, la plate forme sous boitier est supprimée, donc la résistance thermique de conduction est réduite.
3. En faisant appel à la technologie des micro-canaux on peut réduire la taille de système de refroidissement.

I.4.3 Les caloducs miniatures

Un caloduc est un système qui, en profitant du changement de phase d'un fluide caloporteur, prélève de la chaleur en un point (évaporateur) et la transporte vers un autre (condenseur) sans utiliser de pompe ou autre artifice mécanique. Il est constitué d'une enceinte fermée dont les parois internes sont recouvertes par un réseau capillaire saturé de liquide. Il est généralement

composé de trois parties appelées évaporateur, condenseur et zone adiabatique. Son principe de fonctionnement est représenté sur la figure I.18.a. Au niveau de l'évaporateur, le liquide se vaporise et va vers le condenseur où il repasse en phase liquide. Il est alors ramené vers l'évaporateur grâce au réseau capillaire qui joue le rôle de moteur du caloduc. Avec un réseau capillaire adapté, le caloduc peut fonctionner dans toutes les positions et par conséquent hors gravité. L'intérêt essentiel du principe caloduc est qu'il génère entre la zone d'évaporation (source chaude) et la zone de condensation (source froide) une différence de température très faible. On dit alors que le caloduc joue le rôle de court circuit thermique, [25].

Ceci explique le véritable intérêt du principe caloduc. En effet, il permet d'extraire la chaleur d'un endroit difficilement accessible et de la transférer vers une zone pouvant être facilement refroidie. La Figure I.18.b présente l'utilisation d'un caloduc dans le cas du refroidissement du microprocesseur d'un ordinateur portable. Nous voyons que, pour refroidir le microprocesseur, le concepteur a inséré un caloduc permettant d'amener la chaleur du composant vers un côté de l'ordinateur où se trouve un dissipateur à air. Un tel système est appelé « caloduc miniature » lorsque son diamètre (cas du caloduc cylindrique) ou son épaisseur (cas du caloduc plat) est de seulement quelques millimètres [25].

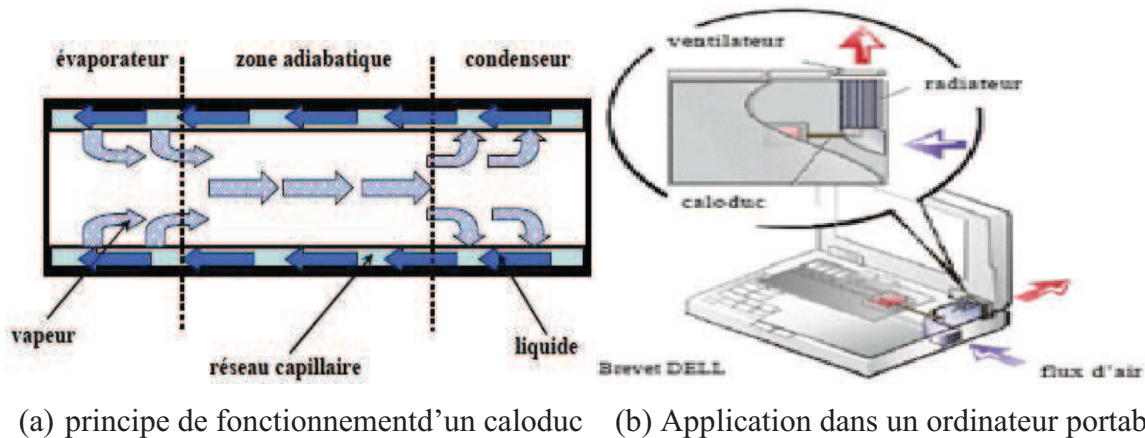


Figure I.18 Principe de fonctionnement et utilisation d'un caloduc

L'évolution des techniques de refroidissement est étroitement liée à l'augmentation de la puissance et de la complexité des circuits électroniques. La tendance de l'industrie électronique est de dissiper plus de puissance dans de plus petits modules, ce qui a créé des défis de gestion thermique croissants. La densité de flux a augmenté dans les nouvelles

génération de microprocesseurs, quant aux convertisseurs de puissance leur volume s'est vu réduire d'une manière importante.

I.5 Notion de Boitier

Le rôle du boîtier est de relier le monde microélectronique du circuit intégré (CI) au monde microélectronique de l'utilisateur, protéger le CI fragile contre les effets néfastes de l'environnement, comme contre les effets électromagnétiques et favoriser la modularité (mettre les systèmes électroniques sous forme de module) et leur réutilisation.

Un boîtier est un sous-ensemble intégrant de l'électronique, de la mécanique ou même de l'optoélectronique, permettant d'optimiser la mise en forme (volume, poids), concrétiser les performances et la fiabilité ainsi que le coût, ceci grâce à l'utilisation des techniques d'interconnexion et de conditionnement les mieux adaptées aux domaines d'application [26].

La Figure I.19 présente une illustration simplifiée d'un module de puissance. Ce module se compose d'un élément actif qui est la puce de puissance à semi-conducteur (IGBT ou MOSFET) qui assure la fonction électrique d'interrupteur. Le substrat isolant permet à la fois l'isolation électrique et l'évacuation des calories dissipées (pertes dans les puces). Il joue également le rôle d'un support mécanique pour les connexions électriques. L'ensemble est ensuite reporté sur le refroidisseur par l'intermédiaire d'un support métallique (base plate ou semelle). Le module est protégé par un boîtier adapté aux connexions électriques, entre le boîtier et l'assemblage de puissance, généralement on rajoute la graisse thermique pour éviter la formation d'arcs électriques et pour protéger le module des impuretés [26].

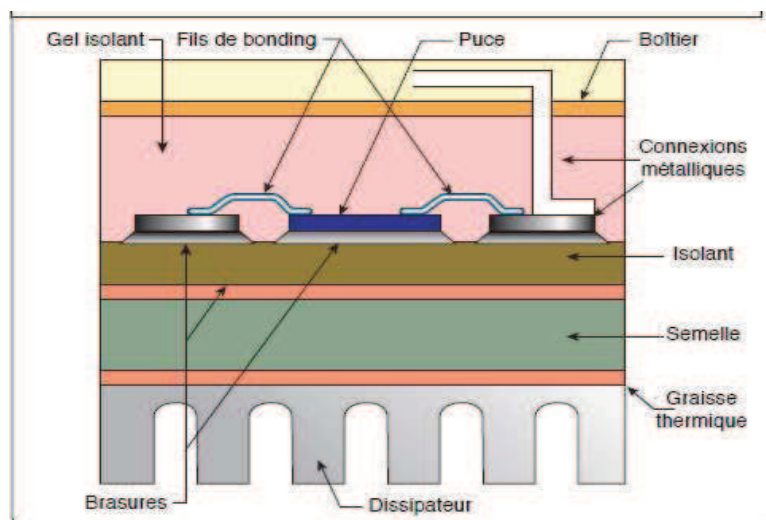


Figure I.19 Assemblage classique d'un module de puissance monté sur son radiateur

Les connexions internes dans un boîtier, présentées comme exemples en Figures I.20 et I.21, assurent la circulation de la puissance électrique et des signaux de commande vers les éléments actifs.

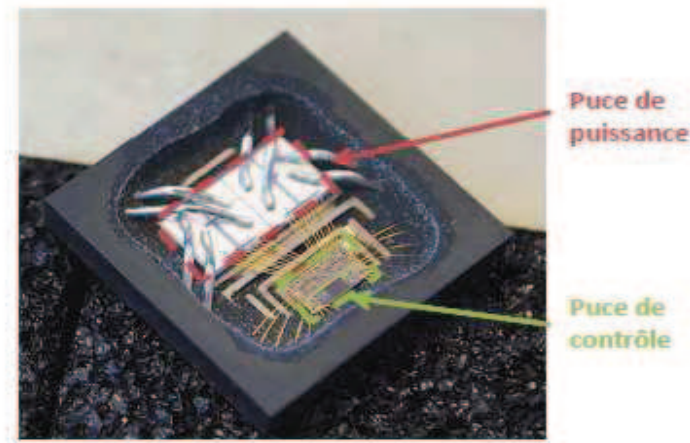


Figure I.20 Composant Smart Power Freescale Semiconductor de type Quad (SPQ-15)[26]

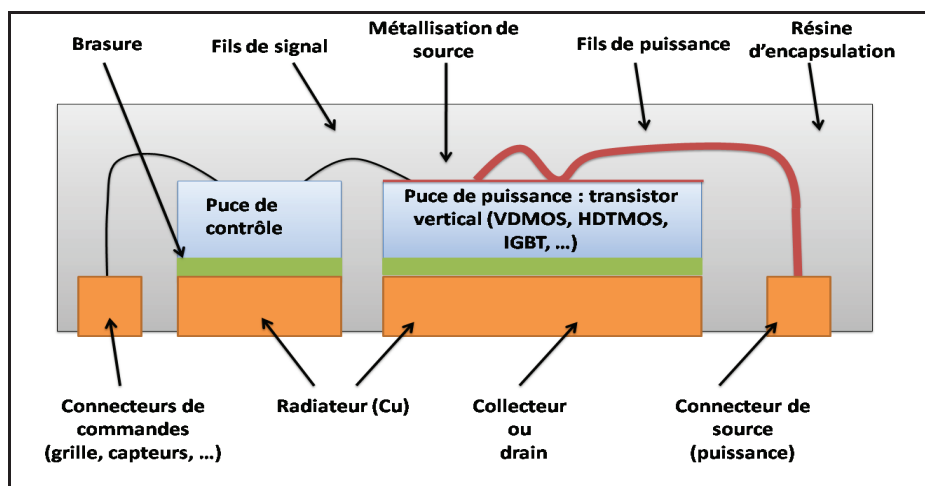
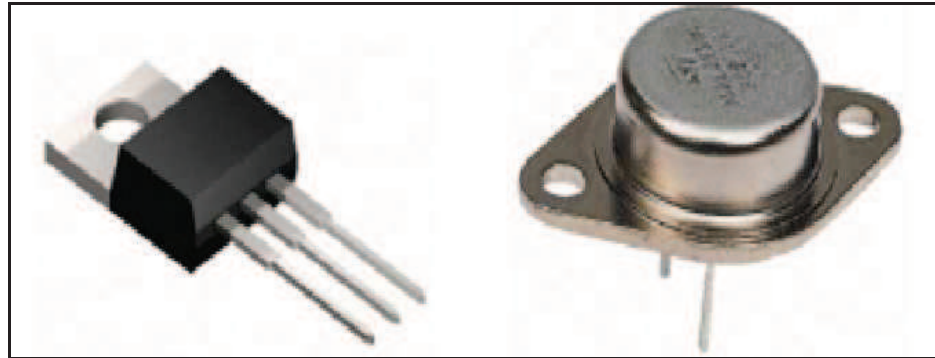


Figure I.21 Assemblage traditionnel d'un module de puissance à base de transistors verticaux (VDMOS, HDMOS, IGBT, ...).

Il existe essentiellement deux modes d'encapsulation en technologie de la mise en boîtier. Le premier consiste à enrober l'ensemble des éléments à protéger (puce de puissance, fils de connexion, ...) et à ne laisser que la surface d'échange thermique et les terminaux électriques. Pour ce faire, un matériau de type résine époxyde est généralement utilisé (Figure

1.22a). La deuxième technique consiste à remplir la dernière surface du module par une couche protectrice en plastique ou en métal, Figure 1.22.b. L'utilisation des boîtiers en résine époxy est limitée aux applications basses températures à cause de la forte différence de coefficients de dilatation thermique qui existe entre la résine et le silicium et aussi de leur sensibilité à l'humidité, [26].



(a) Boîtier en résine époxy de type TO-220A B (b) Boîtier métallique de type TO-3

Figure I.22 Exemples types courants de boîtier de puissance[26]

La défaillance de l'un ou de plusieurs éléments constituant l'assemblage en boîtier peut fortement diminuer les performances de ce dernier, et dans certains cas, peut être fatal surtout en modules de puissance.

I.6 Principaux modes de défaillances des modules électroniques

Au cours de leur fonctionnement, les composants ou les modules électroniques à base semi-conducteur et leurs assemblages respectifs subissent des cycles thermiques actifs induits par les pertes par conduction en mode commutation des puces. Dans le cas des applications embarquées en plus des cycles thermiques actifs, les modules subissent des contraintes environnementales qui peuvent être extrêmes et notamment pour des applications aéronautiques et spatiales. Nous allons présenter succinctement les principaux modes de défaillance des modules de puissance. Les défaillances physiques peuvent être répertoriées, soit au niveau de l'assemblage, soit au niveau de la puce.

I.6.1 Défaillances au niveau de l'assemblage

Près de 65 % des défaillances et des contraintes dans les assemblages électroniques sont attribués aux phénomènes thermomécaniques [27]. Parmi ces défaillances, on trouve :

- La fatigue des joints de brasure entre les différentes interfaces de l'assemblage, Figure I.23.
- La fatigue des fils de bonding entre la puce de puissance et les connexions électriques de l'assemblage de puissance, Figure I.24.

I.6.1.1 Fatigue thermique des joints de brasures

Les brasures constituent un élément important dans l'étude de la fiabilité des modules de puissance. En effet, elles sont fortement soumises aux phénomènes de délaminage lorsque le module électronique est sous hautes tensions ou températures, Figure I.23. Plusieurs études ont été dédiées à la fatigue thermique des joints de brasure et montrèrent que ces brasures constituent l'élément le plus fragile de l'assemblage sous cycles thermique appliquées aux modules électroniques.

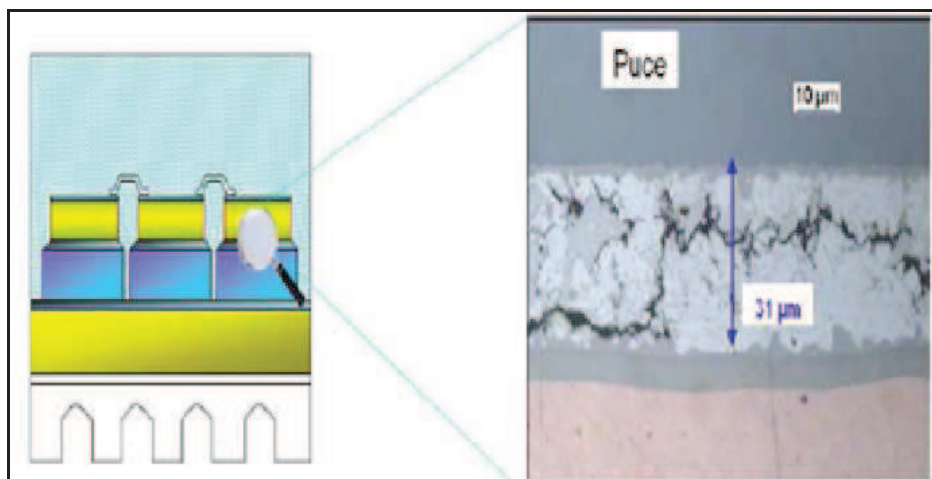


Figure I.23 Exemple de fissuration du joint de brasure entre la puce et l'isolant [27].

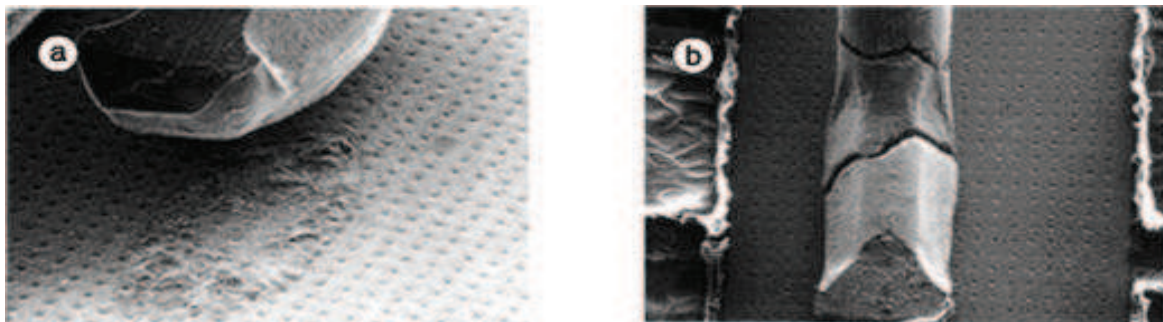
I.6.1.2 Défaillance du fil de Bonding(câblage)

Le deuxième mode de défaillance important est la défaillance au niveau des fils de bonding reliant la puce de puissance à son environnement de connexion électrique. On peut diviser la défaillance à ce niveau en deux catégories :

- La levée des fils de câblage au niveau de la couche de métallisation de la puce de puissance,
- La fracture du fil de câblage au niveau du pied de ce dernier.

On peut trouver dans la littérature plusieurs études dédiées à la levée des fils de câblage [26]. Ce mode de défaillance (Figure I.24.a) est dû essentiellement à la différence du CTE (coefficient de dilatation thermique) entre l'aluminium de la couche de métallisation et le silicium. En effet, le CTE de l'Aluminium est de l'ordre de 23 ppm/K à température ambiante, alors que le CTE du Silicium est seulement de l'ordre de 2,6 ppm/K.

En ce qui concerne les fissurations initiées au niveau du pied du fil de câblage, elles sont essentiellement dues aux problèmes de qualité du fil du bonding[28]. Toutefois, ce mode de défaillance peut être le résultat des contraintes thermomécaniques subies par ce dernier, (Figure I.24.b).



(a) Levée du fil de câblage (b) Fracture du pied du fil de bonding

Figure I.24 Défaillance au niveau des fils de bonding

I.6.2 Défaillance au niveau de la puce de puissance

La défaillance au niveau de la puce de puissance peut être une cause importante dans la destruction du module électronique. Cette défaillance peut être liée à sa fonction par exemple

comme interrupteur électrique ou aux défauts intrinsèques des matériaux et des différentes couches constituant la puce électronique elle-même.

Lorsque la puce est soumise simultanément à l'application d'un fort courant et d'une tension élevée, la puissance électrique instantanée devient très importante menant, dans de nombreux cas, à la destruction de celui-ci par le claquage ou l'emballement thermiques [29,30].

I.7 Conclusion

Grace aux progrès technologiques, les composants électroniques deviennent de plus en plus petits et de plus en plus rapides. Les densités de flux de chaleur à évacuer deviennent très importantes.

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

La température est en général l'ennemi de l'électronique. La température des composants dépendra directement de la chaleur dissipée, du rendement voulu et du choix du bon boîtier. Pour cela on doit maîtriser les nouvelles technologies introduites en méthodes de refroidissement et conception de boîtiers appropriés pour réaliser des équipements innovants ayant un niveau de maturité suffisant en application industriels, spatiales etc...

Dans cette optique, nous allons engager une étude exemple sur l'effet thermique dans les modules HBT (HeteroBipolar Transistor) comme modèle, pour cela connaître le principe physique et technologique de ce composant est très important pour prédire son comportement thermique et détecter les régions chaudes, mais avant il faut résoudre les équations de diffusion de chaleur qui régissent ce système modulaire.

II.1 Introduction

Il ya beaucoup de problèmes d'ingénierie pratiques qui nécessitent l'analyse des équations de transfert de chaleur. La solution de la conduction de chaleur est généralement suffisante pour des problèmes d'ingénierie générale.

Dans ce chapitre nous verrons les principales méthodes utilisées ces dernières décennies pour améliorer la prise en compte des aspects thermiques dans la conception et le fonctionnement des composants et circuits électroniques. La température de fonctionnement conditionne fondamentalement le comportement électrique des composants électroniques actifs ainsi la conception des dispositifs d'évacuation de la chaleur est cruciale pour les composants modernes à forte puissance. Par ailleurs, le mode impulsionnel engendre des phénomènes de fatigue des structures menant à des défaillances.

Les modèles thermiques (boîtier et moyen de refroidissement) ont été sans cesse améliorés ces dernières années, cependant tous ne sont pas adaptés à toutes les étapes de la conception. Ainsi, pour répondre aux différents besoins des ingénieurs, plusieurs types de modèles sont développés (numériques, analytiques, analogiques et expérimentaux, ...) pour prédire la température et la performance thermique des composants et circuits électroniques avant chaque conception technologique [31].

II.2 Equation de la chaleur

Deux corps à températures différentes échangent de l'énergie sous forme de chaleur jusqu'à disparition complète de leur différence de températures. Cet échange peut se faire suivant trois modes de transmission fondamentaux: la conduction, la convection et le rayonnement. On s'intéresse dans cette étude particulièrement au premier mode.

Le phénomène de conduction pure se rencontre essentiellement dans les solides. La propagation de la chaleur par conduction à l'intérieur d'un corps se fait suivant deux mécanismes distincts : une transmission par vibrations des atomes ou molécules et une transmission par électrons libres. L'importance relative de chacun des deux mécanismes dépend évidemment de la nature du corps [8], [32]. L'équation de base de la conduction est donnée par l'expression suivante :

$$q = K \frac{S}{L} \Delta T \quad (\text{II.1})$$

L'équation (II.1) permet de calculer la quantité de chaleur $dQ = q \cdot dt$ échangée entre deux surfaces d'un même conducteur distantes de dx et maintenues à une différence de température dT :

$$dQ = -KS \frac{dT}{dx} dt \quad (\text{II.2})$$

Où

- dQ est la quantité de chaleur conduite, dans le temps dt , dans la direction dx . Le signe (-) provient de la deuxième loi de la thermodynamique, selon laquelle la chaleur se propage d'un point chaud vers un point froid. Si donc l'axe x est orienté positivement dans le sens du flux thermique, $dQ > 0$ implique $dT < 0$.
- K désignant un coefficient positif caractéristique du matériau, appelé conductivité thermique (ou calorifique). Il indique aussi la vitesse avec laquelle l'énergie thermique se propage à travers ce matériau.
- On appelle capacité calorifique d'un matériau la quantité de chaleur C qu'il faut fournir à l'unité de volume de ce matériau pour élever sa température de un degré.

Cette définition étant donnée, on exprime de deux façons différentes, la puissance calorifique reçue à l'instant t , par un domaine (D) de frontière (S) (Figure II.1).

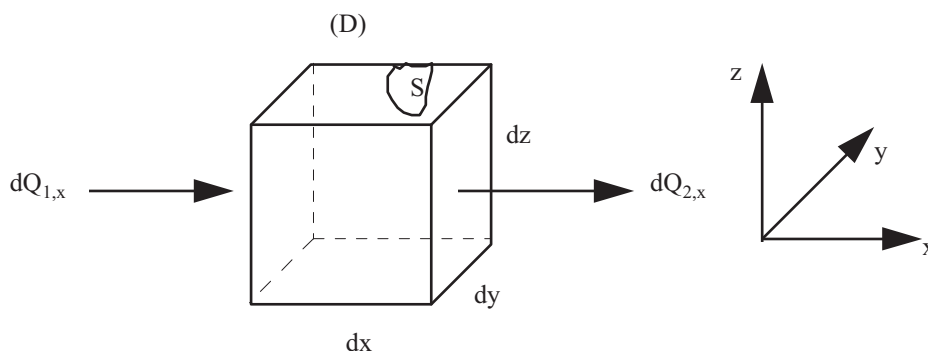


Figure II.1 Elément de volume infinitésimal.

Si on considère une barre du semi-conducteur AsGa semi-infinie, homogène, parfaitement isolée, les expressions de diverses énergies mises en jeu sont:

- **Chaleur entrant par la gauche :**

$$dQ_{1,x} = -K dy dz \frac{\partial T}{\partial x} dt$$

- **Chaleur sortant par la droite**

$$dQ_{2,x} = -K dy dz \frac{\partial}{\partial x} \left(T + \frac{\partial T}{\partial x} dx \right) dt = -K dy dz \left(\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} dx \right) dt$$

Le bilan total dans la direction x est donc :

$$dQ_{1,x} - dQ_{2,x} = -K dy dz \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} dx dt$$

De même :

$$dQ_{1,y} - dQ_{2,y} = -K dz dx \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} dy dt$$

$$dQ_{1,z} - dQ_{2,z} = -K dx dy \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} dz dt$$

- **Energie créée au sein de l'élément**

$$dQ_3 = q(dx dy dz) dt$$

Sous l'influence des variations ci-avant, la capacité calorifique de l'élément varie de :

$$\rho C_P (dx dy dz) \frac{\partial T}{\partial t} dt$$

où ρ est la densité et C_P la chaleur spécifique. En écrivant le bilan global, on trouve :

$$\rho C_P \frac{\partial T}{\partial t} = -K \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q$$

soit :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{q}{\rho C_P} \quad (\text{II.3})$$

où $\alpha = \frac{K}{\rho C_P}$ est la diffusivité thermique (m^2/s)

L'équation (II.3) exprime la seconde loi de Fourier. Sa résolution donne le champ de température dans un solide avec des conditions aux limites et des conditions initiales connues. Une puissance thermique volumique peut être générée au sein du matériau, due à l'effet Joule lorsque ce matériau est parcouru par un courant électrique, par exemple, elle peut être due aussi à des réactions de fission ou encore à une irradiation par micro-ondes. Toutefois, dans la majorité des problèmes, cette puissance notée q dans l'équation (II.3) est nulle ($q=0$) et donc devienne :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (\text{II.4})$$

Ou encore:

$$\Delta T = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{II.5})$$

Ou le signe(-) indiquait que le sens de la diffusion.

II.3 Différentes méthodes de résolution de l'équation de chaleur

La résolution de l'équation de chaleur est étudiée depuis fort longtemps mais trouver une technique ou un outil d'aide à la conception simple et efficace, est toujours d'actualité. Des méthodes numériques de modélisation basées sur les différences finies ou les éléments finis existent [33] mais sont incomplètes ou complexes. La solution analytique des fois

n'existe pas pour des systèmes complexes. Les méthodes analogiques sont une alternative intéressante car le sens physique est maintenu [34].

II.3.1 Solutions Analytiques

Plusieurs méthodes analytiques pour résoudre les problèmes de transfert de chaleur ont été développées, chacun possédant des caractéristiques particulières avantageuses suivant les types particuliers de problèmes à résoudre. Les méthodes les plus utilisées sont :

- **Méthode utilisant les séries de Fourier :** Cette méthode a trouvé une popularité considérable pour le cas de circuits intégrés, hybride, et les modules électroniques intégrant des systèmes de refroidissement de chaleur au cours des dernières décennies. Dans ce procédé, l'équation à résoudre est l'équation différentielle partielle de chaleur en régime permanent avec une conductivité thermique constante dans chaque couche. Cette méthode FSM est un outil très utile pour la prédiction facile de structures planes et simples, [35].
- **Méthode de transformation:** Elle est basée sur l'utilisation de la forte similitude mathématique de l'équation de Laplace pour le problème thermique multicouche à l'état stationnaire [36]. Cette méthode de transformation (TM) permet d'éliminer les coordonnées x , y et t et transforme l'équation de la chaleur en une équation différentielle classique ne dépendant que de la variable z et les transformations requises sont effectuées à l'aide d'algorithmes de transformée de Fourier. Pour cela, seules les structures simples peuvent être facilement décrites.
- **Méthode du Modèle Compact:** Un modèle compact (CM) est un réseau de résistance thermique simple contenant pas plus de dix ou vingt nœuds. Le CM a été utilisé pour prédire la température d'un dispositif électronique en boîtier. La plupart des documents présentés ont discuté de l'utilisation de ce modèle pour l'analyse de la performance thermique [37], [35]. Le CM peut engendrer un nombre limité de résistances thermiques pour établir une connexion directe entre les nœuds surface-surface et des nœuds internes supplémentaires. Cependant, la résistance à la CM n'est pas la vraie résistance thermique, et la forme de la CM ne reflète pas les grandes voies d'écoulement de la chaleur dans les boîtiers.

- **Méthode de séparation des variables** : Elle constitue l'une des méthodes importantes de la résolution des équations différentielles ceci en réécrivant les équations de formes de deux variables distinctes et indépendantes. Elle est plus pratique à appliquer en dimensions finies [38].

Les solutions analytiques de l'équation de transfert de chaleur ne peuvent être obtenues sans hypothèses simplificatrices pour la géométrie, les propriétés des matériaux et les conditions aux limites. Pour l'analyse thermique de problèmes pratiques, de telles simplifications ne sont pas généralement possibles. Par conséquent, les méthodes numériques avec la flexibilité dans le traitement des géométries complexes font une approche idéale pour la solution de ces problèmes de transfert de chaleur.

II.3.2 Solutions numériques

La modélisation numérique offre la possibilité d'obtenir des résultats précis en donnant une analyse des systèmes complexes ou les techniques d'analyse et de mesure n'existaient même pas. Plusieurs méthodes de modélisation numérique pour résoudre les problèmes de transfert de chaleur ont été développés tels que :

II.3.2.1 Les modèles numériques

Les méthodes numériques sont devenues un outil important pour simuler le comportement thermique des systèmes électroniques. De nombreuses méthodes ont été utilisées [39], [40], On citera :

a. Méthodes des différences finies

Le principe de cette méthode consiste en une discrétisation du domaine de définition des variables espace et temps. La division en petits volumes du milieu à étudier est à la fois fonction de sa structure et des conditions aux limites. Dans le cas de la résolution de l'équation de la chaleur dans un milieu quelconque, chaque nœud résultant de la discrétisation est caractérisé par une valeur discrète de la température. L'équation de la chaleur est alors appliquée aux nœuds sous sa forme discrète. Il en découle un système d'équations algébriques

(souvent formé d'un grand nombre d'équations) qu'il faut résoudre par des logiciels informatique [46].

b. Méthodes des éléments finis.

Cette méthode a été développée initialement pour la résolution de problèmes d'élasticité et de résistance des matériaux, elle s'applique aussi aux problèmes de conduction tridimensionnelle en régime stationnaire ou transitoire.

Alors que la méthode des différences finies remplace l'équation différentielle par une équation aux différences par approximation algébrique, la méthode des éléments finis est une méthode d'approximation aussi qui présente l'avantage sur celle des différences finies de mieux s'adapter aux formes irrégulières, et d'autre part aux problèmes où les conditions aux limites sont pas constantes.

c. Eléments de frontières

Une alternative aux méthodes basées sur les éléments finis consiste à considérer des domaines délimités par des surfaces fermées dans lesquelles on résout l'équation de diffusion de la chaleur, en imposant les conditions de frontière prescrites du problème, un système d'équation algébrique linéaire est alors obtenu. La solution de ce système d'équations peut être trouvée en utilisant des méthodes directes ou itératives. A partir des valeurs des différentes caractéristiques thermiques aux frontières, il est possible de calculer les températures et les flux dans n'importe quel point du domain défini .L'inconvénient de cette méthode réside dans le fait que le calcul en régime dynamique est plus compliqué que les deux autres méthodes.

II.3.2.2 Méthodes dynamique des fluides

Au cours des dernières années, la méthode CFD (ComputationalFluidDynamics) a été développée pour les systèmes électroniques pour aider à réduire la dépendance à l'expérimentation vaste et coûteux [41] , [42], car les simulations par CFD seraient utilisés pour prévoir les températures des appareils électroniques et des interactions de transfert de chaleur en circuits. Cependant, une grande variabilité dans la longueur des échelles exigent un

temps de calcul énorme et les simulations CFD exigent également une connaissance en informatique pour utiliser le logiciel.

II.3.3 Solutions électrothermiques

L'utilisation de solutions électrothermiques pour résoudre les problèmes de chaleur n'est pas nouvelle et plusieurs procédés électrothermiques destinés à résoudre les problèmes de transfert de chaleur ont été développés tels que, [43]:

a- Méthode directe (Fully Coupled Method)

Cette méthode est basée sur la modélisation du comportement des circuits électroniques par un seul outil de simulation spécifique. La simulation peut être traitée par circuit set systèmes simulateurs comme Saber, ELDO ou Spectre. Le problème de cette méthode est dans la complexité des modèles à simuler

b- Méthode de relaxation

Cette méthode de relaxation a été basée sur le couplage de l'effet thermique avec le simulateur de circuits électriques. Généralement, le procédé de modélisation de la méthode de relaxation n'est pas si compliqué, parce que les simulateurs spéciaux sont déjà conçus pour un problème particulier thermique ou électrique. Un point essentiel de la méthode de relaxation est la façon de réaliser le transfert des données, la synchronisation, le contrôle de la convergence. Les simulateurs devraient avoir fixés à recevoir et à envoyer des valeurs calculées à un autre simulateur de sauvegarde de données. Par conséquent, l'arrière-plan mathématique du mécanisme de couplage est nécessaire.

II.3.4 Méthodes de mesures de température pratiques

Les méthodes de mesures pratiques de température se basent sur la détermination de l'impédance thermique. Cette technique nécessite la connaissance précise des caractéristiques de fonctionnement électrique du module électronique spécifié et ne fournit aucune information sur la distribution de la température sur ses régions actives. Cette méthode présente de graves inconvénients celle de dépasser la puissance maximale de fonctionnement

du dispositif lui-même et elle nécessite à chaque test une excitation d'impulsions différentes de chaleur et son refroidissement à la température ambiante.

Une des techniques la plus utilisée est l'infrarouge (IR) microscope [44]. C'est un système de vidéo thermique (TVS) balaie toute la surface en vue et mesure la lumière infrarouge provenant de chaque emplacement de point chauds. Il est non-intrusif et fournit un profil de température de surfaces à gammes de températures différentes. Ainsi, des points chauds localisés et des gradients élevés de température sont facilement détectés. Cependant, la limitation de la méthode IR dépend de la résolution de la TVS [45].

II.4 Modélisation numérique

II.4.1 Introduction

La modélisation numérique est la représentation des systèmes physiques en petites modèles spécifiques qui sont obtenus souvent par des méthodes numériques lorsque les solutions analytiques n'existent pas. Les méthodes de résolution numériques sont des méthodes approximatives qu'on utilise très souvent pour solutionner les différents problèmes physiques. Ces méthodes sont basées sur les techniques des différences finies qui consiste à discrétiser le domaine à étudier en une série d'éléments finis. On considère que la température au niveau de chaque élément est constante et égale à celle de son centre.

La modélisation numérique offre la possibilité d'obtenir des résultats précis pour les systèmes complexes sans les problèmes des techniques d'analyse et de mesures pratiques. Plusieurs méthodes de modélisation numérique pour résoudre les problèmes de transfert de chaleur ont été développées, chacune possède des caractéristiques particulières avantageuses à certains types de problèmes, parmi les méthodes utilisées, [46]:

► La méthode de différence finie dans le domaine temporel (FDTD)

C'est une méthode utilisée en modélisation électromagnétique, car il s'agit d'une technique dans le domaine temporel où les équations de Maxwell sont modifiées à des équations centrales de différence.

► Circuit équivalent de l'élément partiel (PEEC)

PEEC est une approche plus souple et flexible pour la manipulation de la nature hybride de l'électronique intégrée. Contrairement à d'autres méthodes, PEEC facilite l'intégration

transparente des simulateurs de circuits traditionnels avec des outils d'analyse électromagnétiques. Ainsi, PEEC est utilisée pour modéliser des géométries tridimensionnelles.

► **La méthode des moments (MoM)**

C'est une technique qui est couramment utilisée pour analyser les structures d'antennes, car elle modélise que la structure métallique et non l'espace autour de lui. Cependant, il est également utilisé dans d'autres applications électromagnétiques.

► **La méthode deligne de transmissions (TLM)**

C'est une technique numérique approprié pour résoudre les problèmes électromagnétiques, mais elle peut également être appliquée à des problèmes thermiques ou de diffusion, ainsi que l'acoustique. Son approche de base est d'obtenir un modèle discret, qui est ensuite résolu exactement par calcul numérique. La méthode de modélisation par ligne de transmissions revient à remplacer chaque bout du matériau (appelé nœud aussi) par une ligne de transmission soumis aux effets de dispersion et de réflexion d'impulsions classiques et détecter ainsi la valeur et la position des nœuds chauds dans les composants électroniques. La TLM (Transmission Line Matrix) a un certain nombre de caractéristiques qui la rendent idéale pour résoudre les problèmes de transfert de chaleur [47]:

- La méthode est exprimée en termes de circuits électriques qui sont familiers à l'ingénieur,
- Les deux environnements internes et externes peuvent être modélisés simultanément,
- L'étude des formes complexes peut être incluse et les propriétés des matériaux non homogènes peuvent être introduites,
- Les régions de source de chaleur peuvent être représentées et le sens de la nature physique du modèle à géométrie complexe, est conservé.

II.4.2 Exemples de logiciels d'outils CAO pour analyser l'effet thermique dans les systèmes électroniques

Beaucoup d'outils de CAO (Computer Aided Optimisation) ont été utilisés pour analyser les comportements thermiques des systèmes électroniques et à améliorer leurs performances. Exemples de logiciels sont cités dans de nombreux articles publiés tels que: FEAP, CALCE, MAYA, FLUENT, FLOTHERM, etc...

Le tableau II.1 présente un échantillon de sociétés ayant des logiciels d'analyse thermique des systèmes électroniques.

Exemples de logiciels et d'outils CAO pour analyser l'effet thermique

| | |
|---|--|
| AcuSIM Software Inc. | www.acusim.com |
| Amtec Engineering | www.amtec.com |
| Analytic and Computational Research Inc. (ACRI) | www.acri.com |
| Ansys Corp. | www.ansys.com |
| Boundary Element Software Technology Corp. (BEST) | www.gpbest.com |
| Blue Ridge Numerics Inc. | www.brni.com |
| CFD Research Corp. | www.cfdrc.com |
| Computational Dynamics Ltd | www.cd.co.uk |
| Computational Mechanics Inc. | www.compmech.com |
| COMSOL Inc. | www.comsol.com |
| Concurrent Analysis Corp. | www.caefem.com |
| Daat Research Corp. | www.daat.com |
| Engineering Mechanics Research Corp. (EMRC) | www.emrc.com |
| Engineering Sciences Inc. (ESI) | www.unicfd.com |
| FEM Engineering | www.femengineering.com |

| | |
|--|--|
| Flomerics Inc. | www.flomerics.com |
| Flow Science Inc. | www.flow3d.com |
| Fluent Inc. | www.fluent.com |
| Harvard Thermal Inc. | www.harvardthermal.com |
| IBM/CATIA | www.catia.ibm.com |
| ICEM CFD Engineering | http://icemcfd.com |
| Innovative Research Inc. | www.inres.com |
| Integrated Engineering Software (IES) | www.integratedsoft.com |
| LMS CADSI | www.cadsi.com |
| Livermore Software Technology Corp. (LSTC) | www.lstc.com |
| MAYA Simulation Ltd. | www.mayahtt.com |
| Moldflow Corp. | www.moldflow.co.uk |
| MSC.Software | www.mscsoftware.com |
| Network Analysis Inc. | www.sinda.com |
| NGB Technologies Inc. | www.ngbtech.com |
| Numerical Applications Inc. | www.numerical.com |
| Numeritec Corp. | www.numeritec.com |
| Technalysis Inc. | www.technalysis.com |
| ThermoAnalytics Inc. | www.thermoanalytics.com |

Tableau II.1 Exemples de logiciels et d'outils CAO pour l'analyse thermique

II.5 Méthode Analytique : Séparation de variables

Plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour résoudre analytiquement l'équation de la chaleur. La plus utilisée est la méthode de séparation des variables car elle est plus pratique

à appliquer en résolution des équations différentielles linéaires en dimensions finies à propriétés constantes, [48].

II.5.1 Méthode de séparation de variables à une dimension

Considérons le problème de la diffusion de la chaleur dans une barre homogène, de coefficient de conduction K , de masse volumique ρ , de coefficient calorifique C_p , de longueur L . L'équation de diffusion de la chaleur à une dimension est donnée par l'équation suivante:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) \quad (\text{II.6})$$

Dans cette équation $\alpha = \frac{K}{\rho C_p}$ est la diffusivité thermique du matériau.

Pour résoudre le problème posé il faut préciser premièrement les conditions aux limites. Dans notre cas on a supposé que la surface de la barre est isolée (les extrémités de la barre sont maintenues à une température de zéro unités) comme suit :

$$\begin{cases} T(0, t) = 0, \forall t \\ T(L, t) = 0, \forall t \end{cases} \quad (\text{II.7})$$

$$T(x, 0) = f(x) \quad (\text{II.8})$$

La résolution de l'équation (II.6) par la séparation des variables consiste à chercher la solution de l'équation de la propagation de la chaleur qui vérifie les conditions (II.7) et (II.8) pour trouver une solution, nous adoptons la stratégie suivante :

- ⇒ Faire en sorte de simplifier l'expression de la forme solution en l'exprimant comme étant le produit de deux fonctions indépendantes $T(x, t) = u(x)w(t)$
- ⇒ Déterminer une solution $u(x)$ qui satisfait les conditions aux limites.
- ⇒ Déterminer la forme solution $w(t)$ en fonction de la solution $u(x)$.
- ⇒ Exprimer la solution $T(x, t)$ sous forme de série de Fourier qui satisfait les conditions initiales sur t (le temps).

En premier, nous posons la solution comme étant le produit de deux fonctions à variables séparées :

$$T(x, t) = u(x) \cdot w(t) \text{ (II.9)}$$

Les dérivées partielles première et seconde respectives sont :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \cdot w(t) = u'' \cdot w \text{ (II.10)}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = u(x) \frac{\partial w}{\partial t} = u \cdot w' \text{ (II.11)}$$

Ainsi, on aura :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \Leftrightarrow u \cdot w' = \alpha u'' \cdot w \Leftrightarrow \frac{u''}{u} = \frac{1}{\alpha} \frac{w'}{w} \text{ (II.12)}$$

Comme il s'agit de deux variables x et t qui sont indépendantes, les expressions dans chaque membre de droite et de gauche ne peuvent être égales que si elles sont égales à une constante arbitraire P :

$$\frac{u''}{u} = \frac{1}{\alpha} \frac{w'}{w} = p \text{ (II.13)}$$

Ce qui nous permet de les séparer en deux équations :

$$\begin{cases} u'' - pu = 0 \\ w' - p\alpha w = 0 \end{cases} \text{ (II.14)}$$

Cela nous ramène à la résolution de deux équations différentielles ordinaires, une du premier ordre, et une du second ordre. Nous devons d'abord résoudre l'équation de $u(x)$ en passant par les trois cas de p s'il est positif, négatif ou nul, nous allons obtenir un seul cas valable qui est pour p négatif, il découle de ce cas l'expression de la solution de $u(x)$:

$$u_n(x) = \sin \frac{n\pi}{L} x, n = 1, 2, 3, \dots \text{(II.15)}$$

$\frac{n\pi}{L}$: C'est le vecteur d'onde obtenu par :

$$\sin \sqrt{p}L = 0 \Rightarrow \sqrt{p}L = n\pi \Rightarrow \sqrt{p} = \frac{n\pi}{L}$$

Donc, il y a donc toute une famille de fonctions solutions dans ce cas, ensuite on résout l'équation d'ordre 1 pour trouver $w(t)$:

$$w' - p\alpha w = 0 \text{(II.16)}$$

La solution générale de cette équation est, selon le nombre n :

$$w_n(t) = c_n e^{-\int_0^t \alpha \left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 dt} \text{(II.17)}$$

En conséquence nous avons une famille de formes solutions $T_n(x, t)$:

$$T_n(x, t) = u_n(x) \times w_n(t) = c_n \sin \left(\frac{n\pi}{L} x\right) \times e^{-\alpha \left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 t}, n = 1, 2, 3, \dots \text{(II.18)}$$

Et la solution générale $T_g(x, t)$ sera évidemment la combinaison linéaire de toutes ces formes solutions. C'est donc une série trigonométrique qui représente la solution générale d'équation aux dérivées partielles homogènes :

$$T_g(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} T_n(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} c_n \sin \left(\frac{n\pi}{L} x\right) \times e^{-\alpha \left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 t} \text{(II.19)}$$

Il faut à présent de fixer les coefficients C_n à l'aide de l'unique condition initiale :

$T(x, 0) = f(x)$. on aura enfin la solution particulière:

$$T_p(x, 0) = \sum_{n=1}^{\infty} c_n \sin \left(\frac{n\pi}{L} x\right) \times e^{-\alpha \left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 \cdot 0} = f(x) \text{(II.20)}$$

II.5.2 Méthode de séparation de variables à deux dimensions

Le cas de résolution de l'équation de conduction thermique à deux dimensions consiste à résoudre l'équation suivante :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (\text{II.21})$$

pour $0 < x < a$, $0 < y < b$, $t > 0$ et avec les conditions:

$$T(0, y, t) = T(a, y, t) = 0, 0 < y < b, t > 0; (\text{II.22.a})$$

$$T(x, 0, t) = T(x, b, t) = 0, 0 < x < a, t > 0; (\text{II.22.b})$$

$$T(x, y, 0) = f(x, y), 0 < x < a, 0 < y < b; (\text{II.22.c})$$

Étape 1: En premier, nous posons la solution comme étant le produit de deux fonctions à variables séparées :

$$T(x, y, t) = u(x) \cdot v(y) \cdot w(t) \quad (\text{II.23})$$

Où u est une fonction de x seul, v est une fonction de y seul, et w est une fonction de t seul. Insérant (II.23) dans (II.21), on obtient :

$$u(x)v(y)w'(t) = \alpha [u''(x)v(y)w(t) + u(x)v''(y)w(t)]$$

Et la division par $\alpha u(x)v(y)w(t)$ donne :

$$\frac{w'(t)}{\alpha w(t)} = \frac{u''(x)}{u(x)} + \frac{v''(y)}{v(y)} \quad (\text{II.24})$$

Cela donne :

$$w' - \alpha(A + B)w = 0 (\text{II.25.a})$$

$$u'' - Au = 0 \text{ (II.25.b)}$$

$$v'' - Bv = 0 \text{ (II.25.c)}$$

Où A et B sont des constantes. De même, (II.25.a) et (II.25.b) impliquent que

$$u(0) = u(a) = 0 \text{ et } v(0) = v(a) = 0 \text{ (II.26)}$$

Étape 2: Comme dans le cas de l'équation d'onde à deux dimensions, on peut montrer que (II.25.b), (II.25.c) et (II.26) admet des solutions non triviales seulement quand :

$$A = -\frac{n^2\pi^2}{a^2}, n = 1, 2, \dots \text{ et } B = -\frac{m^2\pi^2}{b^2}, m = 1, 2, \dots \text{ (II.27)}$$

et

$$A + B = \frac{n^2\pi^2}{a^2} + \frac{m^2\pi^2}{b^2}, n = 1, 2, \dots, m = 1, 2, \dots \text{ (II.28)}$$

Les solutions non triviales sont :

$$u(x) = u_n(x) = \sin \frac{n\pi x}{a} \text{ et } v(y) = v_m(y) = \sin \frac{m\pi y}{b}, m, n = 1, 2 \text{ (II.29)}$$

$$w' + \alpha \left(\frac{m^2\pi^2}{a^2} + \frac{n^2\pi^2}{b^2} \right) w = 0, \text{ (II.30)}$$

La solution générale est sous forme :

$$w_{mn}(t) = A_{mn} \exp \left[-\alpha \pi^2 \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right) t \right] \text{ (II.31)}$$

où A_{mn} est une constante d'intégration, pour chaque $(m, n) \in \mathbb{N} \times \mathbb{N}$. Combinant (II.29) et (II.31) donne les solutions de produits :

$$T(x, y, t) = A_{mn} \exp \left[-\alpha \pi^2 \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right) t \right] \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b}, m, n \in \mathbb{N} \text{ (II.32)}$$

Étape 3: La solution totale est formée en fixant et en exigeant que :

$$T(x, y, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} T_{mn}(x, y, t) \quad (\text{II.33})$$

D'où :

$$T(x, y, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} A_{mn} \exp \left[-\alpha \pi^2 \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right) t \right] \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b}$$

Et exiger que :

$$f(x, y) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} A_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \quad (\text{II.34})$$

Comme dans le cas de (II.20), il découle de (II.34) que

$$A_{mn} = \frac{4}{ab} \int_0^b \int_0^a f(x, y) \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} dx dy \quad (\text{II.35})$$

La solution de l'équation de chaleur par la méthode de séparation de variables nous donne la variation de la température à tout instant. Elle est composée d'un terme en sinus et en cosinus et de l'exponentielle, ce dernier terme limite la valeur de la température pour des grandes valeurs du temps.

La méthode de séparation de variables est très souvent utilisée pour résoudre des problèmes thermiques à 3D dans des structures relativement simples.. L'intérêt considérable de cette méthode consiste en sa rapidité de calcul.

II.6 Méthode de Matrice de Ligne de Transmission TLM

II.6.1 Présentation

La méthode de matrice de lignes de transmission (TLM) est une technique numérique analogique pour résoudre les problèmes physiques en se basant sur des circuits électriques simples. En effet, les techniques traditionnelles se divisent en deux catégories: ceux qui sont

explicites, mais pas inconditionnellement stable, et ceux qui sont inconditionnellement stable mais implicite. TLM est explicite et inconditionnellement stable [49].

II.6.2 Origine de la méthode TLM

L'origine de la méthode TLM remonte au début des années soixante dix [50] et est basée sur les équations de MAXWELLS suivantes :

$$\text{Rot } \vec{H} = \delta \cdot \vec{E} + \epsilon \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \tag{II.36}$$

$$\text{Rot } \vec{H} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \tag{II.37}$$

où \vec{H} et \vec{E} sont des vecteurs dans l'espace à trois dimensions et δ , ϵ et μ sont respectivement la conductivité, la permittivité, la perméabilité.

La combinaison des équations (II.36) et (II.37) en coordonnées cartésiennes conduit à l'équation de propagation d'une onde électromagnétique dans un milieu quelconque :

$$\nabla^2 H = \mu \cdot \delta \cdot \frac{\partial H}{\partial t} + \mu \cdot \epsilon \cdot \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} \tag{II.38}$$

si le milieu est unidimensionnel, alors l'équation (II.38) s'écrit :

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} = \mu \cdot \delta \cdot \frac{\partial H}{\partial t} + \mu \cdot \epsilon \cdot \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} \tag{II.39}$$

Les éléments μ , δ et ϵ peuvent être choisis de telle manière qu'un seul terme du second membre de l'équation (II.39) domine:

Si $\mu \cdot \delta \cdot \frac{\partial H}{\partial t} \ll \mu \cdot \epsilon \cdot \frac{\partial^2 H}{\partial t^2}$ l'équation (II.39) se réduit à :

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} = \mu \cdot \epsilon \cdot \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} \tag{II.40}$$

qui n'est autre que l'équation classique des ondes dans un milieu sans perte. La vitesse de

l'onde étant $v = \sqrt{\mu\epsilon}$. Si $\mu \cdot \delta \cdot \frac{\partial H}{\partial t} \gg \mu \cdot \epsilon \cdot \frac{\partial^2 H}{\partial t^2}$ alors l'équation (II.39) se réduit à :

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} = \mu \cdot \delta \cdot \frac{\partial H}{\partial t} \tag{II.41}$$

Qui n'est autre que l'équation de propagation d'une onde dans un milieu fortement absorbant. On remarque que cette équation est équivalente à l'équation de diffusion donnée par la loi suivante:

$$\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} = \frac{1}{D} \cdot \frac{\partial N}{\partial t} \tag{II.42}$$

où D désigne le coefficient de diffusion, N caractérise l'élément diffusant dans un certain système. Cet élément peut être des particules de matières (électrons, trous, protons, neutrons, atomes, ions, etc...), ou des particules d'énergies (chaleur).

Comme le milieu de propagation peut être une ligne de transmission, la modélisation d'une équation de type (II.39) de la physique en général peut, par analogie, se faire en considérant la propagation d'une onde delta dans une ligne de transmission

Une impulsion électrique dans réseau de lignes de transmission obéit à l'équation de propagation d'ondes de Maxwell :

$$\nabla^2 \Phi = AR_d C_d \frac{\partial \Phi}{\partial t} + BL_d C_d \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} \tag{II.43}$$

Avec Φ le potentiel, R_d , C_d et L_d sont les résistances, capacités et inductances distribués par lignes respectivement. A et B sont des constantes. Si le premier terme de l'équation (II.43) domine le second terme, alors l'équation de diffusion décrite par:

$$K_t(T)(\nabla T(x, y, z, t)) = \rho C_p \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} \tag{II.44}$$

Où C_p est la capacité calorifique, ρ la densité volumique et K_t est la conductivité thermique.

Nous avons une analogie: Le potentiel est équivalent à la température et le courant au flux de

chaleur. Par conséquent, le système est divisé alors en petits volumes unitaires. Chaque élément est représenté par une unité de ligne transmissions. La figure II.2 présente le circuit équivalent du model d'un nœud de TLM et la figure II.3 présente le cas 3D ou les résistances restent groupées autour du nœud. L'inductance et la capacité sont remplacées par l'impédance Z, qui relie chaque nœud à ses voisins. Selon la théorie fondamentale de lignes de transmission, l'impédance ligne est exprimée par [51]:

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{a \Delta t}{C} = \frac{L}{a \Delta t} \tag{II.45}$$

Avec C la capacité, L inductance, a est la dimension choisie.

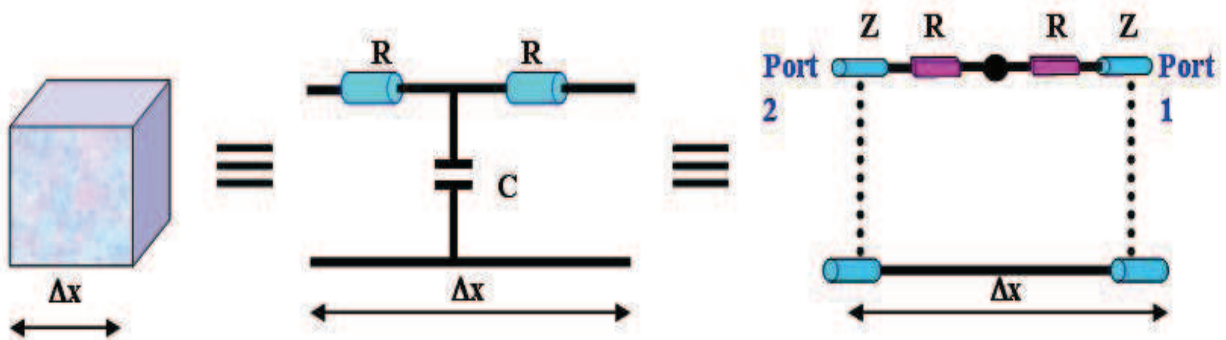


Figure II.2 Circuit équivalent du model d'un nœud

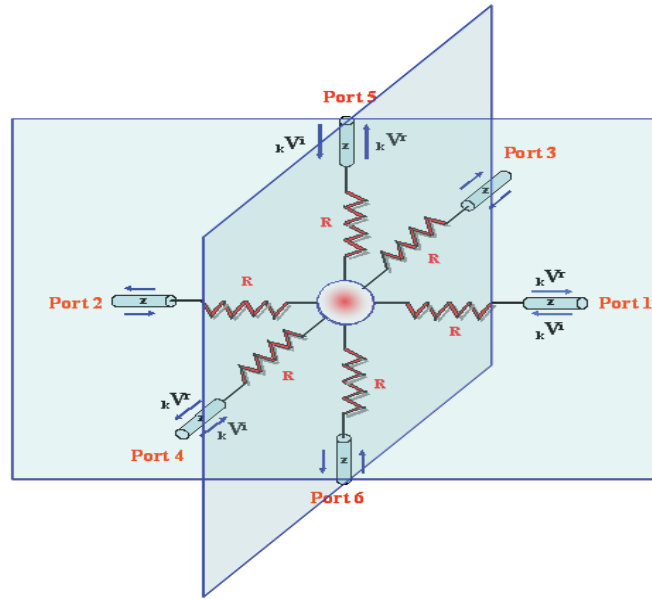


Figure II.3 Représentation d'un Nœud TLM-3D

La procédure numérique à mettre en place consiste à calculer, à chaque itération, l'intensité des impulsions incidentes sur un nœud donné pour déterminer la valeur de la grandeur physique en ce point et ensuite calculer l'intensité des impulsions réfléchies en vue de préparer la prochaine itération. On doit alors suivre les étapes suivantes[52] :

a- Les températures nodales :

À chaque nœud N , la température est calculée à partir des impulsions incidentes ${}_k V_j^i(N)$. L'indice j indique sur quelle ligne de transmissions l'impulsion y est. Pour un nœud tridimensionnel (Figure II.3), la température nodale est :

$${}_k V(N) = \left[\frac{2({}_k V_1^i + {}_k V_2^i)}{R_x + Z} + \frac{2({}_k V_3^i + {}_k V_4^i)}{R_y + Z} + \frac{2({}_k V_5^i + {}_k V_6^i)}{R_z + Z} \right] \frac{1}{Y} \tag{II.46}$$

Avec :
$$Y = \frac{2}{R_x + Z} + \frac{2}{R_y + Z} + \frac{2}{R_z + Z}$$

b- Les impulsions réfléchies :

Les impulsions ${}_k V_j^r(N)$ réfléchies sont calculées selon :

$${}_k V_{1,2}^r = \frac{1}{R_x + Z} [Z {}_k V + (R_x - Z) V_{1,2}^i] \quad (II.47)$$

$${}_k V_{3,4}^r = \frac{1}{R_y + Z} [Z {}_k V + (R_y - Z) V_{3,4}^i] \quad (II.48)$$

$${}_k V_{5,6}^r = \frac{1}{R_z + Z} [Z {}_k V + (R_z - Z) V_{5,6}^i] \quad (II.49)$$

c- Les impulsions incidentes :

Les impulsions incidentes sont calculées par celles réfléchies à l'étape précédente. A l'itération (k+1), on a:

$${}_{k+1} V_j^i(x, y, z) = \Gamma_j {}_k V_j^r(x, y, z) + (1 - \Gamma_j) V_{j'}^r(u, v, w) \quad (II.50)$$

où (x, y, z) sont les coordonnées du nœud N et le Γ est le coefficient de réflexion dans la direction (j) donnée par :

$$\Gamma_j = \frac{Z(u, v, w) - Z(x, y, z)}{Z(u, v, w) + Z(x, y, z)} \quad (II.51)$$

Les valeurs correspondantes de j', j, u, v et w pour j=1, 2... pour les équations (II.50) et (II.51) sont mentionnées en Tableau II.2.

| <i>J</i> | <i>j'</i> | <i>U</i> | <i>v</i> | <i>W</i> |
|----------|-----------|----------|----------|----------|
| 1 | 2 | x-1 | y | z |
| 2 | 1 | x+1 | y | z |
| 3 | 4 | x | y-1 | z |
| 4 | 3 | x | y+1 | z |
| 5 | 6 | x | y | z-1 |
| 6 | 5 | x | y | z+1 |

Tableau II.2 Les valeurs de j, j', u, v, et w utilisées dans les équations (II.50) et (II.51).

L'exécution d'une itération TLM consiste seulement à répéter les équations de (II.46) à (II.51). Nous utiliserons cette méthode pour la modélisation d'un modèle de composant de puissance.

II.7 Conclusion

La détermination de la température des composants est d'une grande importance pour la conception des systèmes électroniques modernes. Ce calcul découle de la résolution de l'équation de la chaleur pour chaque structure de systèmes électroniques. Avec les méthodes numériques classiques de discrétisation, il n'est pas possible de tenir compte des non-linéarités et de la complexité géométrique des structures. Les modèles analytiques quant à eux sont limités aux géométries simples et, sauf exceptions, aux cas linéaires. Trouver une technique simple et efficace pour la résolution de l'équation de chaleur est toujours d'actualité.

Dans ce chapitre, nous avons cité quelques méthodes pour la modélisation de l'effet thermique dans les composants électroniques en s'intéressant à la méthode analytique et la méthode TLM. Nous avons montré qu'il existe une équivalence entre l'équation de diffusion et l'équation de propagation d'ondes en lignes de transmissions et que par conséquent il est possible de modéliser un phénomène de diffusion de chaleur par la propagation d'une impulsion delta dans un réseau de lignes de transmission. Dans le chapitre suivant, nous allons étudier la diffusion thermique dans une barre à base semi-conducteur puis on prendra un exemple de composant de puissance le HBT.

III.1 Introduction

L'utilisation de l'outil informatique dans la résolution des problèmes scientifiques et technologiques, a donné naissance à de nombreux algorithmes dont la plupart sont de nature mathématiques et très peu sont de nature analogique. Dans ce dernier cas une analogie est établie entre le problème étudié et son analogue électrique ou électronique.

La méthode TLM (Transmission-Line-Matrix) s'inscrit dans cette dernière catégorie et se trouve être un outil puissant dans l'étude de plusieurs phénomènes de propagation d'ondes électromagnétiques, de diffusion de chaleur de propagation des ondes acoustiques et même l'optimisation des circuits électriques [53].

Dans ce chapitre on va faire une simulation du comportement thermique d'un composant électronique : le Transistor Bipolaire à Hétéojonction (HBT) mais en passant d'abord par la simulation du phénomène de diffusion thermique dans une barre de AsGa, en faisant pour chaque partie une comparaison de résultats entre la méthode analytique et la méthode TLM.

III.2 Modélisation du phénomène de diffusion thermique dans une barre

III.2.1 Solution Analytique

III.2.1.1 Modélisation unidimensionnelle

Considérons le processus de propagation de chaleur dans une barre homogène dont la longueur est suivant l'axe (x). L'équation de la chaleur dans ce cas est :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{K}{\rho C_p} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (\text{III.1})$$

La solution analytique consiste à trouver une formulation mathématique qui satisfait les conditions physique du problème c'est-à-dire aux conditions initiales de distribution de la température et aux conditions aux limites de la barre.

Pour une barre semi-infinie latéralement isolée où une quantité finie de chaleur est injectée à l'extrémité gauche sous forme d'une impulsion instantanée. La solution de l'équation (III.1) est une distribution Gaussienne de la forme [54]:

$$T(x, t) = T_A + \frac{T_{\max}}{\sqrt{\pi \cdot \alpha \cdot t}} e^{-\frac{x^2}{4 \cdot \alpha \cdot t}} \tag{III.2}$$

avec $\alpha = \frac{K}{\rho C_P}$; dans le cas de AsGa $\alpha = 0.247 \text{ m}^2/\text{s}$

T_{\max} : Amplitude de l'impulsion de chaleur injectée,

T_A : Température ambiante initiale.

La figure (III.1) représente la variation de la température simulée par Maple 13 dans le cas d'une barre semi-infinie qui peut être considérée comme une barre infinie où la température est injectée en son milieu. C'est le cas classique d'une Gaussienne qui diminuera dans le temps tout en s'aplatissant.

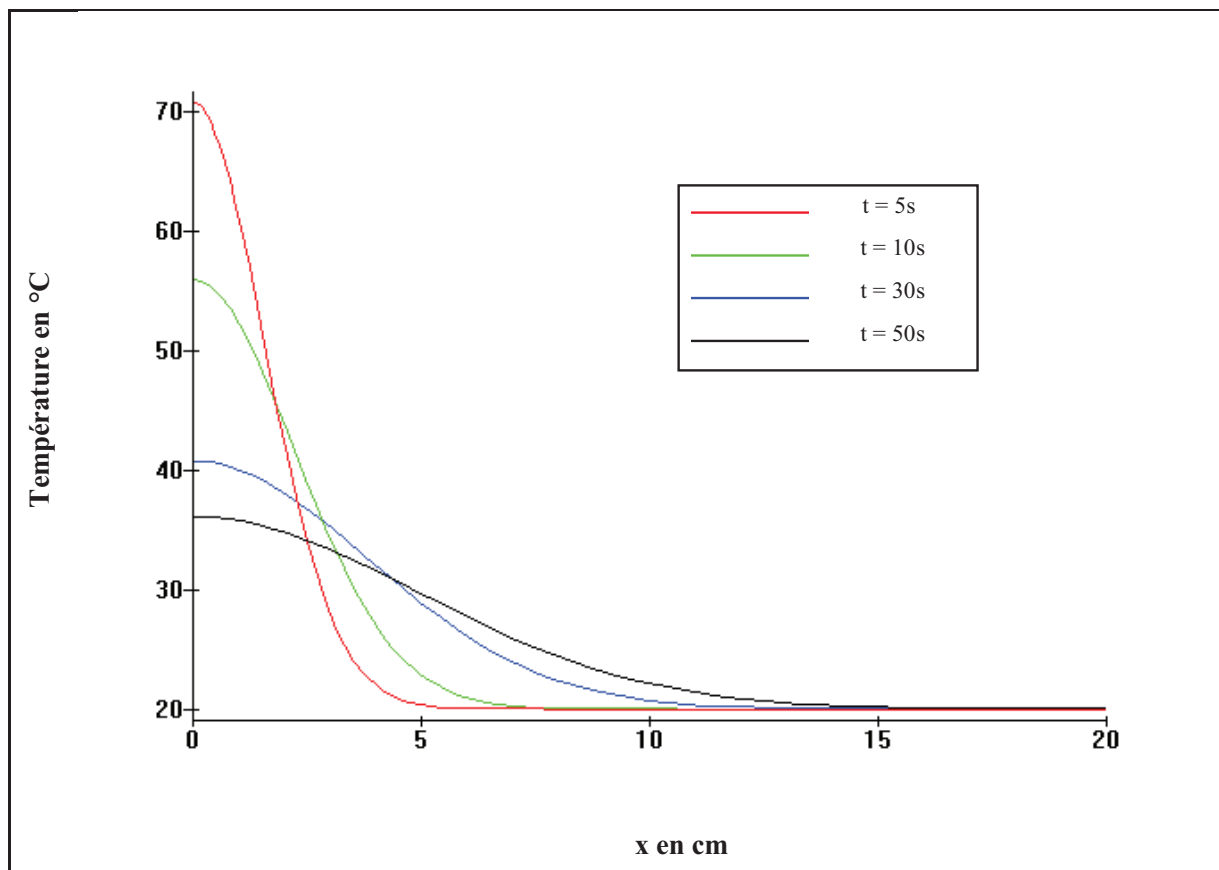


Figure III.1 Variation de la température dans une barre semi-infinie

En déplaçant la position de source de chaleur au centre de la barre en AsGa, on a le résultat suivant, Figure III.2 :

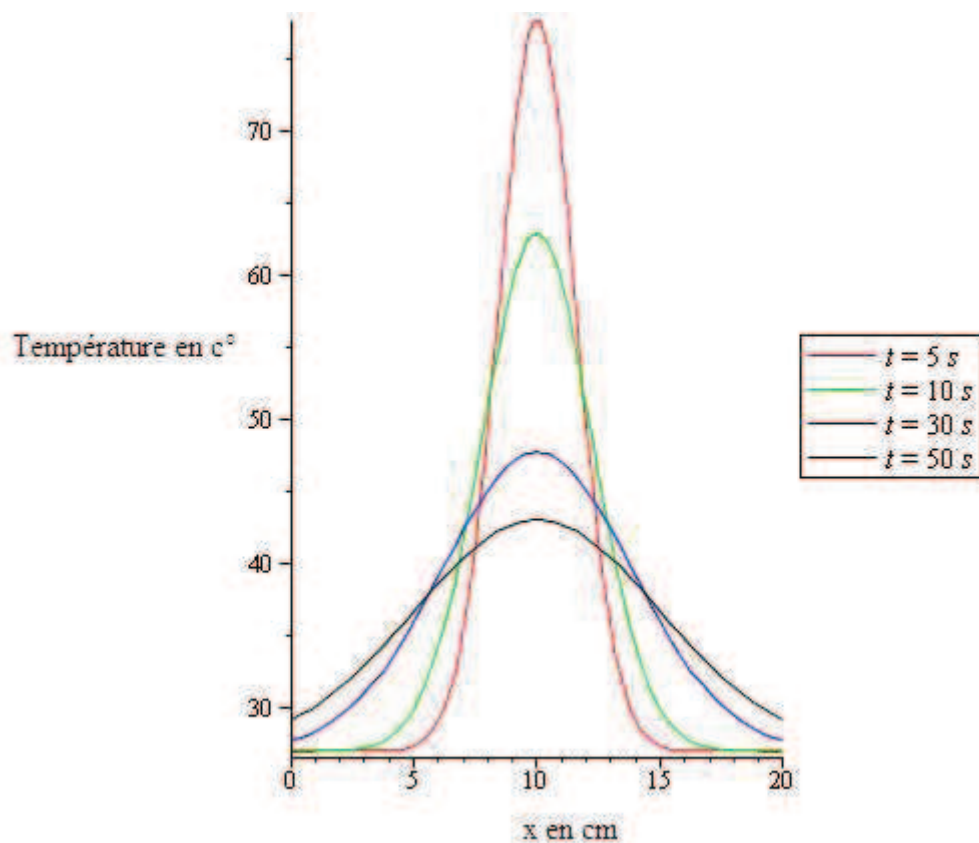


Figure III.2 Variation de la température dans une barre semi-infinie
(Source de chaleur au milieu)

III.2.1.2 Modélisation bidimensionnelle et tridimensionnelle

Les solutions analytiques qui satisfont les conditions initiales et aux limites de la barre, pour le cas bidimensionnel et tridimensionnel, se présentent de la même manière sous formes suivantes[54]:

► En deux dimensions :

$$T(x, y, t) = T_A + \frac{T_{max}}{\pi \cdot \alpha \cdot t} e^{-\frac{(x^2+y^2)}{4 \cdot \alpha \cdot t}} \quad (\text{III.3})$$

► En trois dimensions :

$$T(x, y, z, t) = T_A + \frac{T_{max}}{(\pi \cdot \alpha \cdot t)^{3/2}} e^{-\frac{(x^2+y^2+z^2)}{4 \cdot \alpha \cdot t}} \quad (\text{III.4})$$

La Figure III.3 représente la variation de la température simulée par Maple 13 dans le cas d'une barre semi-infinie qui peut être considérée comme une barre infinie où la température est injectée en son milieu.

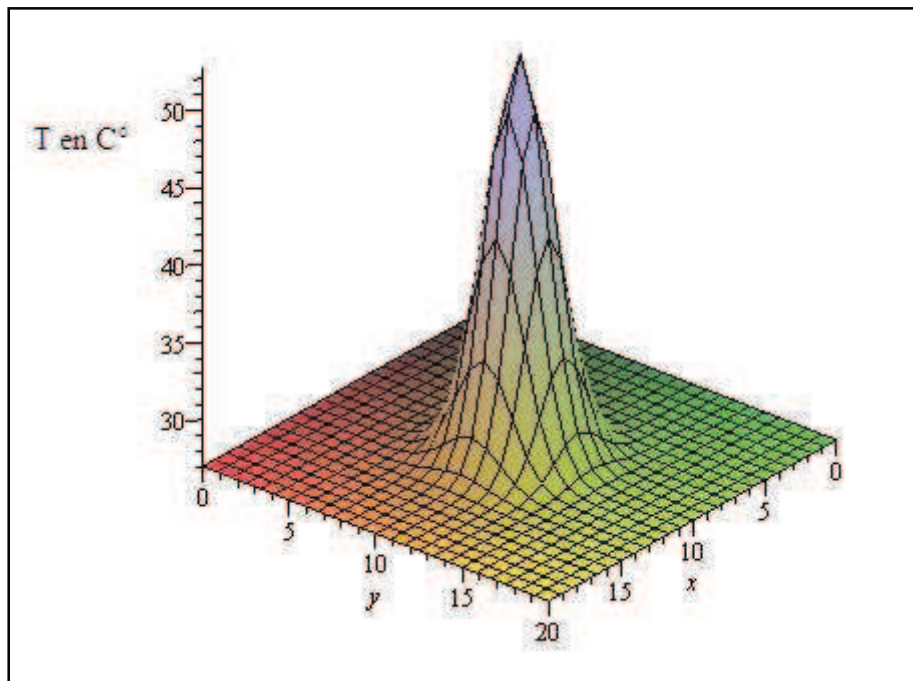


Figure III.3 Variation de la température dans une barre semi-infinie dans le cas bidimensionnel
(Source de chaleur au milieu)

En injectant deux sources de chaleur, on obtient le résultat suivant, Figure III.4 :

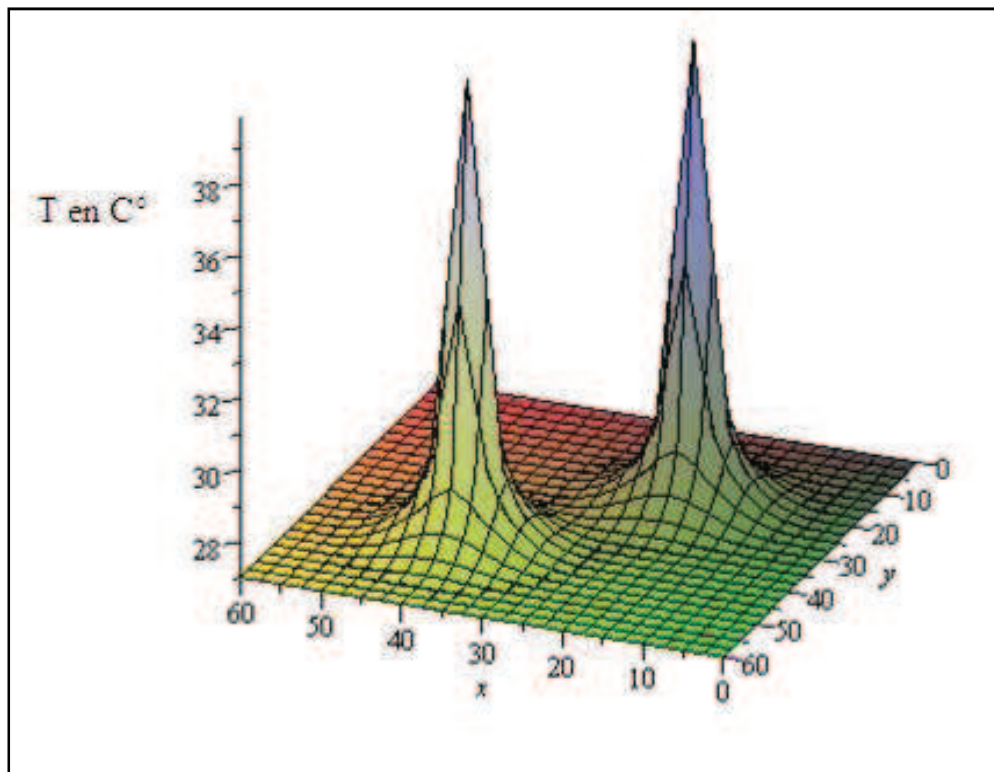


Figure III.4 Variation de la température dans une barre semi-infinie
(deux sources de chaleurs)

Dans le cas tridimensionnel, nous avons injecté par exemple six sources de chaleurs dans la barre, indiquant ainsi l'évolution tridimensionnelle de température en présentant la solution analytique par le Maple 13, Figure III.5.

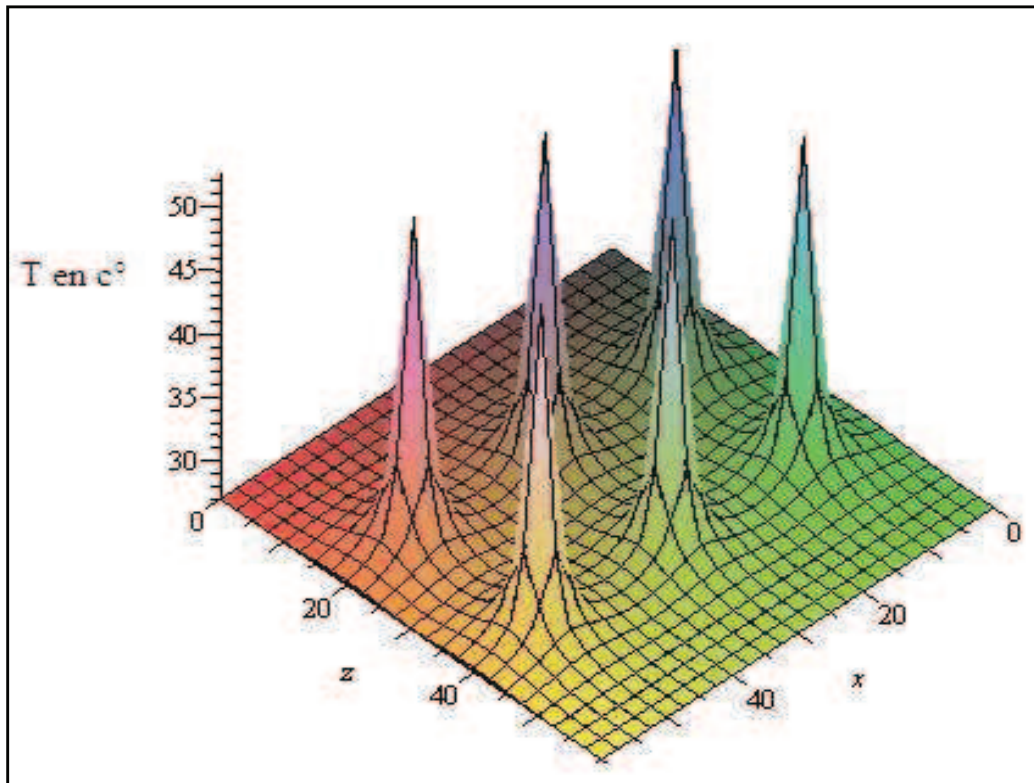


Figure III.5 Variation de la température dans une barre semi-infinie
(Six sources de chaleurs)

L'évolution du profil de température se fait donc, quelle que soit la dimension, suivant des profils gaussiens qui ne dépend que des conditions initiales et aux limites et des positions des sources de chaleur en se basant sur la linéarité des équations utilisées.

III.2.2 Solution Numérique

III.2.2.1 Modélisation unidimensionnelle

Considérons un barreau enAsGa de 20 cm de longueur et 1cm^2 de section, latéralement isolée. On aura 20 nœuds si on divise cette barre en 20 éléments ayant chacun une longueur de 1 cm qui est le pas spatial dx , Figure (III.6). On injecte à l'une de ses extrémités une impulsion de chaleur. En appliquant la méthode de TLM à ce cas unidimensionnel on aura donc :

- la résistance distribuée R_d qui représentera la conductivité thermique K_t

- la capacité distribuée C_d qui représentera la chaleur spécifique de l'AsGa pour chaque élément de la ligne.
- Comme l'inductance thermique n'existe pas, la ligne de transmission n'aura pas d'inductance. Ceci conduit à une erreur dans le modèle, qu'on peut rendre négligeable. En effet, la vitesse de propagation le long de la ligne est donnée par [55]:

$$v = \frac{1}{\sqrt{L_d C_d}} = \frac{dx}{dt} \tag{III.5}$$

donc

$$\frac{1}{L_d C_d} = \left(\frac{dx}{dt}\right)^2 \tag{III.6}$$

D'où $L_d = \left(\frac{dt}{dx}\right)^2 \frac{1}{C_d}$. Comme $L(x) = L_d \cdot dx$, $C(x) = C_d \cdot dx$, alors l'inductance au noeud (x) est

donnée par :

$$L(x) = \frac{(dt)^2}{C(x)} \tag{III.7}$$

Pour une valeur fixe de la capacité $C(x)$ (un élément de volume fixe), l'erreur due à l'inductance d'un noeud est proportionnel au carré du pas temporel dt utilisé dans la procédure numérique de la méthode TLM. Quoique cette technique soit inconditionnellement stable pour n'importe quel pas temporel, une limite supérieure de dt est imposée afin que l'erreur soit suffisamment petite.

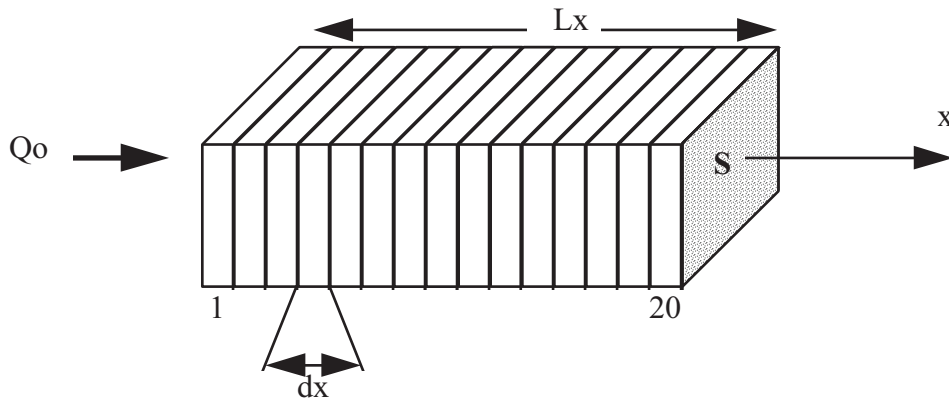


Figure III.6 Division de la barre AsGa en nœuds

La Figure II.2 représentait le circuit électrique et son équivalent en ligne de transmission ou la conductivité et la capacité calorifique pour le AsGa à la température ambiante sont:

$$K_T(x) = 0.46 \text{ W/cm.}^\circ\text{K}$$

$$C_p(x) = 0.35 \text{ J/g.}^\circ\text{K}$$

Le barreau étant considéré homogène les coefficients de réflexion sont nuls aux frontières inter-nœuds sauf aux limites physiques du solide. Si on suppose qu'il n'y a pas d'échange de chaleur avec le milieu extérieur, alors:

$$\begin{aligned} T^i(1,1) &= T^r(1,1) \\ T^i(20,2) &= T^r(20,2) \end{aligned} \tag{III.8}$$

La température nodale ${}_kT$ à l'itération k est déterminée par la somme des impulsions incidentes au nœud dans les deux directions. L'élévation totale de la température au nœud (x) est donnée par:

$$T(x) = T^i(x,1) + T^i(x,2) \tag{III.9}$$

La figure (III.8) montre l'organigramme de la méthode TLM pour ce cas unidimensionnel. La figure (III.7) représente la comparaison entre la solution analytique de l'équation de la chaleur unidimensionnelle et celle modélisée par la méthode TLM pour la barre en AsGa dans laquelle on applique une impulsion de chaleur à l'une de ces extrémités.

On constate que ces deux courbes ont même allure, mais avec une légère différence, ceci est due au fait que dans le modèle numérique, on a considéré une barre finie (il y a pas de l'infini

ou semi-infini en simulation) de 20 cm tandis qu'elle est considérée semi-infini dans l'étude analytique.

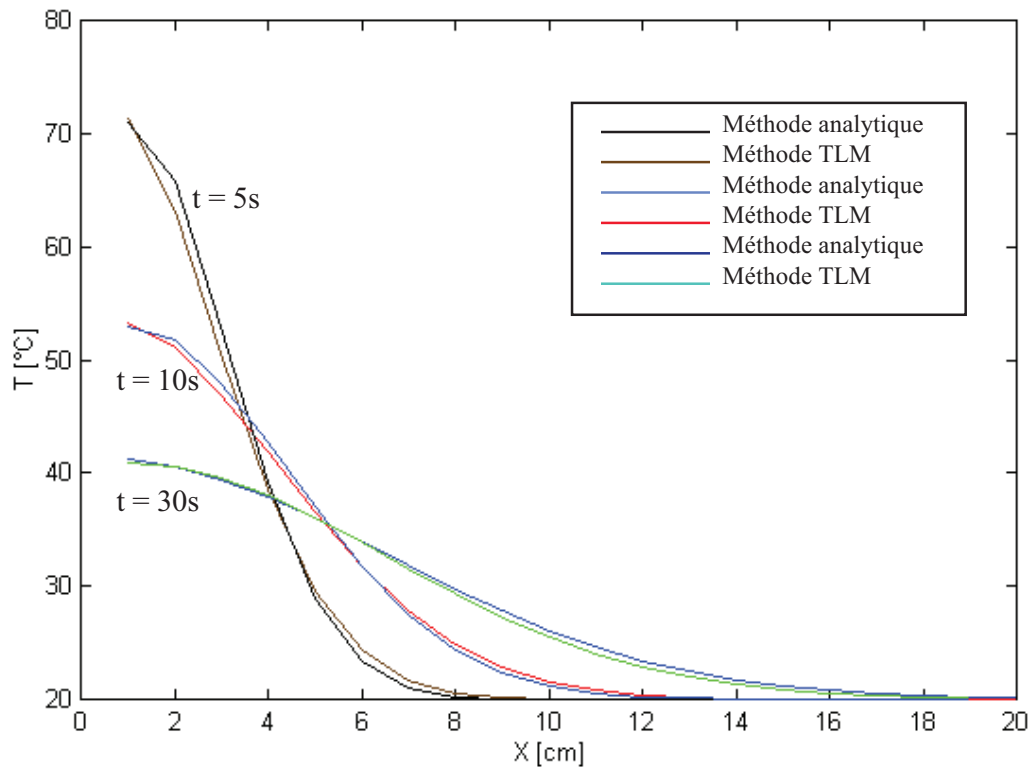


Figure III.7 Comparaison entre la solution analytique et celle modélisée par la méthode TLM
Pour la barre en AsGa.

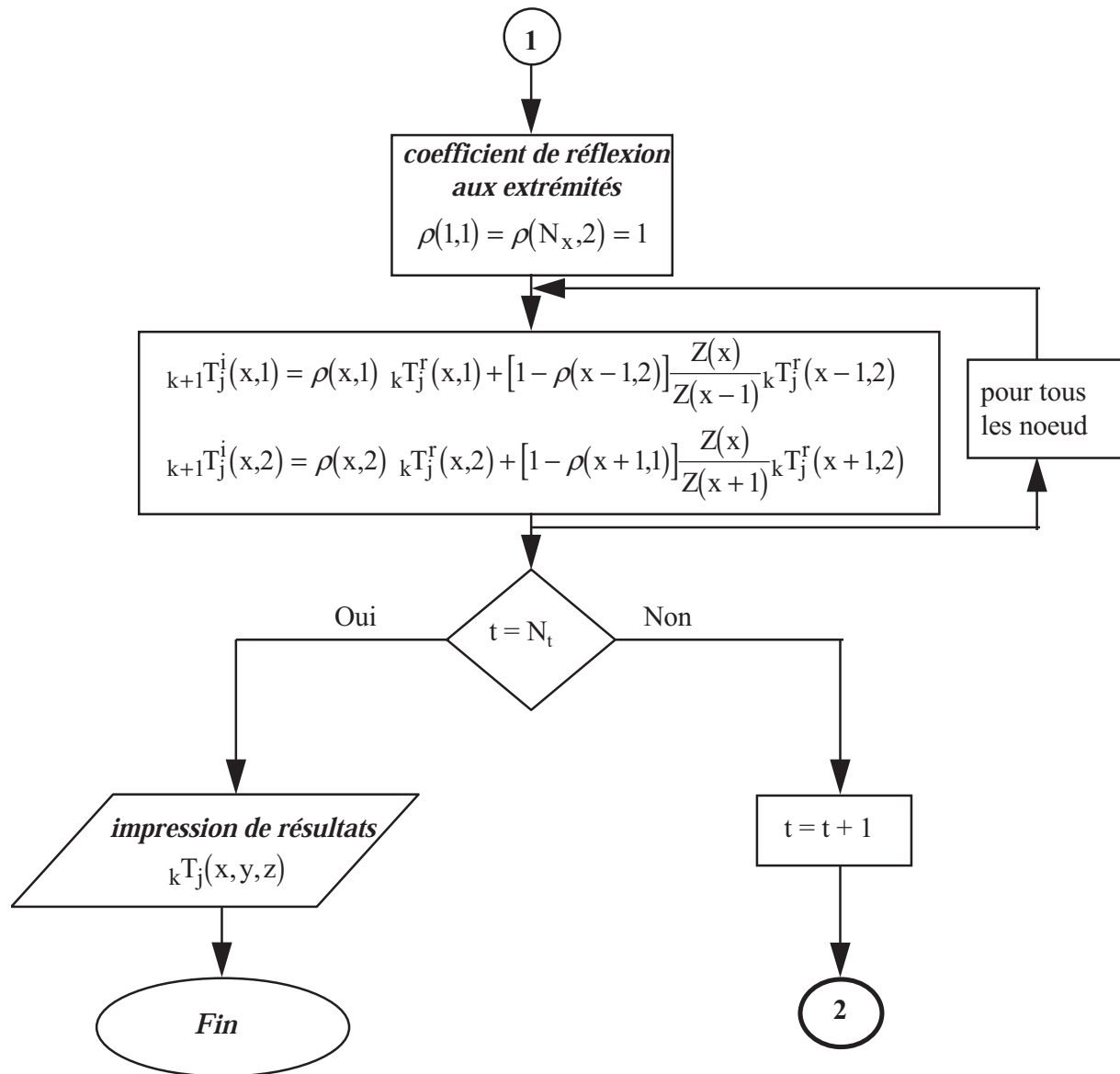


Figure III.8 Organigramme de la méthode TLM-1D appliquée à la diffusion de chaleur à travers une barre AsGa

III.2.2.2 Modélisation tridimensionnelle

Dans la réalité le cas unidimensionnel est exceptionnel ou est souvent utilisé comme une première étude. La puissance d'une technique numérique se mesure dans sa capacité à résoudre le problème tridimensionnel. C'est pourquoi nous allons tester pour la même barre la technique TLM pour le cas à trois dimensions.

On considère toujours notre barreau en AsGa dans lequel on injecte une impulsion de chaleur à l'une de ses extrémités. Les dimensions de ce barreau sont : 20 cm de longueur, et une section de 30 x 20 cm².

La discrétisation du barreau dans le cas tridimensionnel se fait comme suit: on divise notre barreau en éléments de formes parallélépipède de volume dx.dy.dz (Figure III.9).

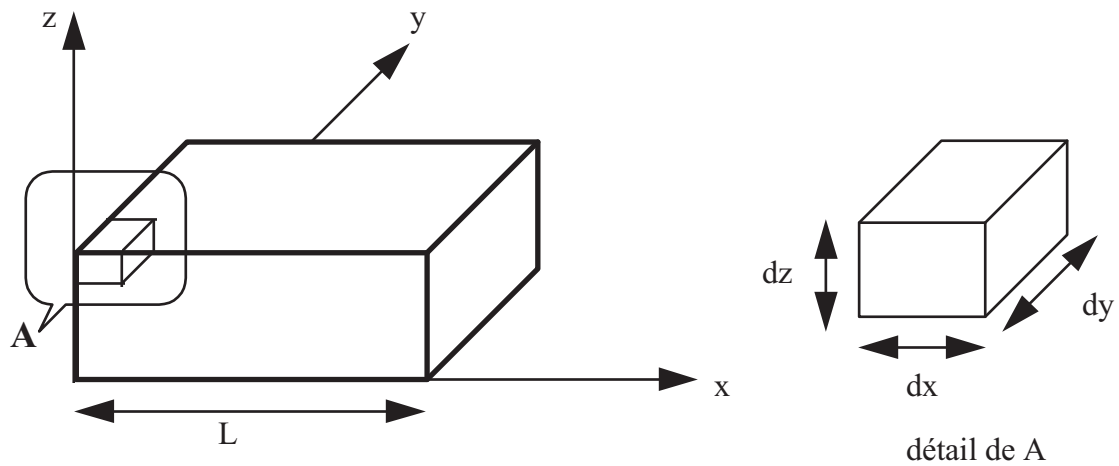


Figure III.9 Discrétisation volumique du barreau

Le circuit électrique équivalent en ligne de transmission de chaque nœud est celui de la Figure (II.3) où les éléments électriques sont calculés à partir des relations suivantes [63]:

$$R_x = \frac{dx}{2K_T dydz} \quad (\text{Suivant la direction } x) \quad (III.10)$$

$$R_y = \frac{dy}{2K_T dx dz} \quad (\text{Suivant la direction } y) \quad (III.11)$$

$$R_z = \frac{dz}{2K_T dx dy} \quad (\text{Suivant la direction } z) \quad (III.12)$$

et

$$C = \rho C_p dx dy dz \quad (III.13)$$

Comme à trois dimensions, la capacité du nœud se divise entre les lignes de transmission, alors l'impédance caractéristique de chaque ligne est donnée par :

$$Z = \frac{dt}{C/3} = \frac{3dt}{\rho C_P dx dy dz} \tag{III.14}$$

Si on suppose notre barre parfaitement isolée alors les six extrémités sont considérées comme des circuits ouverts, Figure (III.10). Les coefficients de réflexions sont alors égaux à l'unité ($\rho = 1$). Cette condition implique que les impulsions incidentes aux extrémités du réseau TLM seront réfléchies avec la même amplitude et dans le même sens [56]. On aura donc:

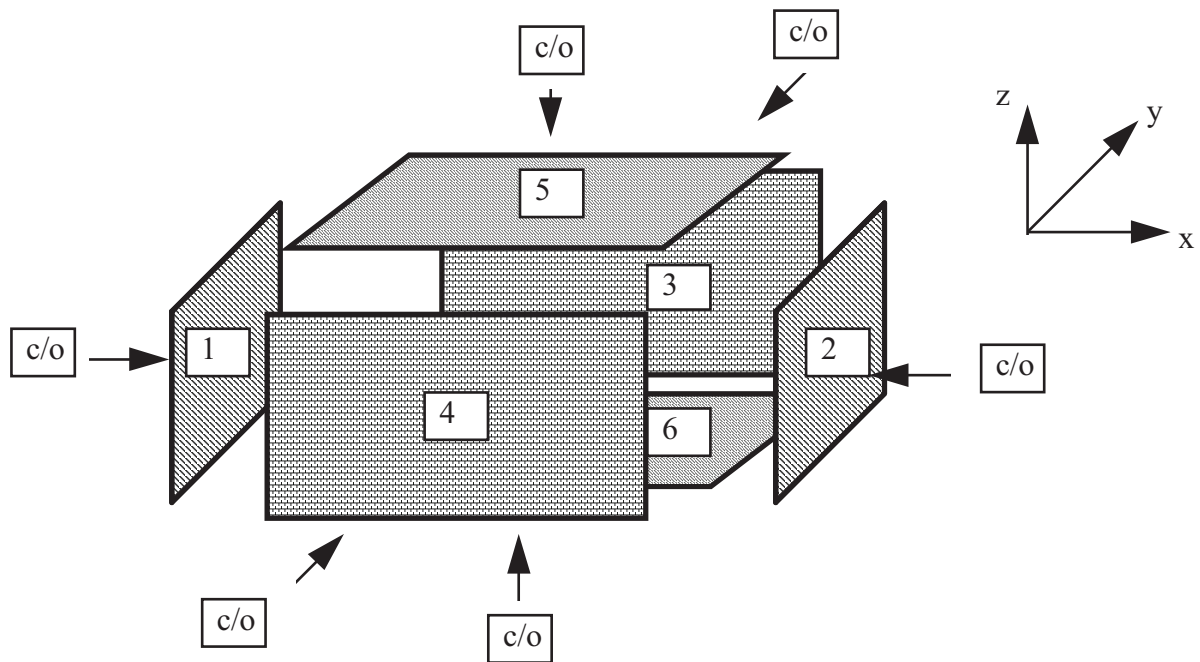


Figure III.10 Conditions aux limites

$$\begin{aligned} T_1^i(1, y, z) &= T_1^r(1, y, z) \\ T_2^i(N_x, y, z) &= T_2^r(N_x, y, z) \\ T_3^i(x, 1, z) &= T_3^r(x, 1, z) \\ T_4^i(x, N_y, z) &= T_4^r(x, N_y, z) \\ T_5^i(x, y, 1) &= T_5^r(x, y, 1) \\ T_6^i(x, y, N_z) &= T_6^r(x, y, N_z) \end{aligned} \tag{III.15}$$

Avec $x = 1, \dots, N_x$

$$y = 1, \dots, N_y$$

$$z = 1, \dots, N_z$$

Le calcul des impulsions réfléchies et incidentes sur les nœuds du réseau s'effectue selon les relations (II.46 à II.51) et repris dans l'organigramme de la figure (III.12).

La figure (III.11) montre la distribution tridimensionnelle de la température. Les figures (a); (b); (c); et (d) montrent l'évolution de la température en fonction du temps selon quatre plans différents dans la direction z, au temps t=5s, après l'injection d'une impulsion de chaleur. On constate que la distribution est gaussienne aussi bien dans les plans (x-y) que dans la direction des z.

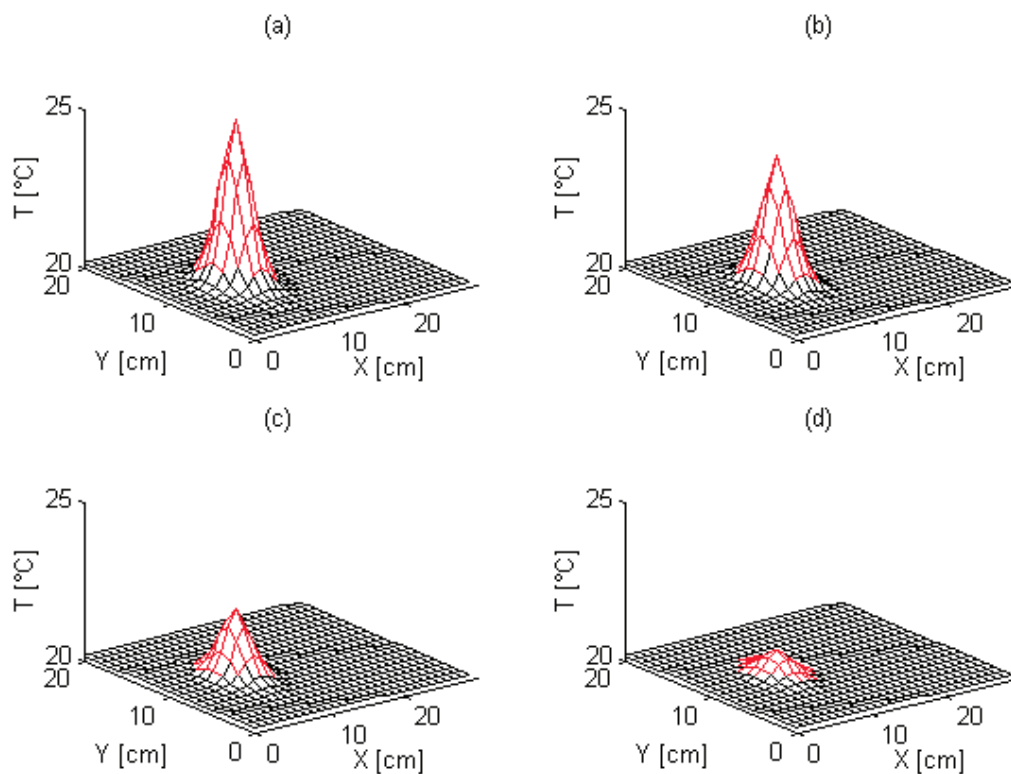


Figure III.11 Visualisation tridimensionnelle de la variation de la température dans une barre en AsGa selon les quatre plans (a,b,c,d).

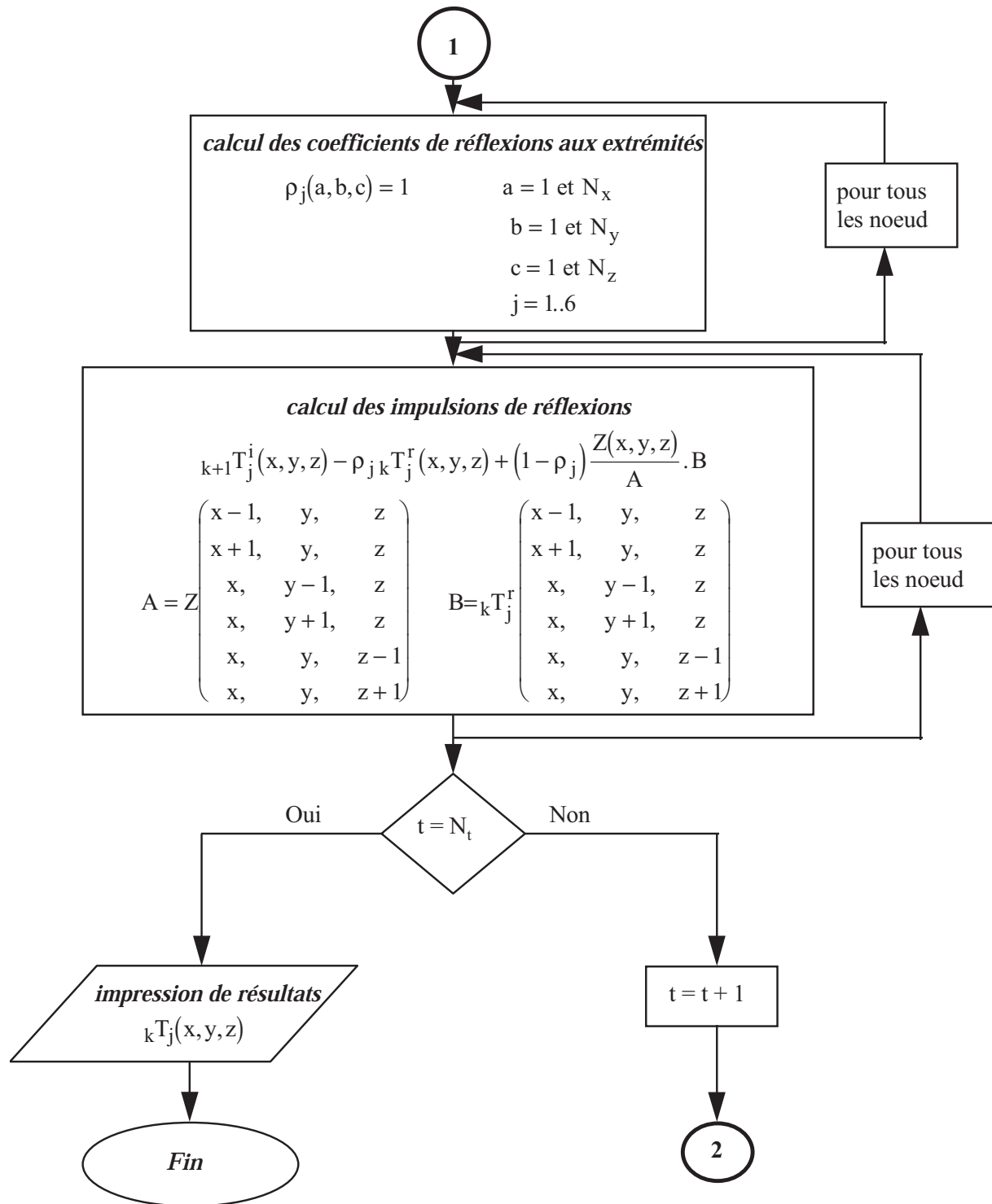


Figure III.12 Organigramme de la méthode de TLM-3D appliquée au phénomène de diffusion thermique dans un barreau à semi-conducteur.

III.3 Modélisation tridimensionnelle par les méthodes analytique et la TLM de la diffusion thermique pour le transistor HBT

III.3.1 Généralités

Ces dernières années une grande importance a été donnée aux alliages semi-conducteurs ternaire III-V type $A_xB_{1-x}C$ telle que les éléments A, B, C appartiennent aux colonnes III ou V. Récemment ces alliages à semi-conducteurs ont une grande attention comme élément essentiel pour la fabrication des composants de puissances et micro-ondes, exemple : le Transistor Bipolaire à Hétérojonction (HBT). L'idée de réaliser des transistors bipolaire à hétérojonction visait initialement à produire des dispositifs présentant une efficacité d'injection largement supérieure à celle des homo-transistors classiques [57].

L'intensification des recherches sur les matériaux semi-conducteurs III.V, déclenchée par l'essor des dispositifs optoélectroniques, et le développement des techniques d'épitaxie en phase liquide multicouches, et les techniques de croissance d'épitaxie MBE (Molecular Beam Epitaxy) et MOCVD (Metal Organic Chemical Vapor Deposition) ont permis de recenser des couples de matériaux susceptibles de constituer des hétérojonctions présentant des propriétés intéressantes. Parmi ceux-ci, l'association GaAlAs/GaAs cumule de nombreux avantages: largeur de bande interdite relativement importante qui autorise un fonctionnement à haute température, mobilité électronique élevée qui permet d'atteindre de bonnes performances en haute fréquence, mailles cristallines assez proches qui minimisent les recombinaisons parasites... Ce sont Dumke, Woodall et Rideout qui ont réalisé en 1972 les premiers transistors bipolaires GaAlAs (N)/GaAs (N)/GaAs (N) obtenus par épitaxie en phase liquide. Depuis, d'autres équipes ont abouti, par épitaxie par jets moléculaires, à la réalisation de dispositifs de même type présentant des performances remarquables [57].

III.3.2 Introduction au Transistor bipolaire à hétérojonction

Le transistor bipolaire à hétérojonction GaAlAs/GaAs tire ses avantages tout d'abord des propriétés de l'arséniure de gallium (forte mobilité électronique) mais aussi des particularités que lui confère l'hétérojonction émetteur-base. En effet, à cause de la très forte valeur de l'efficacité d'injection, le gain intrinsèque en courant est pratiquement égal au facteur de transport. Dans ces conditions, le gain en courant global ne dépend pas du dopage

d'émetteur et n'est sensible au dopage de base qu'à travers les valeurs de la durée de vie des électrons. Il est ainsi possible de choisir des profils de dopages pour lesquels l'émetteur est nettement moins dopé que la base. Cette particularité permet de réduire conjointement la résistance de base et la capacité de transition d'émetteur, ce qui constitue un avantage important par rapport aux transistors silicium, ce qui constitue un comportement bien en haute fréquence, il apparaît que la forte mobilité électronique dans le GaAs contribue à augmenter ces performances.

La sélection de la paire AlGaAs/GaAs (normalement $\text{Al}_{0,3}\text{GaAs}_{0,7}/\text{GaAs}$) est dû principalement à leur constantes de réseau et leur coefficients thermique qui sont approximativement les mêmes ce qui élimine en commun les fissurations dans la fabrication de composants à hétéro structures [58].

III.3.3 Structure de base et conception

Considérons une structure HBT (simple hétéro-structure) constituée d'une large couche comme émetteur (épaisse) AlGaAs (type N), d'une base GaAs (type P) fortement dopée et un collecteur GaAs (type N) légèrement dopé et un sub-collecteur (type N) fortement dopé. Ces couches sont supposées sur un substrat semi-isolant GaAs par chacune des techniques MBE ou MOCVD. Le schéma de tel composant est donné en figure III.13.

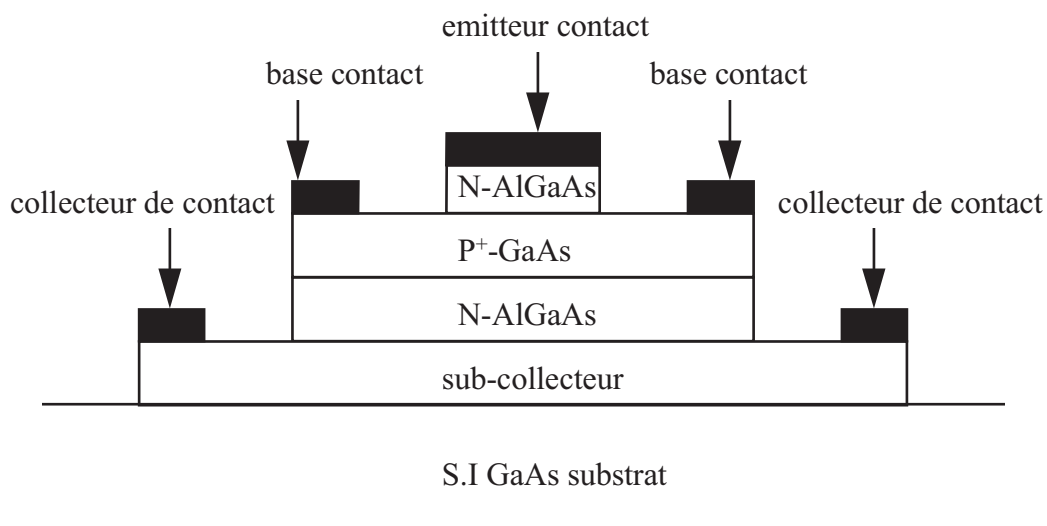


Figure III.13 Schéma du HBT N/P+/n AlGaAs/GaAs/GaAs

Le diagramme d'énergie du HBT sous fonctionnement direct (tension base émetteur $V_{BE} > 0$ et tension collecteur base $V_{CB} > 0$) est donnée en figure (III.14) où $-X1$ et $X2$ sont les limites de la zone de charge de l'émetteur-base et $X3$ et $X4$ sont ceux de la zone de charge de collecteur-base. Il y a une discontinuité de la bande de valence, ΔE_v , au niveau de l'hétérojonction par la largeur de la bande interdite de l'émetteur E_{GE} qui est plus grande que celle de la base E_{GB} . ΔE_v augmente la hauteur de la barrière de potentiel de bande de valence au niveau de l'hétérojonction EB (Emetteur -Base) et ce qui réduit le passage des trous de base vers l'émetteur. Ce qui permet à la fois, avoir une base mince et fortement dopée, maintenir un gain de courant grand et ΔE_v bénéficie de deux avantages :

- le premier, la grande concentration de dopage de la base qui diminue sa résistance série, qui réduira le AC et DC,
- le second : la mince base réduira le temps de transit et augmente la fréquence de coupure.

Il y a apparition d'un « spike » au niveau de ΔE_c qui est dû aux porteurs de charge libres dans l'hétérojonction, qui se déplacent grâce aux phénomènes thermodynamique et Tunnel à la place du phénomène de transport en diffusion par drift. Ce spike influe sur l'efficacité d'injection dans l'émetteur et diminue le courant du collecteur. Ce problème peut être abrégé en insérant une couche mince graduelle (graded layer) avant l'hetero-interface dans laquelle le taux des moles Al augmente linéairement et/ou en insérant une mince couche en AsGa non dopée (spacer) après l'hétéro-interface. La première couche introduite réduit l'importance des phénomènes thermoélectroniques et Tunnel et fait que le passage des porteurs libres de l'émetteur vers la base soit plus efficace. D'autre côté l'insertion d'une couche non dopée décroît la barrière de potentiel avant le spike [59].

III.3.4 Propriétés de l'hétérojonction et discontinuités de bandes

Concentrons-nous sur une hétérojonction émetteur-base. La discontinuité de la bande de conduction ΔE_c et celle de la bande de valence ΔE_v peuvent être définie comme suit :

$$\Delta E_c = q(\chi_B - \chi_E) \tag{III.16}$$

$$\Delta E_v = E_{GE} - E_{GB} - q(\chi_B - \chi_E) = \Delta E_G - \Delta E_c \tag{III.17}$$

Où : les indices E et B indiquent respectivement Emetteur et Base, χ est l'affinité électronique, E_G est l'énergie entre bande, $\Delta E_G = E_{GE} - E_{GB}$ Représente la différence entre le

niveau d'énergie, V_{bi} la tension de blocage de l'émetteur - base est relié aux paramètres du matériau par la relation suivante :

$$V_{bi} = (\chi_B - \chi_E) - \left(\frac{1}{2q}\right)\Delta E_G + V_T \ln\left(\frac{N_E N_B}{n_{iE} n_{iB}}\right) + \frac{1}{2} V_T \ln\left(\frac{N_{CB} N_{VE}}{N_{CE} N_{VB}}\right) \quad (III.18)$$

Avec :

V_T : la tension thermique,

n_i : la concentration intrinsèque des porteurs de charges,

N_B : la concentration de dopage de la base,

N_E : la concentration de dopage de l'émetteur,

N_C : la densité d'états effective dans la bande de conduction,

N_V : la densité d'états effective dans la bande de valence.

ainsi

$$V_{B1} + V_{B2} = V_{bi} - V_{BE} \quad (III.19)$$

Avec

V_{BE} est la tension appliquée au niveau de la jonction émetteur-base,

V_{B1} et V_{B2} sont respectivement les barrières de potentiel du coté de l'émetteur et de la base (voir figure III.15). Les expressions de V_{B1} et V_{B2} sont donnée par les relations suivantes :

$$V_{B1} = \epsilon_B N_B \frac{(V_{bi} - V_{BE})}{(N_E \epsilon_E + N_B \epsilon_B)} \quad (III.20)$$

$$V_{B2} = \epsilon_E N_E \frac{(V_{bi} - V_{BE})}{(N_E \epsilon_E + N_B \epsilon_B)} \quad (III.21)$$

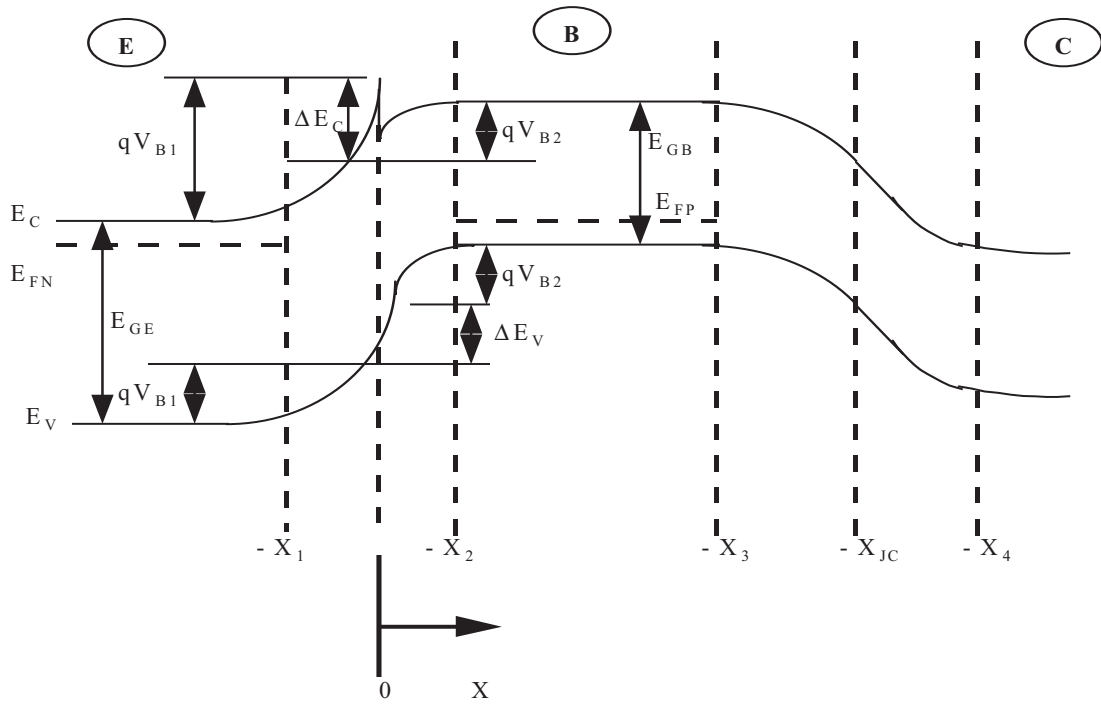


Figure III.14 Diagramme de bande d'énergie pour le Transistor HBT

L'épaisseur de la région de charge d'espace des deux cotés de l'hétérojonction est [59] :

$$X_1 = \left[2\epsilon_B \epsilon_E N_B \frac{(V_{bi} - V_{BE})}{qN_E(N_E \epsilon_E + N_B \epsilon_B)} \right]^{\frac{1}{2}} \tag{III.22}$$

$$X_2 = \left[2\epsilon_B \epsilon_E N_E \frac{(V_{bi} - V_{BE})}{qN_B(N_E \epsilon_E + N_B \epsilon_B)} \right]^{\frac{1}{2}} \tag{III.23}$$

Avec ϵ_E et ϵ_B sont les permittivités relatives du matériau de la zone de transition émetteur et base respectivement.

Ces équations sont obtenues à partir de l'équation de Poisson utilisant l'approximation conventionnelle de la déplétion en considérant que le potentiel et la densité du flux des porteurs libres sont continus au niveau de l'hétérojonction. Les discontinuités en bandes d'énergie influent beaucoup sur le déplacement des porteurs libres de l'hétérojonction et la détermination précise de chaque paramètre est d'une importance primordiale en modélisation.

Cependant plusieurs travaux ont prouvé que la discontinuité de la bande de valence est considérablement large ($\Delta E_C = 0.22$ eV et $\Delta E_V = 0.15$ eV pour une hétérojonction $Al_{0.3}GaAs_{0.7}/GaAs$).

III.3.5 Energie de quasi-niveau de Fermi dans une hétérojonction

Dans une hétérojonction abrupte n-p, l'application d'une alimentation directe réduit la barrière pour le flux des électrons dans la base en outre augmente la barrière pour le flux des électrons dans la direction opposée. Ceci conduit à une situation où le flux d'électrons net dans la région à charge d'espace de l'hétérojonction ne doit pas être petit, d'autre part, non comme dans une homo-jonction, le flux des électrons ne peut être considéré comme une petite perturbation à l'équilibre à travers la région de charge d'espace. En Figure III.15, E_{FN} et E_{FP} sont les énergies du quasi-niveau de Fermi dans le coté émetteur-base de la région de charge d'espace respectivement.

La différence entre les niveaux de Fermi, quand $x = X_2$ est donnée par la relation suivante :

$$E_{FNP} - E_{FP} = kT \ln \left(\frac{[\Delta n(X_2) + n_0]}{n_0} \right) \quad (III.24)$$

Avec :

Δn : l'excès en concentration électronique,

n_0 : la concentration électronique à l'équilibre.

De l'autre côté de la région d'espace ($x = -X_1$) on a :

$$E_{FNN} - E_{FP} = qV_{BE} \quad (III.25)$$

Le niveau de Fermi E_{FP} est plat à travers la région dans ce cas là, la différence d'énergie à la limite $x=X_2$ est égale à :

$$E_{FNN} - E_{FNP} = qV_{BE} - kT \ln \left(\frac{[\Delta n(X_2) + n_0]}{n_0} \right) \quad (III.26)$$

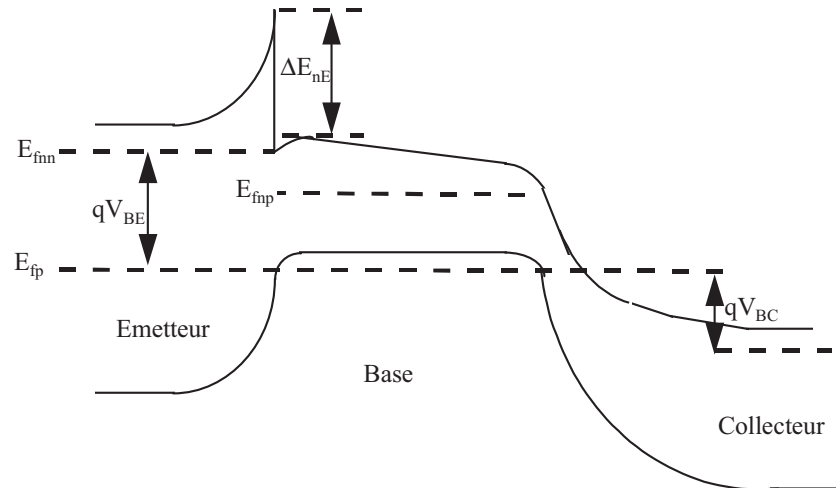


Figure III.15 Diagramme d'énergie de bande pour une hétérojonction émetteur-base.

L'étude physique du comportement du transistor comme une structure hétérojonction est importante avant l'analyse thermique ou autres car comprendre son comportement physique donnera une prévention de sa réaction en mode de fonctionnement.

III.4 L'effet thermique dans le HBT (AlGaAs/GaAs)

La haute performance en puissance du HBT est souvent sévèrement limitée par l'effet thermique. Dans un transistor HBT à seul émetteur nommé à seul doigt émetteur qu'on a considéré jusqu'à maintenant dans les sections précédentes, la génération de la chaleur ne peut pas être dissipée rapidement dans le milieu ambiant et ainsi augmente la température du réseau dans ce composant. Ce phénomène thermique existe dans un transistor HBT qui a une structure à un seul doigt (simple HBT finger) mais pour les composants HBT modernes en microondes ou puissances, une structure à multi-émetteurs comme doigts est fréquemment utilisée (multi-finger HBT) ou chacun fait la fonction d'un HBT. Ces doigts émetteurs sont arrangés en parallèles l'un à côté de l'autre avec un espace propre (figure III.16).

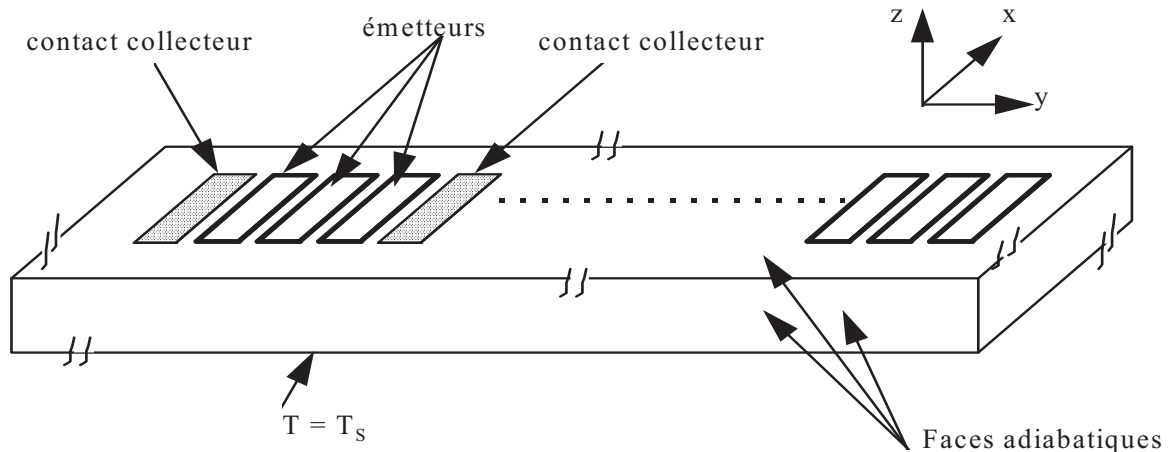


Figure III.16 Structure d'un HBT à n doigts

Toutes les études qui ont été faites sur le HBT en conception et en analyse thermique se sont concentrées sur une structure HBT à multi-doigts laquelle seul l'émetteur est séparé dans la superstructure (Eisland) et chaque'un de la base et le collecteur sont sous les doigts émetteurs montré en figure (III.17.a). Il existe aussi deux autres structures qui sont émetteur/base en superstructure (E/B island) et émetteur/base/collecteur en superstructure (E/B/C island) schématisé en figure (III.17.b) et figure (III.17.c) respectivement [60].

Chaque'une de ces structures permet le déplacement d'un faible courant et ainsi une énergie faible de chaleur peut être générée dans chaque cellule unité du HBT, et l'effet d'auto échauffement est faiblement marqué en comparant avec le cas d'un seul doigt émetteur. L'effet thermique dans un HBT à multi doigts est compliqué que celui d'un seul doigt car le couplage thermique entre les doigts voisins (l'effet de couplage thermique) est existant dans ce genre de composant.

Les effets d'auto-échauffement et de couplage thermiques sont appelés emballement thermique (dérives thermiques) car ils sont des phénomènes thermiques limites pour le bon fonctionnement du composant. Quand le courant de la base est fixé et relativement grand, le courant du collecteur décroît brusquement (c'est-à-dire emballement thermique), ainsi la tension collecteur-émetteur augmente au delà de la valeur critique.

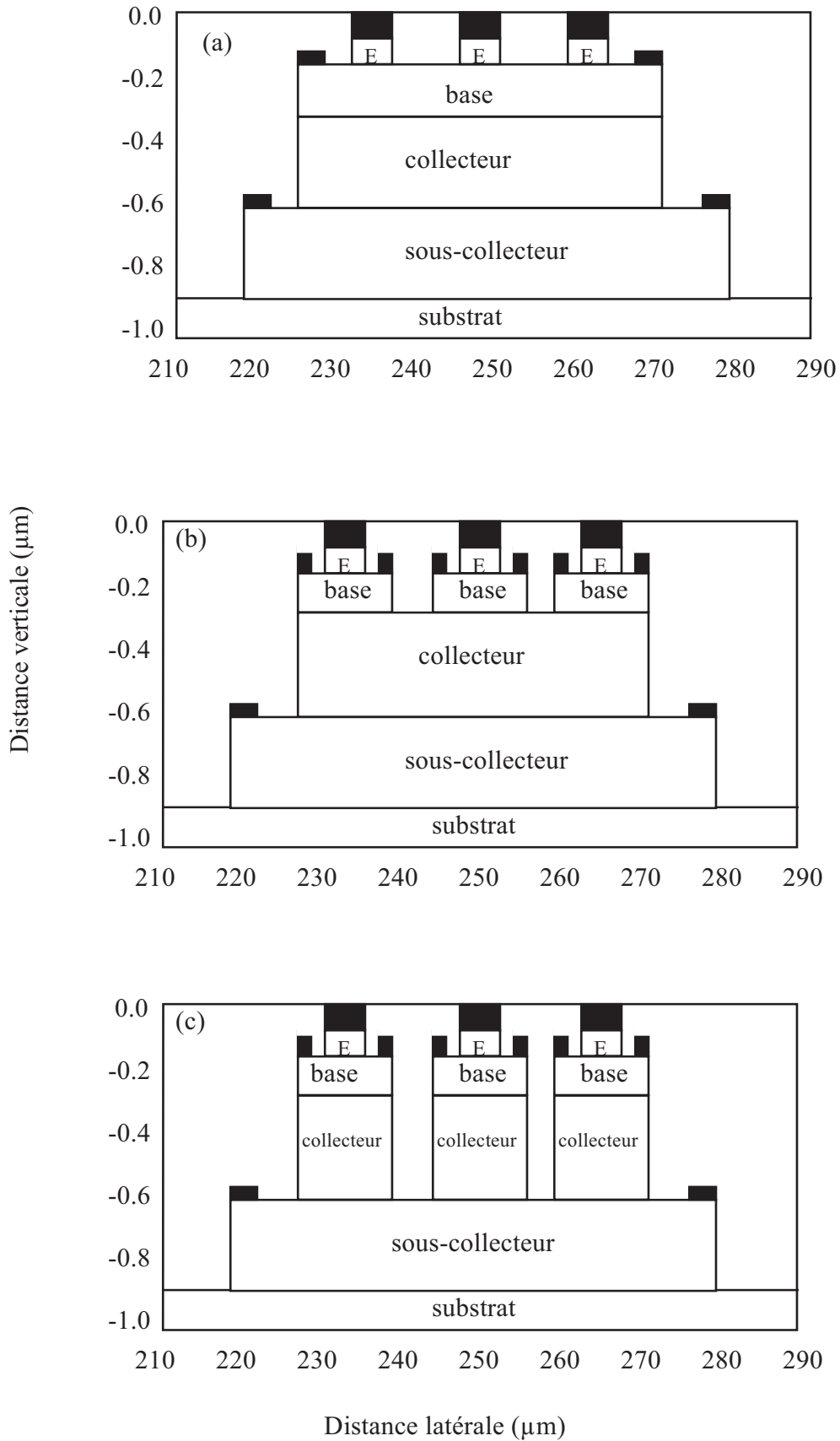


Figure III.17 Structure du composant de puissance HBT

(a) HBT à E-island, (b) HBT à E/B-island, (c) HBT à E/B/C-island

III.4.1 Effet auto-échauffement dans les HBT à seul émetteur

Considérons un HBT à seul émetteur de type N/P/N Al_{0,3}GaAs_{0,7}/GaAs comme montré en figure (III.18).

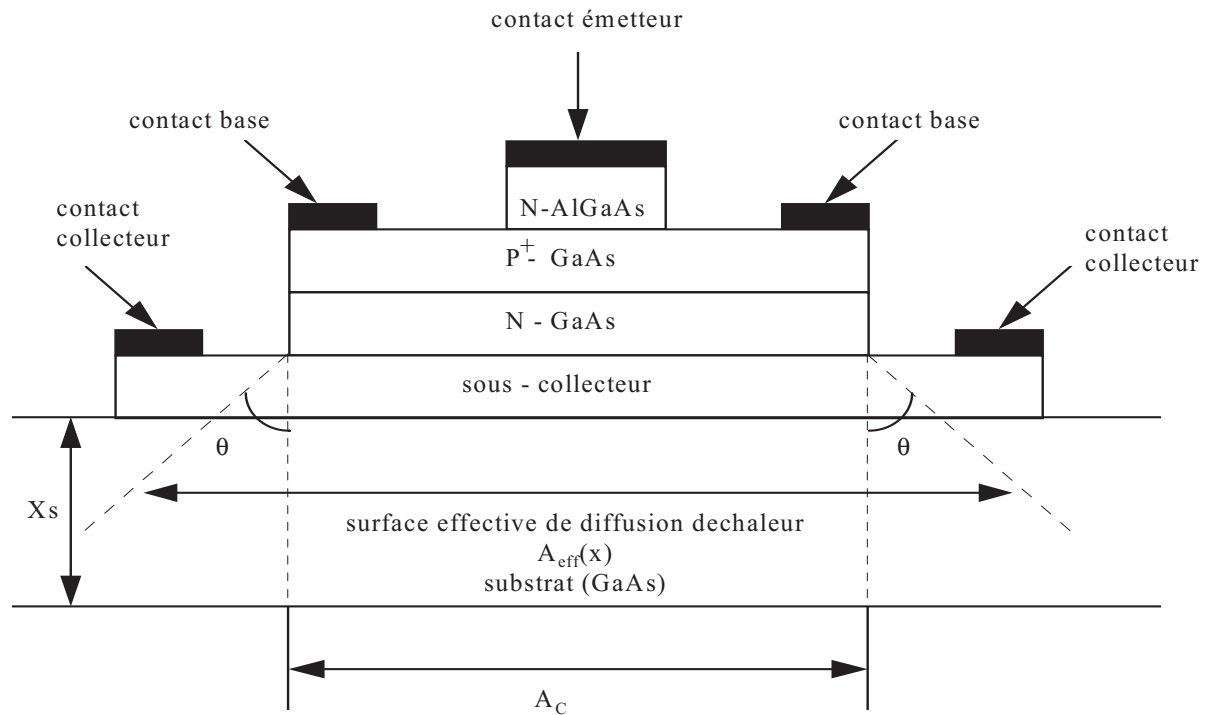


Figure III.18 Les surfaces de diffusion de chaleur dans un HBT de puissance

III.4.1.1 Les concentrations des porteurs de charges libres à l'équilibre en haute température

Pour un émetteur de type n, les concentrations des porteurs libres majoritaires et minoritaires ($n_{0,E}$ et $p_{0,E}$) à des températures T de réseau sont :

$$n_{0,E} = n'_{iE} + N_E + p_{0,E} - n'_{iE}, \quad n_{0,E} p_{0,E} = n_{iE}^2 \tag{III.27}$$

où n'_{iE} est le nombre des porteurs de charges libres générés par les bandes de conduction et de valence, n_{iE} est la concentration intrinsèque des porteurs libres dans l'émetteur (n_{iE} dépend beaucoup de la température du réseau) et N_E^+ est la concentration en ions d'impuretés dans l'émetteur résultant du processus d'ionisation. Si T est au voisinage de la température ambiante T_0 , N_E^+ est égale à la concentration de dopage de l'émetteur N_E , n'_{iE} est négligeable

$$\text{et } n_{0,E} = N_E \text{ et } \rho_{0,E} = \frac{n_{iE}^2}{N_E}. \quad (\text{III.28})$$

Pour des hautes température, n'_{iE} est important et $n_{0,E}$ et $P_{0,E}$ doivent être utiliser pour le calcul de l'équation (III.27). De même, pour la base de type p:

$$n_{0,B}P_{0,B} = n_{iB}^2 (n'_{iB} + N_B)n'_{iB} \quad (\text{III.29})$$

et pour le collecteur de n-type:

$$n_{0,C}P_{0,C} = n_{iC}^2 (n'_{iC} + N_C)n'_{iC} \quad (\text{III.30})$$

Dans les équations ci-dessus, l'indice B et C représente respectivement la base et le collecteur. La dépendance thermique des bandes d'énergie pour un AlGaAs comme émetteur et GaAs comme base et collecteur qui est utilisée dans le calcul de n_{iE} , n_{iB} et n_{iC} peut être exprimée comme [60] :

$$E_{GE} = \frac{1.87 - 5.4 \times 10^{-4} T^2}{T + 204} \quad (\text{III.31})$$

$$E_{GB} = E_{GC} = \frac{1.52 - 5.4 \times 10^{-4} T^2}{T + 204} \quad (\text{III.32})$$

où E_{GE} , E_{GB} et E_{GC} sont respectivement des énergies de bandes pour l'émetteur ($\text{Al}_{0.3}\text{GaAs}_{0.7}$), la base (GaAs) et le collecteur (GaAs).

III.4.1.2 Densité du courant de collecteur

Pour simplifier l'analyse, un HBT graduelle est considéré et la théorie de diffusion-drift est utilisée pour décrire le transport des porteurs libres à travers l'hétérojonction graduelle émetteur-base. On suppose que la couche graduelle est relativement épaisse ($> 100^\circ\text{A}$); [61] ainsi :

$$J_C = \frac{qD_n \Delta n(0)}{\left(W_B + \Delta W_B + \frac{D_n}{v_s} \right)} \quad (\text{III.33})$$

Où

D_n : le coefficient de diffusion des électrons dans la base,

W_b : l'épaisseur de la couche base,

ΔW_B : le courant induit de la base,

$\Delta n(0)$: la concentration en excès des porteurs libres minoritaires de la jonction émetteur.

Les expressions de D_n et Δn en fonction de la température s'expriment ainsi :

$$D_n = V_T \left[\frac{7200}{(1 + 5.5 \times 10^{-17} N_B)^{0.233}} \right] \left(\frac{300}{T} \right)^{2.3} \quad (III.34)$$

$$\Delta n(0) = n_{0,E} e^{\left[-(V_{bi, BE} - V_{j, BE}) V_T \right]} \quad (III.35)$$

avec :

$$V_T = \frac{kT}{q} = 0.0026 \left(\frac{T}{300} \right) : \text{la tension thermique,}$$

$V_{j, BE}$: la tension de la jonction émetteur base,

$V_{bj, BE}$: la tension de déblocage de la même jonction.

La puissance de chaleur $P_s(W)$ générée dans un HBT s'écrit comme suit :

$$P_s = J_C V_{CE} A_E \quad (III.36)$$

Avec A_E est la surface de l'émetteur, et V_{CE} la tension appliquée entre collecteur et la base.

La puissance de chaleur P_s est fonction de la densité du courant de collecteur, de la surface de l'émetteur, et V_{CE} . Cette puissance va créer une élévation de température dans le composant.

III.4.2 Les effets d'auto-échauffement et du couplage thermique dans les HBT à multi-émetteurs

Pour un HBT à multi doigts, l'effet thermique est plus compliqué, en plus du phénomène auto-échauffement dans chaque doigt, le couplage thermique entre les doigts émetteur peut être produit si l'espace entre doigts est relativement petit. L'effet de couplage thermique fait que les doigts internes sont plus chauds que les deux en extrémités. Récemment, il y a eu un développement rapide pour les circuits HBT désigne pour un fonctionnement en haute puissance. Comme résultats une analyse des performances du HBT en haute température devient graduellement importante.

III.5 Modélisation du phénomène de diffusion thermique dans un HBT

III.5.1 Présentation du modèle

On considère un transistor HBT à seul émetteur (figure III.16) qui est en fait un doigt de plusieurs arrangés parallèlement dans la conception technologique du composant. Vue la symétrie de ce dernier on présente un doigt où l'effet de couplage thermique est peu marquant. Ceci dépend de l'espace entre doigts et la géométrie des doigts émetteurs considérés. La figure (III.19) présente la structure de transistor HBT considéré en simulation. On remarque que les contacts émetteurs, base et collecteur sont présentés en région noire. Cette figure illustre aussi les dimensions de la section transversale pour le composant simulé.

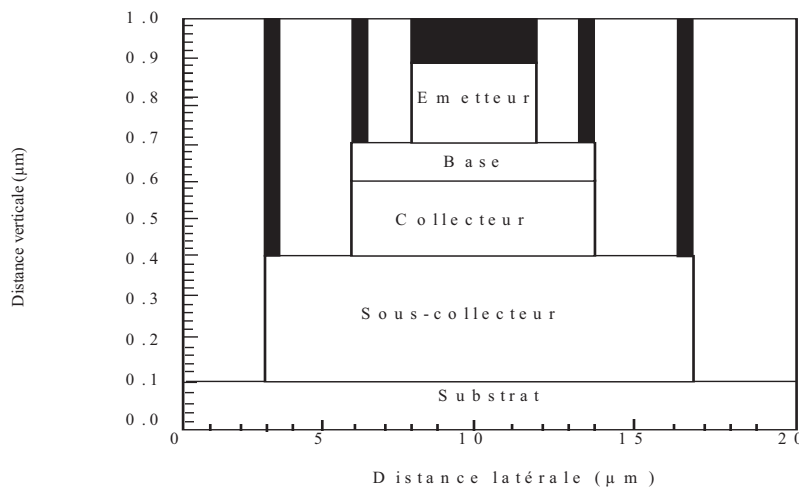


Figure III.19 Structure du HBT utilisé pour la simulation

Les caractéristiques du composant sont données en tableau III.1 ainsi que ses paramètres géométrique [61].

| | épaisseur (Å) | densité de dopage (cm ⁻³) | type |
|------------|---------------|---------------------------------------|--|
| Emetteur | 1000 | 5.10 ¹⁷ | N Al _{0,3} Ga _{0,7} As |
| Base | 1000 | 1.10 ¹⁹ | P GaAs |
| Collecteur | 3000 | 5.10 ¹⁶ | N GaAs |

Tableau III.1 Caractéristique du composant HBT

On donne :

La largeur de l'émetteur = 4µm,

La largeur de la base = 12µm,

La largeur du collecteur = 12µm,

L'épaisseur du substrat en GaAs = 20 µm.

Une puissance Ps est supposée être dissipée uniformément à l'intérieur des régions comme source de chaleur. La relation de Ps avec le courant du collecteur est reliée par l'équation (III.36). On prend une densité de courant de Jc = 8.10⁴ A/cm². Le substrat en GaAs est maintenu à une température de 300°K.

Le tableau III.2 donne les propriétés thermiques et physiques pour différents matériaux utilisés dans la conception du composant HBT.

| | AlGaAS | GaAs |
|----|--------|--|
| KT | 2.37 | $K_{S0} \left(\frac{T}{T_0}\right)^{-b}$ |
| CP | 0.896 | 0.70 |
| ρ | 2.707 | 5.32 |

Tableau III.2 Les propriétés thermiques et physiques

Le tableau III.2 indique que la conductivité thermique du AsGa n'est pas constante mais elle suit une loi empirique de la forme [62] :

$$K_T = K_{S0} \left(\frac{T}{T_0}\right)^{-b} \tag{III.37}$$

Avec :K_{S0}la conductivité thermique à la température ambiante T₀ (K_{S0}= 0.47 W/°K.cm à 300°K) et b est une constante qui vaut 1.22 (b = 1.22).

III.5.2 Modélisation Analytique du phénomène de diffusion thermique dans un HBT

Le modèle est élaboré à partir d'une connaissance de composition du dispositif (concentrations de dopage, des épaisseurs de couche, etc), et de la physique pertinents (tels que les effets graduelle de l'hétérojonction, l'auto-échauffement, le couplage thermique et les résistances d'émetteur (Resistances ballast).

Un HBT de puissance avec des N éléments de source de chaleur, c'est à dire, N doigts d'émetteur est représenté schématiquement sur la FigureIII.16. Dans le régime permanent, la répartition de la température est régie par l'équation de flux de chaleur, la température en un point quelconque (x, y, z) est donnée par [63] :

$$T(x, y, z) = A_{mn} \sum_{i=1}^N \left\{ \frac{w}{2} \sum_{m=1}^N \frac{1}{\lambda_m^2} F_z F_{xi} \cos(\lambda_m x) + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\mu_n^2} F_z F_{yi} \cos(\mu_n y) + \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\lambda_m \mu_n \gamma_{mn}} F_z F_{xi} F_{yi} \cos(\lambda_m x) + \frac{1}{2} \cos(\mu_n y) + \frac{l_{\omega}(t-z)}{4} \right\} I_c^i + T_0 \quad (III.38)$$

où

$$A_{mn} = \frac{4V_{CE}}{k_0 L_x W_y l_{\omega}}$$

$$\lambda_m = \frac{m\pi}{L_x}$$

$$\mu_n = \frac{n\pi}{W_y}$$

$$\gamma_{mn} = \sqrt{\lambda_m^2 + \mu_n^2}$$

$$F_{xi} = \sin \lambda_m \left(x_i + \frac{1}{2} \right) - \sin \lambda_m \left(x_i - \frac{1}{2} \right)$$

$$F_{yi} = \sin \mu_n \left(y_i + \frac{\omega}{2} \right) - \sin \mu_n \left(y_i - \frac{\omega}{2} \right)$$

$$F_{zi} = \tanh(\gamma_{mn} t) \cosh(\gamma_{mn} z) - \sinh(\gamma_{mn} z)$$

où x et y sont les coordonnées du centre de la source de chaleur (émetteur), et K_0 est la conductivité thermique à T_0 . La température en régime permanent non linéaire peut être obtenue et le courant de collecteur dépendant de la température qui s'écoule à travers le doigt est exprimé par l'expression suivante [63]:

$$I_c^i = I_{c0} \left(\frac{T_j^i}{T_0} \right)^{(9/4n)-2.3} \exp \left[\frac{q}{nkT_j^i} \{ V_j^i + \eta(T_j^i - T_0) \} \right] \quad (III.39)$$

où

$$I_{c0} = l_{\omega q} \vartheta_{d0} N_E \times \exp \left[-\frac{q}{nkT_0} \left\{ E_{gB} + \Delta E_C + \frac{kT_0}{q} \ln \left(\frac{N_E N_B}{N_{CE0} N_{VB0}} \right) \right\} \right]$$

$$V_j^i = V_{BE} - \left(R_{bal}^i + \frac{R_B}{h_{FE}} \right)$$

$$\eta = \frac{E_{gB} + \Delta E_C}{T_0}$$

Et où n est un facteur d'idéalité, ϑ_{d0} est la vitesse de dérive des électrons à T_0 , E_{GB} est l'énergie de bande interdite de la base, E_C est la bande de conduction à l'hétérojonction, N_E et N_B sont les niveaux de dopage de l'émetteur et la base, et N_{CE0} et N_{VB0} sont les densités d'état efficaces dans les bandes de conduction et de valence d'émetteur, respectivement. La résistance ballast R_{bal}^i exprime la résistance de contact d'émetteur et H_{FE} est le gain du courant.

L'ensemble des équations (III.38) et (III.39) sont résolus par le procédé d'auto itération de Newton-Raphson. La détermination de l'élévation de la température à chaque doigt est en fonction du courant de collecteur.

III.5.3 Modélisation par TLM-3D du phénomène de diffusion thermique pour un HBT

Le comportement thermique du composant à semi-conducteur fabriqué avec deux ou plusieurs matériaux différents peut être analysé en utilisant la méthode de ligne de transmission dans le cas tridimensionnelle (TLM-3D).

Le composant HBT peut être envisagé comme étant un réseau de nœuds ou chaque un d'eux peut être représenté par son équivalent en ligne de transmission. Le générateur de courant est utilisé pour modéliser la chaleur générée à l'intérieur du composant. Les résistances et les capacités de lignes de transmission représentent les résistances thermique et la capacité thermique respectivement et leur expressions sont exprimés par :

$$R = R_d \cdot \Delta L = \frac{\Delta L}{2 \cdot K_T \cdot A} \quad (III.40)$$

$$C = 2C_d \Delta L = \rho \cdot C_p \cdot A \cdot \Delta L \quad (III.41)$$

$$I = P \cdot (\Delta L_x) (\Delta L_y) (\Delta L_z) \quad (III.42)$$

Avec A : la surface de la section exprimée dans les trois plans comme suit :

$A = \Delta L_y \cdot \Delta L_z$ dans le plan (YZ)

$A = \Delta L_x \cdot \Delta L_y$ dans le plan (XY)

$A = \Delta L_x \cdot \Delta L_z$ dans le plan (XZ)

ΔL prend l'incrément de (ΔL_x , ΔL_y ou ΔL_z) des directions correspondantes. La source de courant I correspond à la puissance dissipée par unité de volume $\Delta L_x \cdot \Delta L_y \cdot \Delta L_z$.

Une itération est requise pour obtenir le potentiel nodale kT donnant ainsi l'élévation de la température de chaque nœud $N(x,y,z)$. Pour cela, il faut spécifier avant :

- **Les conditions aux limites et les coefficients de réflexions**

Comme montre la figure III.19, si le composant HBT est considéré isolé à une de ses faces alors il sera modéliser par TLM-3D par un court circuit où le coefficient de réflexion $\rho = -1$, les autres faces sont des circuits ouvert (c/o) où $\rho = 1$ car on met en évidence la symétrie et la continuité de la matrice de doigts. Les conditions aux limites ont été donnée par les expressions de base de la méthode TLM au chapitre deux.

- **Calcul des impulsions réfléchies**

Le composant HBT est composé de deux matériaux différents, l'alliage $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ et $AsGa$ donc la structure présente une interface ceci sera présenté en TLM par une discontinuité d'impédance entres nœuds figures III.20.

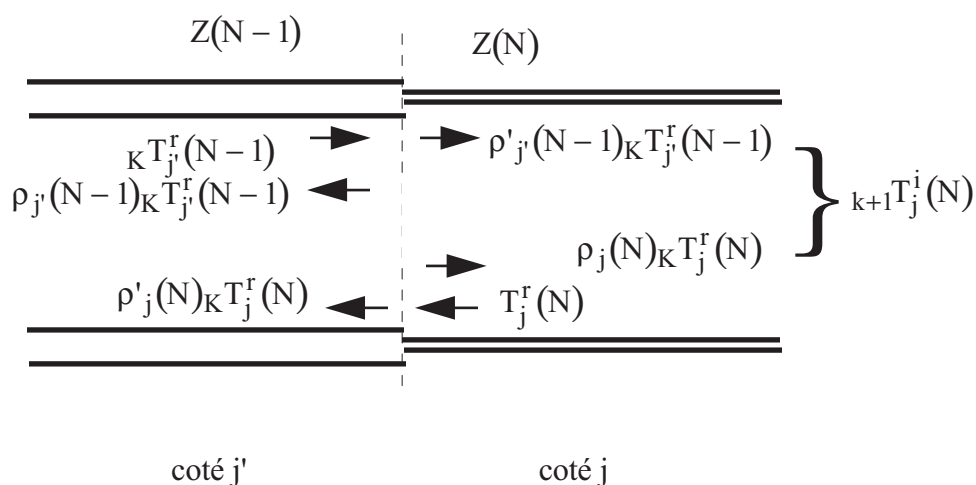


Figure III.20 Tension réfléchies au niveau de discontinuité d'impédance.

Hors les interfaces alliage métal-semi-conducteurs/semi-conducteur. On considère l'adaptation d'impédance pour indiquer la continuité de déplacement d'impulsions jusqu'aux extrémités du composant. Les expressions des impulsions réfléchies dans le cas tridimensionnel sont données par [64]:

$$\begin{aligned}
 k T_{1,2}^r &= \frac{1}{R_x + Z(x, y, z)} \left[Z \cdot k T + (R_x - Z(x, y, z)) k T_{1,2}^i \right] \\
 k T_{3,4}^r &= \frac{1}{R_y + Z(x, y, z)} \left[Z \cdot k T + (R_y - Z(x, y, z)) k T_{3,4}^i \right] \\
 k T_{5,6}^r &= \frac{1}{R_z + Z(x, y, z)} \left[Z \cdot k T + (R_z - Z(x, y, z)) k T_{5,6}^i \right]
 \end{aligned} \tag{III.43}$$

• **Calcul des impulsions incidentes**

Dans notre modèle la partie $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ est représenté par des nœuds, et $AsGa$ par d'autres nœuds différents d'épaisseur $\Delta z = 0.05 \mu m$. Comme les discontinuités d'impédance n'existent qu'au niveau de l'interface $Al_{0.3}Ga_{0.7}As/AsGa$, les impulsions incidentes au niveau de ces discontinuités sont données par:

$$\begin{aligned}
 K_{+1} T^i(x, y, 2, 6) &= \left[(Z_{asga} - Z_{alasca}) \cdot k T^r(x, y, 2, 6) + 2Z_{alasca} k T^r(x, y, 3, 5) \right] \frac{1}{Z_{alasca} + Z_{asga}} \\
 K_{+1} T^i(x, y, 3, 5) &= \left[(Z_{alasca} - Z_{asga}) \cdot k T^r(x, y, 3, 5) + 2Z_{asga} k T^r(x, y, 2, 6) \right] \frac{1}{Z_{alasca} + Z_{asga}}
 \end{aligned} \tag{III.44}$$

Ces équations sont obtenues en substituant les coefficients de réflexion au niveau des interfaces par leurs expressions:

$$\begin{aligned}
 \rho_1 &= \frac{Z_{AlGaAs} - Z_{AsGa}}{Z_{AlGaAs} + Z_{GaAs}} \\
 \rho_2 &= \rho_3 = \frac{Z_{AsGa} - Z_{AlGaAs}}{Z_{AlGaAs} + Z_{GaAs}}
 \end{aligned}$$

• La température nodale

La méthode TLM suit les impulsions circulant dans le réseau de lignes de transmission. Pour faciliter le calcul de l'élévation de température totale au nœud N (x,y,z), on utilise les numéros des directions mentionnés en figure (III.21) pour spécifier les directions des ondes incidentes et réfléchies sur tout nœud (x,y,z).

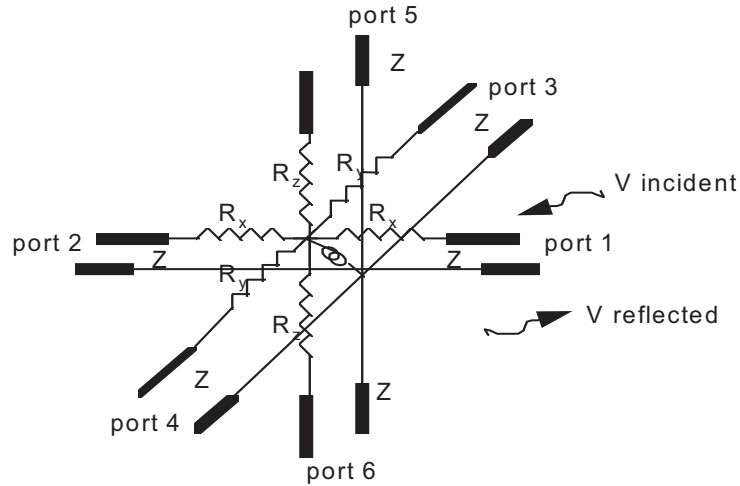


Figure III.21 Présentation tridimensionnel d'un nœud TLM.

La température nodale k^T à l'itération k est la somme de toutes les impulsions incidentes au nœud dans les six directions, et elle est exprimée par la relation suivante :

$$k^T = \left[\frac{2(kT_1^i + kT_2^i)}{R_x + Z} + \frac{2(kT_3^i + kT_4^i)}{R_y + Z} + \frac{2(kT_5^i + kT_6^i)}{R_z + Z} + I \right] \frac{1}{Y} \tag{III.45}$$

avec $Y = \frac{2}{R_x + Z} + \frac{2}{R_y + Z} + \frac{2}{R_z + Z}$

• Dépendance de la conductivité thermique de la température

Comme on a vu que la méthode TLM-3D peut traiter les cas non linéaire. Ceci est fait par la dépendance en température des paramètres thermiques du matériau par exemple la conductivité (équation III.37). La figure III.22 montre la variation de la conductivité thermique

en fonction de la température et à cet effet on introduit cette non-linéarité dans l'algorithme de la méthode TLM-3D pour chaque itération et nœud par nœud.

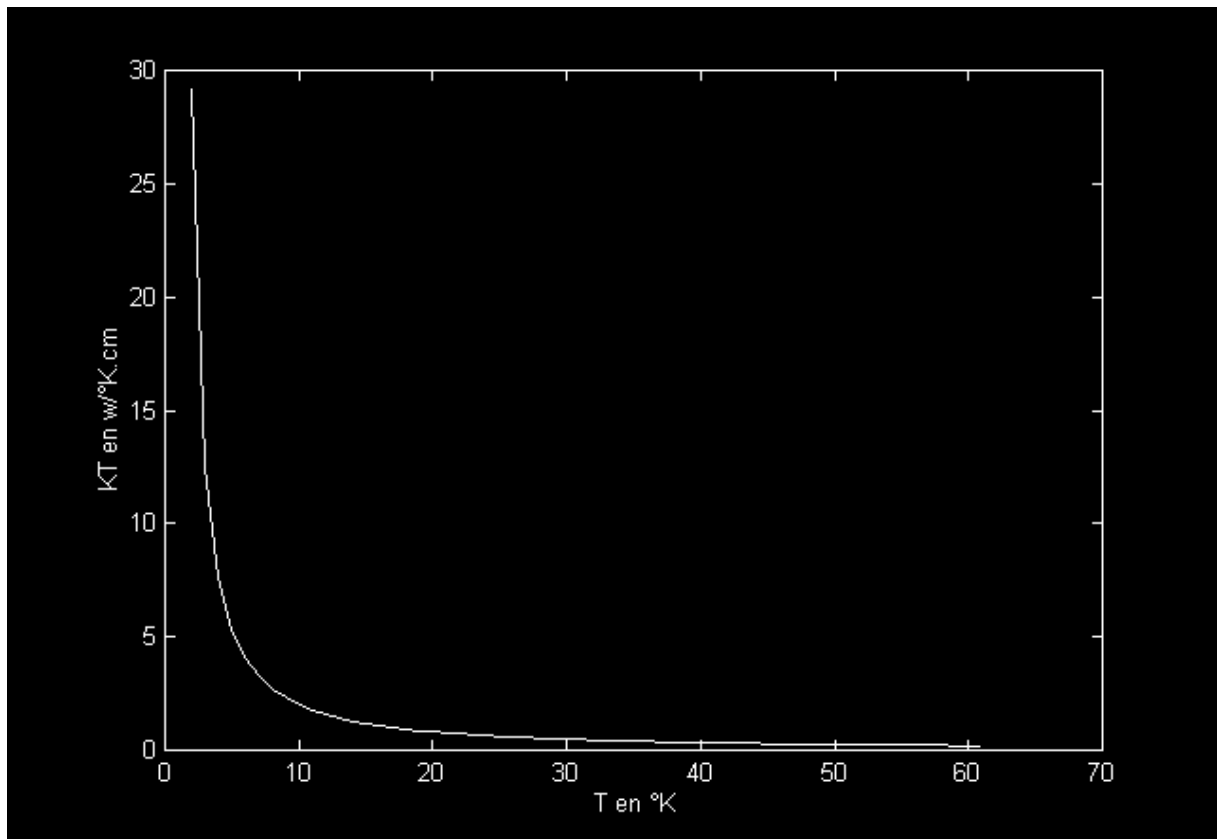


Figure III.22 La variation de la conductivité thermique en fonction de la température

a. Cas d'un HBT à un doigt

L'évaluation de la température en un point quelconque de la structure HBT sera faite par la méthode TLM. Dans notre cas on considère le pas spatiale de $1\mu\text{m}$ comme unité de distance suivant l'axe des abscisses (x) et le pas de $0.1\mu\text{m}$ suivant l'axe des (z) vu l'épaisseur des couches est minces (Figure III.23).

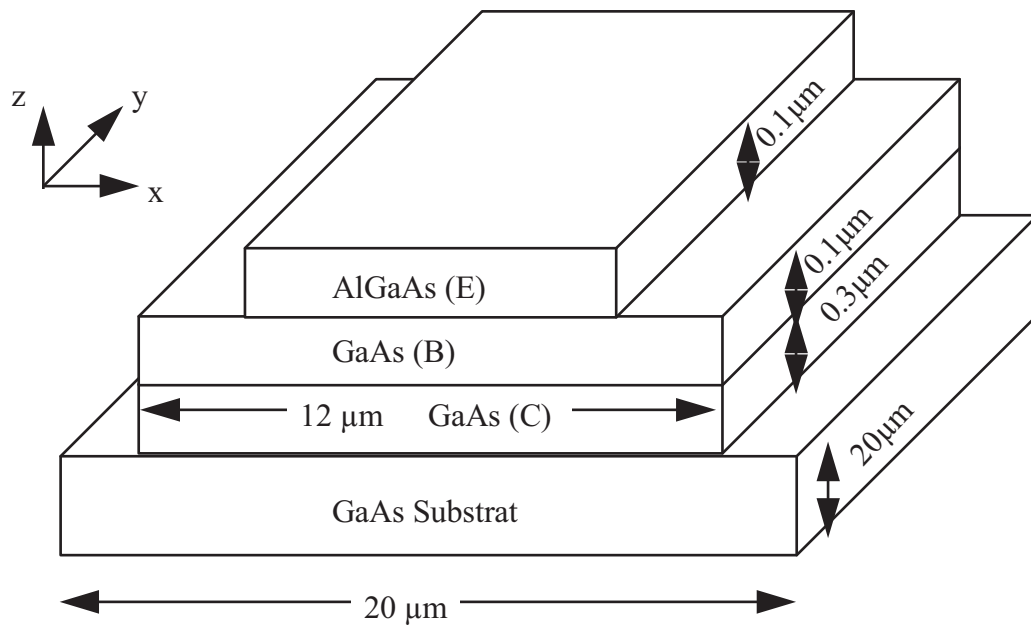


Figure III.23 Présentation du HBT

Or les interfaces entre matériaux en considérant suivant les directions de continuité des impulsions jusqu'aux extrémités du composant (adaptation d'impédance), alors les impulsions incidentes à l'itération (k+1) sont comme suit:

$${}_{k+1}T_j^i(x, y, z) = {}_kT_{j'}^r(u, v, w) \tag{III.46}$$

Les valeurs correspondantes de j' , u , v et w pour $j = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ sont données au tableau II.2:

b. Cas d'un HBT à trois doigts

La distribution de température non uniforme et la conduction de courant non uniforme, ne sont pas souhaitables étant donné que la puissance de l'ensemble du dispositif est dissipée dans un doigt, plutôt que d'être distribuée uniformément dans tous les doigts. C'est pourquoi on va prendre le cas de trois doigts et suivre la répartition de la température et détecter l'effet de couplage thermique mentionnée en étude théorique du dispositif HBT (Figure III.24).

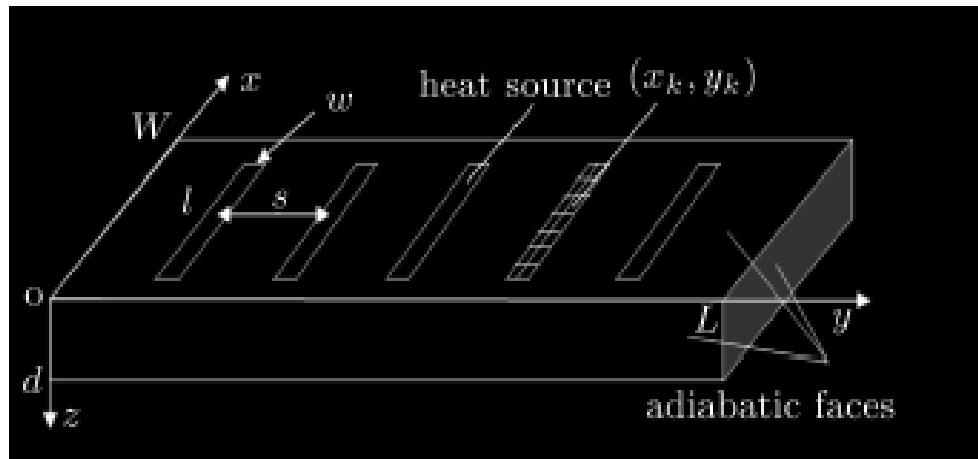


Figure III.24 Modèle de structure d'un HBT à N doigts

Pour la modélisation par la méthode de TLM-3D, on suit les mêmes étapes que pour le cas d'un doigt. Le composant HBT peut être envisagé comme étant un réseau de rangées de nœuds et chaque un d'eux peut être représenté par son équivalent en ligne de transmission. Une itération est requise pour obtenir le potentiel nodale kT donnant ainsi l'élévation de la température de chaque nœud $N(x,y,z)$.

III.6 Simulation et Résultats

III.6.1 Modélisation par TLM-3D pour un HBT à un doigt

La figure III.25 montre la réponse thermique d'un composant HBT sous une tension $V_{BE}=1.6V$ et $V_{CE}=3V$ simulé par le logiciel Maple 13. On remarque un pic situé autour de $8\mu m < x < 12\mu m$ et $0 < y < 0.6\mu m$, et diminue à travers la région extrinsèque et le substrat mis à la température ambiante ($300^\circ K$). Ce HBT opère sous une densité de courant de collecteur de $8.10^4 A/cm^2$. On remarque que la température avoisine les $400^\circ K$ quand le composant est soumis à une impulsion de courant électrique de durée $5 \mu s$. L'analyse de la courbe de la figure III.25 montre que l'effet d'auto-échauffement dans le HBT se fait au niveau de la jonction base-collecteur comme région active.

La figure III.26 montre la variation de la température d'un HBT opérant sous un courant de collecteur qui atteint $10^5 A/cm^2$. Il y a apparition de pic et la température avoisine les $500^\circ K$ au niveau de la jonction base-collecteur. Cette haute température résulte de l'existence d'un grand champ électrique au niveau de cette jonction influençant sur le bon fonctionnement du composant HBT.

L'effet d'auto-échauffement est marquant dans la région active quand le courant du collecteur dépasse les $I_c > 10^5 \text{ A/cm}^2$ et ainsi la haute fréquence et le grand gain de courant sont influencés par cet effet. Car l'augmentation de la température qui résulte de l'auto-échauffement crée l'effet Kirk qui réduit la vitesse de saturation des porteurs de charge libres et augmente simultanément le temps de transit dans la base et le temps de retard dans le collecteur.

L'effet d'auto-échauffement est le facteur clé limitant le gain en courant et la fréquence de coupure dans le HBT en AlGaAs/GaAs.

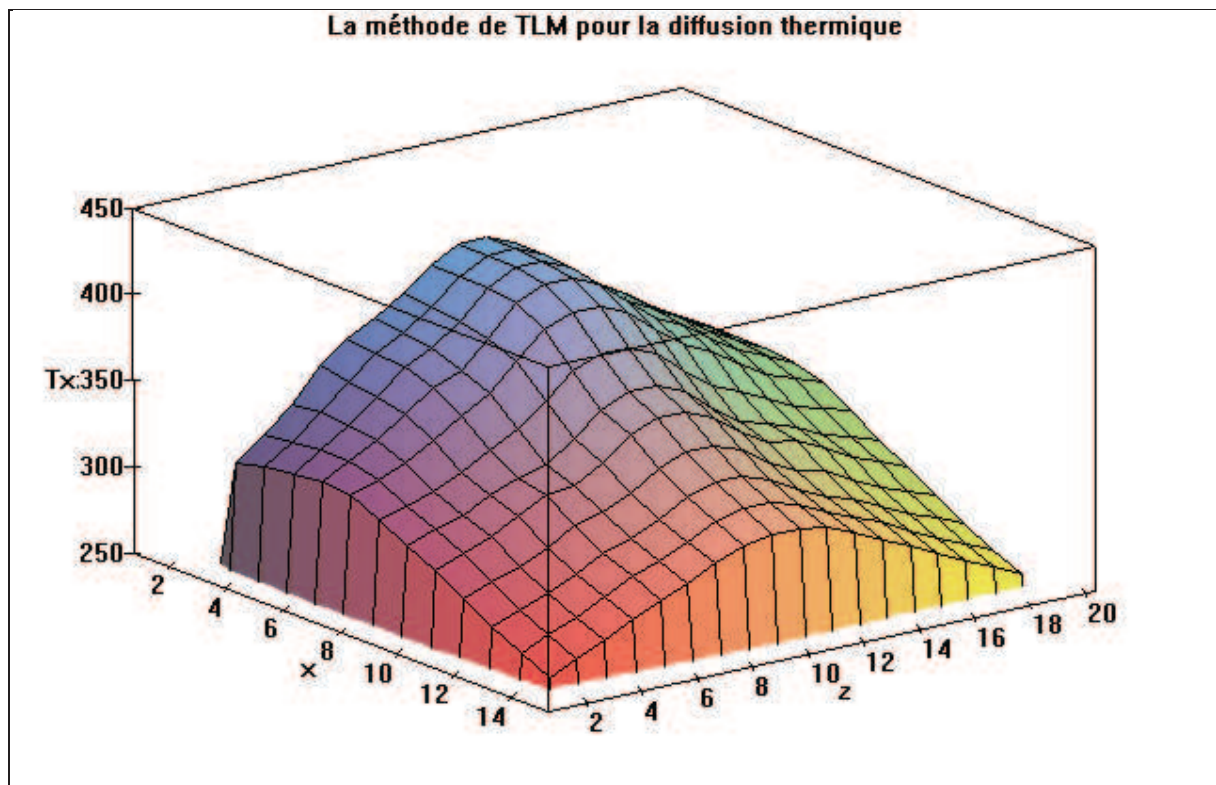


Figure III.25 Variation de la température pour un HBT opérant sous un courant de collecteur $I_c = 8.10^4 \text{ A/cm}^2$

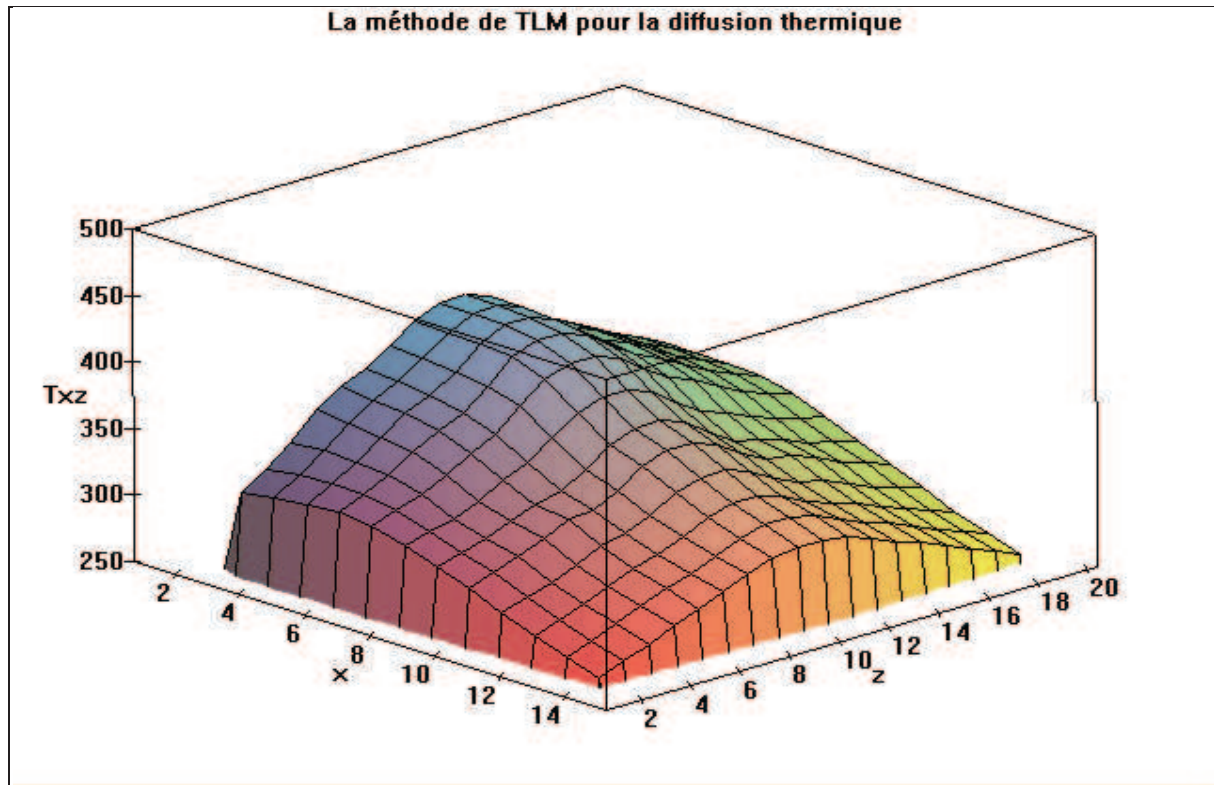


Figure III.26 Variation de la température pour un HBT opérant sous un courant de collecteur

$$I_c = 10^5 \text{ A/cm}^2$$

III.6.2 Modélisation par TLM-3D pour un HBT à trois doigts

Figure III.27 montre la variation de la température le long de la direction de la profondeur du substrat en utilisant le modèle tridimensionnel TLM pour les trois doigts émetteurs du dispositif de puissance à micro-ondes le HBT.

La distribution de température est non uniforme dans tous les doigts. Il y a une augmentation aux niveaux des émetteurs et la température diminue rapidement à la température ambiante dans la région extrinsèque adjacente au substrat et entre les doigts montrant le rôle de l'espacement entre les doigts et le substrat dans la dissipation de la chaleur générée.

On faisant le zoom de la figure III.27, on remarque en figure III.28 que les doigts extrêmes ont une température similaire, mais le doigt central est légèrement plus chaud qu'eux.

Comme l'effet de couplage thermique est plus important à la partie centrale du dispositif, il y aura une répartition non uniforme de la température et de la conduction de courant. Le contrôle de l'auto-échauffement est d'une importance primordiale sur les performances des dispositifs électroniques.

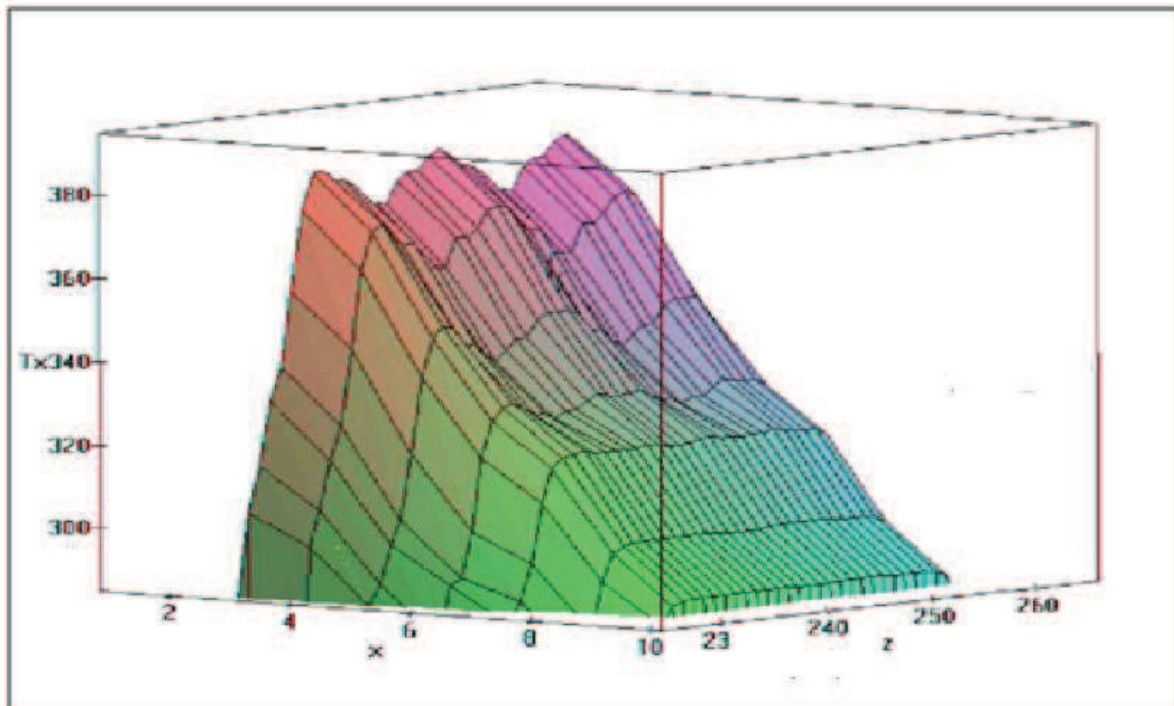


Figure III.27 Variation de la température pour un HBT à trois doigt opérant sous un courant de collecteur $I_c = 8.10^4 \text{ A/cm}^2$

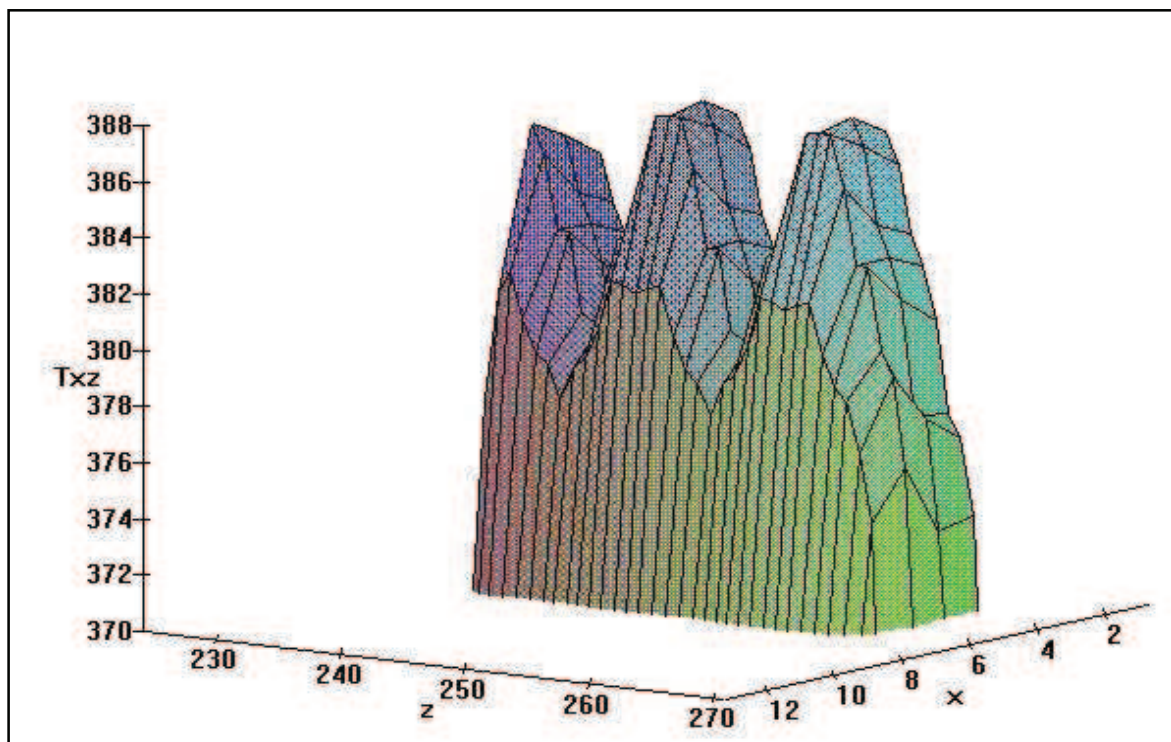


Figure III.28 Zoom de la figure III.27

III.6.3 Modélisation par la méthode analytique du HBT à trois doigts

A présent, une analyse est utilisée pour prédire le comportement thermique des multi-doigts émetteurs. Nous avons résolu l'équation analytique flux de chaleur à l'état stationnaire et utilisé le courant de collecteur en fonction de la température de jonction à chaque doigt en session III.5.2.

Figure III.29 montre la variation de la distribution de température le long du substrat pour les trois doigts du dispositif de puissance à micro-ondes le HBT.

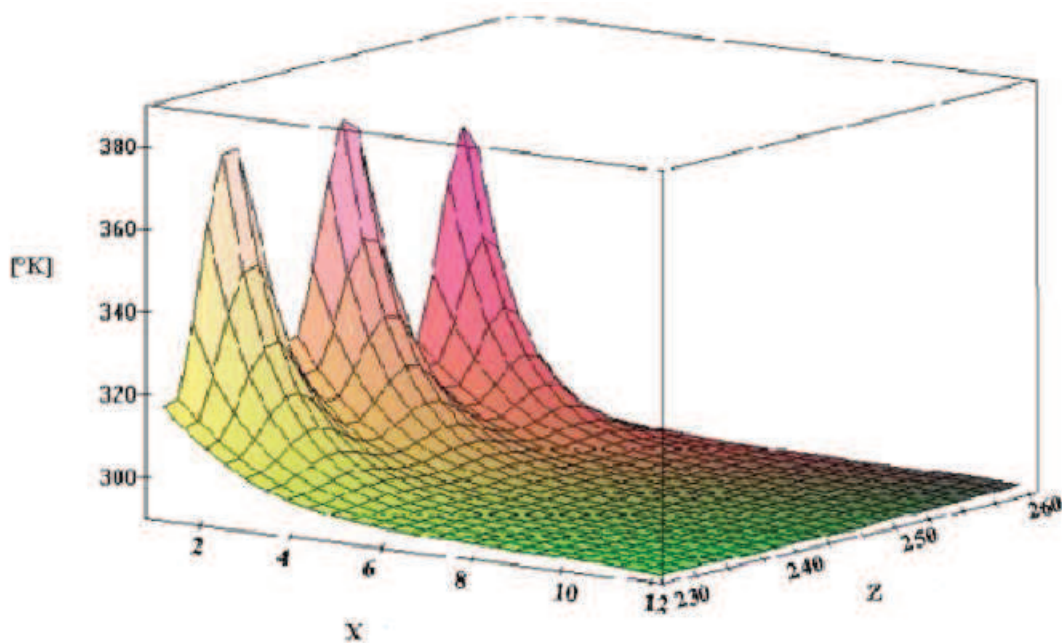


Figure III.29 Variation analytique de la température pour un HBT à trois doigts opérant sous un courant de collecteur $I_c = 8.10^4 \text{ A/cm}^2$

Les résultats analytiques sont d'accord avec les résultats numériques avec une petite différence. Les solutions analytiques de l'équation de transfert de chaleur ne peuvent être obtenues sans hypothèses simplificatrices pour la géométrie, les propriétés des matériaux et les conditions aux limites.

La figure III.29 montre aussi qu'il y a une augmentation aux niveaux des émetteurs et la température diminue rapidement à la température ambiante dans la région extrinsèque adjacente au substrat et entre les doigts indiquant ainsi le rôle de l'espacement entre les doigts et le substrat dans la dissipation de la chaleur générée.

Nous proposerons alors un changement de la dimension de l'épaisseur du substrat.

Les résultats analytiques ou numériques montrent que les dispositifs de puissance HBT AlGaAs / GaAs, génèrent une chaleur considérable qui doit être dissipée rapidement pour avoir une sûreté de fonctionnement normale.

III.6.4 Changement de dimension de l'épaisseur du substrat

Les dispositifs de puissance HBT à AlGaAs / GaAs génèrent une chaleur importante pour cela on doit changer la dimension du substrat pour dissiper cette chaleur.

Les dispositifs HBT qu'on utilise sont habituellement montés avec un substrat GaAsépoxy qui sert de dissipateur thermique. Malheureusement, le GaAs est un mauvais conducteur thermique, ce qui nécessite que le substrat de GaAs doit être affiné de son épaisseur (initialement $200\mu\text{m}$) à par exemple $100\mu\text{m}$, nous utiliserons la méthode TLM pour voir le comportement thermique du dispositif pour différentes épaisseurs.

La figure III.30 montre que la température de jonction diminue lorsque l'épaisseur du substrat varie de $200\mu\text{m}$ à $100\mu\text{m}$. Donc, la diminution de l'épaisseur du substrat induit une diminution de la température à l'intérieur du canal du dispositif.

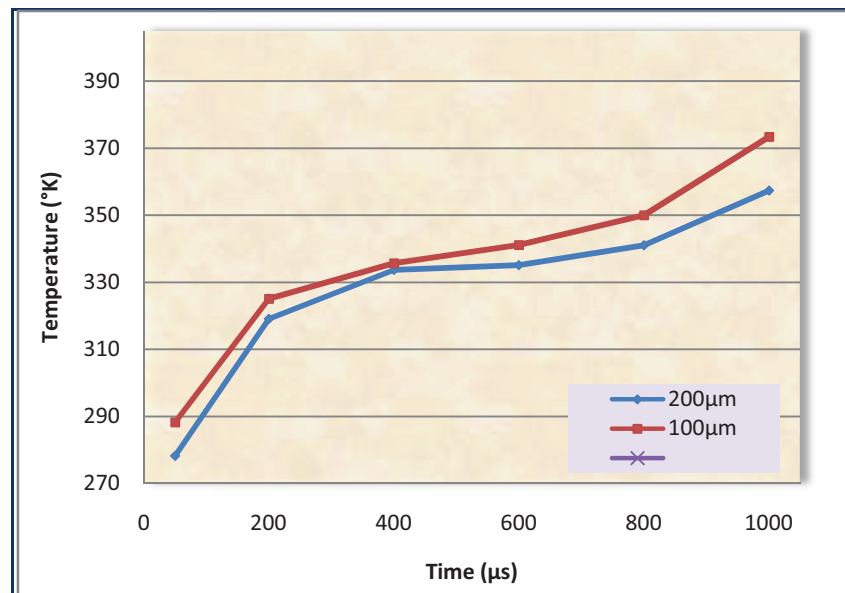


Figure III.30 Variation de la température le long du canal pour deux cas d'épaisseur du substrat

La méthode TLM est inconditionnellement stable, elle a un grand intérêt dans la résolution des problèmes non linéaires avec une géométrie compliquée d'une part, et un niveau considérable dans la simulation et la conception thermique des composants électroniques.

III.7 Conclusion

L'application de la méthode TLM à la modélisation de la diffusion thermique dans une barre à semi-conducteur, aussi bien pour le cas unidimensionnel que tridimensionnel, montrent que les résultats numériques sont en bon accord avec les résultats analytiques. Ce test positif nous permet maintenant d'élargir le champ d'application de la méthode TLM à l'étude de la génération et la dissipation de la chaleur dans un composant électronique de puissance.

Les résultats montrent clairement que les dispositifs de HBT sont capables d'auto-générer une quantité de chaleur considérable qui doit être dissipée très rapidement pour réduire l'effet de couplage thermique et augmenter sa durée de vie. En outre, les résultats montrent que le substrat et géométrie et l'espacement entre les doigts jouent un rôle important dans la dissipation de la chaleur générée.

Il est évident que la dissipation de la chaleur interne, a une importance capitale sur la dérive des propriétés électriques, d'une part, et la conception géométrique des circuits et modules électroniques, d'autre part.

La présence de champs électriques intenses (plus de 10^5 V/cm) à certains endroits du composant comme la région active ou les rebords géométriques conduit à l'apparition de points chauds destructeurs.

Conclusion générale

Le progrès en technologie s'accompagne d'une miniaturisation de plus en plus grande de composants électroniques. Il en découle une tension particulière aux problèmes de génération thermique interne qui peut avoir des conséquences considérables sur les propriétés électriques de ces derniers. La fiabilité du composant est intimement liée à la vitesse avec laquelle cette chaleur interne est dissipée. Cette vitesse est fonction de la nature physique du phénomène de diffusion, du choix du matériau, de sa géométrie, et de l'environnement immédiat du composant.

Comprendre le processus d'échange et de diffusion de la chaleur est incontournable dans un grand nombre d'applications technologiques et couvre plusieurs applications tels les machines industrielles, la médecine, le spatiale, les circuits et équipements électroniques, etc.... Bien que ce problème est étudié depuis fort longtemps, trouver une technique ou un outil d'aide à la conception simple et efficace, est toujours d'actualités.

Tout composant admet une température maximale de fonctionnement, appelée température maximale de jonction, dépendant du type de matériau utilisé et de la technologie de réalisation. Cette température maximale de jonction reste une donnée importante puisque c'est elle qui permet d'estimer le niveau de refroidissement nécessaire au bon fonctionnement du composant. De plus, la prédiction de la fiabilité dès la phase de conception des systèmes est un avantage compétitif de tout premier plan car il permettra de retenir les architectures des systèmes répondant au mieux au besoin. Cela contribuera à garantir la maîtrise des nouvelles technologies introduites et de réaliser des produits innovants ayant un niveau de maturité suffisant en application industriels, spatiales, etc...

Dans cette optique, nous avons engagé des travaux sur l'effet thermique sur des modules HBT comme modèle, pour cela connaître le principe physique et technologique de ce composant est très important pour prédire le comportement thermique et détecter les régions chaudes.

Dans ce mémoire, nous avons cité quelques méthodes de modélisation de l'effet thermique dans les composants électroniques en s'intéressant à la méthode analytique et la méthode TLM. Nous avons montré qu'il existe une équivalence entre l'équation de diffusion et l'équation d'une ligne de transmission et que par conséquent il est possible de modéliser un

Conclusion générale

phénomène de diffusion par la propagation d'une impulsion d'ondes dans un réseau de lignes de transmission (nœuds).

Parmi les composants à hétérojonction, les transistors bipolaires AlGaAs / GaAs HBT présentent des avantages très intéressants pour les applications hyperfréquences, par exemple pour la transmission rapide des données, les applications micro-ondes et les circuits optoélectroniques intégrés. L'étude des phénomènes thermiques dans ce genre de transistors est primordiale.

L'application de la méthode TLM à la modélisation de la diffusion thermique dans une barre AsGa, aussi bien pour le cas unidimensionnel que tridimensionnel, montre que les résultats numériques sont en bon accord avec les résultats analytiques. Ce test positif nous a permis d'élargir le champ d'application de la méthode TLM à l'étude de la génération et la dissipation de la chaleur dans le composant de puissance. Les résultats montrent clairement que les dispositifs HBT en modules sont capables de générer une quantité considérable de chaleur qui doit être dissipée très rapidement pour réduire l'effet de couplage thermo électronique et augmenter la durée de vie de ce dispositif. En outre, les résultats montrent aussi que le substrat et la géométrie de l'espacement entre les doigts jouent un rôle important dans la dissipation de la chaleur générée.

L'application d'un champ électrique intense (plus de 10^5 V/cm) pour le HBT, conduit à l'apparition de points chauds destructeurs en certains endroits du composant comme la région active ou les rebords géométriques. L'effet d'auto-échauffement est le facteur clé limitant le gain en courant et la fréquence de coupure dans le HBT en AlGaAs/GaAs.

La méthode TLM est un bon outil de simulation avant conception de dispositifs, car elle permet l'évaluation et la localisation de la température en tout point quelconque de la structure pour divers dispositifs. Ainsi, la modélisation de problèmes de diffusion de chaleur et l'analyse thermique est possible pour tout module électronique fabriqués avec de nombreux matériaux différents.

Notre travail a fait objet d'une Communication Internationale en cours: N. Harchouch, R. Hocine, K. Belkacemi and A. Amrani : "*Thermal Study using Analytical and 3D-TLM model for Muti-Emitter fingers power Heterojunction Bipolar Transistors*" ICIEM'2014: Troisième conférence internationale sur l'ingénierie industrielle et Productique qui se tiendra à l'Université de Batna Algérie, le 11- 13 mai 2014.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] M. Prakash Gupta and S.Kumar, "Thermal Management of Many-Core Processors Using Power Multiplexing", *Electronic Cooling Magazine*, December 2013
- [2] E.bernard : "Manuel de thermique : théorie et pratique" Hermès, 1997.
- [3] C. Christophe : "Amélioration de modèles électrothermiques des composants de puissance de type TBH ou pHEMT et application à la conception optimale de modules actifs pour les radars", thèse de doctorat de LIMOGES, mai 2004.
- [4] M. Rebay, S. kakaç, R. Ben maad , J. Padet: "Experimental Evaluation of the Heat Transfer Coefficient in Electronic Air-Cooling" , *Int. Journal of TransportPhenomena*, Vol. 11, pages :185-196, 2009.
- [5] W.Wondrak: "Physical limits and lifetime limitations of semiconductor devices at high temperature", *Microelectronics reliability*, Vol. 39, issues 6-7, June-July 1999, pp. 1113-1120.
- [6] Md. Didarul, O. Kenyu, Y. Minoru, S. Izuru : "Study on heat transfer and fluid flow characteristics with short rectangular plate fin of different pattern", *ExperimentalThermal and Fluid Science*, Volume 31, pages 367-379 , 2007.
- [7] A.Bejan:"Heat transfer", John Wiley & Sons, Inc, 1993.
- [8] Benmansour, "Contribution à l'étude des mécanismes de défaillances de L'IGBT sous régimes de fortes contraintes électriques et thermiques", thèse de Doctorats, laboratoire IMS Bordeaux, décembre 2008.
- [9] A.Tanaka, Mori M., Inoue H., "3300 High power IGBT modules with high reliability for traction applications", *Power Conversion*, pp. 191-199, 1997.
- [10] E.Iacona, J. Taine, and J.P. Petit : "Transferts thermiques: Introduction aux transferts", édition 2008: Dunod.
- [11] J.Fourier, « Théorie analytique de la chaleur», Jacques Gabay, 1989.
- [12] G. Marcello Pesare , Anna Gina Perri, "An analytical method for the thermal layout optimisation of multi-layer structure solid-state devices," *Solid-State Electronics*, vol. 45, 2001.
- [13] Pitts, D.R. and L.E. Sissom, Schaum's "Outline of Theory and Problems of Heat Transfer"1998: edition McGraw-Hill.
- [14] V. Szekely. A New Evaluation Method of Thermal TransientMeasurementResults. *Mircroelectronics Journal*, Volume: 28, Pages: 277–292, 1997.
- [15] P. Dupuy, thèse "Modèles thermiques et méthodologie d'analyse thermique pour circuits intégrés de puissance de type "SmartPower", LAAS- No d'ordre : 449, en 1998.
- [16] Y. Peles, A. Kosar, C. Mishra, C. Kuo, B. Schneider : "Forced convective heat transfer across a pin fin micro heat sink", *International Journal of Heat and Mass Transfer*,Vol. 48, pages : 3615-3627, 2005.
- [17] Wang, B.X. and X.F. Peng, "Experimental investigation on liquid forced convection heat transfer through micro channels". *International Journal of Heat and Mass Transfer*", 1994. volume1: p. 73-82.
- [18] Frank Fan, "Electronics packaging simplified radiation heat transfer analysis method with Thermal and Thermo mechanical Phenomena in Electronic Systems", 2004. SEMITHERM '04. The Ninth Intersociety Conference, 2004.
- [19] Stephen A. Solovitz, M.E.L.D.S., Advanced Technology Leader, Ener, Micro channels Take Heat sinks to the Next Level, November 2006, *Power Electronic Technology: Power Electronic Technology* November 2006. p. 14-20.
- [20] Tong, X.C., "Advanced Materials for Thermal Management of ElectronicPackaging"2010: Springer.
- [21] S. Azzopardi, J.-P. Fradin, M. Médina, R. Meuret, M. Piton, P. Rollin, "Etude prédictive de la fiabilité de l'électronique de puissance embarquée : projet CEPIA", *Electronique de Puissance du Futur*, Tours : France 2008.
- [22] Toshiba America Electronic Components, Inc., "Six-In-One Package Offers Low- Cost IGBT Solution for Industrial Drive Market," <http://www.toshiba.com/taec/press/to-727.htm>(Irvine, CA: TAEC, 1997).

- [23] S. Kakaç, H. Yurucu, and K.A. Hijikata, *Cooling of Electronic Systems*, Kluwer Academic Publishers, Massachusetts, 1994.
- [24] "What Does the Future of Thermal Management Hold for Electronics?" (<http://www.me.umn.edu/divisions/tht/tme/tme4.html>).
- [25] J. H. Rosenfeld, N. J. Gernert and M. T. North, "Internally Extended Surface Heat Pipe Evaporators for Microelectronics Cooling", *Fundamentals of Phase Change: Boiling and Condensation*, ASME HTD-Vol.273, (1994).
- [26] B. Sonuparlak, M. Lehigh, "Design and Fabrication of Thermal Management Materials for High Performance Electronic Packages", *International Symposium on Microelectronics*, pp.377-382, 1996.
- [27] Saint-eve, "Influence de cycle de courts-circuits sur la durée de vie de composant semi-conducteurs de puissance", F. Saint-Eve, S. Lefebvre, P. Dang, JC Faugières, Z. Khatir, EPF 2002, Montpellier, pp. 167-172.
- [28] Tanaka A., Mori M., Inoue H., "3300 High power IGBT modules with high reliability for traction applications", *Power Conversion*, pp. 191-199, 1997.
- [29] G. Lefranc, T. Licht, G. Mitic, "Properties of solders and their fatigue in power modules", *Microelectronics reliability*, Vol. 42, Issues 9-11, September-November 2002, pp. 1641-1646.
- [30] M. Ciappa, "Selected failure mechanisms of modern power modules", *Microelectronics Reliability*, Vol.42, n°4-5, pp.653-667, April-May 2002.
- [31] Guide FIDES 2004 Edition A, "Méthodologie de fiabilité pour les systèmes électroniques", DGA - DM/STTC/CO/477-A, 2004.
- [32] F. Kreith et M. Bohn. "Principles of Heat Transfer. CL-Engineering, 2000.
- [33] M. N. Sabry, "Static and dynamic thermal modeling of ICs," *Microelectronics Journal*, vol. 30, 1999.
- [34] R. Hocine, A. Boudghene Stambouli, A. Boukourt et K. Belkacemi "3D TLM Method Thermal Analysis for the IGBTs in Solar Inverter", *The 2nd Algeria-Japan Academic Symposium, Advanced Sciences*, May 17th 2012, Oran.
- [35] G. Marcello Pesare, Anna Gina Perri, "An analytical method for the thermal layout optimisation of multi-layer structure solid-state devices," *Solid-State Electronics*, vol. 45, 2001.
- [36] G. D. M. Marcin Janicki, Andrzej Napieralski, "Application of Green's functions for analysis of transient thermal states in electronic circuits," *Microelectronics Journal*, vol. 33, 2002.
- [37] J. P. W. Batty, C.E. Christoffersen, S. David, R.G. Johnson, C.M. Snowden, M.B. Steer, "Fully Analytical Compact Thermal Model of Complex Electronic Power Devices and Packages in Coupled Electrothermal CAD," in *13th workshop on physical simulation of semiconductor devices*, 2002.
- [38] R. Hocine, L. Belabas, A. Boudjemai, "Thermal behaviour using Analytical and Numerical model in Multi-Finger Power Heterojunction Bipolar Transistors", *The third International Conference Engineering, CATAEE'99*, Jordan
- [39] P. Dupuy, « Modèles thermiques et méthodologie d'analyse thermique pour circuits intégrés de puissance de type "SmartPower", " *LAAS- No d'ordre : 449*, 1998.
- [40] C. J. M. L. H. Vinke "Recent Achievements in the Thermal Characterization of Electronic Devices by Means of Boundary Condition Independent Compact Models," in *Thirteenth IEEE Semi-Therm Symposium*, 1997.
- [41] C. Zweben, "High performance thermal management materials", *Electronics Cooling*, Vol. 5, N°3, September 1999, pp. 36-42.
- [42] C. Van Godbold, V. Sankaran, J.L. Hudgins: "Thermal analysis of high-power modules", *IEEE Transactions on power electronics*, Vol.12, N°1, January 1997.
- [43] C. J. M. L. H. Vinke "Compact Models for Accurate Thermal Characterization of Electronic Parts," *IEEE Transactions On Components, Packaging, And Manufacturing Technology—Part A*, vol. 20, DECEMBER 1997 1997.
- [44] A. Hamidi, G. Coquerz, R. Lallemand and P. Vales, "Temperature Measurements and Thermal Modelling of a High Power IGBT Multichips Modules for Reliability Investigations in Traction Application", *Microelectronics Reliability journal* N°38, pp 1353-1359, 1998.

- [45] V. Szekely, and M. Rencz, "Image Processing Procedures for the Thermal Measurements," IEEE Trans. on Components and Packaging Technology, Vol. 22, No. 2, pp 259-265, June 1999.
- [46] S.Wünsche, C. Clauss, P. Schwarz and F. Winkler, "Electro-Thermal Circuit Simulation Using Simulator Coupling," IEEE Trans. on Very Large Scale Integration(VLSI) Systems, Vol. 5, No. 3, pp 277-282, September 1997.
- [47] Saidane, R. Hocine and S. Mimouni, "Transmission Line Matrix: A Tool for Modeling Thermo-Electric properties of Materials and Devices, Journal of New Technology and Materials, JNTM Volume 02, Issue 01, June 2012
- [48] Mark A. Pinsky. Partial Differential Equations and Boundary-Value Problems with Applications. International Series in Pure and Applied Mathematics. McGraw-Hill, Boston, third edition, 1998.
- [49] V.Trenkic, "The Development and Characterization of Advanced Nodes for TLM Method", Thesis submitted to the University of Nottingham for degree of Doctor of Philosophy, November 1995.
- [50] Johns.P.B, "A simple and explicit and unconditionally stable numerical routine for the solution of the diffusion equation", Int.J Number Engng 1977, N°11, 1328-1340.
- [51] M.Y.Zeben, A.H.Salah, "TLM Modelling of Diffusion, Drift and Recombination of Charge Carriers in Semiconductors", International Journal Numerical Modelling, Electron Network Devices Fields, pp 219-225, 1992.
- [52] R. Hocine, S.H.Pulko, A. Boudghenestambouli, A. Saidane," TLM Method for Thermal Investigation of IGBT Modules in PWM Mode", Microelectronic Engineering Journal, Elsevier Science, 2009.
- [53] P.W.Webb and I. A. D. Russell" Application of the TLM Method to Transient Thermal Simulation of Microwave Power Transistors ", IEEE Transactions on Electron Devices, Vol.42, N°4, 1995.
- [54] A.E.Kronberg, A.H.Benneker, "Notes on Wave theory in Heat Conduction: A new bound G. Lefranc, T. Licht, G. Mitic,ary condition", International journal Heat Mass Transfer, Biskra, 1998, pp 127-137.
- [55] X. Gui, P. W.Webb, and G. B-Gao, "Use of the three-dimensional TLM Method in the Thermal Simulation and Design of Semiconductor Devices", IEEE transactions on electron devices, 39(6), (1992) 1295-1301.
- [56] C.Christopoulos , " The Transmission Line Modelling Method ", IEEE/OUP Series On Electromagnetic Wave Theory, Oxford University Press, Chapter 7, 1995, pp.167-176.
- [57] L.L.Liou, J.L.Ebel, and C.I. Huang, "Thermal effects on the characteristics of AlGaAs/GaAs heterojunction bipolar transistors using two-dimensional numerical simulation", IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 40, 1993, 35-43.
- [58] R.J. Malik, L.M. Lunardi, R.W.Ryan, « Submicron scaling of AlGaAs/GaAs self-aligned thin emitter heterojunction bipolar transistors (SATE-HBT) with current gain independent of emitter area", Published in Electronics Letters, Volume:25 , Issue: 17, 1989, pp: 1175 – 1177.
- [59] J.J.Liou, "Principales and analysis of AlGaAs/GaAs heterojunction bipolar transistors", Ed Artech, London, 1996
- [60] W.Liu and B.Bayraktaroglu, "Theoretical calculations of the temperature and current profiles in multijunction bipolar transistors", Solid State Electron. Vol.36, N°2, 1993, 125-132.
- [61] R. Hocine, A. Saidane, S. Mimouni, "TLM Thermal Modelling of Power Semi-conductors Devices ", Proceedings of the IEEE'97, International Annual Conference, University of Batna, Vol.1, pp 199-202,1997.
- [62] V. S. ZeljkoJakopovic, ZvonkoBencic, "Electro-Thermal Modelling and Simulation of a Power-MOSFET," AUTOMATIKA, 2001.
- [63] G. Perri:" Dispositive Electronic Advanced, Progedit Editor, Bari, Italy; ISBN: 978-88-6194-081-9, 2011.
- [64] R.Hocine, S.H.Pulko, A.BoudghneneStambouli and K. Melouk, " Transient 3D heat flow analysis for high power IGBT modules in PWM mode using the TLM method », International Conference on PowerElectronics and Electrical Drives ICPEED' 2010, Oran 26-27 Octobre 2010 USTOMB.