

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

Comme exigence partielle
de la maîtrise en génie électrique

Par

Mohamad ISSA

« Analyse électrothermique des micro- et nano-systèmes »

Avril 2005

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

À mes parents

« et ton seigneur a décrété : “n’adorez que Lui; et (marquez) de la bonté envers les pères et mères : si l’un des d’eux ou tous deux doivent atteindre la vieillesse auprès de toi; alors ne leur dis point : « Fi! » et ne les brusque pas, mais adresse-leur des paroles respectueuses et par miséricorde; abaisse pour eux l’aile de l’humanité; et dis « Ô mon Seigneur, fais-leur; à tous deux; miséricorde comme ils m’ont élevé tout petit”. Sourate du Coran (17; 23-24)

Remerciements

Certains croient qu'il est inutile de remercier Dieu puisqu'il fait toujours selon sa volonté et non la nôtre. Pourtant, que sa volonté rencontre la nôtre ou pas, il y a toujours lieu de remerciements. Je te remercie, Mon Seigneur, pour ta bonté et ton amour envers moi, et le courage que tu me donnes pour pouvoir réaliser tous mes objectifs.

Des remerciements, d'une façon toute spéciale, à Monsieur Adam Skorek, mon directeur de recherche, pour avoir accepté de me guider dans ce projet. Son professionnalisme, son sérieux, son expertise et sa patience sont des qualités importantes qui m'ont permis de réaliser ce travail.

Je tiens à remercier aussi, à tous ceux qui m'ont aidé d'une façon ou d'une autre dans ce projet de recherche et à mes amis d'ici ou d'ailleurs qui m'ont apporté leur support moral quand j'en avais besoin, merci.

Je dédie ce mémoire, à ma mère qui m'a poussée et encouragée à poursuivre mes objectifs. À mon père qui a été mon premier professeur, de sa rigueur exemplaire, j'ai retenu la discipline. Enfin à toute ma famille Amal, Assil, Majd et tous ceux qui ont cru en moi, merci.

Résumé

L'une des tendances majeures des sciences et des technologies d'aujourd'hui est la course à la miniaturisation. Faire toujours plus petit est le maître mot de nombreux scientifiques et industriels. Faire toujours plus petit pour mieux connaître et utiliser les lois fondamentales du comportement de la matière. Faire toujours plus petit pour être plus rapide. Faire toujours plus petit pour être moins cher...

Dans le domaine technologique, faire plus petit, c'est travailler avec les atomes, les utiliser et les manipuler. Certes, cela fait longtemps que les physiciens, les chimistes, les biologistes et les ingénieurs utilisent les propriétés des atomes. Mais ce n'est que depuis les années 1980 que les scientifiques manipulent les atomes un par un. Les nouvelles disciplines qui étudient et manipulent les systèmes à l'échelle des atomes, molécules et au dessus, à des dimensions comprises entre un nanomètre ($1\text{nm} = 10^{-9}\text{m}$) et la centaine de nanomètres, sont les nano-technologies.

Alors que les scientifiques s'intéressent aux atomes, un secteur technologique est en pleine expansion : la microélectronique. Il s'agit d'appareils miniatures (dont les composants ont des dimensions de l'ordre de quelques micromètre ou dizaines de micromètres). Ces systèmes intègrent des parties mécaniques microscopiques mobiles et des circuits intégrés, souvent sur la surface d'une même puce. Cependant ces circuits rencontrent des problèmes d'ordre thermique : les températures trop basses ou trop

élevées ainsi que les forts gradients de températures peuvent endommager voire détruire les composants.

Dès qu'un composant électronique est traversé par un courant électrique, il a tendance à produire de la chaleur (pertes par effet Joule). Cette chaleur n'est généralement pas perceptible avec des composants qui sont traversés par de faibles courants, mais elle est nettement perceptible avec des composants où circulent plusieurs ampères ; il suffit d'approcher la main d'un régulateur d'alimentation, d'un ampli BF fonctionnant à forte puissance ou d'un microprocesseur en pleine activité pour constater que "c'est chaud". Dans tous les dispositifs mécaniques en mouvement, il existe des frottements et ceux-ci produisent aussi de la chaleur : en hiver, on se réchauffe en se frottant les mains. Il en va de même, par exemple, pour les disques durs qu'on trouve sur les micro-ordinateurs : même si les surfaces en contact sont faibles, avec des vitesses de rotation de 7.000 à 15.000 tours/minute, la chaleur dégagée devient importante : là encore, si on touche un disque dur en pleine activité, on sent nettement que "c'est chaud".

Tant que la chaleur est évacuée au moins aussi vite qu'elle est produite, il n'y a généralement aucun problème particulier : le système atteint une température d'équilibre et y reste. Mais si l'évacuation de chaleur se fait moins vite que sa production, le système électronique et/ou mécanique va s'échauffer de plus en plus et cela peut conduire à sa destruction (par déformation voire fusion pour les éléments mécaniques, par emballement thermique pour les semi-conducteurs). Il faut donc veiller à ce que le système ne dépasse pas une certaine température. Laquelle ? Celle de l'élément dont la température maximum de fonctionnement est la plus basse.

L'objectif principal du projet concerne la modélisation et la régulation de température d'un microprocesseur appliqué vastement dans les systèmes de télécommunications. Dans un premier temps, nous présentons une revue sur les propriétés physiques et électroniques des éléments semi-conducteurs, suivi par les étapes de la micro/nanofabrication et sur le principe de régulateurs thermoélectriques ainsi que les caractéristiques de ceux qui sont vastement utilisés dans le cadre des micro-nano-systèmes. Le choix du type de contrôleur sera déduit de la forme des modèles établis ainsi que des avancements les plus récents dans le domaine de la commande.

La contribution scientifique du projet comprend :

- La modélisation du système par un schéma électrique équivalent,
- L'utilisation d'un contrôleur élargi pour la commande d'un régulateur thermique,
- L'applicabilité de la méthode à une large gamme de systèmes électroniques.

TABLE DES MATIÈRES

TABLE DES MATIÈRES-----	I
-------------------------	---

LISTE DES FIGURES-----	VI
------------------------	----

LISTE DES TABLEAUX-----	IX
-------------------------	----

Chapitre 1

1.1	Problématique -----	1
1.2	Objectifs de la recherche -----	3
1.3	Méthodologie de la recherche -----	4
1.4	Structure du mémoire-----	6

Chapitre 2

2	MATÉRIAUX ET PROPRIÉTÉS ÉLECTRONIQUES DES SEMI- CONDUCTEURS -----	7
2.1	Les matériaux-----	7
2.1.1.	Introduction -----	7
2.1.2.	Propriétés des matériaux-----	8
2.1.3.	Microstructures -----	9
2.1.4.	Nanomatériaux-----	10
2.1.5.	Fullerènes-----	12
2.2	Propriétés électroniques des semi-conducteurs-----	15
2.2.1.	Notions sur la théorie des bandes d'énergies-----	15
2.2.2.	Isolants, semi-conducteurs, conducteurs-----	16
2.3	Phénomènes de transport des charges dans les semi-conducteurs -----	17

2.3.1.	Phénomène de conduction dans un métal-----	17
2.3.2.	Densité de courant -----	17
2.4	Électrons et trous dans un semi-conducteur pur (intrinsèque) liaison de covalence-----	18
2.4.1.	Notion de trou -----	19
2.5	Dopage d'un semi-conducteur -----	20
2.5.1.	Donneurs -----	20
2.5.2.	Accepteurs -----	21
2.6	Comportement fréquentiel des matériaux-----	22
2.7	Interaction photon --électron dans un semi-conducteur-----	22

Chapitre 3

3	MICRO/NANOFABRICATION ET TECHNOLOGIES NANOMÉTRIQUES	-----26
3.1	Techniques de bases -----	26
3.2	Élaboration des couches minces à l'échelle atomique-----	27
3.3	Fabrication des puces -----	28
3.3.1.	Conception assistée par ordinateur (CAO) -----	29
3.3.2.	La photolithographie-----	33
3.3.3.	Dopage-----	35
3.3.4.	La salle blanche-----	36
3.3.5.	Les étapes de la fabrication des puces -----	37
3.4	Manipulation des molécules et d'atomes-----	38
3.5	Méthode de production -----	39
3.6	Nano-observation-----	40

3.6.1.	Microscopie électronique-----	40
3.6.2.	Microscopie de pointe à balayage-----	41

Chapitre 4

4 MESURE DE TEMPÉRATURE ET RÉGULATEURS

THERMOÉLECTRIQUES DES MICROSYSTÈMES -----		43
4.1	Introduction -----	43
4.2	La dissipation -----	44
4.3	Conductivité thermique-----	45
4.4	Concept de mesure -----	46
4.4.1.	Système de mesure-----	47
4.4.2.	Méthodes de mesure de température -----	48
4.5	Thermométrie par thermocouple -----	50
4.5.1.	Les thermocouples -----	50
4.6	Dissipation thermique des étages de puissance -----	52
4.7	Circuit de refroidissement des microsystèmes -----	53
4.7.1.	Introduction -----	53
4.7.2.	Paramètres des modules électriques -----	56

Chapitre 5

5 NANOÉLECTRONIQUE, NANOMAGNÉTISME ET MODÉLISATION

ÉLECTRIQUE -----		58
5.1	La nanoélectronique -----	58
5.2	L'électronique moléculaire -----	59

5.2.1.	Les fils moléculaires -----	59
5.2.2.	Le courant à travers une molécule-----	60
5.2.3.	Blocage de Coulomb-----	64
5.3	Le nanomagnétisme-----	65
5.3.1.	Le magnétisme dans la matière -----	65
5.3.2.	Diamagnétisme et paramagnétisme -----	65
5.3.3.	Le superparamagnétisme -----	67
5.4	Modélisation électrique-----	67
5.5	Caractéristiques électriques et géométriques du système-----	69
5.5.1.	Analogies entre les grandeurs électriques et thermiques-----	71
5.6	Modélisation numérique sous TAS-----	74
5.6.1.	Introduction -----	74
5.6.2.	La géométrie -----	74
5.6.2.1.	Réalisation de la géométrie -----	76
5.6.3.	Les conditions-----	81
5.7	Validation du modèle électrique -----	83
5.7.1.	Valeurs numériques nécessaires du modèle à la simulation -----	83

Chapitre 6

6	CONTRÔLE THERMIQUE, RÉSULTATS ET DISCUSSION-----	89
6.1	Introduction -----	89
6.2	Conception du contrôleur par logique floue-----	90
6.2.1.	Rappel sur la logique floue-----	90
6.2.2.	La fuzzification -----	91

6.2.3.	Inférences-----	91
6.2.4.	Opérateurs de la logique floue-----	92
6.3	Structure d'un réglage par logique floue-----	92
6.3.1.	Représentation générale -----	92
6.3.2.	Configuration interne d'un régulateur par logique floue-----	93
6.3.3.	Méthodologie de conception d'un réglage par un régulateur standard et par contre réaction-----	94
6.3.4.	Méthodologie de conception de réglage par logique floue-----	94
6.3.5.	Avantages et inconvénients du réglage par logique floue-----	95
6.4	Simulation et exploitation des résultats -----	97
6.5	Implantation complet du système sur TAS -----	99
6.5.1.	Modélisation et simulation complète du système sur TAS -----	102
6.6	Exploitation des résultats de simulation -----	105
6.6.1.	Pour une température extérieure variable-----	105
6.6.2.	Pour une température extérieure constante-----	106

Chapitre 7

7	CONCLUSION -----	108
	RÉFÉRENCES -----	110

Liste des Figures

<u>Figure</u>	<u>Titre</u>	<u>Page</u>
1.1	Loi de Moore.....	2
1.2	Causes majeures des pannes électroniques.....	2
1.3	Méthodologie de recherche.....	5
2.1	Structure de la molécule C ₆₀	7
2.2	Structure de la molécule C ₇₀	8
2.3	Formes allotropiques du carbone.....	14
2.4	Bandes d'énergies.....	15
2.5	Diagrammes de bandes d'énergies.....	16
2.6	Densité de courant.....	17
2.7	Liaison de covalence des semi-conducteurs.....	19
2.8	Notion de trou.....	20
2.9	Atome donneur.....	21
2.10	Absorption d'un photon	23
2.11	Emission d'un deuxième photon.....	23
2.12	Emission spontanée d'un photon.....	24
3.1	Tranche fine de silicium.....	29
3.2	Organigramme de la conception et du test.....	32
3.3	Logogramme de conception d'un ASIC.....	33
3.4	Photolithographie électronique.....	35
3.5	La salle blanche.....	37
3.6	Ecriture directe de motifs atomiques.....	39
4.1	Dissipation thermique.....	45
4.2	Représentation générale du système de mesure.....	47
4.3	Modèle générale d'un système de mesure.....	48

<u>Figure</u>	<u>Titre</u>	<u>Page</u>
4.4	Représentation de la thermométrie par thermocouple.....	51
4.5	Équivalence entre énergie thermique et énergie électrique.....	52
4.6	Représentation générale d'un système de refroidissement liquide.....	54
4.7	Fonctionnement du caloduc (<i>angl. Heat pipes</i>).....	55
4.8	Micro ventilateurs (<i>angl. micro fans</i>).....	55
5.1	Formation d'une jonction mécanique à l'aide d'un matériau Piézoélectrique.....	60
5.2	Structure électronique d'une jonction moléculaire.....	61
5.3	Fonction de Fermi.....	62
5.4	Transport du courant à travers une molécule.....	62
5.5	Blocage de Coulomb.....	65
5.6	Fonction de Langevin.....	66
5.7	Architecture interne du MC33186.....	69
5.8	Caractéristiques géométriques.....	70
5.9	Modèle électrique équivalent au système physique.....	73
5.10	Modèle géométrique sur TAS.....	75
5.11	Variations normalisées par rapport à 1.5W du pourcentage d'utilisation du processeur.....	81
5.12	Variation de la température extérieure.....	82
5.13	Modélisation sans les refroidisseurs thermiques.....	85
5.14	Variations du pourcentage d'utilisation du processeur.....	86
5.15	Variations de la température extérieure en fonction du temps.....	86
5.16	Évolution des températures T_a et T_b en fonction du temps pour la température extérieure de la figure (V-14).....	87
5.17	Évolution des températures T_a et T_b en fonction du temps pour une T^0 extérieure constante.....	87
6.1	Structure d'un réglage par logique floue	92
6.2	Configuration interne d'un régulateur par logique floue.....	93
6.3	Étapes de conception d'un réglage avec régulateur standard et par contre réaction	94
6.4	Méthodologie de conception d'un réglage par logique floue	95
6.5	Plat froid (<i>angl. Coldplate</i>) réalisé sous TAS.....	97

<u>Figure</u>	<u>Titre</u>	<u>Page</u>
6.5b	Principe de l'écoulement du liquide réfrigérant dans le plat froid.....	98
6.7	Modélisation et simulation thermique du plat froid sur TAS.....	99
6.8	Représentation générale du système au complet sur TAS.....	100
6.9	Application du caloduc dans les nanotubes.....	101
6.10	Caractéristiques des canaux de caloduc.....	102
6.11	Modélisation et simulation thermique du système au complet.....	103
6.12	Résultat final de la modélisation et simulation thermique sur TAS.....	103
6.13	Résultats de la simulation sur TAS.....	104
6.14	Résultats et caractéristiques de la simulation obtenus par TAS.....	104
6.15	Variations de T_a avec les variations extérieure de la température de la figure V-15	105
6.16	Variations de T_b avec les variations extérieure de la température de la figure V-15	105
6.17	Variations de Q_{reg} avec les variations de la température extérieure de la figure V-15.....	106

LISTES DES TABLEAUX

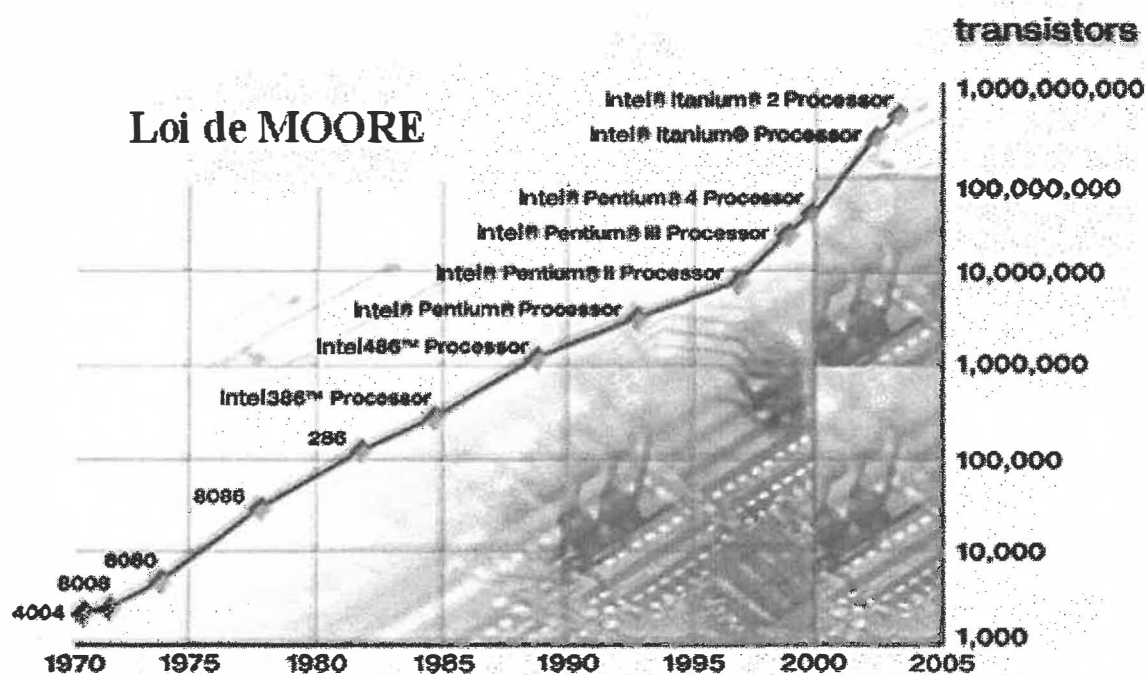
<u>Tableau</u>	<u>Titre</u>	<u>page</u>
2.1	Types des matériaux nanostructurés et leurs domaines d'applications...	12
2.2	Propriétés électriques des principaux semi-conducteurs.....	25
5.1	Caractéristiques électriques du système.....	71
5.2	Analogies entre les grandeurs électriques et thermiques.....	72
5.3	Propriétés des matériaux utilisés.....	80
6.1	Comparaison d'états d'équilibre du modèle.....	101

Chapitre I

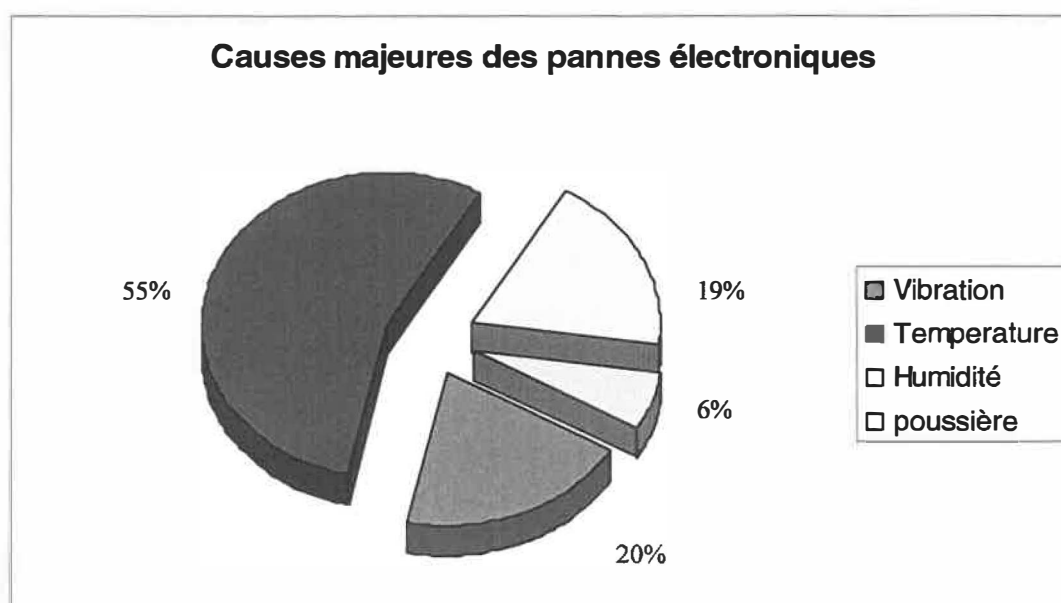
Introduction

I.1. Problématique

Les applications de l'électronique sont partout et ont gagné le grand public. Dans tous les domaines – militaire, spatial, industriel et domestique – elles exigent un accroissement de la vitesse de réponse des dispositifs, une réduction de la taille, des fonctionnalités plus complexes et une meilleure fiabilité. La loi de Moore, qui prédit que les performances des semi-conducteurs doublent tous les dix-huit mois (voir figure I-1), continue de se vérifier depuis le début des années 1970 pour l'ensemble des composants : microprocesseurs, mémoires, circuits logiques, composants de puissance. Le problème d'évacuation de la chaleur se pose maintenant au niveau même du composant, à cause de la forte augmentation de la densité de flux résultant de la miniaturisation et de l'augmentation des fréquences de fonctionnement. Le contrôle thermique est un point clef de la conception des équipements électroniques, car la qualité et la fiabilité de leurs composants dépendent fortement de la température (voir figure I-2). Ces dispositifs ont donc besoin d'un système de régulation thermique pour améliorer l'exécution et la fiabilité.



(Fig.I-1) : Loi de Moore : évolution du nombre de transistors contenus dans les microprocesseurs sortis des usines Intel depuis 1971 à nos jours, avec le nom commercial du microprocesseur (Source Intel : www.intel.com)



(Figure I-2) : Les causes majeures des pannes électroniques (Source : US Air Force Avionics integrity Program)

De nos jours, la méthode de régulation thermique la plus courante dans les ordinateurs est la convection forcée basée sur l'utilisation des ventilateurs. Cependant, il existe d'autres méthodes de régulation telles que : l'immersion dans un liquide de refroidissement, les caloducs (*ang. Heat pipes*), les micros fans, les refroidisseurs thermo et nano-thermoélectroniques, etc.

I.2. Objectifs de la recherche

L'objectif général du projet de recherche concerne essentiellement la nouvelle technologie de fabrication des composants électroniques au niveau micro/nanofabrication avec la modélisation numérique d'un microprocesseur appliqué dans un système de télécommunication dans le but d'étudier son comportement au niveau thermique et de voir les différentes méthodes de refroidissement qui sont utilisées dans la nouvelle technologie des microsystèmes pour maintenir le système autour d'une température de consigne.

L'objectif général peut se décomposer en sous-objectifs :

- Étude et types des matériaux et propriétés électroniques des semi-conducteurs;
- étude des méthodes de micro/nanofabrication;
- étude des méthodes de mesure de température;
- étude et choix de régulateurs micro/nanothermoélectroniques;
- modélisation numérique d'un microprocesseur appliqué dans un système de télécommunication;

- simulations et la validation des résultats obtenus;
- discussion des résultats obtenus et les possibilités d'application

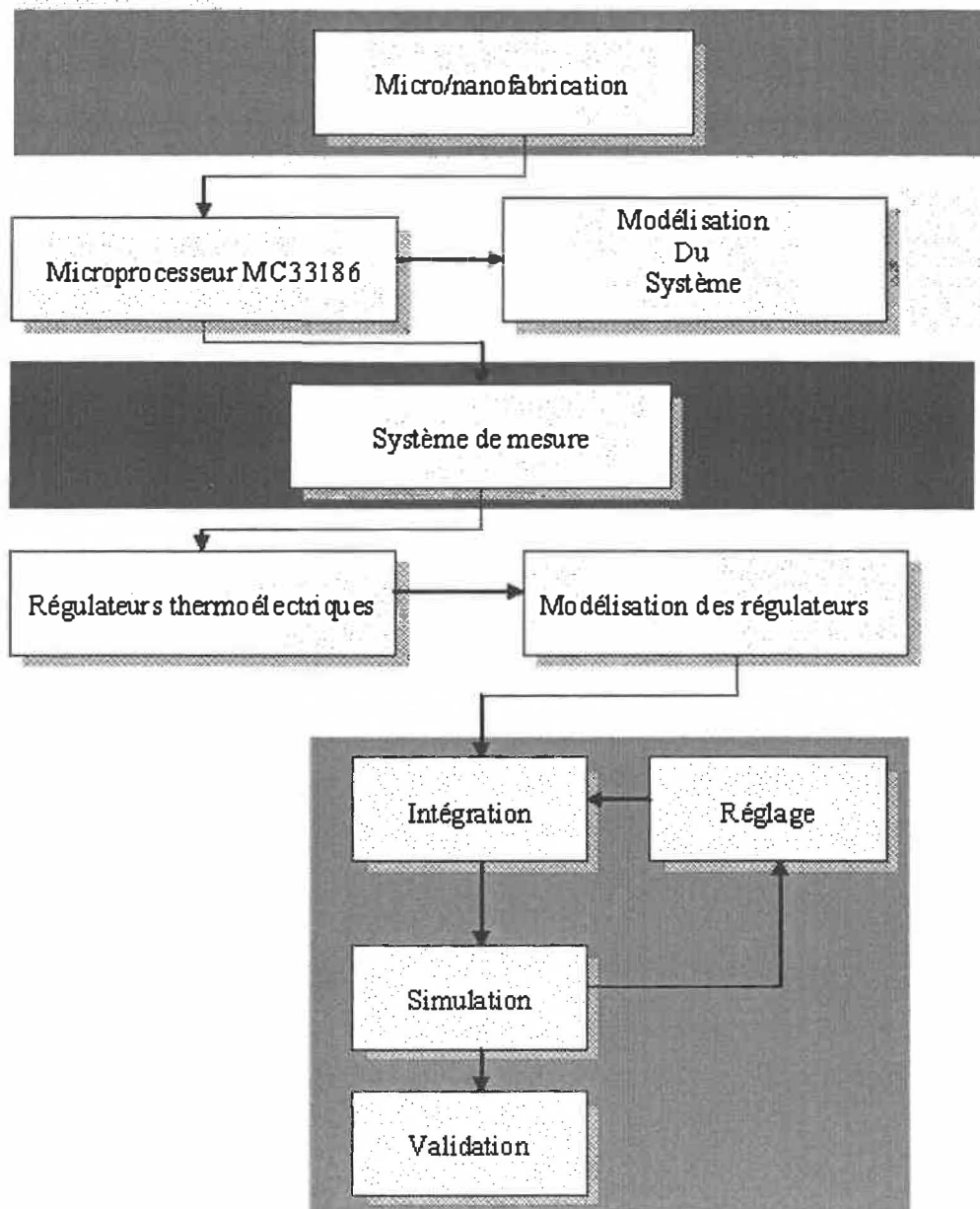
I.3 Méthodologie de la recherche

L'émergence de nouvelles technologies à l'échelle du nanomètre pour réaliser, manipuler et agir sur les atomes, les molécules et les matériaux dans une ou plusieurs dimensions, a fortement enrichi nos imaginations et nos capacités pour créer un nouvel espace d'exploration dans les domaines scientifiques et les applications industrielles. Ainsi, l'avancement de la science dans le domaine thermique et dans le domaine de la commande servira de point de départ. Dans le cadre de la recherche, nous fixons un microprocesseur du type MC33186 (*ang. MC33186 by Motorola*) appliqué dans un système de télécommunication. Après avoir fait une étude structurale du microprocesseur, nous déterminons les points diffusant le plus de chaleur et la méthode la plus adéquate pour mesurer la température. Une étude des méthodes de régulation thermique permettra de choisir le type de régulateur le plus approprié à notre application : les régulateurs thermoélectriques au niveau micro/nano-technologie.

La modélisation d'un système est l'une des plus importantes étapes pour en simuler et faciliter le comportement et la conception du contrôleur. Un modèle électrique équivalent à l'ensemble du composant sera développé et validé par simulation numérique sous le logiciel TAS (*ang. Thermal Analysis System*). Dès que le modèle obtenu présentera les points diffusant le plus de chaleur, une étude des caractéristiques du modèle permettra de

choisir le bon régulateur thermique qui aura comme objectif, d'éviter l'endommagement du notre puce électronique par une bonne régulation thermique.

Cette méthodologie de recherche est illustrée dans la figure I-3.



(Figure I-3) : Méthodologie de recherche

I.4 Structure du mémoire

Ce mémoire est composé de sept chapitres. Le premier présente la problématique, les objectifs de recherche et la méthodologie utilisée pour les atteindre. Le deuxième chapitre se compose de deux sous-sections. La première sous-section fait une brève introduction sur la nature et différents types des matériaux ainsi que leurs propriétés physiques, et la seconde sous-section présente les propriétés physiques des semi-conducteurs. Dans le troisième chapitre nous présentons les étapes de la micro/nanofabrication pour les composants électroniques avec une revue sur les technologies nanométriques. Le quatrième chapitre fait une brève introduction sur les différents systèmes de mesure et sur le principe des régulateurs thermoélectriques, ainsi que les caractéristiques de ceux qui sont vastement utilisés dans le cadre des micro et nanosystèmes. Le cinquième chapitre concernant la modélisation sera également constitué de deux sous-sections. La première sous-section présente la modélisation sous forme de schéma électrique équivalent à l'ensemble de la puce électronique, et la deuxième sous-section présente la modélisation à l'aide d'un logiciel de simulation. Les résultats et les discussions se trouvent au sixième chapitre. Enfin le septième chapitre conclut ce mémoire en mettant en évidence l'originalité et les contributions scientifiques du projet, ainsi que l'applicabilité des résultats.

Chapitre II

Matériaux et propriétés électroniques des semi-conducteurs

II.1. Les matériaux

II.1.1. Introduction

La matière dont est formé le monde qui nous entoure est composée de particules discrètes, ayant une taille submicroscopique, dont les lois de comportement sont décrites par les théories atomiques. Les états d'organisation de la matière sont très variés depuis le désordre complet des atomes ou des molécules d'un gaz sous faible pression jusqu'à l'ordre quasi parfait des atomes dans un monocristal. D'ici nous définissons les matériaux comme les solides utilisés par l'homme pour la fabrication d'objets qui constituent le support de son cadre de vie. En effet aucun objet ne peut être réalisé sans matériaux. Tous les secteurs de l'activité humaine dépendent des matériaux, de la fabrication d'un circuit intégré à l'édification d'un barrage hydroélectrique. Ils apparaissent dans notre corps pour renforcer ou se substituer à nos biomatériaux endommagés. [ISDM]

II.1.2. Propriétés des matériaux

Un matériau possède un ensemble de propriétés qui détermine son comportement. On caractérise une propriété d'un matériau en analysant la réaction du matériau à une sollicitation extérieure. On détermine en général une propriété à l'aide d'un essai normalisé. Selon le type de sollicitations extérieures, on distingue trois catégories de propriétés :

- Les ***propriétés mécaniques*** qui reflètent le comportement des matériaux déformés par un ensemble de forces.
- Les ***propriétés physiques*** qui mesurent le comportement des matériaux soumis à l'action de la température, des champs électriques ou magnétiques ou de la lumière.
- Les ***propriétés chimiques*** qui caractérisent le comportement des matériaux dans un environnement réactif.

Certaines propriétés dérivent directement de l'arrangement des atomes et de la nature des liaisons. C'est le cas de l'opacité des métaux, de la transparence des verres ou de l'extensibilité des caoutchoucs. D'autres propriétés des matériaux sont fortement dépendantes de leur microstructure qui est composé de grains ou de particules de taille microscopique, dotés d'une morphologie déterminée. [ISDM]

II.1.3. Microstructures

Comme l'indique leur étymologie, les microstructures sont constituées d'un ensemble d'éléments organisés à l'échelle microscopique et qui contrôle les propriétés d'un grand

nombre de matériaux. Leur observation et leur caractérisation nécessitent donc l'utilisation de techniques microscopiques. Les microstructures formées dans les matériaux dépendent non seulement de la composition ou de la structure chimique du matériau mais aussi de l'existence de gradients de température ou de concentration à l'intérieur de celui-ci lors de sa transformation. Les microstructures sont également fortement influencées par l'énergie nécessaire à la création des interfaces nouvelles. Les éléments de la microstructure d'un matériau sont en général définis par plusieurs paramètres :

- composition;
- arrangement atomique;
- quantité relative;
- morphologie;
- taille.

La microstructure détermine les propriétés d'un très grand nombre de matériaux. C'est grâce à la modification contrôlée de la microstructure lors de la fabrication ou de la transformation que l'ingénieur en matériaux obtient une large gamme de propriétés. Une variation de la microstructure au cours du temps lors de l'utilisation du matériau entraîne une modification importante de ses propriétés (phénomène de vieillissement). Pour obtenir des matériaux fiables, il est indispensable de maîtriser les phénomènes de vieillissement qui sont le résultat de modifications physiques ou de réactions chimiques.

[PDM]

II.1.4. Nanomatériaux

Les matériaux sont constitués d'atomes. Leurs propriétés macroscopiques – celles qu'on exploite pour différentes applications- dépendent du type d'atomes et de leur agencement. Ainsi, la seule différence entre le charbon et le diamant, dont les propriétés macroscopiques sont extrêmement différentes comme par exemple la dureté, est la manière dont les atomes sont disposés dans le réseau. Cependant il existe plusieurs méthodes pour produire des nanoparticules. Certaines consistent à chauffer à un niveau très élevé un matériau, de sorte que les atomes s'évaporent, puis à refroidir ces atomes pour qu'ils s'agglomèrent en particules. Par définition, les nanomatériaux sont des matériaux qui sont constitués d'un assemblage de particules nanométriques, c'est-à-dire dont la taille est inférieure à 100 nm. Les matériaux traditionnels sont habituellement composés de particules de plusieurs centaines et, plus souvent, de plusieurs milliers de nanomètres, qu'on appelle des grains. Or, au début des années 1980, on s'est rendu compte que lorsqu'on diminuait sensiblement la taille de ces grains, les propriétés du matériau changeaient de manière très marquée. En effet des matériaux assemblés à partir de nanoparticules sont beaucoup plus résistants et plus malléable (ductiles) que les matériaux ordinaires. Plus la taille des nanoparticules diminue, plus la résistance (dureté) du matériau augmente. Il y a toujours un arbitrage à faire entre la dureté d'un matériau et sa ductilité, c'est-à-dire que lorsqu'on augmente la dureté d'un matériau, il devient toujours moins ductile. Or, des matériaux composés de nanoparticules peuvent être à la fois plus durs et plus ductiles qu'un matériau ordinaire. Les matériaux nanostructurés représentent une composante essentielle des nanotechnologies. On peut les grouper en plusieurs types :

- **Dispositifs nanostructurés inorganiques** : dispositifs quantiques à effet de champ, dispositifs à un électron, mémoires de la prochaine génération, supports d'enregistrement magnétiques, etc.
- **Corps nanostructurés à base de carbone et organiques** : nanotubes de carbones, couches minces de diamant, dispositifs d'électroluminescence organique, etc.
- **Matériaux nanostructurés macromoléculaires et inorganiques** : polymères macromoléculaires, céramiques, alliages en super métaux, etc.
- **Corps nanostructurés poreux et à forte surface spécifique** : membranes isolés, céramiques séparées de leur matière nuisible, poudres photocatalytiques, etc.
- **Corps nanostructurés pour les biotechnologies** : système de relargage de médicaments, dispositifs d'imitation du vivant, matériaux pour les capteurs à haute sensibilité, etc.
- **Technologies fondamentales des nanostructures** : équipements de production, méthode d'usinage, procédés d'observation, etc.

Le tableau II.1, présente les différents types de matériaux nanostructurés et leurs domaines d'applications.

Type de matériaux \ Domaine concerné	Dispositifs de soins médicaux	Dispositifs électroniques	Purification de l'environnement	Nouveaux matériaux nanostructurés
Dispositifs inorganiques	—	+	—	—
Macromoléculaires et inorganiques	—	—	+	—
Corps nanostructurés pour les biotechnologies	+	—	—	—
Technologies fondamentales des nanostructures	—	—	—	+

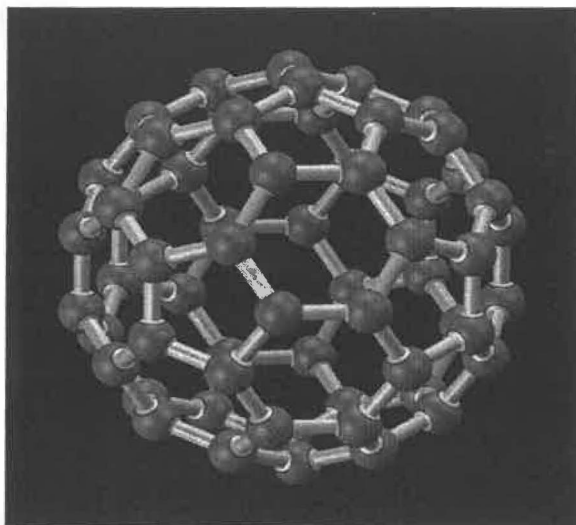
(Tableau II-1) : Les différents types des matériaux nanostructurés et leurs domaines d'applications
(source : Japan patent office)

II.1.5. Fullerènes

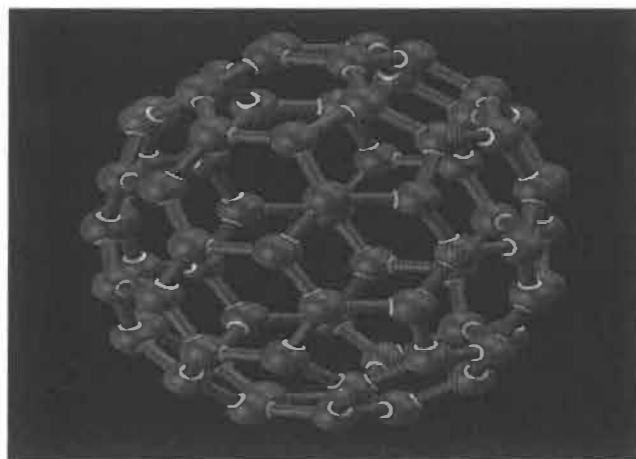
Les fullerènes sont une nouvelle variété de carbone formés de molécules ayant une forme de cage. Jusqu'à leur production en mai 1990 par Krätschmer, on ne connaissait que le diamant et le graphite comme formes cristallines du carbone pur. Cette nouvelle molécule est composée de 60 atomes de carbone, ayant donc la formule chimique C_{60} . La structure de la molécule de C_{60} est celle d'un ballon de football composée de vingt hexagones et de douze pentagones qui forment un icosaèdre dont les sommets occupés par un atome de carbone, sont équivalents (figure II.1). Chaque atome de carbone est lié aux trois atomes voisins par deux liaisons simples et une double liaison. Au sein de la molécule les liaisons sont donc fortes. Par contre, étant donné que chaque atome de carbone a ses valences saturées au sein de la molécule, ce sont des liaisons intermoléculaires faibles de

type Van der Waals qui assurent la cohésion du solide, qui est donc un isolant électrique.

D'autres formes de fullerènes ont aussi été observées, tels les C_{70} , C_{76} , C_{84} , etc.

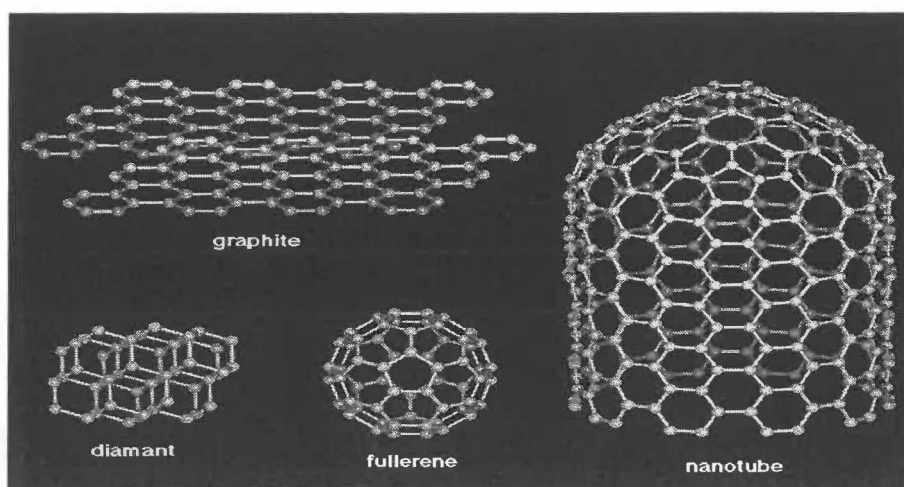


(Figure II-1) : Structure de la molécule C_{60} formée de 20 hexagones et 12 pentagones. (Source : PDM)



(Figure II-2) : Structure de la molécule C_{70} . Celle-ci est plus allongée et on peut l'imaginer comme une molécule de C_{60} à laquelle on a ajouté 10 atomes de carbone formant une ceinture de 5 hexagones supplémentaires autour du plan équatorial de la molécule. (Source : PDM)

Actuellement, il est aussi possible d'obtenir des fullerènes tubulaires. On peut imaginer ces structures comme deux hémisphères de C_{60} , reliées par un cylindre de même diamètre, avec une structure hexagonale comme un plan graphitique enroulé (figure II.3). La première observation de ces tubes de carbone ayant de diamètres de l'ordre du nanomètre et des longueurs de quelques microns a été faite par microscopie électronique par transmission par Iijima en 1991. Dans la plupart des cas, les tubes se présentent sous la forme de plusieurs tubes concentriques. Dans le solide, ils se présentent souvent sous la forme de fagots constitués de plusieurs tubes alignés. Ces tubes peuvent être soit isolants, soit semi-métalliques suivant leur structure. L'intercalation de métaux alcalins entre les molécules de fullerènes a permis la modification de leurs propriétés électroniques. Ainsi, avec une stœchiométrie M_3C_{60} , on obtient des supraconducteurs ayant des températures de transition supérieures à 30 K. Ces matériaux ont ainsi suscité un regain d'intérêt pour les supraconducteurs à haute température critique initialement provoqué par les céramiques supraconductrices. [PDM]

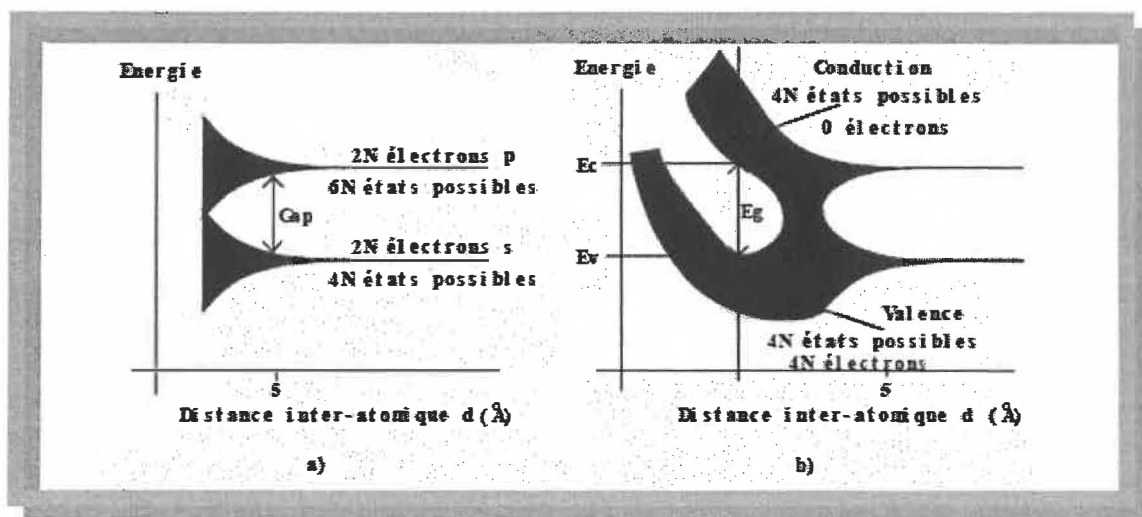


(Figure II-3) : Les formes allotropiques du carbone (Source : CNRS)

II.2. Propriétés électroniques des semi-conducteurs

II.2.1 Notions sur la théorie des bandes d'énergie dans les solides

Les semi-conducteurs et les métaux ont une structure cristalline, c'est-à-dire que les atomes ou molécules sont groupés en réseaux régulièrement disposés dans l'espace. Dans ces réseaux la distance inter-atomique étant faible (de l'ordre de quelques Å) les atomes ne peuvent plus être considérés comme isolés et il en résulte des interactions (de nature électrostatique entre les divers atomes). Considérons un cristal constitué de N atomes du groupe IV a (C, Ge, Si, Sn) et supposons que l'on puisse faire décroître la distance inter-atomique.



(Figure II-4) : Diagrammes d'énergie des éléments du groupe IV lorsque la distance inter-atomique décroît: apparition des bandes d'énergie (source : les semi-conducteurs :www.unilim.fr)

Lorsque les distances inter-atomiques deviennent suffisamment faibles l'ensemble du cristal devient un système électronique qui obéit au principe d'exclusion de Pauli. On a donc, une dégénérescence des états d'énergie. Cette dégénérescence se traduit par la démultiplication des niveaux d'énergie correspondants aux sous-couches s et p en N sous

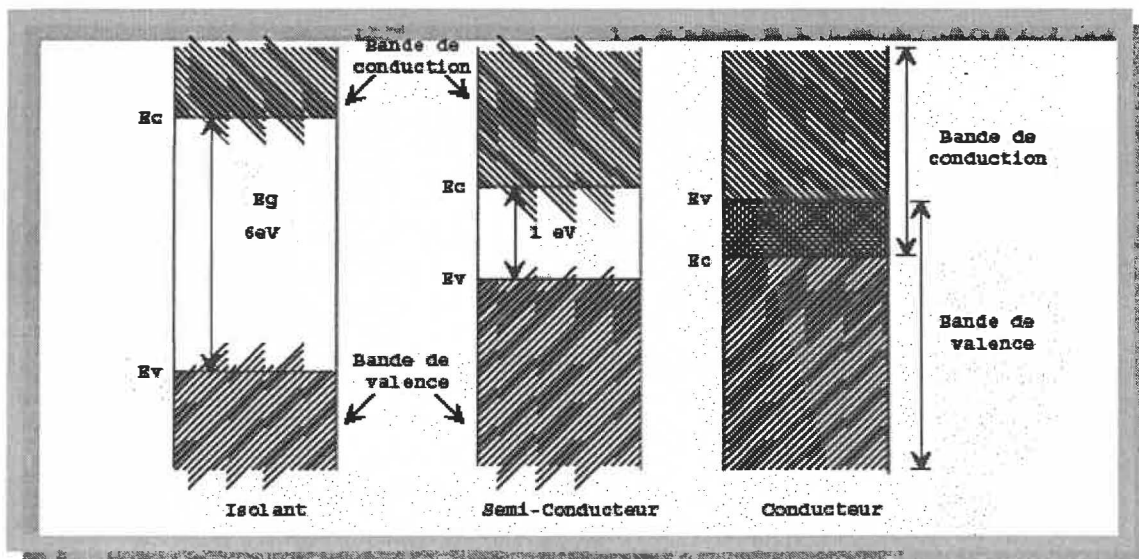
niveaux qui constituent autant d'états d'énergie possible pour les électrons. Ces N états distincts constituent une bande d'énergie.

On note l'existence d'une bande d'énergie appelée bande interdite qui ne comprend aucun état possible. Lorsque la distance inter-atomique décroît encore, on a affaire à ce que l'on appelle des interactions fortes et l'on obtient la structure représentée à la figure b).

II.2.2. Isolants, semi-conducteurs, conducteurs

On distingue les isolants de semi-conducteurs et les conducteurs à partir de leur structure de bande d'énergie.

À 0° K tous les électrons se trouvent dans la bande de valence pour les isolants et les semi-conducteurs. Lorsque la température s'élève, l'énergie apportée aux électrons n'est pas suffisante pour les faire passer de la bande valence dans la bande de conduction pour un isolant ($E_g = 6 \text{ eV}$) tandis que pour un semi-conducteur quelques électrons passeront de la bande de valence dans la bande de conduction ($E_g = 1 \text{ à } 1.5 \text{ eV}$).



(Figure II-5) : Diagrammes de bandes d'énergie des différents types d'éléments (source : les semi-conducteurs : www.unilim.fr)

II.3 Phénomènes de transport de charge dans les semi-conducteurs

II.3.1 Phénomène de conduction dans un métal

Dans un métal chaque atome est susceptible de fournir un voire 2 ou 3 électrons à la bande de conduction. Ces électrons ne peuvent être rattachés à aucun atome particulier et sont donc libres de se mouvoir à l'intérieur du cristal ; se sont les électrons libres. A la température ambiante et en l'absence de champ électrique les électrons sont animés de mouvements aléatoires dus aux collisions avec les atomes. Le déplacement moyen de l'ensemble des électrons est nul dans ce cas. Si l'on applique un champ électrique E à l'intérieur du métal la vitesse moyenne des électrons sera non nulle et sera proportionnelle au champ électrique pour de faibles valeurs de celui-ci; on a alors:

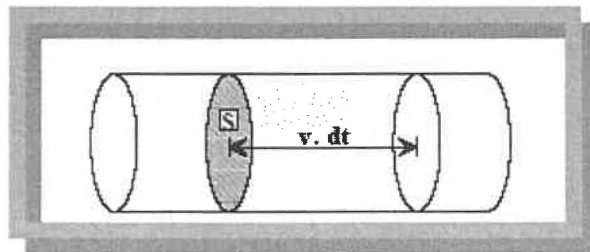
$$\vec{v} = \bar{\mu} \vec{E} \quad (\text{II.4})$$

μ est appelé la mobilité des électrons, elle s'exprime en $\text{m}^2/\text{V.S}$.

Ce déplacement d'électrons va engendrer un courant dit courant d'entraînement.

II.3.2 Densité de courant

Considérons un barreau de longueur L et de section S contenant n électrons/ m^3 .



(Figure II-6) : Cylindre des charges traversant la section S pendant le temps dt (source : les semi-conducteurs : www.unilim.fr)

Le courant à l'intérieur du barreau est :

$$I = \frac{dQ}{dt} \quad (\text{II.5})$$

où dQ est la charge traversant la section S pendant le temps dt . Cette charge est constituée par l'ensemble des charges qui peuvent atteindre la section S pendant le temps dt soit celles contenues dans le cylindre de longueur $v \cdot dt$ (figure II.6).

$$I = n \cdot q \cdot S \cdot v = \frac{dQ}{dt} \quad (\text{II.6})$$

la densité de courant \vec{J} est alors :

$$\vec{J} = \vec{n} \cdot \vec{q} \cdot \vec{v} \quad (\text{II.7})$$

Compte tenu de la relation (II.4) on a:

$$\vec{J} = \vec{n} \cdot \vec{q} \cdot \vec{\mu} \cdot \vec{E} = \vec{\sigma} \cdot \vec{E} \quad (\text{II.8})$$

σ est la conductivité du métal et la résistivité $\rho = \frac{1}{\sigma}$

$$\sigma = n \cdot q \cdot \mu \quad (\text{II.9})$$

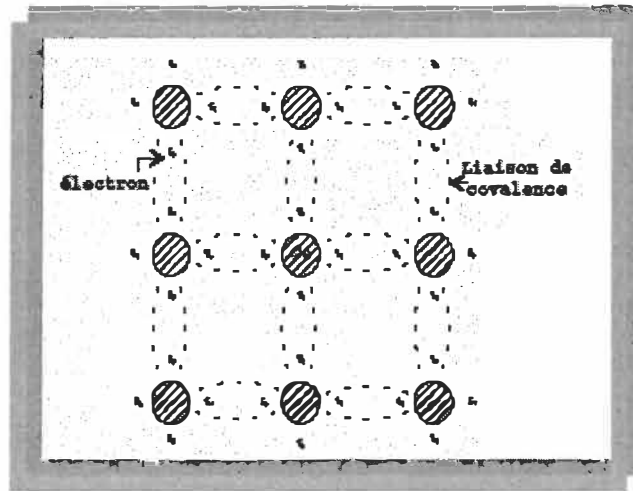
$n = 10^{28}/\text{m}^3$ pour un conducteur

$n = 10^7/\text{m}^3$ pour un isolant

II.4 Electrons et trous dans un semi-conducteur pur (intrinsèque) liaison de covalence

Les 4 électrons de la couche périphérique des éléments du groupe IV forment avec les électrons des atomes voisins des paires d'électrons qui assurent les liaisons inter-atomiques appelées liaisons de covalence ex. : Germanium.

Comme tous les électrons des couches périphériques sont insérés dans des liaisons covalentes le Germanium a une conductivité très faible à basse température.



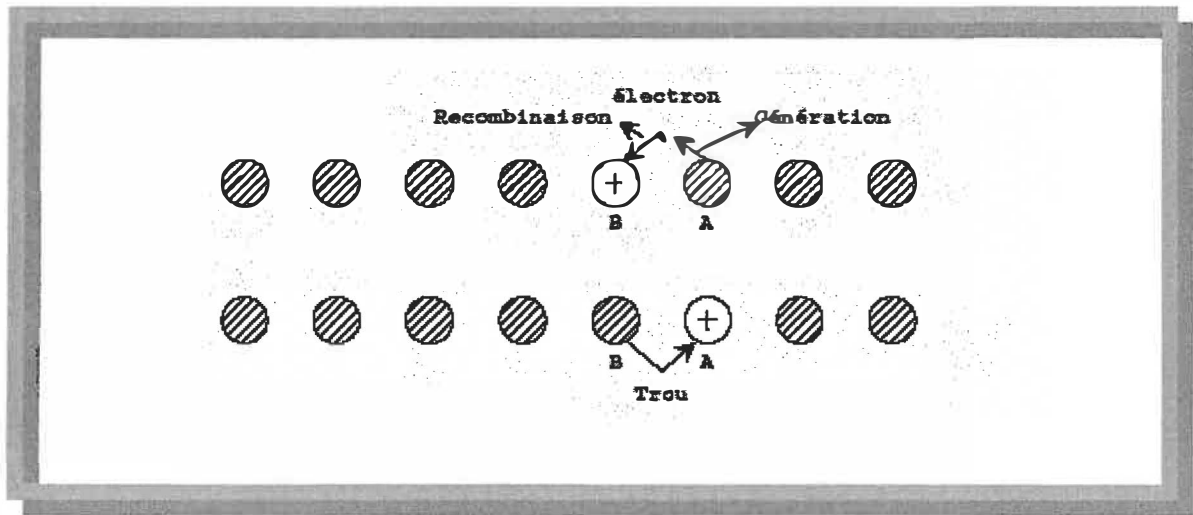
(Figure II-7) : Structure des liaisons de covalence des éléments du groupe IV (source : les semi-conducteurs : www.unilim.fr)

II.4.1 Notion de trou

Si l'on apporte sous forme thermique une énergie suffisante au cristal : ($E_G = 0,72 \text{ eV}$ Ge ; $E_G = 1,1 \text{ eV}$ si ; $E_G = 1.42 \text{ eV}$ AsGa). Plusieurs des liaisons covalentes peuvent être détruites libérant ainsi un électron. L'atome possédant ainsi 1 électron de moins sur sa couche externe est donc porteur d'une charge électrique positive $q = +1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$. Un tel manque d'électron au niveau d'une liaison de covalence est appelé un **trou** (figure II.8).

La notion essentielle est que ce trou pourra participer à la conduction de la manière suivante: un électron d'une liaison voisine d'un trou pourra facilement se déplacer pour venir compléter cette liaison sous l'effet d'une faible énergie laissant par la même, un trou là où il était. Tout se passe comme si le trou s'était déplacé dans la direction opposée à celle de l'électron. Ce phénomène est illustré à la figure 8 où on a représenté la **génération** d'un électron de l'atome A qui se **recombine** avec l'atome B qui avait

initialement un manque d'électron. Tout se passe comme si le trou s'était déplacé de B vers A. Sous l'effet d'un champ électrique le déplacement moyen des électrons générés ne sera pas nul dans le sens opposé au champ électrique ce qui induit un déplacement équivalent des trous dans le sens du champ électrique.



(Figure II-8) : Illustration de la notion du trou (source : les semi-conducteurs :www.unilim.fr)

Dans un semi-conducteur pur, le nombre de trous est égal au nombre d'électron et on a $n = p = n_i$

n_i est la concentration en porteurs du semi-conducteur intrinsèque. [PFEI]

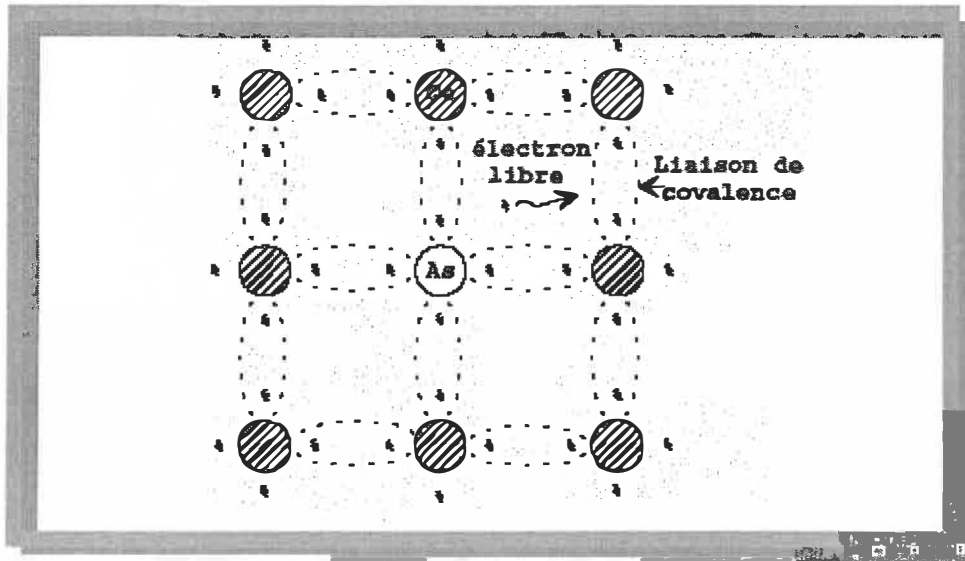
II.5 Dopage d'un semi-conducteur

On dit qu'un semi-conducteur est dopé ou extrinsèque lorsque l'on a diffusé des impuretés à l'intérieur de ce semi-conducteur.

II.5.1 Donneurs

Supposons que l'on introduise dans le semi-conducteur des atomes appartenant au groupe V de la classification périodique (Azote N^7 , Phosphore P^{15} , Arsenic As^{33}). Ces atomes ont 5 électrons sur leur couche périphérique. Etant insérés dans le cristal comme sur la figure

II-9, II-7 des ces électrons participeront aux liaisons covalentes tandis que le 5ème sera un électron quasi-libre pouvant participer à la conduction de l'électricité. En effet l'énergie requise pour le rendre libre est de l'ordre de 0,01 eV pour Ge et de 0,05 eV pour Si.



(Figure II-9): Introduction d'un atome donneur dans le réseau (source : les semi-conducteurs : www.unilim.fr)

On dit que l'on a affaire à un semi-conducteur dopé N. A la température ambiante pratiquement tous les donneurs sont ionisés et si la concentration en atomes donneurs est N_D/m^3 la densité de porteurs libres du semi-conducteur sera :

$n = n_0 + N_D$; d'où n_0 est la densité d'électrons générés par le processus de rupture de liaisons de covalence qui engendre des paires électrons-trous.

II.5.2 Accepteurs

Supposons que l'on introduise maintenant des atomes du groupe III (Bore b^5 , Gallium

Ga^{31} , Indium In^{49}). Ces atomes possèdent trois électrons sur leur couche périphérique. Ils vont donc former avec les atomes de Ge ou Si voisins des liaisons incomplètes que les électrons voisins viendront facilement compléter un générant derrière eux des **trous**.

On dit que le semi-conducteur est **dopé P** et à température ambiante il y a autant de trous que d'atomes accepteurs. De la même façon que pour le semi-conducteur dopé N, la concentration en trous du semi-conducteur sera : $p = p_0 + P_A$.

II.6. Comportement fréquentiel des matériaux

Lorsqu'une onde pénètre dans un matériau, elle va se propager avec une certaine vitesse et sera plus ou moins absorbée. La vitesse est liée aux propriétés diélectriques de ce matériau, alors que l'absorption dépend de ses propriétés conductrices, ce qui dans ce dernier cas signifie qu'elle est habituellement attribuée aux porteurs mobiles.

L'équation de propagation d'une onde plane dans un milieu avec pertes, se déduit des équations de Maxwell et peut se mettre sous la forme :

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_{x,y}}{\partial z^2} j\omega\mu_0(\sigma + j\omega\varepsilon) \varepsilon_{x,y} \quad (\text{II-10})$$

expression dans laquelle $\varepsilon_{x,y}$ est la composante du champ électrique transverse ou normale à la direction de propagation suivant z , μ_0 , la perméabilité du matériau (non magnétique) telle que $\mu_0 = 4\pi.10^{-7}$ en unités MKSA.

σ et ε sont respectivement la conductivité et le constant diélectrique absolu du matériau.

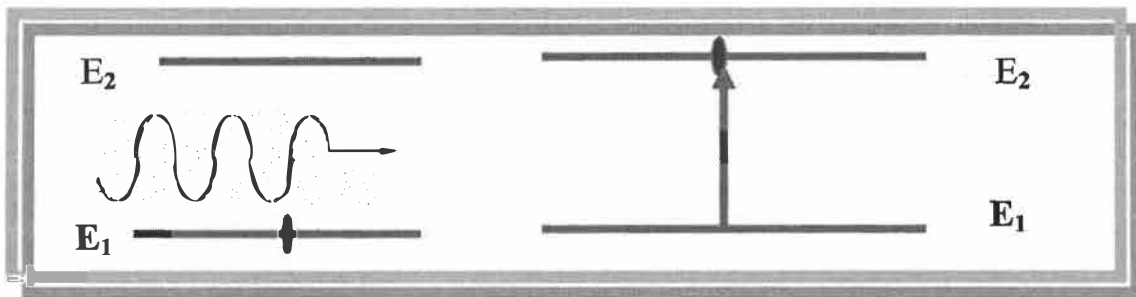
II.7. Interaction photon-électron dans un semi-conducteur

Il existe trois formes d'interaction entre un photon et un électron dans un semi-conducteur.

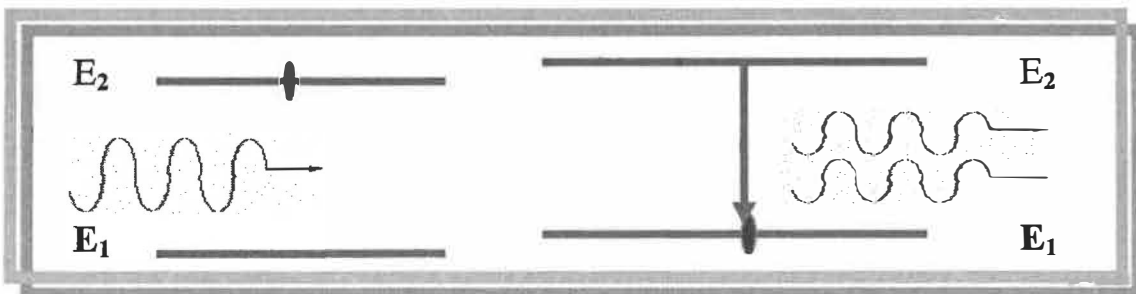
Un photon peut être absorbé dans le cristal entraînant le passage d'un électron de la bande de valence à la bande de conduction (figure II-10).

En second lieu, ce mécanisme d'absorption peut être accompagné de la stimulation d'une émission d'un autre photon entraînant un processus de recombinaison d'un électron de la bande de conduction vers la bande de valence (figure II-11).

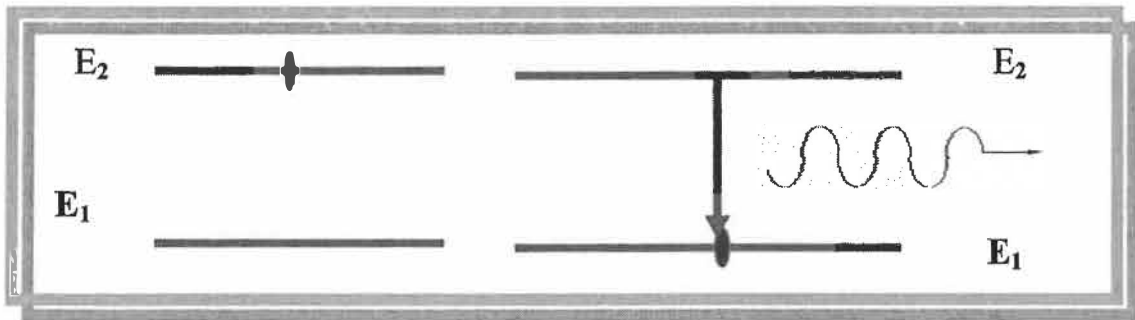
La troisième forme est la transition spontanée d'un électron de la bande de conduction vers la bande de valence, associée à une émission de photon (figure II-12). On définit ainsi les processus d'absorption, d'émission stimulée et d'émission spontanée. On notera que le retour d'un électron de la bande de conduction vers la bande de valence ne se traduit pas toujours par l'émission d'un photon. [PFEI]



(Figure II-10) : Transitions entre deux niveaux d'énergie E_1 et E_2 . Absorption d'un photon. (Source : PFEI)



(Figure II-11) : Transitions entre deux niveaux d'énergie E_1 et E_2 . Simulation de l'émission d'un deuxième photon. (Source : PFEI)



(Figure II-12) : Transitions entre deux niveaux d'énergie E_1 et E_2 . Émission spontanée d'un photon.
(Source : PFEI)

II.8. Propriétés électriques des principaux semi-conducteurs

Dans un semi-conducteur la conduction de l'électricité se fait de manière bipolaire (électrons et trous). Si on applique un champ électrique \mathbf{E} à un semi-conducteur on aura une densité de courant:

$$\vec{J} = (\vec{n} \cdot \vec{\mu}_n + \vec{p} \cdot \vec{\mu}_p) \vec{q} \cdot \vec{E} \quad (\text{II.11})$$

et

$$\vec{\sigma} = \vec{q} \cdot (\vec{n} \cdot \vec{\mu}_n + \vec{p} \cdot \vec{\mu}_p) \quad (\text{II.12})$$

Pour un semi conducteur intrinsèque on a: $n = p = n_i$ (génération thermique) avec n_i qui est donnée par :

$$n_i^2 = A_0 \cdot T^3 \cdot e^{-\frac{E_{G0}}{KT}} \quad (\text{II.13})$$

où A_0 est une constante indépendante de la température et E_{G0} est le "gap" à 0°K , K est la constante de Boltzmann.

$$\sigma = 1,28 \cdot 10^{-23} \text{ J}^0\text{K}$$

Le tableau II.2 résume les valeurs des principaux paramètres pour le Germanium le Silicium et l'Arséniure de Gallium:

Propriété à 300°K	Ge	Si	AsGa
Largeur de bande interdite E_g (eV)	0,67	1,1	1,4
Concentration d'atomes (/cm ³)	4,42.10 ²²	5. 10 ²²	2,21. 10 ²²
Densité intrinsèque(/cm ³)	2,4.10 ¹³	1,45.10 ¹⁰	9.10 ⁶
Mobilités μ_n intrinsèques μ_p (cm ² /V.s)	3900 1900	1350 480	8600 250
Constantes diélectriques relatives ϵ_r	16,3	11,7	12
Champ de claquage V/m	$\sim 8.10^6$	$\sim 3010^6$	$\sim 35.10^6$

Tableau II-2 : Propriétés électriques des principaux Semi Conducteurs (source : Japan patent office)

Chapitre III

Micro/nanofabrication et technologies nanométriques

III.1 Techniques de base

L'émergence de nouvelles technologies à l'échelle du nanomètre pour réaliser, manipuler et agir sur les atomes, les molécules et les matériaux dans une ou plusieurs dimensions, a fortement enrichi nos imaginations et nos capacités pour créer un nouvel espace d'exploration dans les domaines scientifiques et les applications industrielles. On peut citer par exemple la miniaturisation de composants microélectroniques. Aujourd'hui, on est capable de fabriquer des motifs de taille inférieure à $0.2\mu\text{m}$ sur des grandes surfaces massivement parallèles, et il est à prévoir bientôt une taille proche de 50 nm en utilisant les nouvelles techniques de lithographie qui sont en train d'être mises au point. D'autre part, les techniques d'épitaxie par jets moléculaires et de dépôts organométalliques en phase vapeur sont sur le point de produire des structures verticales composées de couches fines diverses et variées à l'échelle atomique. Entre 1 à 10 nm, la technique la plus

prometteuse est sans doute le positionnement de molécules ou atomes individuels en utilisant le champ électrique formé au bout de la pointe d'un microscope à effet tunnel, formant les structures artificielles les plus fines à ce jour. Alors que les technologies de fabrication progressent, les champs scientifiques et d'applications potentielles ne cessent de s'agrandir. Lorsque la taille critique de composants entre dans le régime du nanomètre, de nombreux effets apparaissent. Il faut donc observer, analyser et exploiter ces effets en mettant au point certaines fonctions spécifiques, soit électroniques, optiques, magnétiques, mécaniques ou encore électrochimiques. Dans cette section nous discuterons sur les techniques de microfabrication utilisées le plus fréquemment à la fabrication de micro/nanostructures.

III.2 Élaboration des couches minces à l'échelle atomiques

L'élaboration de matériaux en structures multicouches, constituées de l'empilement alterné de couches minces à l'échelle de quelques plans d'atomes, a été développée en premier lieu dans le domaine des semi-conducteurs et de l'optique par rayons X. Par exemple, des multicouches alternant un élément atomique léger (Si, C, etc.) et un métal plus lourd (W, Mo, etc.) permettent l'obtention de miroirs X sélectifs à haut coefficient de réflexion. En physique de semi-conducteurs, les développements les plus spectaculaires sont venus de l'association de composés **III-V**, **II-VI**, et **IV-IV** sous forme d'hétérostructures, de puits quantiques ou de super réseaux, d'alliages ternaires et quaternaires dont on peut faire varier à volonté en utilisant les techniques de croissance par épitaxie par jets moléculaires ou dépôts organométallique. Cette nouvelle ingénierie de structure de matériaux a déjà débouché sur une véritable application industrielle, d'une

part, dans le domaine des circuits électroniques rapides, et, d'autre part, dans celui de l'optoélectronique, avec des émetteurs, des modulateurs et des récepteurs de lumière dans la bande de télécommunications. Par ailleurs, l'élaboration des multicouches magnétiques en alternant un métal magnétique (Fe, Co, etc.) et un métal non magnétique (Au, Pt, Cu, etc.) a permis de créer une nouvelle génération de supports magnétiques pour des têtes de lecture et des capteurs magnétorésistifs performants. L'exploitation du choix optimal des différentes compositions de matériaux devrait conduire encore à l'apparition de nouvelles structures et matériaux dans les prochaines années à venir. En particulier, l'association de matériaux métalliques et semi-conducteurs permettra l'intégration sur un même support des capteurs magnétiques et des circuits électroniques.

III.3 Fabrication des puces

Les techniques de fabrication des circuits intégrés sont très complexes. Il s'agit en effet de réaliser sur une surface de quelques millimètres carrés et une épaisseur de quelques microns un assemblage de plusieurs milliers de composants et les interconnexions entre tous ces éléments. Le matériau de départ est une tranche (disque) très fine de silicium dont le diamètre ne cesse de croître (voir fig. III.1). Il est couramment de 10 cm de diamètre mais peut atteindre des tailles de l'ordre de 30 cm. Ce disque de silicium subit près d'une centaine de traitements différents : dépôt de couches minces isolantes ou conductrices, microgravure, attaque chimique, recuit thermique approprié, dopage par implantation d'atomes... Plusieurs circuits intégrés sont fabriqués en même temps sur une plaque de silicium et le procédé de fabrication traite des lots de 50 à 100 tranches de silicium. Lorsque l'ensemble des traitements est effectué, la tranche de silicium qui

regroupe une à plusieurs centaines de fois le même circuit intégré élémentaire est découpée en pastilles. Le circuit intégré nu est très fragile. Pour être utilisée, chaque pastille ou puce est montée dans un boîtier céramique ou plastique muni de pattes de connexion. Une fois encapsulée, chaque puce est alors contrôlée individuellement et celles qui ont un fonctionnement défectueux ou qui s'écartent trop des spécifications attendues sont rejetées. Le rendement d'une chaîne de fabrication est l'une des mesures principales de la qualité d'une filière technologique. Par exemple, pour des circuits de complexité moyenne, 40% à 60% de ceux-ci ont un fonctionnement correct.

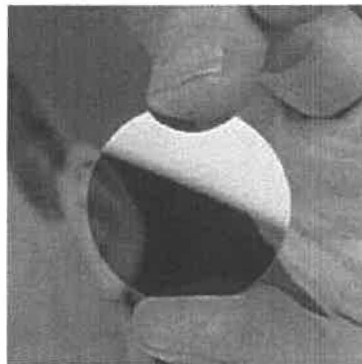


Figure III-1 Fine tranche de silicium. (Source : CEA. www.cea.fr)

III.3.1 Conception assistée par ordinateur (CAO)

Comme un architecte, le concepteur de puces doit d'abord dessiner un plan. Toutes proportions gardées, c'est comme essayer de faire rentrer le plan d'une grande ville (Montréal par exemple) dans un centimètre carré. Autant dire que, sans l'aide de la conception assistée par ordinateur, la mission serait impossible. Après avoir déterminé les fonctions de la puce, le concepteur puise dans des bibliothèques informatisées les millions d'éléments qui vont constituer le circuit. Comme dans un puzzle géant, il doit

d'abord chercher à arranger les pièces les unes par rapport aux autres, puis dessine les chemins qui vont les relier. Avant de lancer la fabrication, il simule sur ordinateur le fonctionnement de sa puce. Si tout va bien, il passe alors les plans et leur mode d'emploi au secteur production.

Les différentes étapes de conception et de réalisation d'un ASIC commencent par la définition du problème devant aboutir à un cahier des charges indiquant les contraintes de l'environnement extérieur. Celui-ci permet de définir les spécifications : type d'ASIC, technologie bipolaire, MOS, CMOS, BICMOS, silicium, AsGa, et la configuration en tant que système (boîtes noires). Les deux étapes suivantes sont les étapes principales de la conception : simulation comportementale, logique, analogique et l'implantation des masques qui consiste à établir, à partir d'un logiciel, la disquette, la bande magnétique..., permettant de réaliser les masques ou de commander un système de lithographie directe.

Le système de conception doit comporter un certain nombre de vérifications susceptibles de modifier, par rebouclage direct, cette approche descendante :

- Vérification des règles de dessin, pour éviter toute incompatibilité technologique; on comparera les résultats à des règles définies par le fonderie.

- Extraction du schéma électrique qui pourra être comparé à un schéma pré-établi à partir des spécifications, ou qui demandera une nouvelle simulation du dispositif, en prenant en compte un certain nombre de contraintes technologiques, définissant de façon plus précise les performances exactes des composants et de leur environnement.

On passe ensuite à la fabrication qui à son tour va être contrôlée de manière systématique en générant, à partir de la simulation, des vecteurs de test visant ultérieurement à valider ou non la qualité du produit. Cette procédure met en œuvre un certain nombre de logiciels, qui devront être compatible entre eux et interactifs, et qui seront intégrés dans l'ensemble complet de conception de l'ASIC.

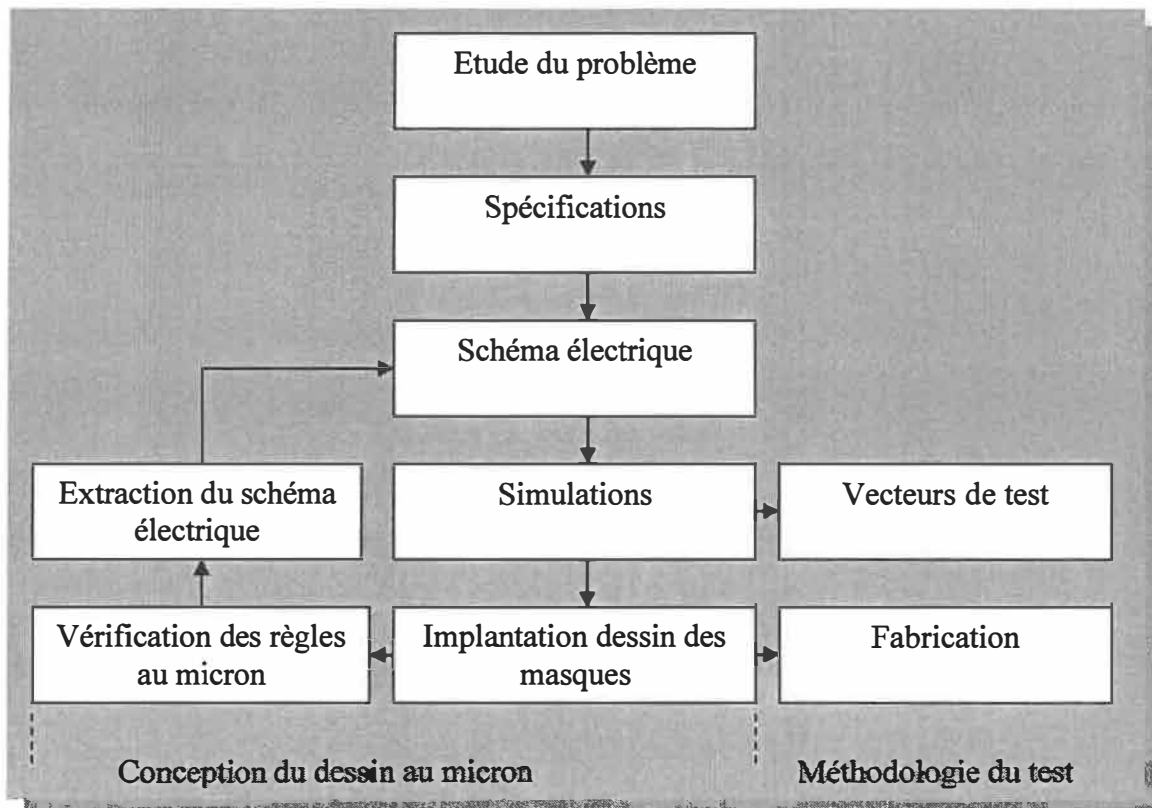
La nature à la fois descendante et rebouclée du diagramme de la *figure III.2* conduit à présenter l'ASIC sous une forme, le plus souvent graphique, plus ou moins détaillée suivant l'étape de la conception.

On distinguera trois représentations principales :

- Une représentation comportementale ou fonctionnelle de haut niveau, se traduisant par des schémas blocs ou boîtes noires rebouclées entre elles, établissant ainsi un logogramme au sens large;
- Une représentation électrique, traduisant le comportement logique ou analogique sous la forme classique d'un schéma comportant des composants sous forme symbolique (transistors, portes, registres, etc...), et des interconnexions;
- Une représentation réelle des dessins correspondant aux différents niveaux de masques, qui traduit les dimensions exactes de l'ensemble tel qu'il sera traité en technologie.

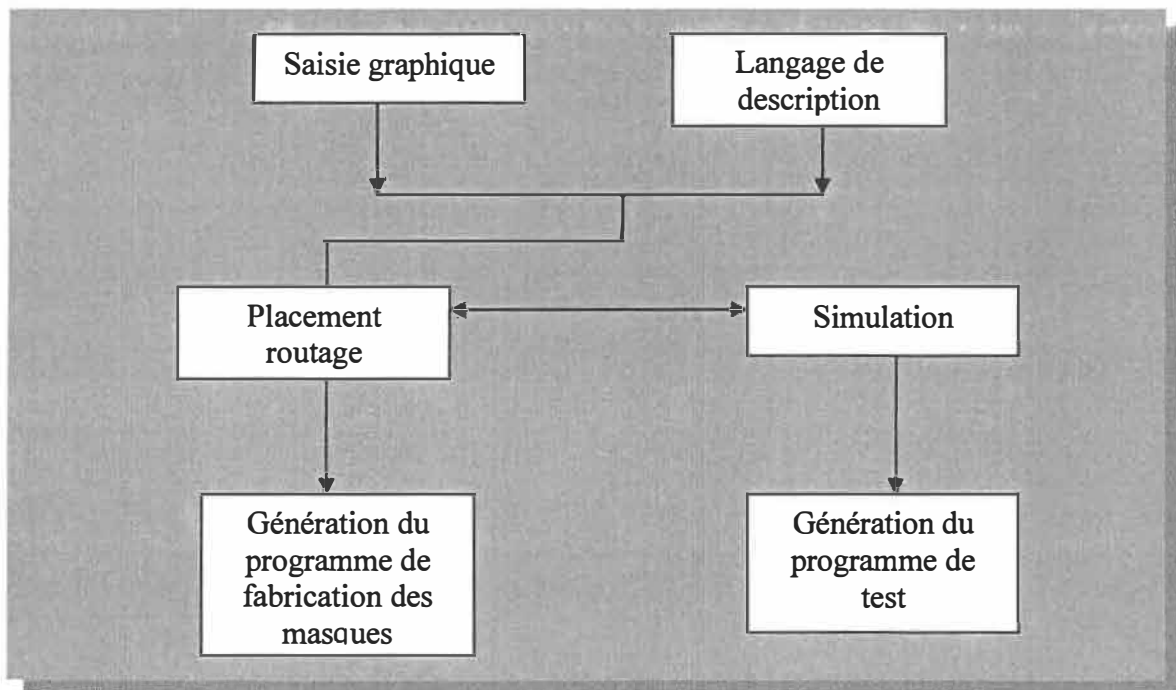
Ces différentes procédures peuvent être appliquées spécifiquement dans chacune des étapes de la conception. Ainsi, au niveau de la saisie graphique, on fera appel aux fonctions de base (bibliothèque de fondeur) et à l'organisation hiérarchique du système à réaliser, prenant en compte des impératifs extérieurs (systèmes à règles, impératifs économiques, normes,...) et intérieurs (horloges, topologie compatibilité

électromagnétique, règles technologiques). Le niveau simulation est la seconde étape à prendre en considération, car la complexité des systèmes interdit de tester le système, en tout ou partie, sous forme de maquettes. Cette simulation impose la maîtrise de la modélisation à différents niveaux, et son importance justifie qu'elle soit analysée en détails. Un troisième niveau concerne le placement des cellules et le routage des interconnexions, étape également très importante car elle doit prendre en compte les contraintes technologiques, électriques, et viser à optimiser le produit fini pour obtenir le meilleur compactage possible. La voie manuelle ou automatique peut être utilisée pour atteindre ce but.



(Figure III-2) : Organigramme de la conception et du test (source : PFEI)

On introduira enfin la génération des vecteurs de test, qui se fera en interaction avec les simulateurs et la conception proprement dite. On définira en particulier un générateur de fautes qui permettra de vérifier et garantir le bon fonctionnement du produit réalisé. Cet ensemble est résumé dans la figure III.3 auquel est ajouté le bloc «langage de description» qui permet une interactivité et une progression ascendante et descendante dans l'outil de CAO.



(Figure III-3) : logogramme de conception d'un ASIC (source : PFEL)

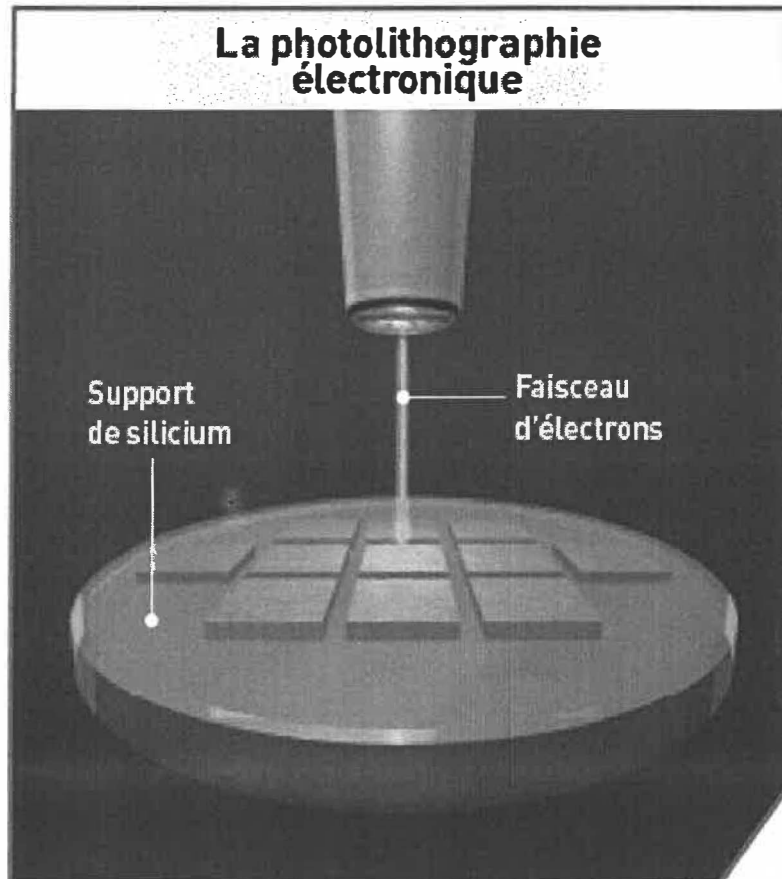
III.3.2 La photolithographie

L'un des traitements clefs de la fabrication d'un circuit intégré est la photolithographie. Ce procédé permet la construction des chemins pour les électrons et des barrières isolantes pour les séparer. Pour préparer le support, on chauffe la plaquette de silicium à

plus 1000°C. Comme pour la rouille du fer, il se produit une réaction chimique à la surface : l'oxydation. La plaquette est alors entièrement recouverte d'une fine couche isolante d'oxyde de silicium. Le support est maintenant prêt. La résine photosensible est répandue uniformément sur toute la surface du support. Si on compare la photolithographie à la photographie, la résine joue le rôle de la pellicule. Une fois recouverte de résine, la tranche de silicium est soumise à une lumière visible ou à un rayonnement ultraviolet (UV) à travers un masque représentant le motif recherché. Les rayonnements impressionnent ("insolent") la résine (voir figure III.4). C'est l'insolation. Après avoir éliminé la résine insolée, les zones non protégées par celle-ci sont gravées par attaque acide. Le silicium est donc mis à nu selon les contours du masque. Les restes de résine sont éliminés à l'aide d'un solvant. Le support est prêt pour l'étape suivante. La microlithographie est difficile à réaliser puisque les motifs ont souvent une dimension inférieure à un micron. De plus, l'obtention d'un circuit intégré nécessite de dix à quatorze gravures dont la superposition doit être réalisée, pour certains circuits, avec une précision de l'ordre de 0,35 μm . Le plus petit transistor est de 20 nanomètres.

Il existe encore certaines autres méthodes comme la lithographie par nanomoulage qui est considérée comme la technique la plus simple à mettre à point pour dupliquer des motifs de haute résolution. En tout, il faut avoir un moule, une presse et une paire de plaques chauffantes pour imprimer des motifs du moule en déformant la couche de résine déposée sur le substrat à une température au-dessus de la température vitreuse de la résine utilisée. Le moule est alors séparé de l'échantillon à une température relativement basse de sorte que les motifs 'imprimés' dans la résine restent corrects. Les parties de faible épaisseur

de la résine sont ensuite enlevées par une attaque chimique réactive. En principe, la résolution de cette technique ne dépend que celle du moule utilisé, et peut être aussi petite que 6nm.



(Figure III-4) : La photolithographie électronique (Source : CEA)

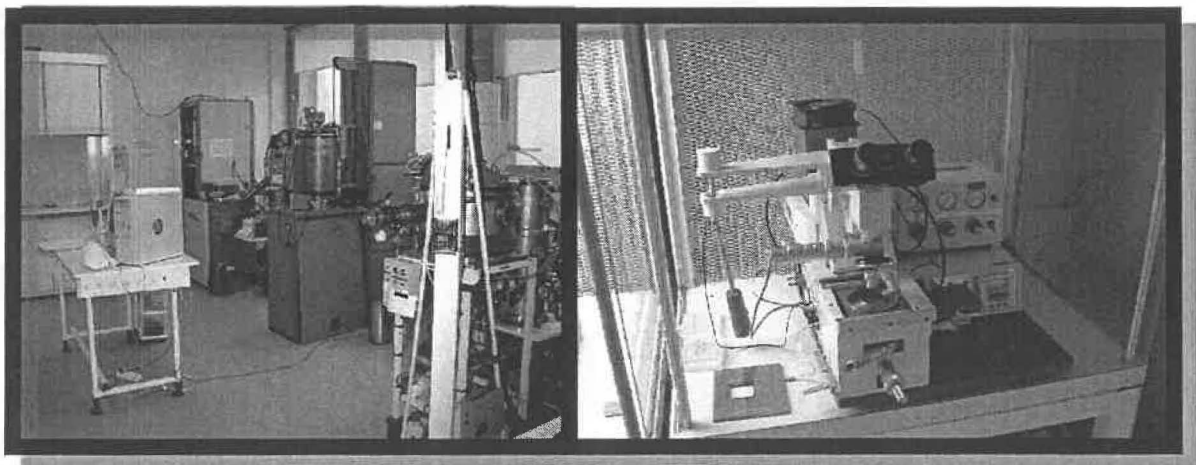
III.3.3 Dopage

Le dopage d'un semi-conducteur consiste à introduire des ions perturbateurs (arsenic, bore, phosphore...) dans le cristal de silicium pour modifier sa conductivité. Il peut être réalisé soit par chauffage dans un four très chaud (épitaxie, 1200 °C) en présence d'un gaz dopant, soit, de plus en plus souvent, par bombardement d'ions à travers un masque.

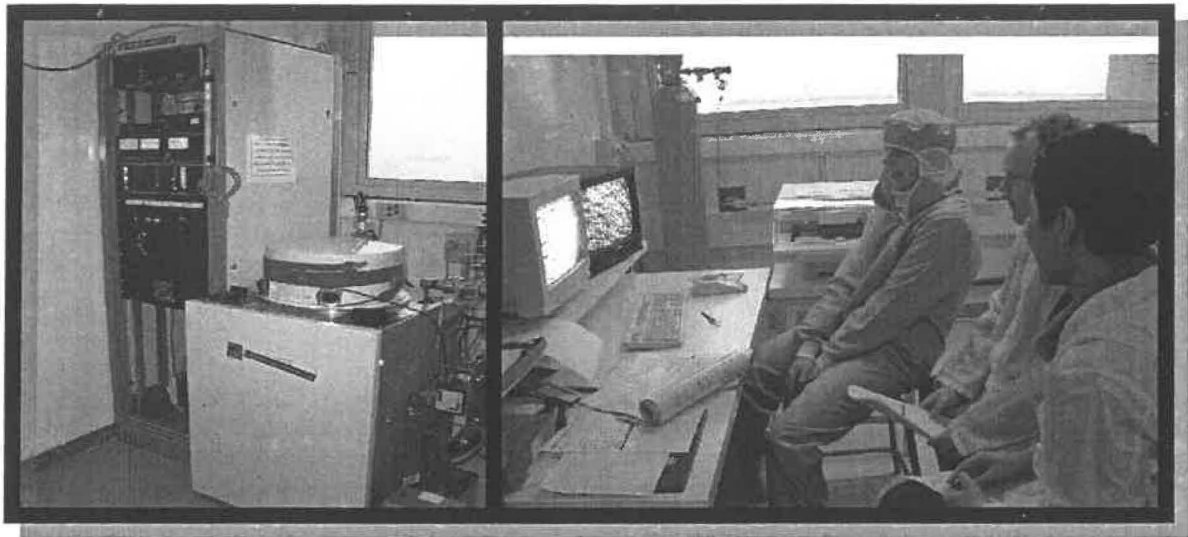
À noter que pour les semi-conducteurs, les produits dopants sont des gaz ou des bombardements d'ions.

III.3.4 La salle blanche

Les puces ne supportent pas les poussières. À l'échelle d'une puce, un grain de poussière représente un rocher qui bouche les chemins creusés pour la circulation des électrons. Pour cette raison, les lieux de fabrication des puces, les salles blanches, sont extrêmement propres. L'eau, l'air, les produits chimiques, de même que l'humidité et la température de la salle blanche doivent être rigoureusement contrôlés. Les opérateurs en salle blanche n'échappent pas à la règle (voir figure II.4). Ils portent une combinaison spéciale qui retient les particules organiques et les poussières. En effet, l'homme est la principale source de micropoussières : 500 000 particules sont dégagées par une chevelure lors d'un mouvement de tête. L'haleine d'un fumeur contient encore 20 000 particules à chaque expiration trois heures après sa dernière cigarette.



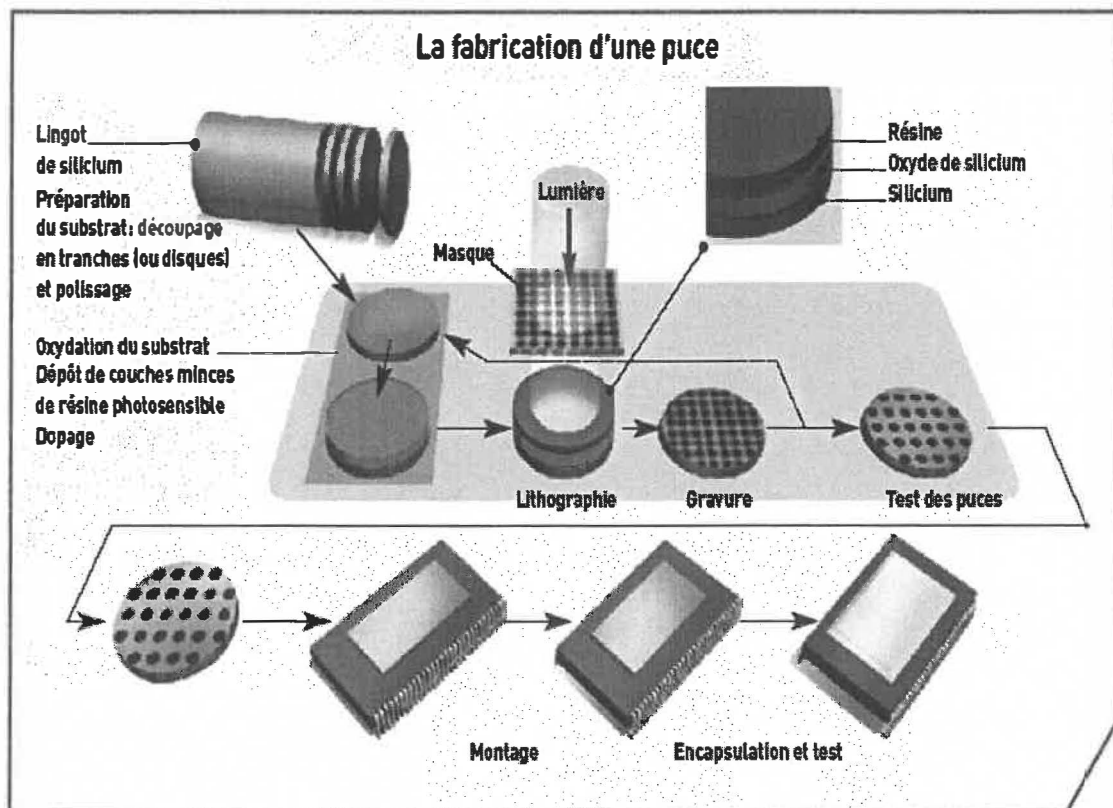
(a)

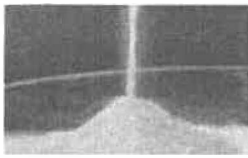


(b)

Figure III-5(a) Salle de lithographie. (b) Profilomètre (Source : CEA. www.cea.fr)

III.3.5 Les étapes de la fabrication des puces





1- La poudre de Silicium



2- Le creuset



3- Passage au four



4 – Le cristal découpé
en tranche



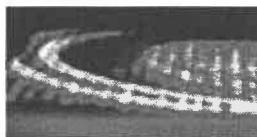
5 – Suit le polissage



6- On obtient un monocristal



7 – la plaquette est recouverte
d'une couche mince isolante



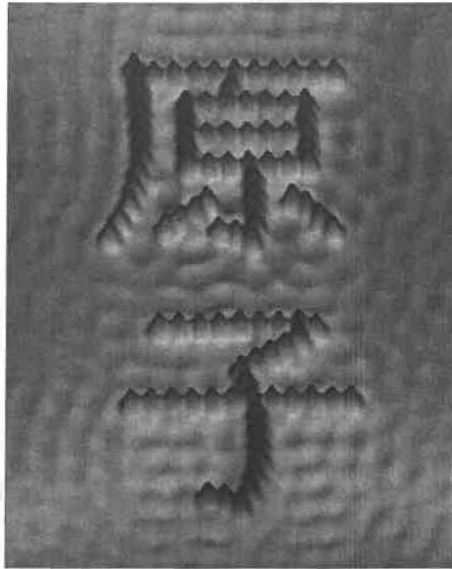
8 – Passage sous les rayons U.V



9 – La plaque après traitement

III.4 Manipulation de molécules et d'atomes

Depuis ces dernières années, une véritable révolution s'est opérée avec le développement des méthodes de manipulation des molécules et des atomes individuels. On peut citer par exemple les techniques du faisceau laser, de l'optique en champ proche, et des microscopies de pointes à balayage (STFM, AFM, SNOM). Avec un microscope à effet tunnel, il est possible d'observer les atomes d'une surface quelconque, les déplacer un à un pour fabriquer des motifs, et, dans certains cas, de réaliser un dispositif électronique simple avec une seule molécule (figure III.5).



(Figure III-6): Ecriture directe de motifs atomiques, réalisés et observés par un microscope à effet tunnel. Ces deux idéogrammes signifient ‘atomes’ en chinois et sont constitués par des atomes de fer sur une surface de cuivre (source : IBM).

III.5 Méthode de production

Il existe plusieurs méthodes pour produire des nanoparticules. Certaines consistent à chauffer à un niveau très élevé un matériau, de sorte que les atomes s'évaporent, puis à refroidir ces atomes pour qu'ils agglomèrent en particules. Ces opérations, quoique simples en apparence, s'avèrent tout de même assez complexes dans la pratique, car il faut éviter une trop grande agglomération des atomes. De plus, il faut utiliser des gaz inertes, parfois fonctionner sous vide. D'autres méthodes sont basées sur la pulvérisation d'un matériau cible, par exemple à l'aide d'un plasma (pulvérisation cathodique) ou d'un faisceau laser intense (ablation laser). Une autre méthode existe encore qui recourt au bombardement avec des ions de gaz inertes, tels l'argon ou le krypton, ce qui produit l'éjection d'atomes et de particules. Cette méthode, qui exige une chambre fonctionnant

sous vide avec une pression très faible, est employée régulièrement dans la synthèse de matériaux semi-conducteurs. L'entreposage des nanoparticules obtenues par divers moyens exige une certaine protection. En effet, puisque leur surface exposée est assez grande, ces nanoparticules sont très réactives et elles peuvent, par exemple, facilement s'oxyder. De plus, elles cherchent souvent à s'agglomérer en plus grosses particules. Il faut soit les entreposer dans une atmosphère avec un gaz inerte ou les protéger en les enrobant avec une couche protectrice constituée de polymères ou de sels. Une méthode qui fait l'objet de beaucoup de recherches actuellement est l'auto-assemblage des particules. Il s'agit alors de mélanger les particules dans une substance colloïdale et de créer les conditions pour que les différentes nanoparticules s'agglomèrent de la façon désirée.

Plus facile à dire qu'à faire! La chimie colloïdale est une vieille branche de la chimie, de sorte qu'à première vue le fait de travailler avec des nanoparticules ne présente aucun problème. Malheureusement, la compréhension du comportement d'agglomération et de croissance des nanoparticules est un phénomène encore très mal compris. De plus, les techniques de filtration et de sédimentation sont encore plus difficiles à contrôler dans le cas des nanoparticules. En somme, il reste encore beaucoup de recherches à effectuer pour bien comprendre tous les phénomènes reliés à la création, à l'entreposage, à la manipulation et à l'utilisation des nanoparticules.

III.6 Nano-observation

III.6.1 Microscopie électronique

Les microscopes électroniques sont les outils conventionnels pour observer des micro et des nanostructures diversement variées. La résolution d'un microscope électronique

dépend essentiellement de l'énergie du faisceau d'électrons, de la qualité de l'optique électronique, de la sensibilité du détecteur et de la stabilité mécanique du système. Différents modes de fonctionnement sont couramment utilisés dans les laboratoires, tels que les microscopes électroniques à balayage (SEM), les microscopes électroniques en transmission (TEM), les microscopes électroniques à balayage en transmission (STEM) et les microscopes de Lorentz, etc. Equipés des systèmes analytiques (détecteur d'Auger, des rayons X, etc.) ces microscopes permettent d'obtenir également de riches informations autres que la topographie (compositions, états électroniques, magnétiques, etc...). On peut encore coupler directement ces microscopes aux systèmes de microfabrication pour renforcer leur capacité de contrôle de qualité de production. En général, les microscopes électroniques ont une très haute résolution, allant jusqu'à une résolution atomique. Le point faible est qu'ils ne permettent pas de travailler dans un environnement atmosphérique, ce qui limite leur utilisation dans les études de systèmes biologiques in vivo.

III.6.2 Microscopie de pointe à balayage

Les microscopies de pointe à balayage sont les méthodes d'analyse de la topographie et des propriétés physiques ou chimiques des surfaces à l'échelle atomique avec une pointe tout près de la surface à étudier.

Grâce à l'utilisation des éléments piézo-électriques, les mesures peuvent être contrôlées à un centième du nanomètre. Rappelons que le microscope STM a été inventé au début des années 80 pour mesurer des densités d'électrons de surface. En remplaçant la tête du STM, des nouvelles générations des microscopes à pointe sont devenues capables de

mesurer à l'échelle du nanomètre des propriétés spécifiques des matériaux (optiques, électriques, magnétiques, thermiques, des forces atomiques,...). Depuis ces dernières années, le développement et l'utilisation de ces microscopes ont connu une croissance extrêmement forte, dans des domaines extrêmement variés, que ce soit au niveau des instrumentations spécifiques, des méthodes de calcul théoriques et des matériaux ou d'échantillons à étudier (semi-conducteurs, métaux, polymères, biomolécules,...). Particulièrement intéressantes sont les applications potentielles à détection optiques locales de molécule biologique et des études spectroscopiques locales de divers matériaux etc... On peut citer par exemple, les mesures directes des forces sur une molécule ADN et leurs propriétés électroniques, ce qui permet de mieux connaître l'architecture de la vie au niveau moléculaire. Enfin, en modulant l'interaction entre la pointe et la surface de l'échantillon, on peut même réaliser des opérations de nanofabrication à l'échelle atomique.

Chapitre IV

Mesure de température et régulateurs thermoélectriques des microsystèmes

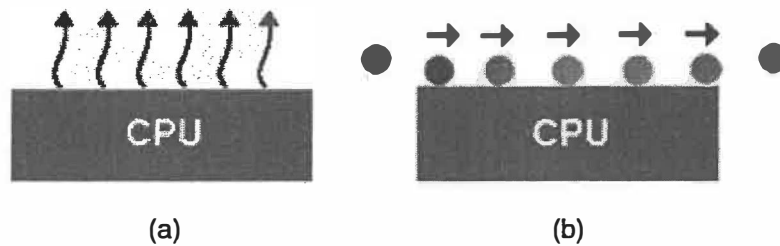
IV.1. Introduction

Depuis 1969, date de l'introduction du microprocesseur Intel 4004, toute l'industrie des microprocesseurs ne fait que suivre la loi énoncée par le Dr. Gordon Moore : " le nombre de transistors et, consécutivement, la puissance d'un microprocesseur, doublent tous les 18 mois ". Même si, aujourd'hui, il semble que les méthodes litho photographiques de fabrication de processeurs semblent devoir atteindre leurs limites d'ici 5 à 10 ans, force est de reconnaître avec quelle exactitude cette loi fût suivie ces 30 dernières années. Pourtant, entre 1970 et 1980 cette loi fût l'objet de bien des discussions car il paraissait physiquement inimaginable d'obtenir des densités telles que celles que nous connaissons aujourd'hui. De cette non-croyance découla le manque de développement de solutions

thermiques jusqu'à ce que, relativement récemment, elles deviennent nécessaires. Il est important de noter la corrélation qui existe entre cette loi et la dissipation thermique. En effet si le nombre de transistors doublait tous les 18 mois (et la fréquence des microprocesseurs de façon équivalente), les évolutions des technologies de gravure ne suivirent pas la même perspective si bien que puissance électrique consommée et puissance thermique dégagée devinrent de plus en plus importantes. Aujourd'hui, non seulement nos microprocesseurs ne peuvent se passer d'un système de dissipation relativement conséquent, mais la loi de Moore étant extensible à tous circuits intégrés, cette évolution touche aujourd'hui les processeurs de nos cartes vidéo et rien ne dit que bientôt nos cartes son n'en seront pas aussi affublées. Considérables augmentations de fréquence et du nombre de transistors nous conduisent aujourd'hui à envisager des méthodes de refroidissement " agressives ", telles que le refroidissement liquide...

IV.2. La dissipation

Aujourd'hui, sur tous les PC du marché, les microprocesseurs sont surmontés en standard d'un dissipateur thermique, plus connu sous le nom de radiateur. Ce dispositif simple permet en fait d'agrandir de façon substantielle la surface présentée au caloporteur (ici l'air) ce qui améliorera l'efficacité de la dissipation. Fixé sur la pièce à refroidir, il en prend la chaleur par conduction thermique (échange d'énergie cinétique entre molécules), et l'évacue par la négligeable radiation (rayonnement électromagnétique photonique, fig. de IV.1a) mais surtout par convection naturelle ou forcée (transfert par mouvement de molécules fig. IV.1b)



(FigureIV-1): (a) – Rayonnement électromagnétique photonique; (b) – Transfert par mouvement de molécules (Source : CEA).

La nature électromagnétique du rayonnement de la radiation est en fait la raison de la prédominance du noir dans la couleur du dissipateur. Les phonons mis en jeu dans le matériau sont dissipés par émission électromagnétique de photons (lumière). Bien qu'un dissipateur passif n'est sensé employer qu'une convection naturelle, on notera que de nombreux grands constructeurs emploient un ventilateur couplé directement au dissipateur qu'ils utilisent en guidant le flux d'air dans l'unité centrale de façon à ce qu'une convection forcée se produise tout de même. L'efficacité d'un tel système dépend principalement de deux facteurs : la surface présentée au caloporteur et surtout la capacité du dissipateur à pomper la chaleur de l'objet chaud, sa capacité à conduire celle-ci... sa conductivité. Et c'est là qu'intervient le choix du matériau à employer. En effet tous les matériaux sont loin d'avoir une conductivité équivalente.

IV.3. Conductivité thermique

Lorsque, dans un système, des régions se trouvent à des températures différentes, la chaleur se transmet des régions les plus chaudes vers les régions les plus froides. Ceci peut se faire suivant trois mécanismes distincts :

- *par conduction* à travers la substance;

- **par convection;** la chaleur est transférée grâce au mouvement relatif de certaines portions du milieu;
- **par rayonnement;** c'est un phénomène de propagation électromagnétique; cette propagation se fait entre des surfaces se trouvant à des températures différentes et séparées par un milieu transparent au rayonnement thermique.

La convection et le rayonnement se manifestent en général dans les liquides et les gaz, alors que dans les solides, le rayonnement est inexistant sauf dans les matériaux transparents, à haute température. Contrairement à la conductivité électrique qui s'étale sur plus de 24 ordres de grandeur, la conductivité thermique varie très peu d'un élément cristallin à l'autre et l'on peut obtenir des valeurs inférieures d'un ordre de grandeur avec des matériaux non cristallins.

IV.4. Concept de mesure

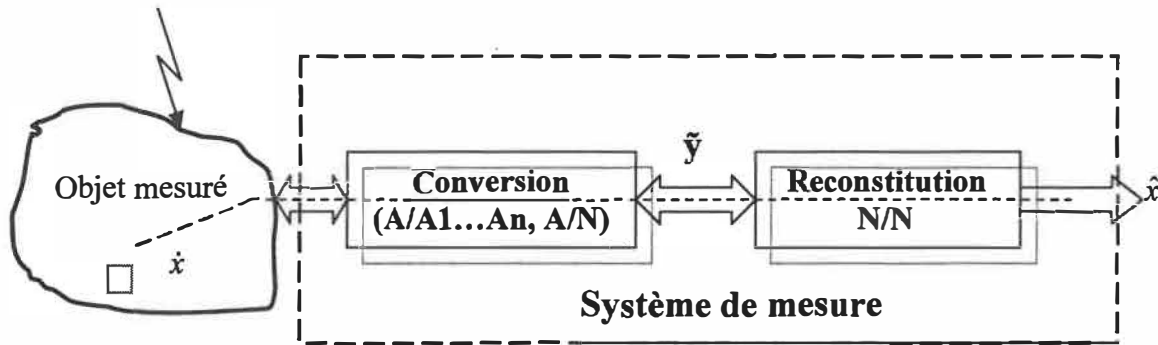
La mesure peut être présentée à différents niveaux de généralité et suivant différents points de vues. En particulier, le dictionnaire international de la métrologie la résume comme suit :

« La mesure est l'ensemble des opérations ayant pour objectif de déterminer la valeur d'une quantité »

En terme de théorie des systèmes de télécommunications (utilisant le concept du système, du signal et de l'information), nous pouvons définir la mesure comme une procédure qui vise à extraire l'information désirée du signal, appelé *mesurande*, et la présenter sous une forme utile, appelé *résultat de mesure*. Chaque mesurande peut être caractérisé par sa nature physique et le modèle mathématique adoptée pour l'analyser.

IV.4.1. Système de mesure

La figure IV.2 présente la structure générale d'un système de mesure [KOD2003].

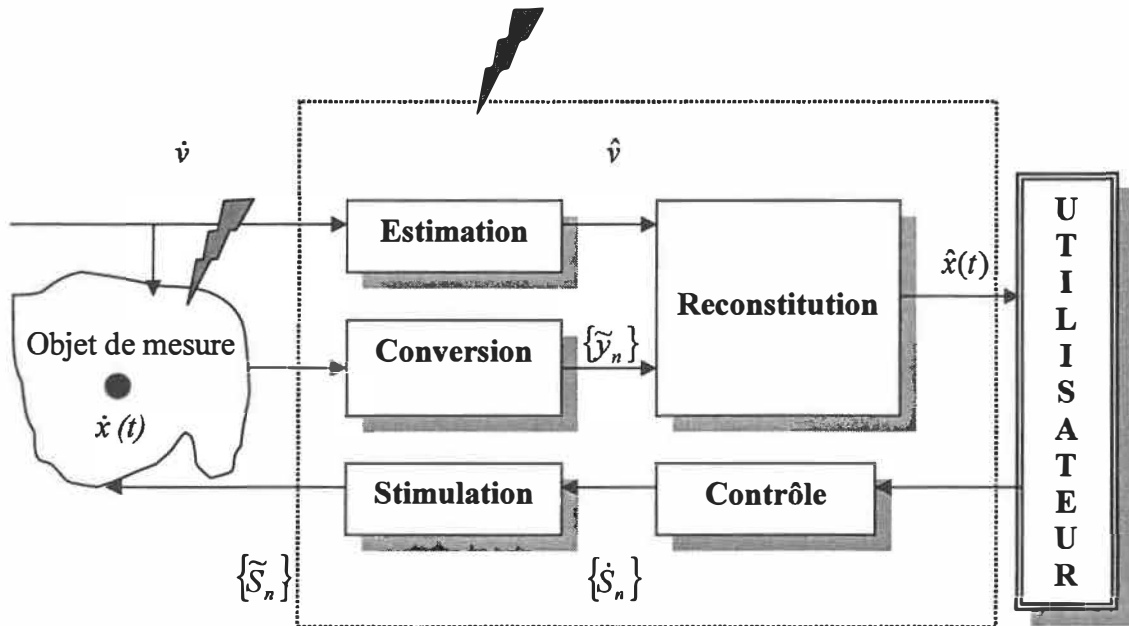


(Figure IV-2) : Représentation générale d'un système de mesure [KOD2003].

- \dot{x} est le mesurande : quantité physique à mesurer
- \tilde{y} est le résultat final de mesure : résultat de la conversion
- \hat{x} est le résultat final de mesure : résultat final estimé de la mesure; un estimé du mesurande obtenu à partir du résultat de conversion, en utilisant l'information a priori concernant les modèles mathématiques du canal de mesure, du bruit de conversion, des grandeurs d'influence ainsi que du mesurande.
- ↘ Représente les différentes sources de bruits : perturbations parasites qui représentent toutes les influences aléatoires agissant sur les signaux dans la chaîne de mesure.

Nous pouvons donc constater qu'un système de mesure est divisé en deux parties distinctes, soit un bloc de conversion du signal d'entrée ($A/A1...An, A/N$) et un bloc de reconstitution. La modélisation d'un système de mesure est relativement complexe car il contient des éléments (blocs fonctionnels) matériels et logiciels, électriques et non électriques, analogiques et numériques. Pour entrer plus profondément dans la question

de modélisation d'un système de mesure, nous pouvons considérer le modèle général plus détaillé présenté à la figure IV.3.



(Figure IV-3) : Modèle général d'un système de mesure [KOD2003].

Dans ce modèle : $\dot{x}(t)$ est le mesurande, $\{\tilde{y}_n\}$ est le vecteur des résultats bruts de mesure, \dot{v} représente le vecteur des grandeurs d'influence et $\{\tilde{s}_n\}$ est le signal stimulant l'objet de mesure. Le symbole « $\dot{\bullet}$ » indique une valeur exacte, le symbole « $\hat{\bullet}$ » indique une valeur estimée et le symbole « $\tilde{\bullet}$ » désigne une valeur bruitée.

IV.4.2. Méthodes de mesure de température

Il existe différentes méthodes de mesure de température dont :

- les **thermocouples** qui sont les capteurs de température les plus utilisés;
- les **cristaux liquides thermochromiques (TLCs)** qui sont des matières qui changent de structure moléculaire et de propriétés optiques avec la température;

- **les semi-conducteurs;**
- **les infrarouges** qui utilisent la radiation thermique émise par les objets ne se trouvant pas au zéro absolu;
- **la fibre optique;**
- **etc...**

Du nombre important de propriétés de la matière et de phénomènes physiques sensibles à la température résulte une grande diversité de méthodes de mesure :

- **méthode optiques** basées sur la répartition spectrale du rayonnement émis ou l'élargissement de raies spectrales par l'effet Doppler dû à l'agitation thermique;
- **méthodes mécaniques** fondées sur la dilatation d'un solide, d'un liquide ou d'un gaz à pression constante, sur la pression d'une vapeur saturante, sur la célérité du son, etc...
- **méthodes électriques** reposant sur la variation thermique de la valeur d'une résistance ou de son bruit de fond, sur l'effet Seebeck, sur la sensibilité thermique de la fréquence d'oscillation d'un quartz, etc...

Les méthodes optiques ou acoustiques qui s'appuient sur l'observation extérieure d'une propriété du milieu dont on mesure la température n'apportent à celle-ci aucune perturbation, leur domaine d'emploi est cependant limité par la complexité de leur mise en œuvre. Les méthodes électriques basées sur l'emploi de capteurs spécifiques sont d'une grande généralité d'une mise en œuvre relativement simple mais l'interaction réciproque du capteur et du milieu environnant pose souvent, lorsque la mesure doit être

précise, un délicat problème d'évaluation et de minimisation de l'écart entre la température à mesurer et celle effectivement mesurée par le capteur.

Ces méthodes de mesure peuvent être classées en deux catégories :

- **les méthodes de mesure sans contact**, réalisées avec des instruments optiques;
- **les méthodes de mesure avec contact**, réalisées avec des instruments à vue (thermomètre) ou des résistances en liaison avec des indicateurs.

Pour les deux catégories, il est nécessaire de réaliser l'adaptation optimale de chaque élément de la chaîne de mesure avec le milieu étudié ou environnant. En ce sens, le résultat de mesure de la température peut dépendre de plusieurs facteurs :

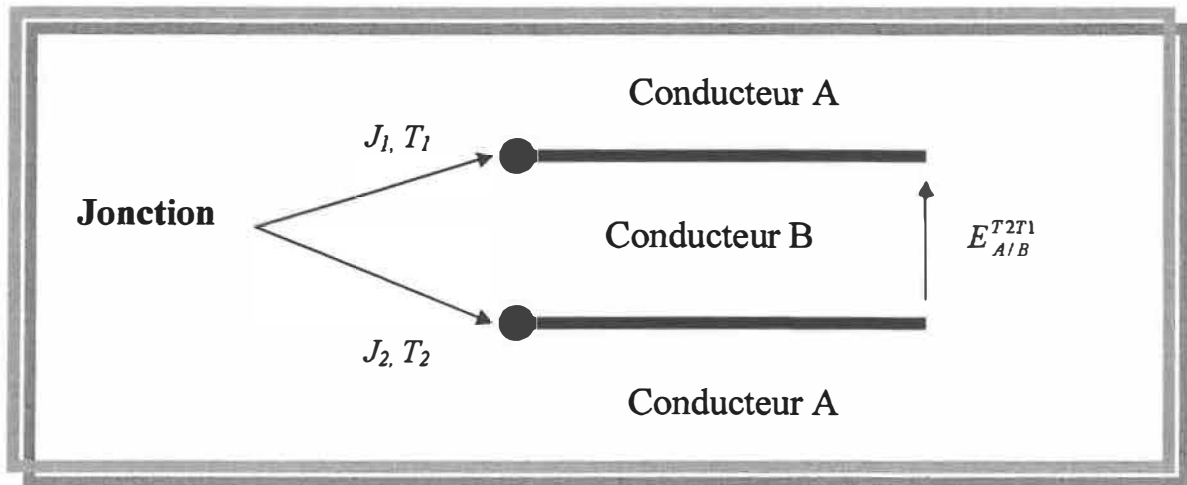
- type de capteur utilisé;
- environnement;
- nature du milieu;
- nature des échanges thermiques entre le capteur et le milieu ambiant dont on veut mesurer la température.

IV.5. Thermométrie par thermocouple

IV.3.1. Les thermocouples

Un thermocouple constitué de deux conducteurs A et B formant entre eux deux jonctions aux températures T_1 et T_2 délivre une force électromotrice $E_{A/B}^{T_2 T_1}$ qui dépend d'une part de la nature des conducteurs A et B et d'autre part des températures T_1 et T_2 . En général la température de l'une des jonctions est fixe, connue et sert de référence ($T_1 = T_{ref}$) et on l'appelle jonction de référence ou soudure froide; celle de l'autre jonction, dite jonction

de mesure ou soudure chaude, est la température T_C qu'elle atteint lorsque placée dans le milieu étudié de température inconnue T_x . La température T_C est fonction de T_x et de l'ensemble des échanges thermiques possibles avec d'autres milieux (les parois, le milieu extérieur, etc.) La représentation d'un thermocouple est donnée à la figure IV.4.



(Figure IV-4) : Représentation de la thermométrie par thermocouple (source : M1C91)

$E_{A/B}^{T_2 T_1}$ dépend de la nature des conducteurs A et B et aussi T_1 et T_2 ; T_1 est une température fixe, connue et sert de référence T_{ref} et T_2 est un point de mesure T_C .

La prise d'information se faisant au niveau d'une jonction dont les dimensions peuvent être très réduites :

- le thermocouple permet des mesures de température ponctuelles,
- la capacité calorifique du capteur peut être très réduite assurant une vitesse de réponse élevée.

Un autre intérêt du thermocouple est de délivrer un signal, une f.é.m. (force électromotrice), dont la mesure ne nécessite pas la circulation d'un courant dans le capteur : il n'y a donc, contrairement au cas des résistances, aucune incertitude liée à

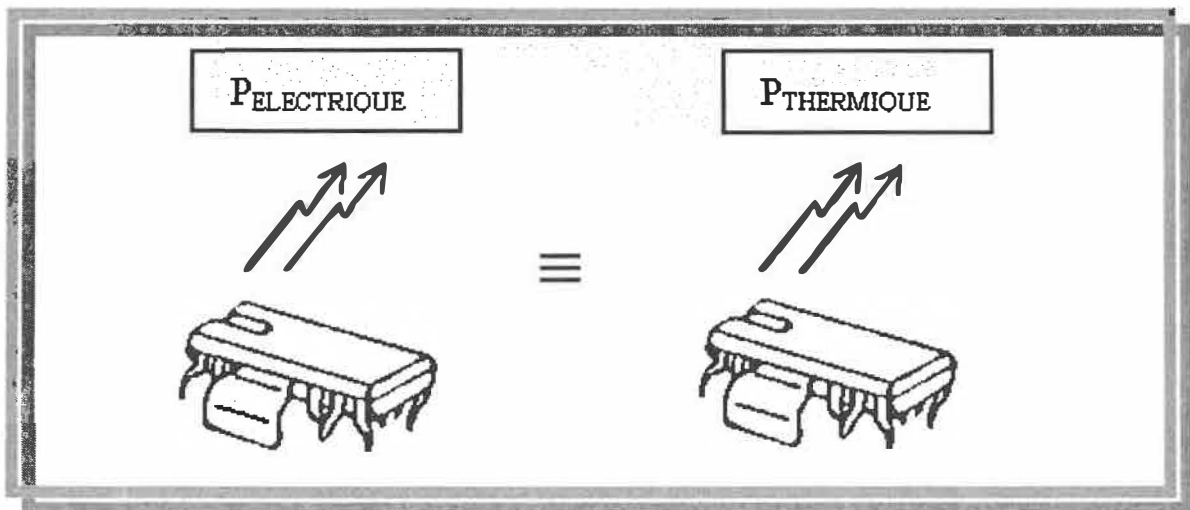
l'auto échauffement ce qui peut être appréciable dans le cas de mesures sur des systèmes à faible inertie thermique ou à basse température.

IV.6. Dissipation thermique des étages de puissance

Les sollicitations électriques demandées à un composant électrique entraînent une dissipation de puissance et par conséquent une dépense d'énergie électrique. En régime continu C.C. ou en régime sinusoïdale C.A., la puissance électrique dissipée est le résultat du produit tension - courant :

$$P = U \times I \quad (IV.4.1)$$

Cette puissance dissipée est dégagée en chaleur. Sauf cas particuliers, nous pouvons admettre l'équivalence entre l'énergie thermique dégagée et l'énergie électrique consommée (figure IV.5).



(Figure IV-5) : L'équivalence entre l'énergie thermique dégagée et l'énergie électrique consommée

Nous pouvons dire que le composant, ou la jonction d'un semi-conducteur, devient la source d'énergie thermique à évacuer. La conduction d'une jonction PN va amener le cristal semi-conducteur à une température ϑ_j , qui devra être évacuée vers l'air ambiant, au travers du boîtier.

IV.7. Circuit de refroidissement des microsystèmes

IV.7.1 Introduction

La méthode de régulation la plus courante des ordinateurs est la convection forcée (ventilateur), cependant il existe d'autres méthodes de régulation telles que :

- **L'immersion dans un liquide de refroidissement**

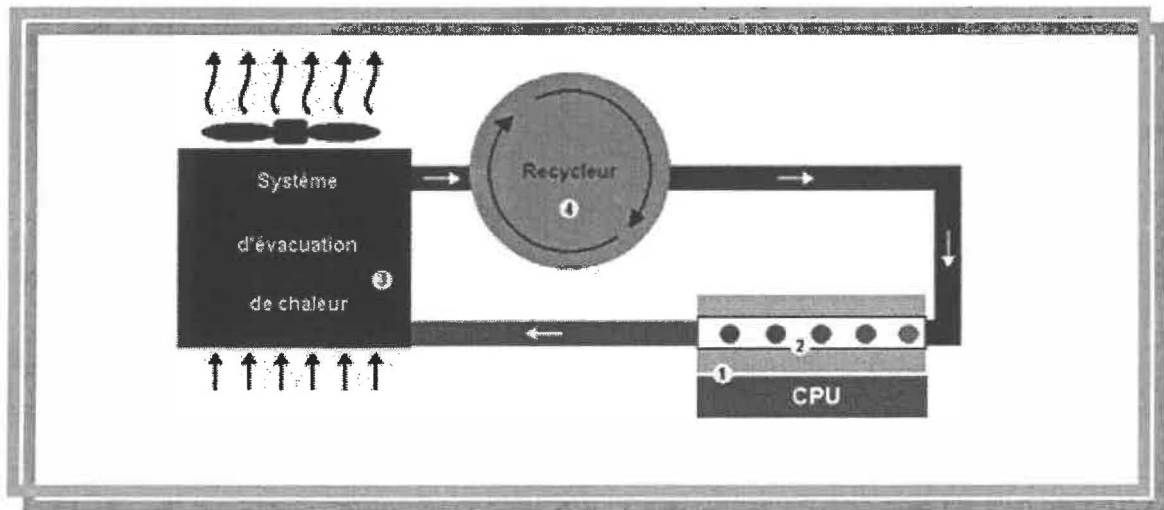
Le but de ce type de système est d'emmagasinier la chaleur au moyen du caloporteur (ici l'eau) et d'emmener celui-ci jusqu'à un dispositif permettant au caloporteur de se décharger de cette chaleur emmagasinée, tout ceci dans un circuit totalement fermé et hermétique. Le liquide ayant la plus grande conductivité à l'état naturel est l'eau. Ce pouvoir peut-être éventuellement amélioré par certains additifs spécialisés (utilisés dans la compétition automobile) mais tout autre ajout (antigel, antitarte...) baissera sa conductivité. C'est pourquoi, le meilleur choix se révèle être l'eau déminéralisée qui élimine aussi bien les problèmes de tarte que de conduction de courant électrique. En résumé il nous faut donc :

I. **Un échangeur** placé sur le CPU permettant de transmettre la chaleur produite par celui-ci au caloporteur.

II. **Un dispositif d'évacuation de la chaleur.**

III. Un dispositif permettant de créer le cycle du caloporteur plus simplement **une pompe.**

Conceptuellement, un système de refroidissement liquide peut se représenter dans la figure IV.6 :



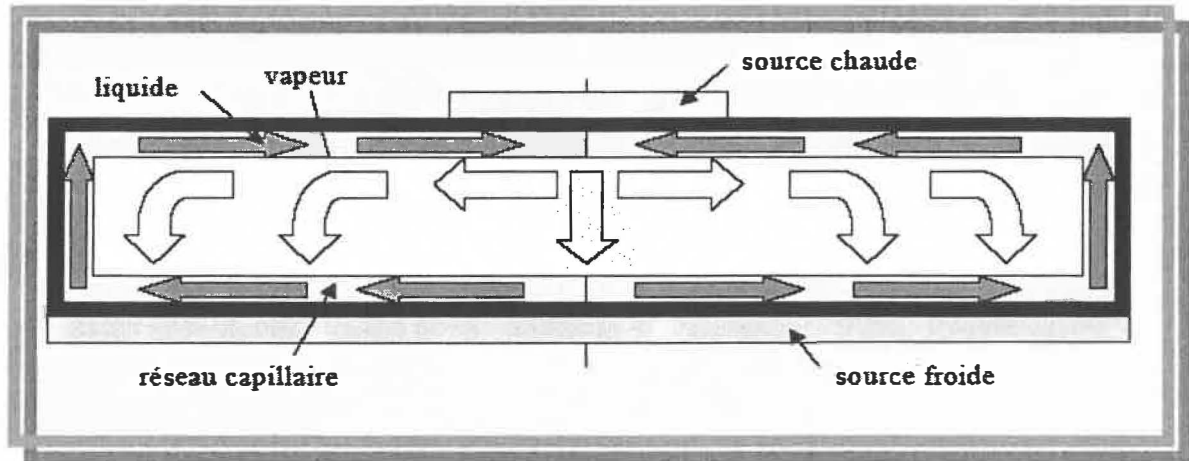
(Figure IV-6) : Représentation d'un système de refroidissement liquide (Source : CEA)

En effet, la chaleur du CPU est transmise au bloc échangeur eau/eau interne par conduction (1). Puis, par convection forcée, le caloporteur absorbe cette chaleur (2), chaleur ensuite évacuée par l'échangeur externe (ici de type air/eau (3)) pour amorcer alors un nouveau cycle (4).

- **Les caloducs (ang. Heat Pipes)**

Un caloduc est un système de transfert de chaleur passif avec une conductivité thermique extrêmement grande. Quand la chaleur est entrée dans l'évaporateur, le fluide est vaporisé, créant un gradient de pression dans le conduit. Ce gradient de pression force la vapeur à circuler le long du conduit dans une section refroidissante où elle se condense

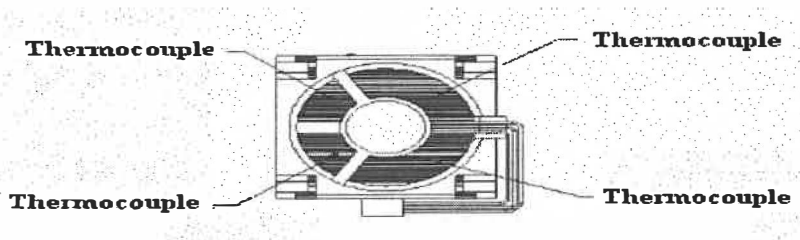
abandonnant son état latent de vaporisation. Le fluide travaillant est alors retourné dans l'évaporateur par la force des capillaires développées dans la structure.



(Figure IV-7) : Principe du fonctionnement d'un caloduc (Source : CEA)

- **les micros ventilateurs**

Cette méthode est assez nouvelle et pourra être prise en considération dans notre application. Cependant il faut choisir cette méthode dès la conception du processeur ou autres circuits électroniques, car cette méthode de refroidissement suppose que le ventilateur soit intégré dans le circuit avec une taille de l'ordre du micromètre. L'avantage majeur des micros fans est le gain de place, l'inconvénient est qu'il faut y penser dès la conception du circuit intégré et la maintenance est impossible.



(Figure IV-8) : Micro fans (Source : Intel)

- **Régulateurs thermoélectriques à éléments Peltier**

Un élément Peltier consiste en un thermocouple composé d'éléments de type n et p en tellure de bismuth sous la forme de lingots poly cristallins. Les extrémités des éléments sont soudées sur des plaques de cuivre, qui sont elles mêmes soudées sur des plaques céramiques fournissant un support mécanique durable et assurant un bon transfert de chaleur ainsi qu'une bonne isolation électrique.

Les différentes applications des régulateurs thermoélectriques à effet Peltier sont :

1. refroidissement d'éléments électro-optiques;
2. stabilisation de diodes lasers;
3. refroidissement de détecteurs infrarouges;
4. refroidissement de cartes PC ou microélectroniques;
5. refroidissement d'aliments;
6. conditionneurs;
7. pour tout besoin nécessitant un refroidissement précis et contrôlé, sans bruit et très fiable.

IV.7.2. Paramètres des modules thermoélectriques

Les paramètres caractérisant les régulateurs thermoélectriques sont :

- I Courant (A) au borne du régulateur thermoélectrique
- Q_C Quantité de chaleur absorbée (W)
- T_C Température de la face froide en fonctionnement (°C)
- T_h Température de la face chaude en fonctionnement (°C)

- ΔT Différence de température entre les faces (°C)
- ΔT_{max} Différence de température maximale possible (°C)
- V Tension d'entrée (V)
- N Nombre de paires de thermocouples
- G Facteur géométrique du refroidisseur

Chapitre V

Nanoélectronique, nanomagnétisme et modélisation électrique

V.1. La nanoélectronique

Comme nous l'avons mentionné précédemment, la miniaturisation de la microélectronique arrive devant un mur. Si on désire que la tendance à la miniaturisation se poursuivre, il va donc falloir passer à autre chose. C'est le domaine de la nanoélectronique, associée aux ordinateurs moléculaires et quantiques. Derrière un mot unique se cachent cependant plusieurs concepts, qui n'ont en commun que le préfixe «nano-». [L.N.D]

Depuis une trentaine d'années, les chimistes et physiciens conçoivent, dessinent et fabriquent des molécules qui, individuellement, remplissent les fonctions des résistances, diodes, transistors, etc. Dès le début des années 1970, des chercheurs d'IBM ont breveté

l'idée qu'une seule molécule peut fonctionner comme un élément de mémoire. Quelques années plus tard, des chercheurs imaginèrent qu'une molécule pouvait se comporter comme une diode quand elle était placée entre deux électrodes métalliques, et avec l'invention du microscope à effet Tunnel (*angl. STM : Scanning Tunnel Microscope*), en 1981, les choses se sont accélérées. Simultanément, certains imaginent d'utiliser des particules plus grosses que les molécules, mais de taille nanométrique (de l'ordre de quelques nanomètres) : les puits quantiques (*angl. quantum dots*). Néanmoins, outre des problèmes physico-chimiques liés à leur synthèse et à leur arrangement contrôlé, des questions de sciences fondamentales restent à résoudre. D'autres problèmes très terre à terre vont aussi se poser qui, aujourd'hui jouent un rôle très important dans la perturbation du fonctionnement des ordinateurs : *dissipation de la chaleur*.

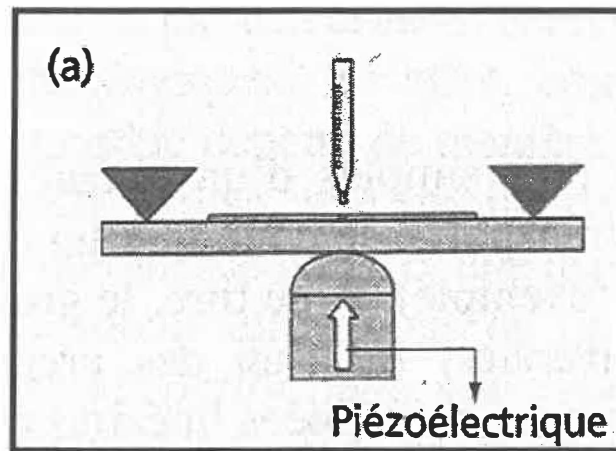
Ce chapitre traitera dans un premier temps de l'électronique moléculaire et du comportement magnétique à l'échelle nanométrique, et dans un deuxième temps de la modélisation électrique et numérique comme méthode de validation du modèle électrique.

V.3. L'électronique moléculaire

V.3.1. Les fils moléculaires

Les composants électroniques les plus simples d'un circuit intégré sont les connexions permettant de transporter le courant d'un élément à l'autre (entre deux transistors par exemple). À ce titre, le groupe du professeur Mark Reed (Yale University) fut l'un des premiers à démontrer que des molécules organiques conjuguées linéaires peuvent conduire le courant entre deux contacts métalliques et se comporter donc comme des fils

électriques moléculaires. Pour ce faire, une jonction moléculaire formée par deux pointes d'or séparées par une distance variable de l'ordre de seulement quelques dixièmes de nanomètre est réalisée par rupture mécanique contrôlée. (Figure V-1)



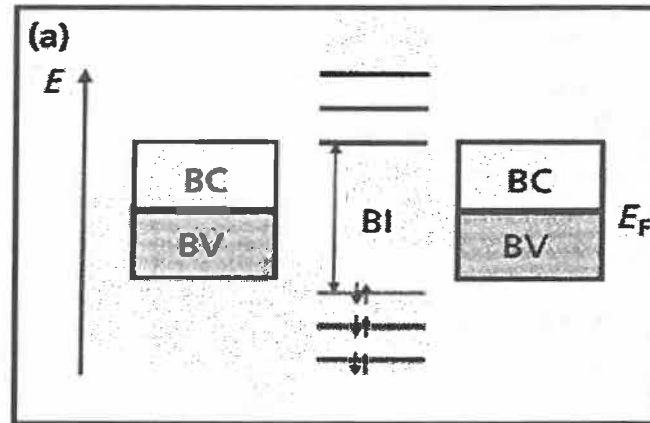
(Figure V-1) : (a) formation d'une jonction mécanique à l'aide d'un matériau piézoélectrique

V.3.2. Le courant à travers une molécule

Décrivons à présent l'origine du courant mesuré dans une jonction moléculaire. Lorsqu'une molécule est mise en contact avec deux électrodes métalliques, l'énergie du niveau de Fermi E_F de ces dernières se trouve généralement au sein de la bande interdite BI de la molécule, séparant ses orbitales moléculaires occupées et inoccupées (Figure V-2a). La probabilité d'occupation des niveaux électroniques des bandes de valence et de conduction du métal par des électrons à une température donnée est régie par la fonction de Fermi :

$$f(E) = \frac{1}{\exp\left[\frac{E - E_F}{kT} + 1\right]} \quad (\text{V.1})$$

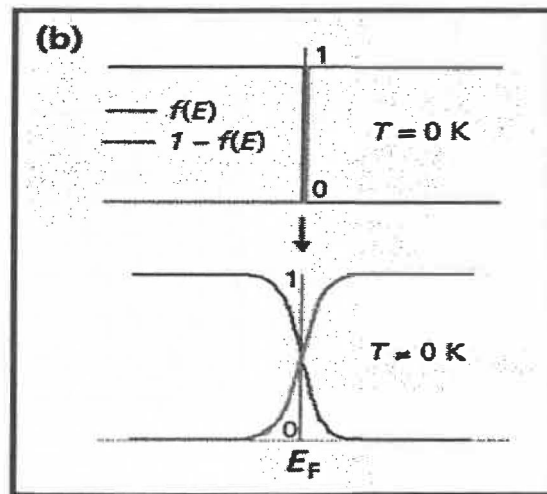
Nous voyons graphiquement (figure V.2b), à 0K, que la fonction de Fermi est égale à 1 si $E < E_F$ et 0 si $E > E_F$, impliquant que la bande de valence est complètement remplie et la



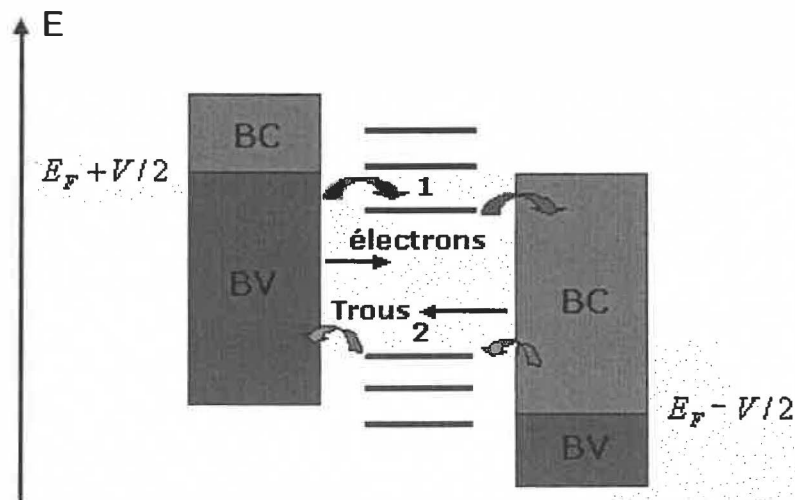
(Figure V-2) : (a) Structure électronique d'une jonction moléculaire non polarisée, avec BV et BC les bandes de valence et de conduction du métal, E_F l'énergie du niveau de Fermi, et BI la bande interdite de la molécule.

bande de conduction vide. Certains électrons peuvent être cependant transférés du haut de la bande de valence vers le bas de la bande de conduction à des températures supérieures à 0K. Dans le cas de la molécule, la forte séparation énergétique (de l'ordre de plusieurs eV) entre les orbitales occupées et inoccupées implique qu'aucune orbitale inoccupée n'est peuplée par effets thermiques dans des conditions de température normales. Pour que les électrons traversent la molécule, il est indispensable qu'un niveau occupé d'une électrode soit en résonance (autrement dit possède la même énergie) avec une orbitale inoccupée de la molécule, elle-même en résonance avec un niveau électronique inoccupé de l'autre électrode (chemin 1 de la figure V-3); de manière similaire, le courant peut être également obtenu lorsqu'un niveau inoccupé d'une électrode est en résonance à la fois avec une orbitale occupée de la molécule et un niveau occupé de l'autre électrode, en d'autres termes lorsqu'un trou (c'est-à-dire une place électronique vacante) est

initialement injecté dans une orbitale occupée de la molécule puis transféré à son tour dans la bande de valence de la seconde électrode (chemin 2 de la figure V-3).



(Figure V-3): (b) Fonction de Fermi à 0K et à une température différente de 0 K.



(Figure V-4) : Transport du courant à travers une molécule suite à l'application d'une différence de potentiel V entre les deux électrodes.

Ces deux situations ne sont pas observées pour une jonction moléculaire non polarisée, au vu de la structure électronique décrite par la (figure V-3), ce qui explique l'absence du courant à 0V dans les mesures expérimentales. La seule façon de générer un courant à travers la molécule est donc d'appliquer une différence de potentiel V entre les deux électrodes par $-V/2$ (du côté du pôle positif de la différence de potentiel) et de stabiliser celui de l'autre électrode par $+V/2$ (du côté du pôle négatif), comme illustré dans la figure V-4.

La figure V-4 illustre clairement que seules les orbitales moléculaire comprise entre $E_F - V/2$ et $E_F + V/2$ peuvent participer au transport d'électrons (pour les orbitales inoccupées) et de trous (pour les orbitales occupées), à travers la jonction. Le courant transitant à travers une orbitale moléculaire donnée couplée aux orbitales i et j des deux électrodes s'exprime comme :

$$I = \frac{4\pi e}{\hbar} f(E_i)(1 - f(E_j))n_i n_j T_{ij}^2 \delta(E_i - E_j) \quad (V.2)$$

où e est la charge de l'électron; $f(E_i)$ la probabilité d'inoccupation du niveau j dans la deuxième électrode; n_i et n_j , les nombres de niveaux électroniques possédant respectivement les énergies E_i et E_j ; $\delta(E_i - E_j)$ le symbole de Kronecker (égale à 0 si E_i et E_j sont différents et 1 si identiques), dont la présence assure la conservation de l'énergie lors d'un transport dit élastique; T_{ij} un terme de transmission traduisant la force du couplage entre les orbitales de la molécule et des deux électrodes.

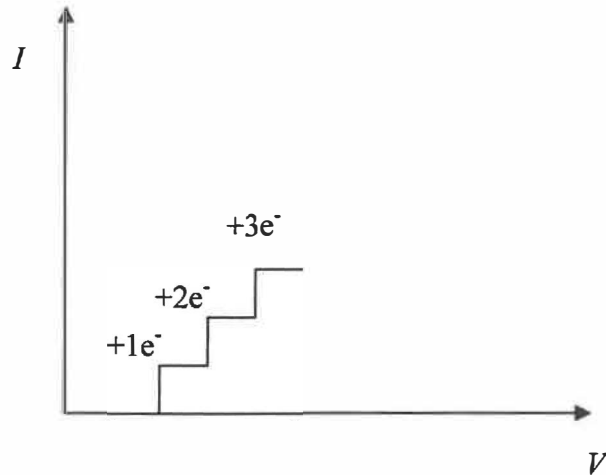
Ce terme de couplage dépend fortement de la force de la liaison entre les atomes de soufre de la molécule et les atomes d'or des électrodes ainsi que de la forme de l'orbitale moléculaire du niveau considéré; la transmission du courant sera fortement réduite si

l'orbitale est localisée sur un segment de la molécule et sera par contre amplifiée pour une orbitale moléculaire délocalisée sur l'ensemble du chemin conjugué de la molécule. La vision assez simple du transport du courant que nous venons de décrire est à la base de la théorie de Landauer couramment utilisée de nos jours pour calculer le courant à travers une jonction moléculaire en fonction du voltage. [L.N.D]

V.3.3. Blocage de Coulomb

Lorsqu'un contact très faible s'établit entre la molécule et les électrodes en l'absence de liaisons covalentes, les courbes courant/voltage (I/V) adoptent généralement une allure en forme d'escalier reflétant un phénomène dit de blocage de coulomb (figure V.5. Dans ce cas, le courant ne peut transiter de manière continue entre les deux électrodes et chaque charge injectée sur la molécule y demeure un temps certain. Dans le cas d'un transport dominé par les électrons, la première marche correspond à l'injection d'une charge sur la molécule. L'introduction d'une deuxième charge ne peut se faire aussi facilement vu qu'elle est défavorisée par les processus de répulsion électrostatique entre les deux nouveaux électrons injectés dans la molécule. C'est la raison pour laquelle le courant reste constant jusqu'à une valeur de différence de potentiel compensant l'énergie de répulsion entre les deux charges; à ce stade, deux électrons peuvent être injectés simultanément, ce qui augmente l'amplitude du courant à une valeur qui sera conservée tant que trois électrons ne pourront être injectés ensemble.

En général, les effets de blocage de Coulomb sont d'autant plus détectables dans les courbes I/V que la température à laquelle sont effectuées les mesures est faible.



(Figure V-5) : Représentation schématique d'une courbe I/V par un transport d'électrons à travers une jonction moléculaire en présence d'un blocage de Coulomb.

V.4. Le nanomagnétisme

V.4.1. Le magnétisme dans la matière

Le magnétisme de la matière condensée est dû aux moments magnétiques des électrons et dépend de la manière dont ces moments se combinent. Un matériau répond à la présence d'un champ extérieur $B_0 = \mu_0 H$, où μ_0 est la perméabilité du vide, par une aimantation M_0 (moment magnétique par unité de volume). Les propriétés magnétiques du matériau sont caractérisées par la susceptibilité magnétique :

$$x = M_0 / H \quad (\text{V.3})$$

rapport sans dimension. [L.N.D]

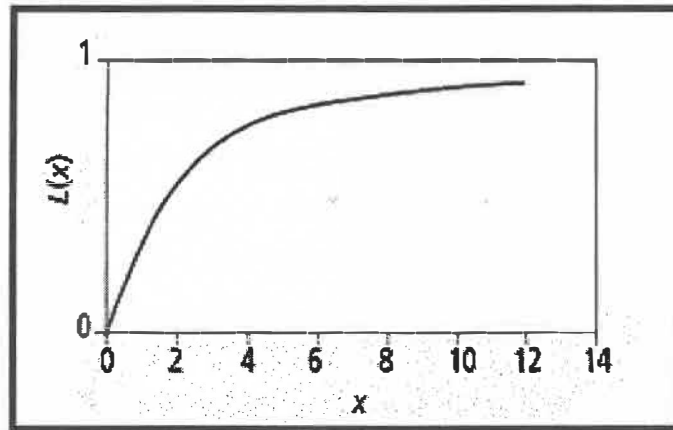
V.4.2. Diamagnétisme et paramagnétisme

Lorsque les moments magnétiques des électrons liés dans une orbitale se compensent, la substance est dite diamagnétique. Pour les substances diamagnétiques, x est négative et

très petite, de l'ordre de 10^{-5} . Lorsque les moments magnétiques des électrons ne se compensent pas, une collection de moments magnétiques élémentaires de module μ , indépendants les uns des autres, soumis à un champ magnétique extérieur B_0 et à donner lieu à une aimantation macroscopique :

$$M = M_S L(x) \quad (V.4)$$

où M_S est l'aimantation à saturation, à savoir celle que créeraient les moments élémentaires s'ils étaient tous alignés; $L(x) = \coth(x) - 1/x$ est la fonction de Langevin, et $x = \mu\beta_0 / (k_B T)$, k_B étant la constante de Boltzmann et T la température absolue.



(Figure V-6) : Fonction de Langevin

En développant la fonction de Langevin au premier ordre en x , soit pour un champ relativement faible ou à haute température, on obtient $L(x) \approx x/3$, et donc

$$x = \mu_0 n \mu^2 / (3k_B T) \quad (V.5)$$

où l'on a remplacé M_S par $n\mu$, n étant le nombre de moments magnétiques élémentaires par unité de volume. Cette dernière équation définit la susceptibilité paramagnétique de Curie.

V.4.3. Le superparamagnétisme

Pour des nanoparticules et en l'absence de champ extérieur, on s'attend donc à une rupture spontanée de symétrie, le vecteur moment magnétique «choisissant» entre les différentes directions dites faciles, équivalentes entre elles du point de vue énergétique, et ici aussi sans indication extérieure susceptible de déterminer ce «choix.»

Cependant l'énergie d'anisotropie est proportionnelle au volume de la particule. La barrière d'énergie pour passer d'une direction d'aimantation facile à une autre, c'est à dire, dans le cas d'une anisotropie uniaxiale, d'un côté à l'autre sur le même axe, diminue aussi avec le volume du cristal, et des fluctuations temporelles peuvent alors apparaître, au cours desquelles le vecteur moment magnétique saute d'une direction facile à une autre. Le temps de corrélation qui caractérise ces fluctuations aléatoires s'appelle le temps de *Néel* (τ_n), et est une fonction exponentielle de l'énergie d'anisotropie :

$$\tau_N \propto \sqrt{\frac{k_B T}{KV}} * \left(e^{\frac{KV}{k_B T}} \right) \quad (V.6)$$

où l'on a posé $E_A = KV$.

V.5. Modélisation du système

Parmi les outils de modélisation de système électrothermiques, nous trouvons :

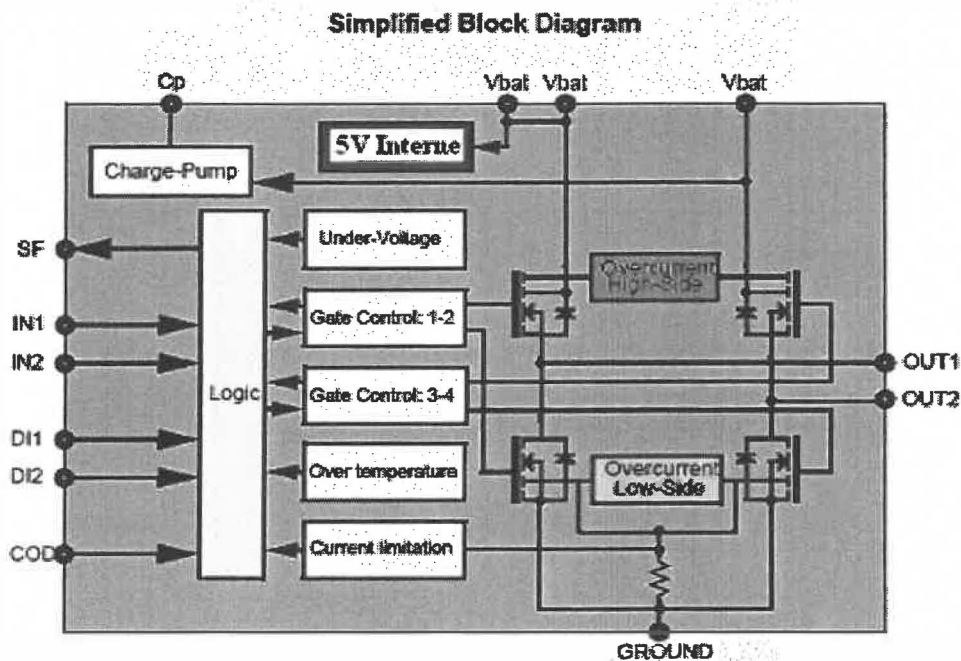
- les logiciels de simulation numérique,
- les circuits électriques équivalents,
- les modèles mathématiques équivalents.

Pour ce qui est des logiciels de simulation numérique nous citons : **NISA**, **JMAG**, **FLOTHERM**, **ANSYS**, **TAS**, **etc...** L'étude d'un système à l'aide de ces logiciels se fait en plusieurs étapes. La première étape consiste à créer la géométrie du système (*angl. Pré-processing*) (dimension, position, etc.), puis à attribuer les propriétés thermiques des éléments (dans le cas d'une étude thermique : densité, conductivité et chaleur spécifique) et enfin à spécifier les conditions aux limites du système (éléments source de chaleur, température initiale dans le cas d'une étude dynamique, etc...). Une fois cette étape complétée nous pouvons passer à la deuxième étape qui est la simulation du système (*angl. processing*) en mode thermique. Enfin, la troisième et dernière étape est l'analyse des résultats de simulation (*angl. Post-processing*) : température, pression, etc... Une autre méthode de modélisation consiste à trouver un circuit électrique équivalent à notre système. Cette modélisation est très pratique pour la simulation du système avec des outils tels que Matlab et SIMULINKTM.

V.5.1. Modélisation électrique du système

Les récents progrès des techniques microélectroniques permettent aujourd'hui la fabrication des systèmes monolithiques comportant sur la même puce les composants sensoriels ainsi que l'électronique de traitement numérique et analogique (modulateurs, amplificateurs, filtres, convertisseurs,...) [ITR99]. Ce haut niveau d'intégration permet la miniaturisation, la reproductibilité et une performance accrue des systèmes tout en abaissant significativement les coûts de production.

Afin de développer un asservissement qui améliore le plus possible le fonctionnement de notre système en fonction des critères de base, il est important de décrire le système. Le schéma du système est présenté à la figure V-7.



(Figure V-7) : L'architecture interne du notre système MC33186 Automotive H-Bridge Driver (Source : Motorola : www.motorola.com)

V.6. Caractéristique électrique et géométrique du MC33186

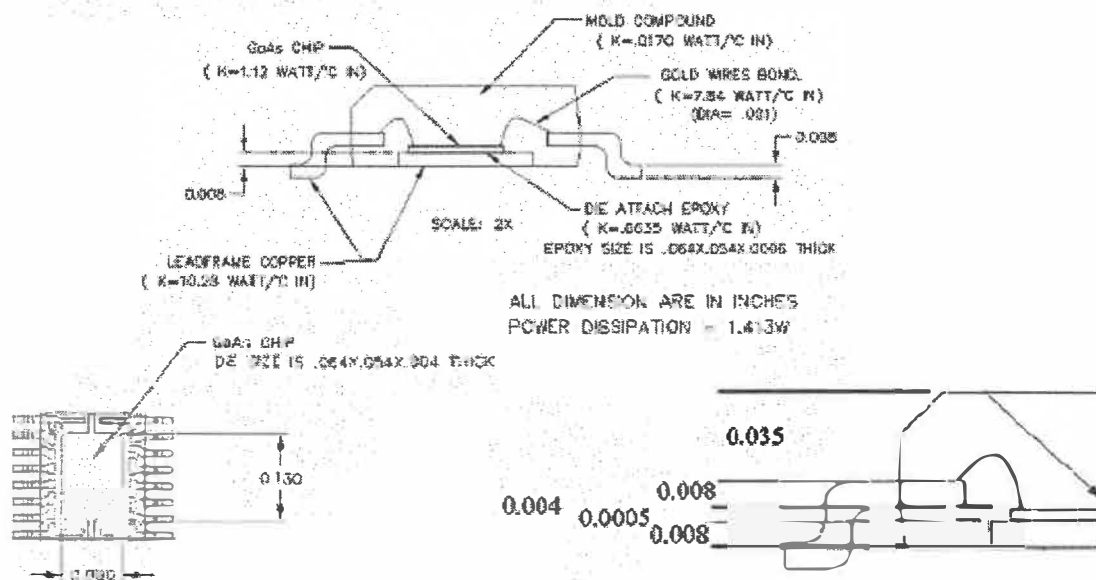
Le H-Bridge Driver MC33186 est un circuit intégré à large intégration (VLSI) utilisé principalement pour commander les moteurs C.C. Un des champs les plus importants de la demande d'un tel dispositif dans le domaine de la télécommunication, est le contrôle pour la rotation des antennes paraboliques et des radars.

Le H-Bridge Driver MC33186 se compose des éléments suivants :

1. quatre transistors de haute puissance TMOS (Source principale de la chaleur);
2. des détecteurs mesurant les tensions, courants et la température;
3. d'une pièce de logique CMOS, qui commande les portes des transistors de puissance et pour empêcher des dommages (sous voltage, surintensité et de l'augmentation de la température).

Le tableau V-1 décrit les caractéristiques électriques et les fonctions des bornes (*ang. Pins*) du notre système.

Caractéristiques géométriques



(Figure V-8) : caractéristique géométrique (Source : Motorola : www.motorola.com)

Bornes (<i>ang. Pins</i>)	Nom	Description
9, 10	GND	Puissance au sol (<i>angl. Power Ground</i>)
1	GND	Sol analogique (<i>angl. Analog ground</i>)
2	Sortie SF (Status-Flag)	Rendement de drain ouvert.
3, 13, 11, 12	Entrée IN1, IN2, DI1, DI2	Entrées commandées de tension avec l'hystérésis (<i>angl. Voltage controlled inputs with hysteresis</i>)
8	COD	lorsqu'il n'est pas connecté au GND, un échec stocké sera remis à zéro par le changement du niveau de tension sur DI1 ou sur DI2. Une fois reliée à VCC, le pin de neutralisation DI1 et DI2 seront inactifs.
6, 7, 14, 15	OUT1, OUT2	Sorties du H-Bridge avec des diodes indépendantes intégrés.
4, 5, 16	vbat	Les pins 4, 5 sont intérieurement reliés. Ils alimentent la logique CMOS. Le pin 16 assure l'alimentation de la pompe de la charge.

(Tableau V-1) : Caractéristiques électriques du H-Bridge Driver MC33186 (Source : MOTOROLA)

V.6.1. Analogies entre les grandeurs électriques et thermiques

Deux systèmes sont dites analogues s'ils obéissent aux mêmes équations et possèdent les mêmes conditions aux limites [KRE67]. Cela signifie que l'équation traduisant un des

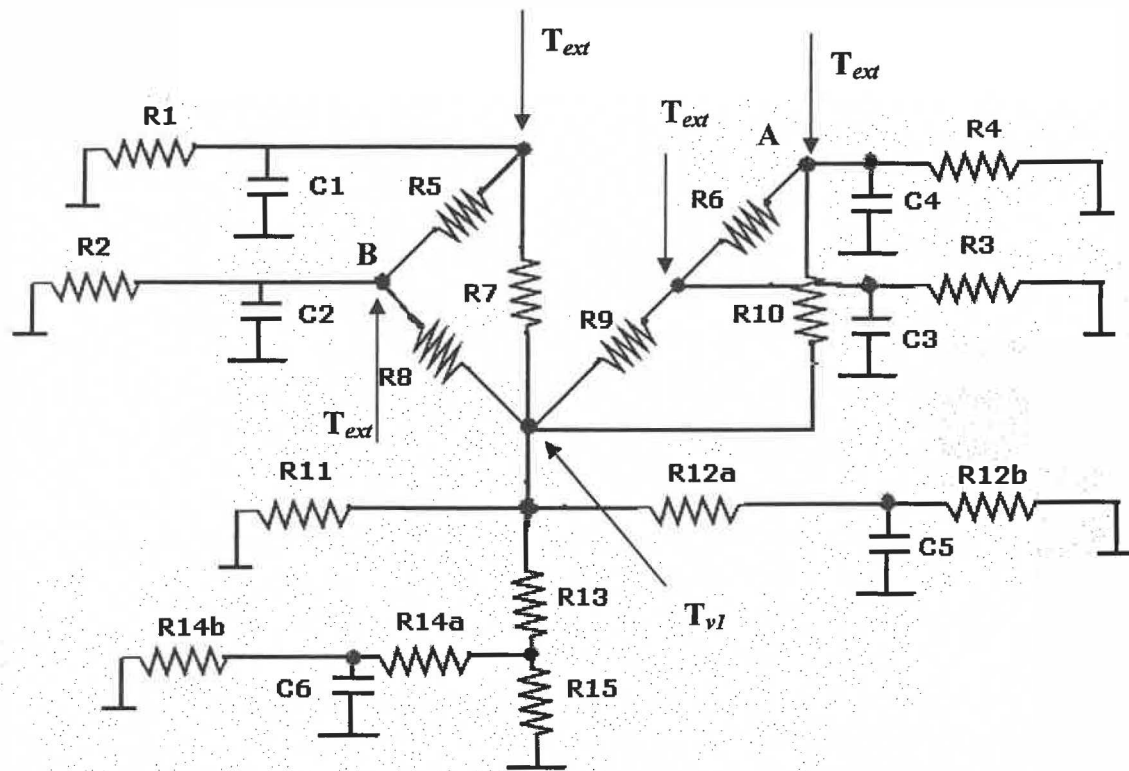
Le système peut être transformé, pour exprimer le deuxième système, par simple changement de symboles. Par exemple, le flux de chaleur à travers une résistance thermique est analogue à l'intensité de courant dans un circuit électrique à courant continu car ces deux types d'écoulement obéissent aux mêmes équations. Si nous remplaçons dans l'équation du flux de chaleur $q = \frac{\Delta T}{R}$ le symbole ΔT des températures (potentiel de température) par le symbole du potentiel électrique, c'est-à-dire la différence de potentiel ΔE et le symbole de la résistance thermique R par celui de la résistance électrique R_e , nous obtenons l'équation du débit de quantité d'électricité, c'est-à-dire le courant $i = \frac{\Delta E}{R_e}$. La base d'analogies ayant été établie, nous pouvons appliquer certaines propriétés de la théorie de l'électricité aux problèmes de transmission de chaleur.

Tableau V-2 : Analogies entre les grandeurs électriques et thermiques

Quantité électrique	Quantité thermique
Courant i	Flux de chaleur Q
Résistance électrique R	Résistance thermique R_θ
Tension U	Différence de température ΔT
Capacité C	Capacité thermique C_θ

Afin d'établir le modèle équivalent au système physique nous devons faire plusieurs approximations. La structure est basée sur la forme du circuit intégré et de la carte PCB, et les raccordements des nœuds entre ces deux représentent les chemins les plus

importants de l'écoulement de la chaleur. La structure tient compte du fait, que la source principale de la chaleur est les transistors TMOS et que les seuls points dans lesquels les températures doivent être calculé, sont situés dans notre système. Les valeurs des résistances ont été optimisées en utilisant l'algorithme d'optimisation de Powell, tandis que les valeurs initiales des condensateurs ont été calculées sur la base des dimensions et de la propriété du matériel et du composé du moule. Ainsi, le montage électrique équivalent au système physique est représenté à la figure V-8.



(Figure V-8) : Modèle électrique équivalent au système physique

Où

- $R_1 - R_4$ et $C_1 - C_4$, correspondent au composé du moule.

- $R_5 - R_{11}$ représente l'écoulement de la chaleur dans le substrat de silicium, la couche de soudure et dans le radiateur interne du composant.
- $R_{12}-R_{15}$ représente l'émission et la convection de la chaleur à la surface du moule, du cuivre et du vias thermique interne.
- $C_5 - C_6$ représentent la capacité d'accumulation thermique du composant.
- T_{vl} représente la température du régulateur
- T_A – représente la source de la chaleur du processeur.
- T_B - représente la source de la chaleur des 4 transistors TMOS.

V.7. Modélisation numérique sous TAS

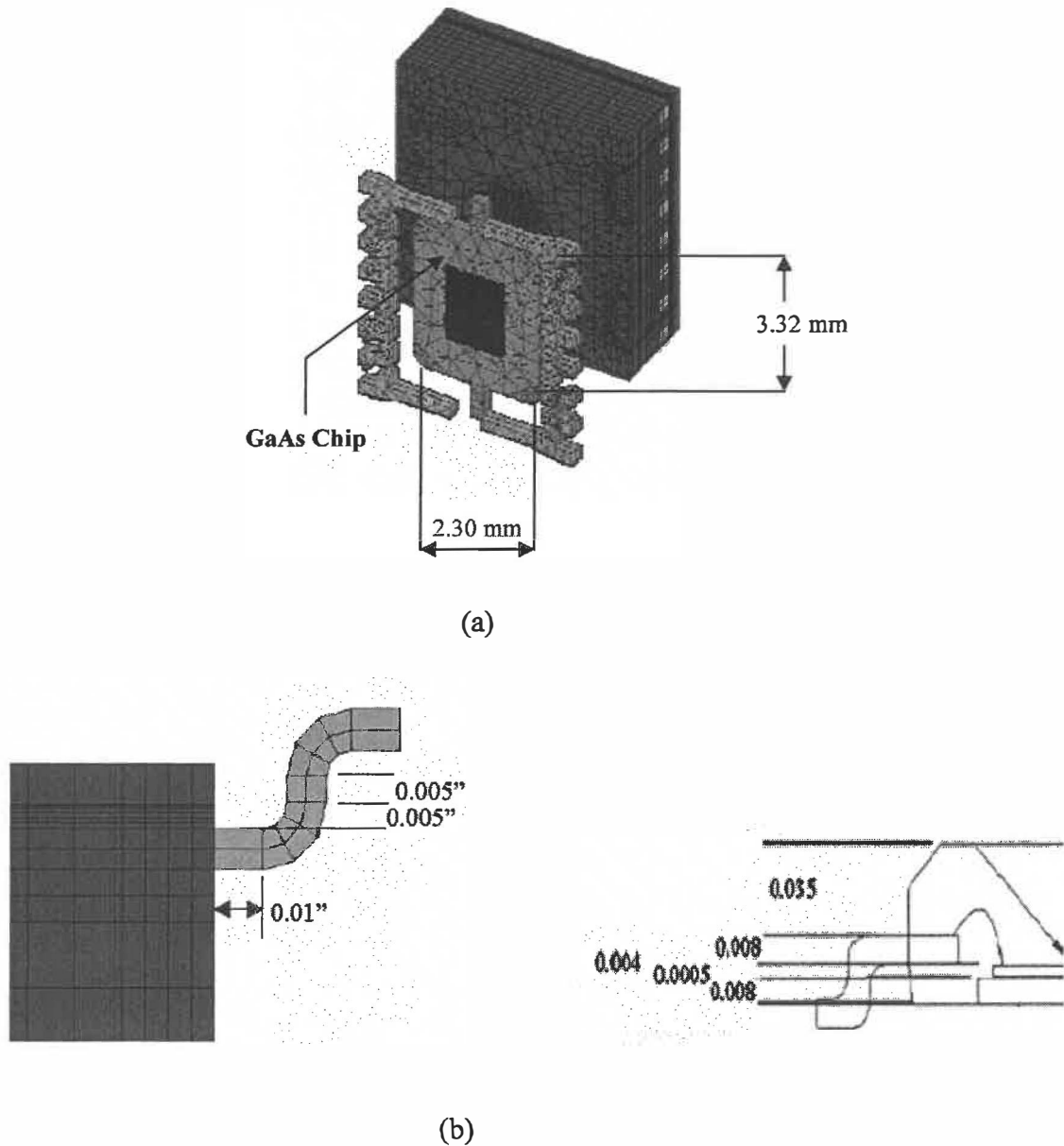
V.7.1. Introduction

TAS (*angl. Thermal Analysis System*) est un logiciel d'analyse thermique très utilisé par les concepteurs dans le domaine de l'électronique. Développé à la base pour les besoins spécifiques des industries, il inclut des dispositifs et des fonctionnalités pour la création, l'analyse et l'interprétation optimisée pour des créateurs confrontés à l'évaluation de problèmes thermiques de plus en plus rudes. Il n'y a aucune limite pour modéliser la taille, celle-ci est seulement limitée à la mémoire du PC.

V.7.2. La géométrie

La géométrie à représenter sous TAS est présentée à la figure V-9 et représente notre microcontrôleur MC33186. Les dimensions qui ont été choisis lors de la réalisation sous

TAS sont les mêmes dimensions qui ont été considérés chez Motorola. Les dimensions ont été ajoutées sur la figure V-9.



(Figure V-10): (a) Modèle géométrique du MCC33186 réalisé sous le logiciel TAS (dimensions considérés en mm); (b) Les dimensions ont été prises en INCHES d'après Motorola. (À noter : 1/8 INCHES = 3,2 mm) (Source Motorola : www.motorola.com).

V.7.2.1.Réalisation de la géométrie

I - Open the model "Meshed.mod"

Extrude the Plates into Bricks and delete the Plates

- Select Add>Brick>Extrude Plate

1. Entrer l'épaisseur de 0.008
2. Vérifier l'effacement des plats
3. Laisser la propriété à exister
4. Check Windows select
5. Click **OK** et taper **YES** pour effacer les plats

II – Extrude the face of the Brick elements into more Brick elements

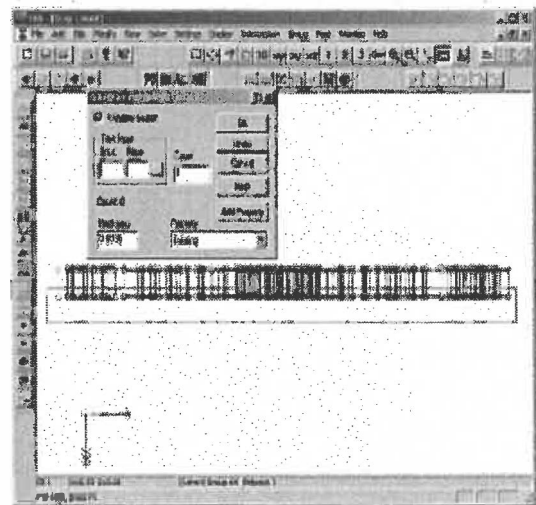
- Selection - bouton **XZ**

- Select Add>Brick> Extrude Brick Face

1. Entrer l'épaisseur de 0.0005
2. Check Windows **Select**
checkbox
3. Changer la valeur de
l'épaisseur à 0.001
4. Changer le compte en 4
5. **Uncheck the Aspect Ratio**
button (bouton
d'allongement).

6. Choisissez l'ajustement ou

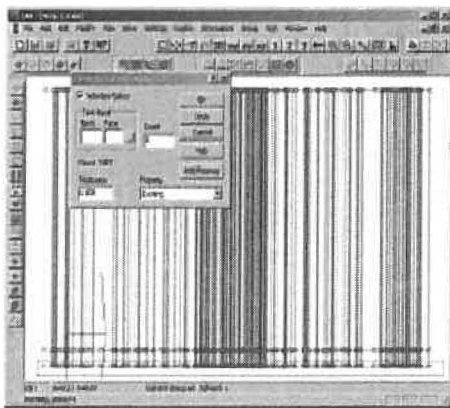
cliquer sur le bouton




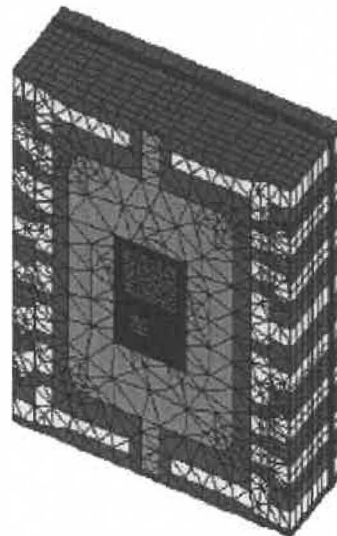
7. Rechanger l'épaisseur à
0.004
8. Changer le compte à 2

9. **Window in on the bottom face of the bottom Bricks**

10. Répéter les mêmes étapes 6 à 9 en changeant cette fois ci l'épaisseur à 0.0005 et le compte à 7



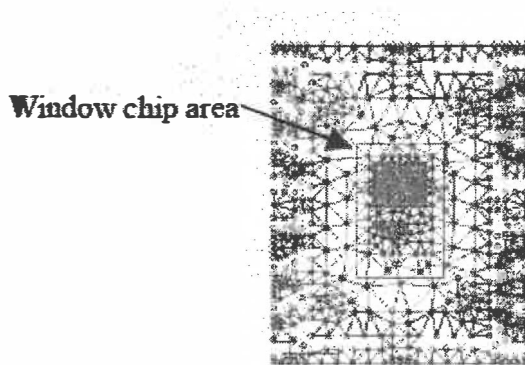
4. Selection du bouton 



III- Thermally attach the model

- Select Solve>Compact Equiv
 - **Change the properties to the correct ones**
1. **Select group>Quick** (Selection group>Quick)
 2. Check the **Window Select checkbox** and window the **top layer of bricks**
 3. Selection – bouton **OK**

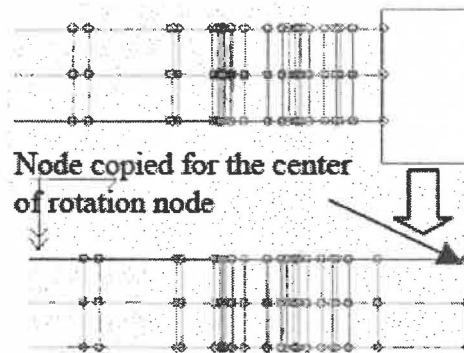
5. Select **Modify>Property** (Sélection modifier>propriétés)
6. Select property 2, **Copper**. (Sélection – propriétés 2 – Cuivre)
7. Check the **Window Select checkbox** and window the **chip area** (voir figure- Window chip area).



IV- Add nodes at the center of rotation (Ajouter des noeuds au centre de rotation)

- **Select Edit>Copy**

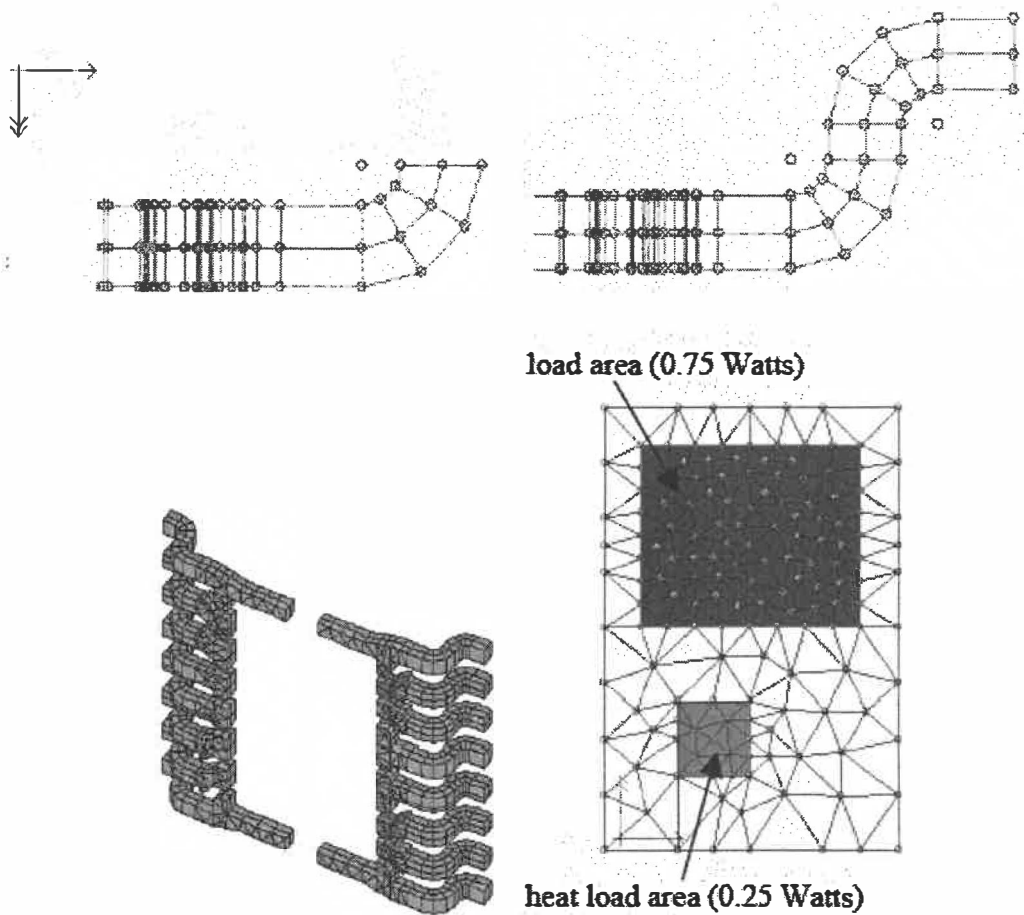
1. Entrer la dimension Z de -0.005
2. Sélectionner le nœud qui apparaît à droite du model
3. Appuyer sur le bouton **OK**



- **Select Add>Brick>Revolve**

1. Sélectionner le bouton de rotation Y
2. Sélectionner le centre droite du nœud

2. Entrer un angle de 90 degrés
3. Vérifier Window, Sélectionner **checkbox and window the right side Plates**



V- Add a heat load to the model (Ajouter une charge thermique au modèle)

1. **Select Group>Edit**
2. Sélectionner le groupe numéro 2
3. Check the Echo/ **Select Checkbox**
4. Entrer le nom du groupe **GaAs**
5. Vérifier la propriété **GaAs**, Appuyer sur le bouton **Process**
6. Appuyer sur le bouton **OK**

Lors de la conception du modèle, nous avons utilisé les caractéristiques des matériaux déjà existantes dans une librairie de TAS et d'autres que nous avons créées. Ces caractéristiques utilisées sont résumées dans les tableaux V-3.

Layer description	Thickness (mm)	Number of elements	Element thickness (mm)
Copper base	0.008	1	0.008
Die bond	0.0005	1	0.0005
GaAs die	0.004	4	0.001
Lead frame	0.008	2	0.004
Encapsulate	0.035	7	0.005

(a)

Matériaux	Densité kg/m^3	Conductivité thermique $\text{W/(m}^0\text{K)}$	Chaleur spécifique $\text{J/(kg}^0\text{K)}$	Appliqué au composant
Pure Copper	8.933×10^3	3.95×10^2 ⁽¹⁾	3.97×10^2	support processeur
Lumped chip	-	2.0×10^1 ⁽¹⁾	-	-
Board material	1.9733×10^3	$k_x = 3.977 \times 10^1$	6.613491×10^2	support processeur
	1.9733×10^3	$k_y = 3.977 \times 10^1$ ⁽³⁾	6.613491×10^2	support processeur
	1.9733×10^3	$k_z = 3.333052 \times 10^1$	6.613491×10^2	support processeur
Pure silicon	2.33×10^3	Valeur $= 1.175 \times 10^2$	7.0×10^2	Die
Pure silicon	2.33×10^3	Coeff. $= -4.2 \times 10 \text{ W/(m}^0\text{K}^2)$ ⁽²⁾	7.0×10^2	Die
Pure silicon	2.33×10^3	$T_{ref} = 100^\circ\text{C}$	7.0×10^2	Die

(b)

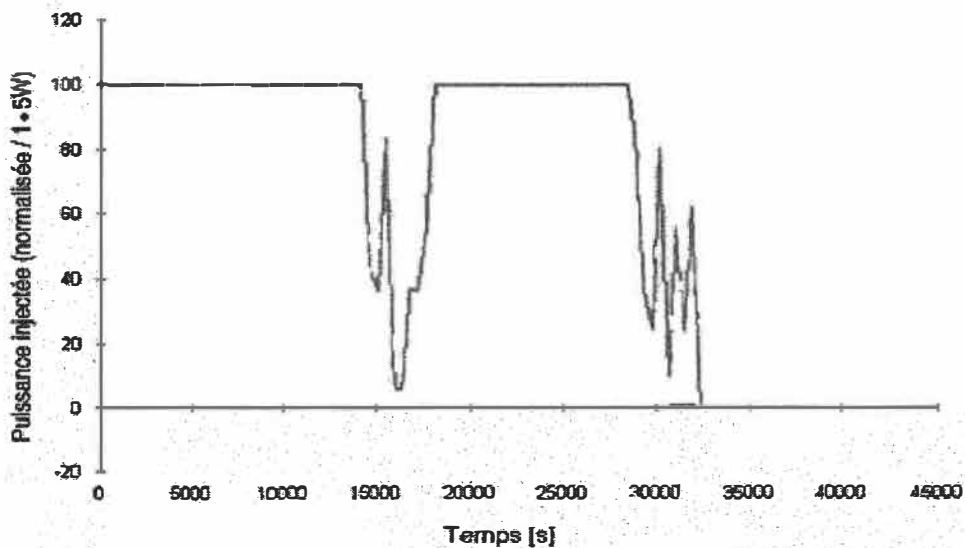
(Tableaux V-3) : Propriétés des matériaux utilisés. ⁽¹⁾ Conductivité thermique constante, ⁽²⁾ Conductivité thermique dépendante de la température et ⁽³⁾ conductivité thermique orthotropique.

V.7.3. Les conditions

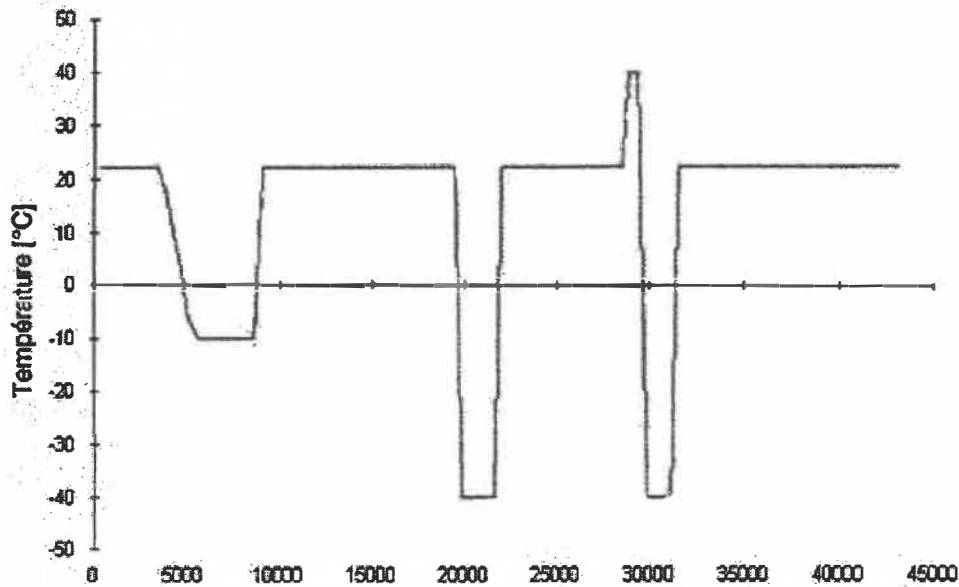
La deuxième grande partie de la modélisation est d'établir les conditions aux limites du système, c'est-à-dire définir les éléments sources de chaleur, les éléments responsables de phénomènes de convection et de radiation. De plus, la modélisation numérique utilisant un module thermique dynamique, il faut préciser la température initiale de chacun des nœuds, et définir les courbes dépendantes du temps.

- Amplitude des courbes en fonction du temps

Deux courbes dépendantes du temps sont nécessaires dans cette étude : une pour la variation du pourcentage d'utilisation du microprocesseur (figure V-10) et une autre pour la variation de la température extérieure (figure V- 11).



(Figure V-11) : Variations normalisées par rapport à 1.5 W du pourcentage d'utilisation du microprocesseur



(Figure V-12) : Variations de la température extérieure

- Sources de chaleur

Nous supposons que les deux types de composants générant le plus de chaleur sont le processeur interne avec les quatre transistors TMOS de notre microcontrôleur MC33186. Le dégagement de chaleur dépend du pourcentage d'utilisation que nous avons décrit à la figure V-9. Ces valeurs sont normalisées et seront multipliées par 1.5W, que nous supposons être la puissance maximale dissipée par le processeur.

- Température spécifique

La température spécifique désigne la température de la surface des éléments qui influencent le système, mais qui ne sont pas influencés par le système. Dans notre cas, la

surface du circuit aura une température spécifique qui correspond aux variations de la température extérieure en fonction du temps représenté à la figure V-12.

- Température initiale

Lors d'une analyse thermique dynamique, nous avons le choix d'imposer la température initiale de chacun des nœuds sinon cela est fait par défaut. La température initiale de tous les nœuds est de : $T_0 = 22^{\circ}C$.

V.8. Validation du modèle électrique

Une méthode de validation du modèle électrique du système physique peut être la modélisation numérique dynamique avec des logiciels de simulation numérique tel que TAS que nous avons vu au paragraphe V.5. La méthode idéale de validation est l'expérimentation sur un modèle physique, cependant elle est souvent coûteuse en temps et en argent.

V.8.1. Valeurs numériques du modèle nécessaires à la simulation

Une méthode possible pour le calcul des résistances thermiques et des capacités d'accumulation thermique consisterait à utiliser les formules analytiques suivantes :

1. Pour la résistance thermique

$$R = \frac{\Delta_y}{k * A} \quad (V-7)$$

Où :

Δ_y est la distance entre deux régions de différence de température T_1-T_2

k est la conductivité thermique du corps considéré;

A l'aire d'une section uniforme séparant deux régions de différence de température T_1-T_2 .

2. Pour la capacité d'accumulation thermique

$$C = V * \rho * C_p \quad (V-8)$$

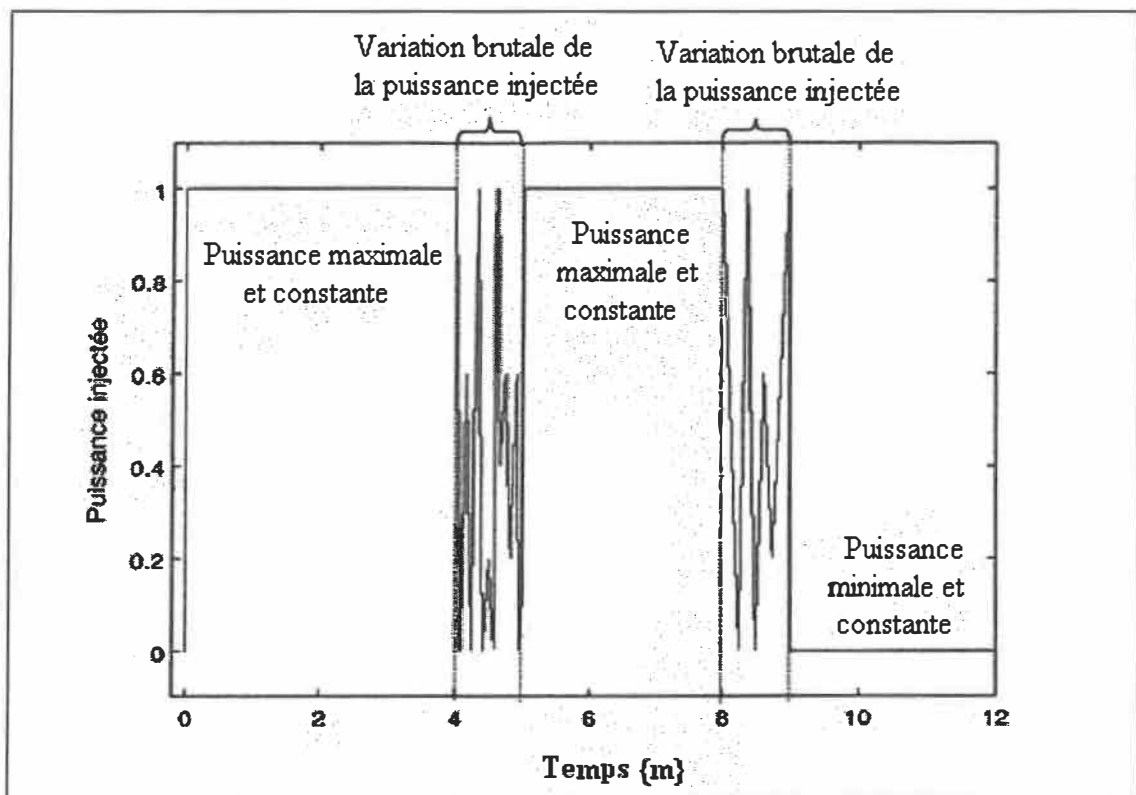
Où

V est le volume du matériau considéré;

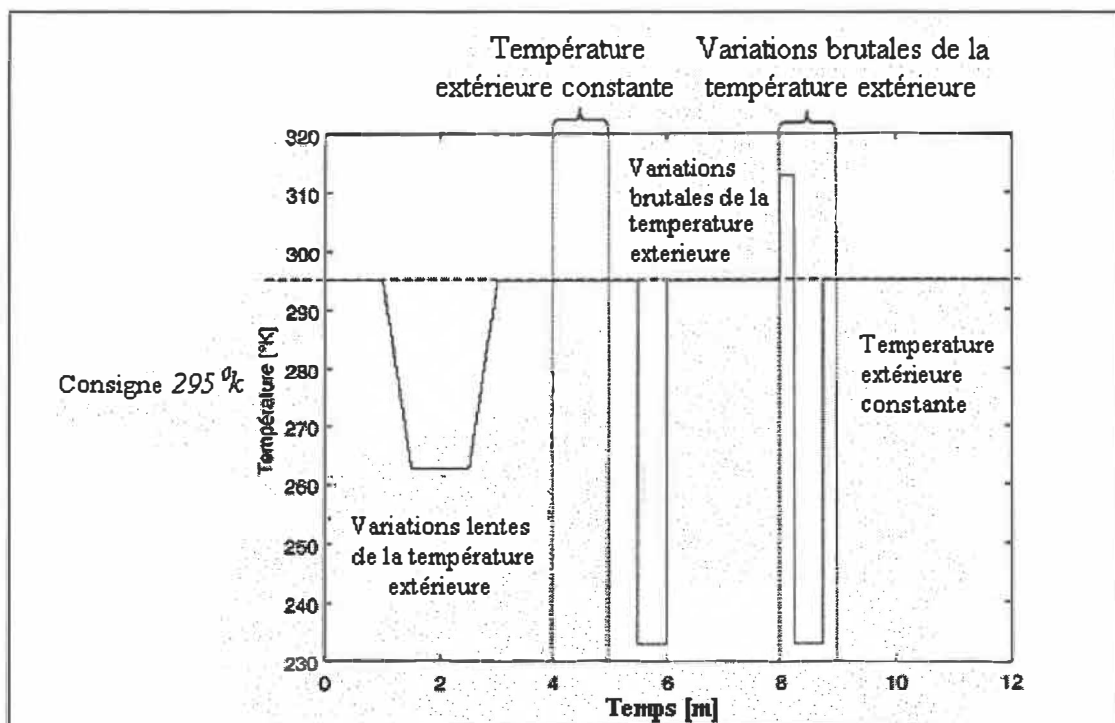
ρ est la densité du matériau considéré;

C_p est la chaleur spécifique du matériau considéré.

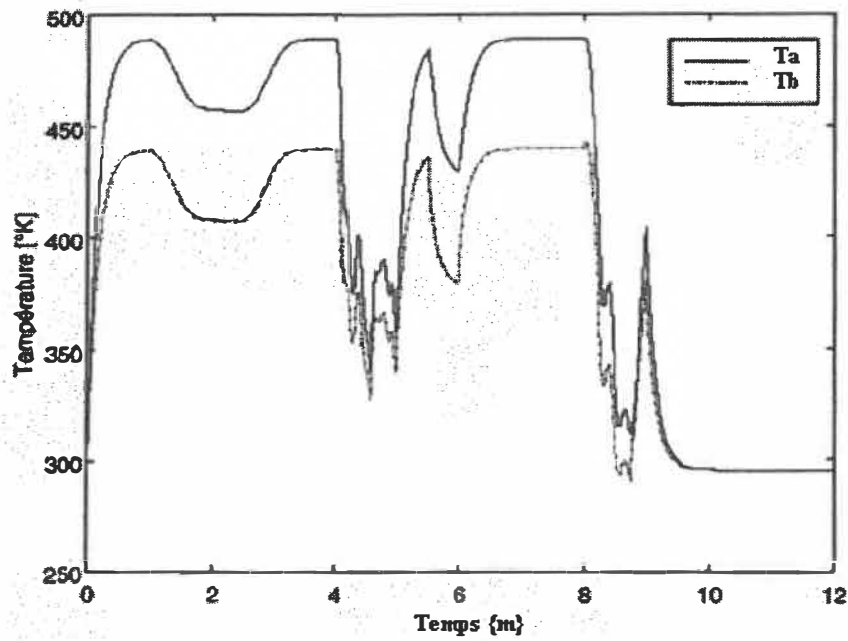
L'implantation du modèle est faite sous **SIMULINK**TM avec un bloc éditeur d'équations différentielles (*ang. Differential Equation Editor – DEE*) comme le montre la figure V-12. Les blocs «**nu**» et «**Text**» caractérisent respectivement la variation du pourcentage d'utilisation du processeur ou de la mémoire du MC33186 et la variation de la température extérieure. Les figures V-13 et V-14 représentent les variations de ces grandeurs.



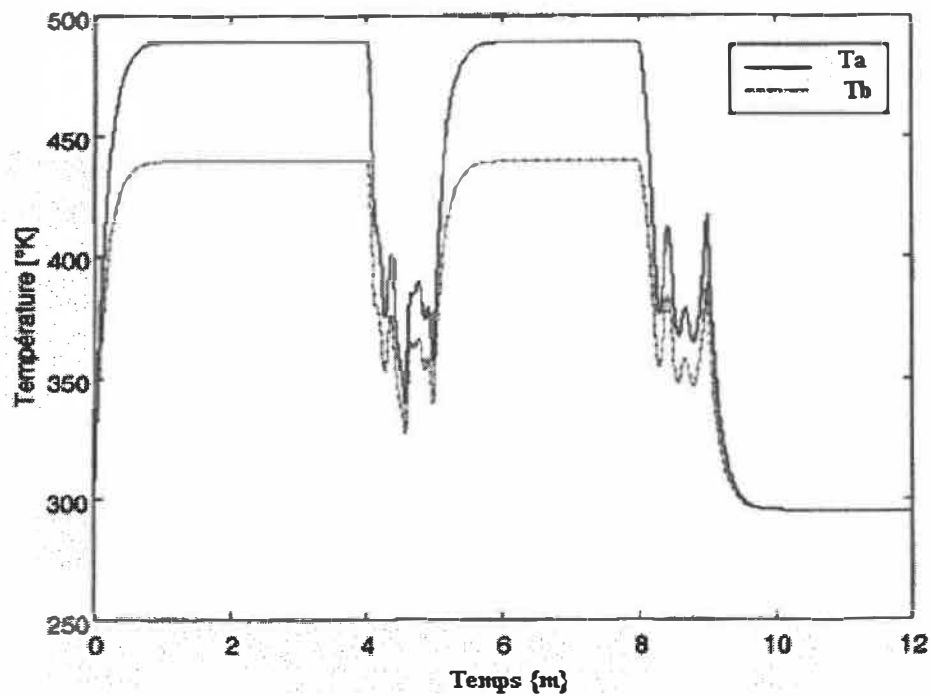
(Figure V-14) : Variations du pourcentage d'utilisation du processeur du MC33186



(Figure V-15) : Variations de la température extérieure en fonction du temps



(Figure V-16) : Évolution des températures T_a et T_b en fonction du temps pour la température extérieure de la figure (V-14).



(Figure V-17) : Évolution des températures T_a et T_b en fonction du temps pour une température extérieure constante.

On peut constater d'après la figure V-16 que la température du processeur est très élevée sans contrôleur thermique. De plus, dans la figure V-15, nous constatons que la température extérieure a une influence non négligeable sur le système.

Dans la suite, il sera important de faire deux types de simulations :

- à température extérieure variable
- à température extérieure constante

Chapitre VI

Contrôle thermique, résultats et discussion

VI.1. Introduction

La conception de contrôleur pour un système dépend grandement des caractéristiques des modèles utilisés : le modèle est-il statique ou dynamique? linéaire ou non linéaire? variant ou invariant? etc...

Il existe ainsi un besoin réel d'innovation dans le domaine du montage, de la connectique et du refroidissement des composants. Ces dernières années, des études sur des micro-échangeurs en cuivre intégrés sous la semelle des composants de puissance, fonctionnant en convection forcée avec un fluide de refroidissement liquide en régime d'écoulement laminaire ou sous forme diphasique (phases liquide et vapeur en présence), ont été réalisées. Elles ont montré l'efficacité de tels modes de refroidissement puisque les densités de flux évacuées atteignent 400 W/cm^2 avec de l'eau.

Une autre solution consiste à concevoir des micro-refroidisseurs en silicium mettant en œuvre les techniques de gravure profonde (canaux rectangulaires et hexagonaux de diamètre hydraulique interne de l'ordre de 250 μm) et d'auto soudage de plaques de silicium. Pour les applications de plus faible puissance, inférieure à la centaine de watts, il s'agit non plus de mettre en place dans le silicium une structure à forte évacuation thermique mais une structure à fort pouvoir de diffusion. Le principe d'un échangeur passif, fonctionnant en double phase, de type caloduc intégré au silicium, est très prometteur, avec une densité de flux potentielle de 100 W/cm^2 .

Dans ce chapitre nous démontrons l'efficacité du système de refroidissement caloduc par rapport à l'application d'un régulateur par logique floue. Une discussion sur ces résultats accomplira notre chapitre.

VI.2. Conception du contrôleur par logique floue

VI.2.1. Rappel sur la logique floue

Les bases théoriques de la logique floue ont été établies en 1965 par le professeur Lotfi A. Zadeh de l'université de Californie de Berkeley. À cette époque, la théorie de la logique floue n'a pas été prise au sérieux. La logique floue, contrairement au fonctionnement binaire exact pour tout ou rien (1 et 0) des ordinateurs, permet de traiter des variables non exactes dont la valeur peut varier entre 1 et 0.

Les éléments de base de la logique floue sont :

- les variables linguistiques,
- la définition des variables linguistiques,

- les déductions floues (inférences),
- les opérateurs.

VI.2.2. La fuzzification

La description d'une certaine situation, d'un phénomène ou d'un procédé contient en général des expressions floues comme : quelque, beaucoup, souvent, chaud, froid, rapide, lent, grand, petit, etc... Les expressions de ce genre forment les variables linguistiques de la logique floue. Afin de permettre un traitement numérique, il est indispensable de les soumettre à une définition à l'aide de fonctions d'appartenance. Cette étape est appelée **fuzzification** et consiste à attribuer à chaque valeur de la variable linguistique des fonctions d'appartenance μ , dont la valeur varie entre 0 et 1, en tenant compte de la classification en un certain nombre d'ensembles flous.

VI.2.3. Inférences

En général, plusieurs variables linguistiques, convenablement définies par des fonctions d'appartenance, sont liées entre elles par des règles, afin de tirer des conclusions. Ces règles sont appelées **déductions floues** ou **inférences**. Nous distinguons deux méthodes d'inférence :

- inférence avec une seule règle,
- inférence avec plusieurs règles.

Dans beaucoup d'applications, ces deux méthodes sont combinées.

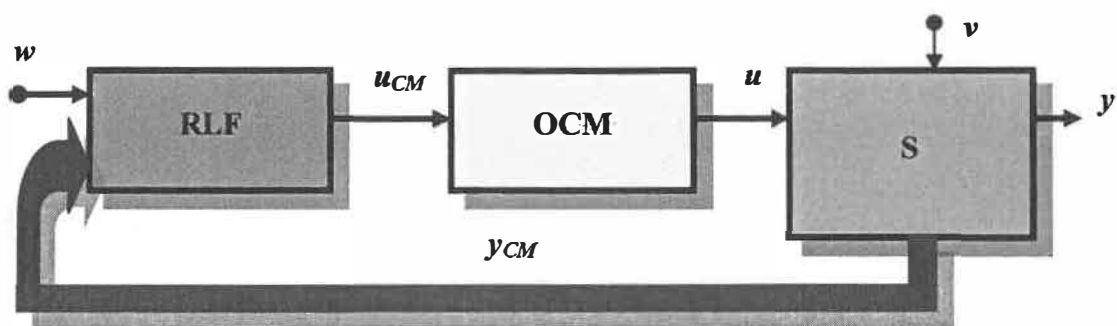
VI.2.4. Opérateurs de la logique floue

Les variables linguistiques sont liées entre elles au niveau des inférences par des opérateurs ET/OU. Il s'agit des opérateurs de la logique floue qui interviennent sur les fonctions d'appartenance représentant les variables linguistiques. De plus, il existe un opérateur NON (complément, négation, inverse). Les règles de calculs pour ces opérateurs sont bien connues dans le cas de la logique classique.

VI.3. Structure d'un réglage par logique floue

VI.3.1. Représentation générale

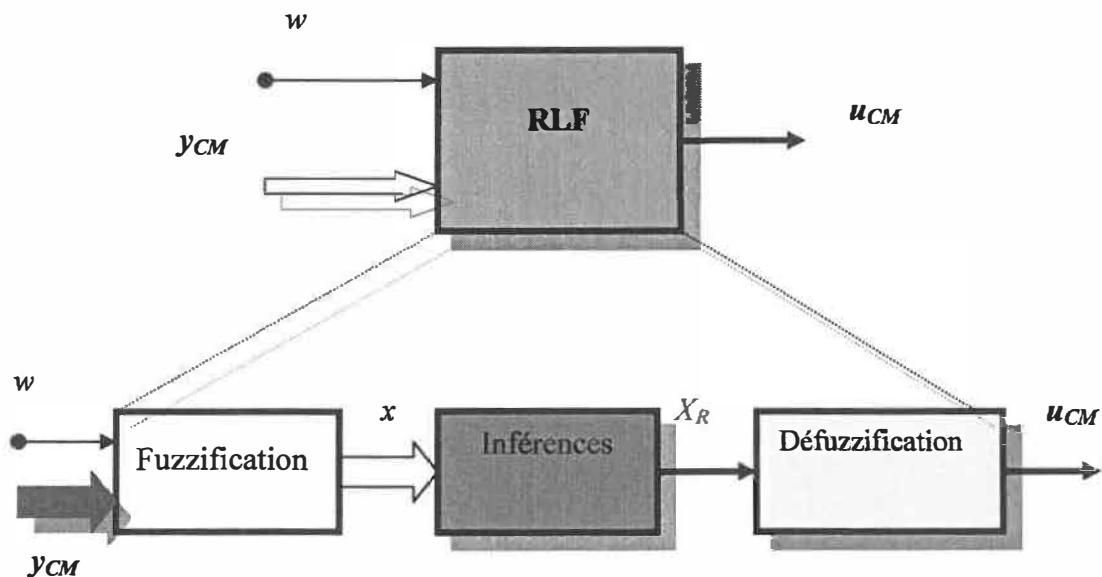
Soit **S** le système à régler et **OCM** l'organe de commande, le régulateur par logique floue **RLF** fournit le signal de commande u_{CM} . Il reçoit à son entrée la grandeur de consigne w et une ou plusieurs grandeurs mesurées, réunies dans le vecteur y_{CM} . Ce dernier contient en général la grandeur à régler y et, le cas échéant, d'autres grandeurs mesurées qui sont déterminantes pour saisir l'évolution dynamique du système à régler. Nous pouvons représenter la structure d'un réglage par logique floue par le schéma de la figure VI-1.



(Figure VI-1) : Structure d'un réglage par logique floue [BUH94]

VI.3.2. Configuration interne d'un régulateur par logique floue

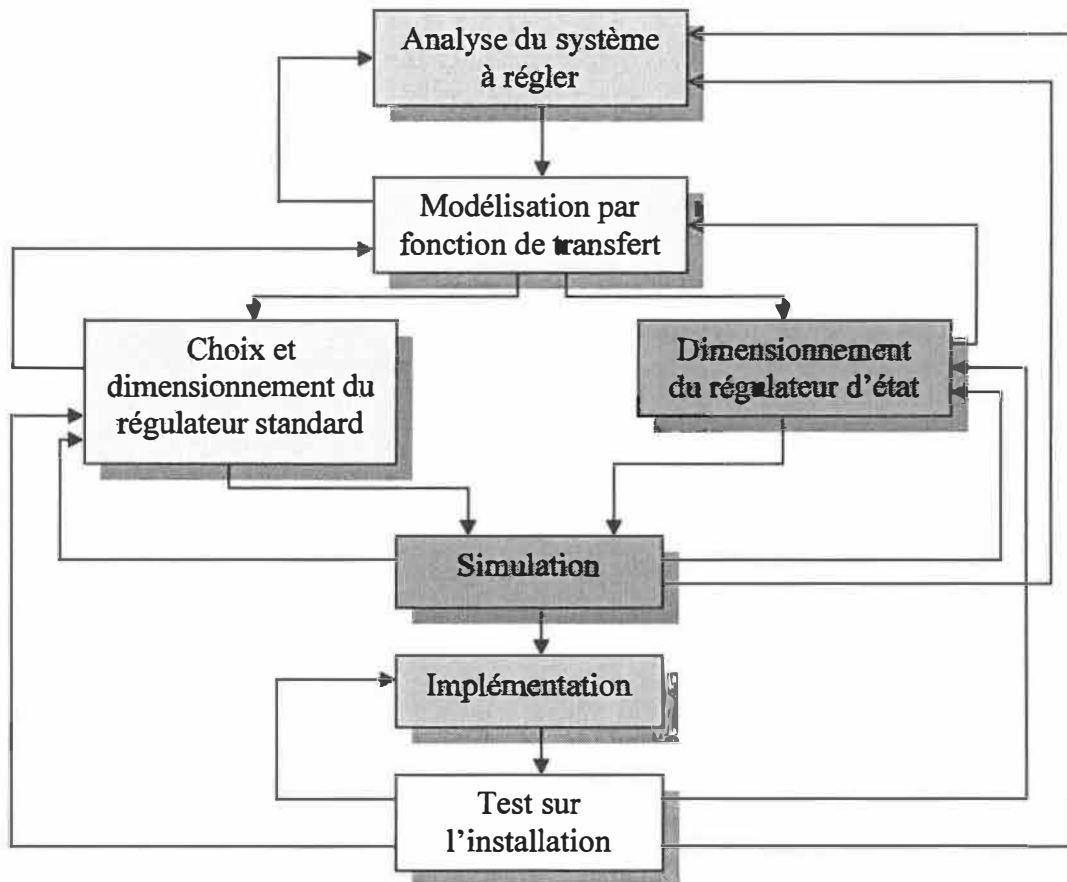
Par opposition à un régulateur standard ou à un régulateur par contre-réaction d'état, le régulateur par logique floue ne traite pas une relation mathématique bien définie (algorithme de réglage), mais utilise des inférences avec plusieurs règles, se basant sur des variables linguistiques. Ces inférences sont alors traitées par les opérateurs de la logique floue. Nous pouvons représenter la configuration interne d'un régulateur par le schéma de la figure VI-2.



(Figure VI-2) : Configuration interne d'un régulateur par logique floue [BUH94]

VI.3.3. Méthodologie de conception d'un réglage avec un régulateur standard et par contre réaction

Les étapes principales à suivre lors de la conception d'un réglage avec régulateur standard sont représentées à la figure VI-3.

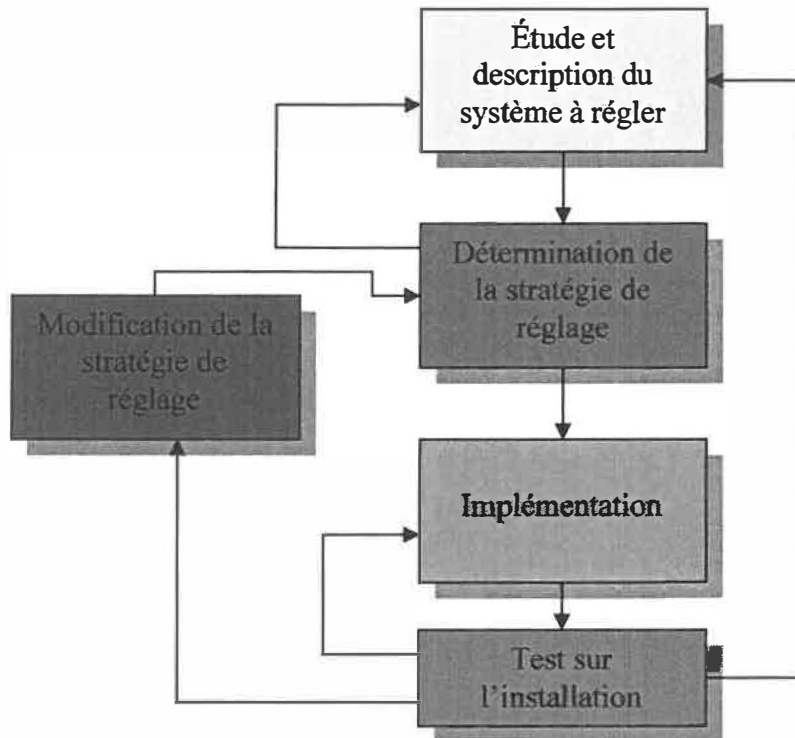


(Figure VI-3) : Étapes de conception d'un réglage avec régulateur standard et par contre réaction [BUH94]

VI.3.4. Méthodologie de conception de réglage par logique floue

Nous pouvons représenter la méthodologie de conception d'un régulateur par logique

floue par la figure VI-4.



(Figure VI-4) : Méthodologie de conception d'un réglage par logique floue [BUH94]

Nous pouvons noter que dans le cas du réglage par logique floue, il n'est pas nécessaire d'établir un modèle. Si, pour un certain système à régler, il existe tout de même un modèle mathématique convenable, il peut être utilisé pour tester et modifier la stratégie de réglage à l'aide d'une simulation numérique.

VI.3.5. Avantages et inconvénients du réglage par logique floue

Les propriétés essentielles d'un réglage par logique floue peuvent être résumées de la façon suivante :

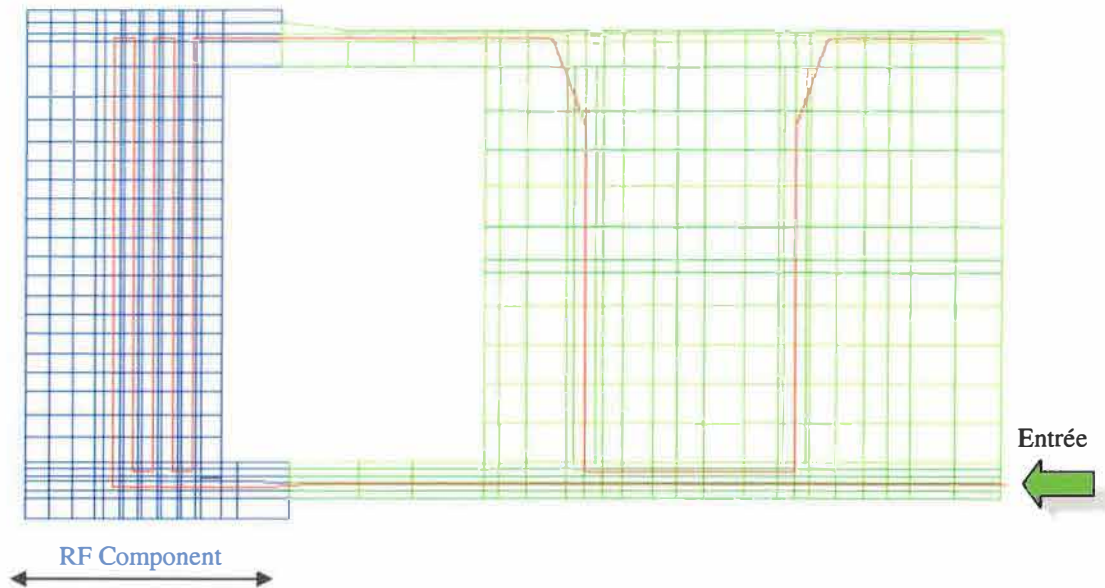
- comportement non linéaire sans dynamique;
- aptitude à régler convenablement des systèmes ayant un comportement dynamique compliqué, dont la modification est difficile, voire impossible;
- modélisation du système à régler superflue (pouvant tout de même être utile);
- connaissance approximative des paramètres du système à régler.

Les avantages du réglage par logique floue sont :

- La non nécessité d'une modélisation du système à contrôler (cependant, il peut être utile de disposer d'une modèle convenable);
- La possibilité d'implémenter des connaissances (linguistiques) de l'opérateur du processus;
- La disponibilité de systèmes de développement efficaces, soit pour microprocesseurs ou PC (solution logicielle), soit pour circuits intégrés (processeurs dédiés, *fuzzy processors*, solution matérielle).

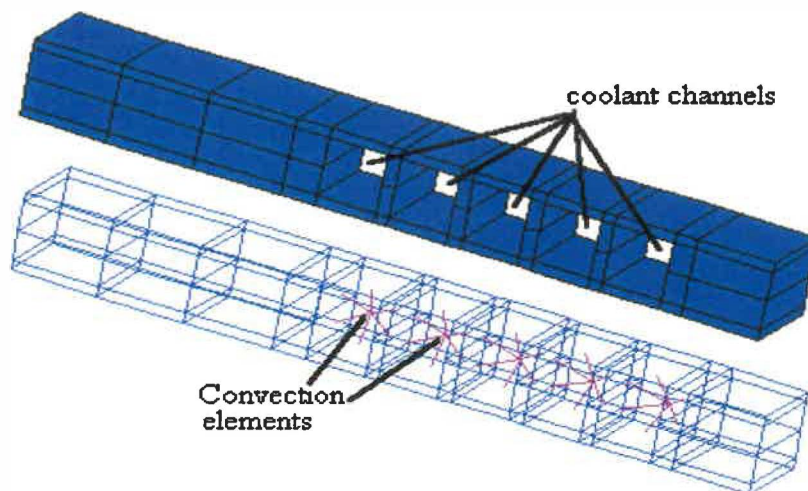
Les inconvénients sont :

- La difficulté de démontrer la conception d'un réglage (choix d'une grandeur à mesurer, détermination de la fuzzification, des inférences et du défuzzification);
- L'approche artisanale et non systématique (implantation des connaissances de l'opérateur souvent difficile);
- La difficulté de démontrer la stabilité du circuit de réglage en toute généralisée (en l'absence d'un modèle valable);
- La possibilité d'apparition de cycles limites à cause du fonctionnement non linéaire;
- La cohérence des inférences non garantie *a priori* (apparition possible de règles d'inférences contradictoires).



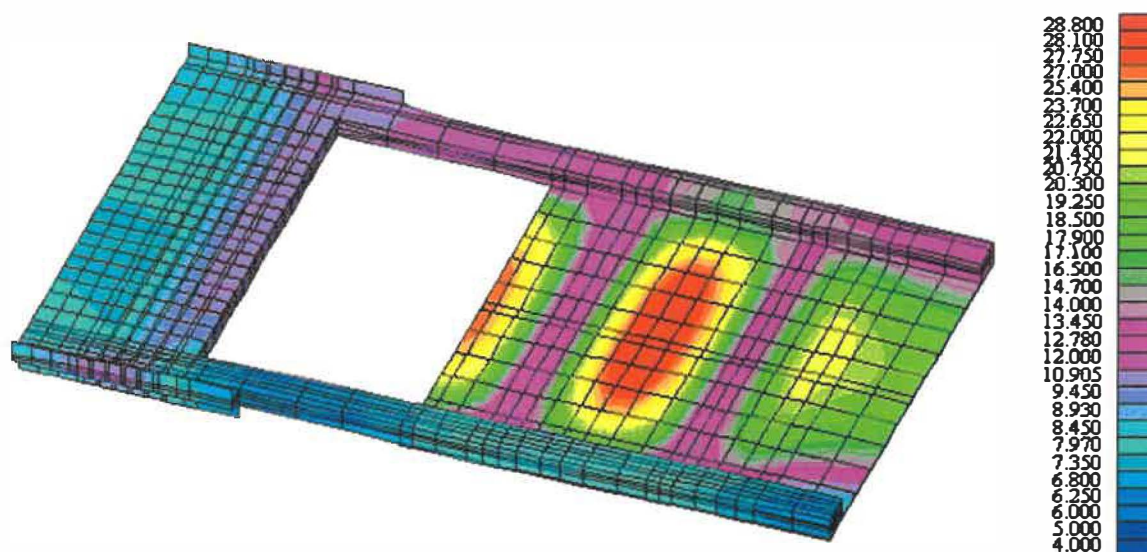
(Figure VI-5b) : Principe de l'écoulement du liquide réfrigérant dans le plat froid. Le liquide réfrigérant entre du côté droit du plat où il exécute un chemin serpentin. Le liquide est présenté en couleur rouge.

La figure VI-6 ci-dessous présente les canaux d'écoulement de liquide réfrigérant dans le côté gauche du plat froid.



(Figure VI-6) : Canaux de refroidissement permettant l'écoulement du liquide réfrigérant dans la partie gauche du plat froid (angl. coldplate)

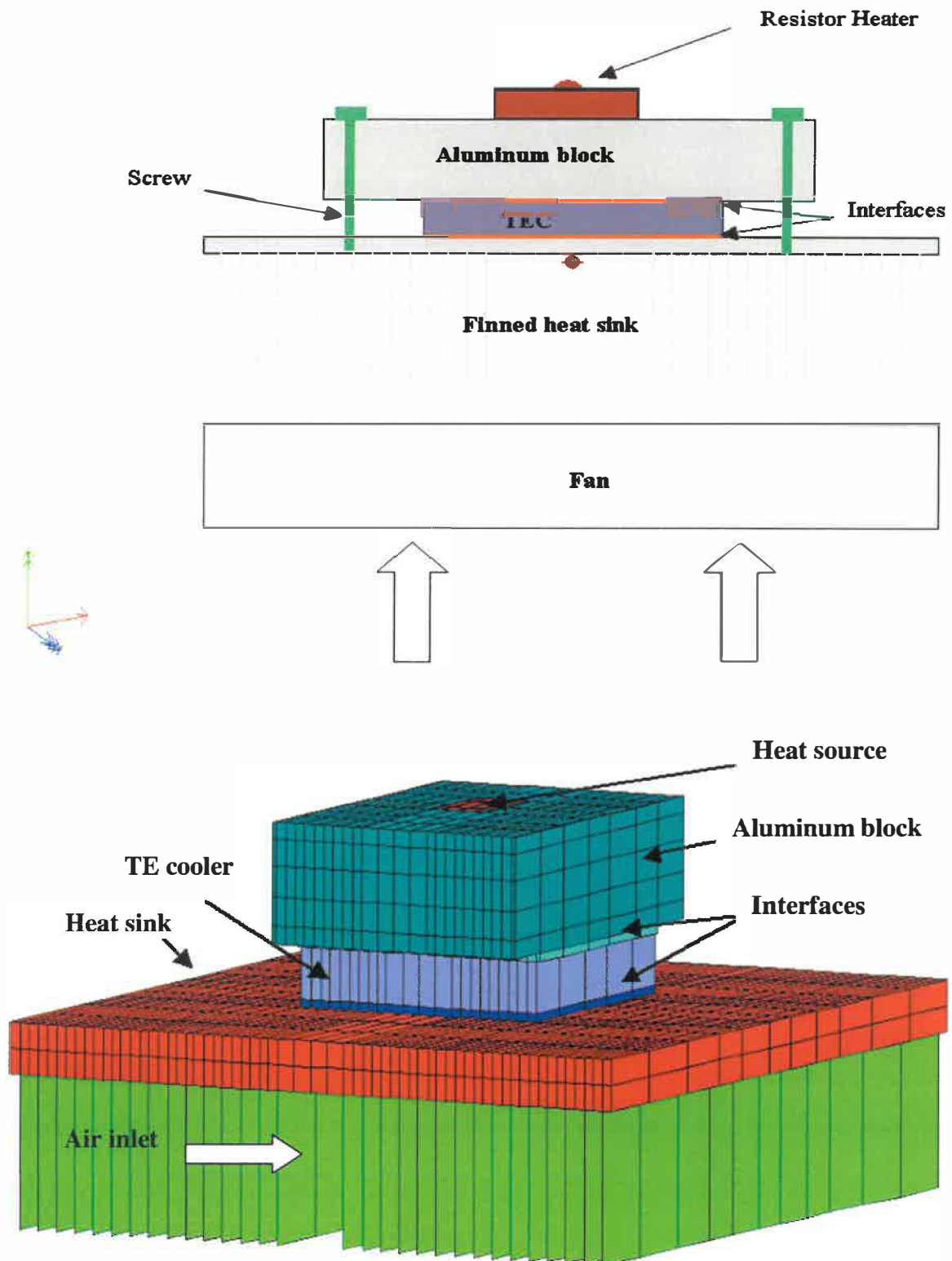
Le régulateur thermique caloduc décrit au chapitre IV a été implanté dans notre système afin de régler la température nécessaire et de le maintenir autour d'une température stable. Une simulation a été nécessaire pour le plat froid sous TAS afin d'obtenir un contrôle plus réaliste. La figure VI-7 illustre la distribution de l'écoulement de la chaleur sur la région gauche isotherme du plat froid.



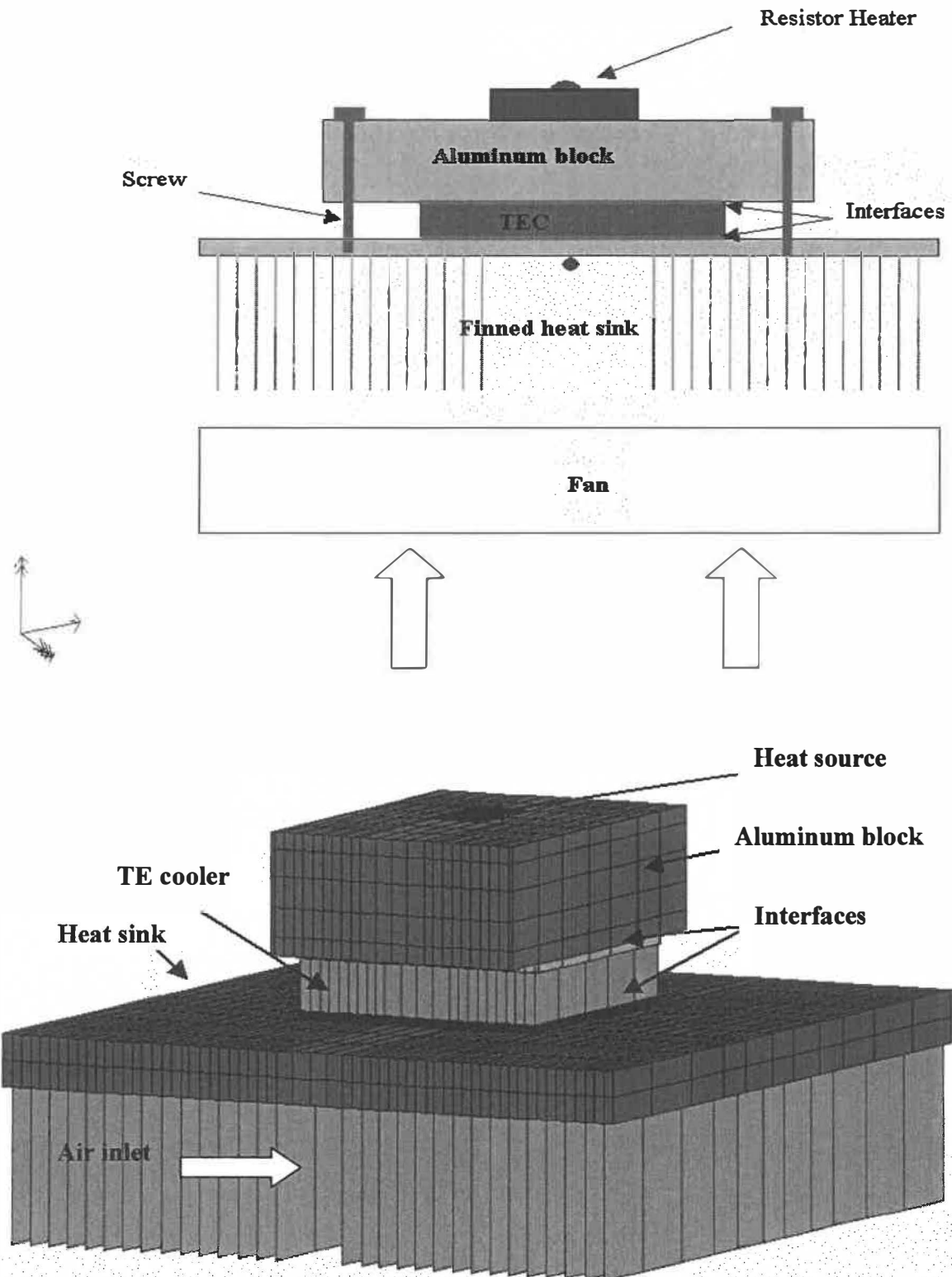
(Figure VI-7) : modélisation et simulation thermique du plat forme froid sous le logiciel TAS.

VI.5. Implantation du système complet sur TAS

Le schéma TAS du système au complet est présenté à la figure VI-8. Comme nous pouvons le constater la modélisation du système complet se compose de trois parties essentielles : source de la chaleur (angl. heat source), d'un bloc d'aluminium (canaux d'écoulement) et d'un réfrigérant Thermo-Electrique TE (angl. Thermo Electric Cooler).



(Figure VI-8): Système au complet réalisé sur TAS. L'essai a été exécuté avec une charge résistive de 3.8 watts.

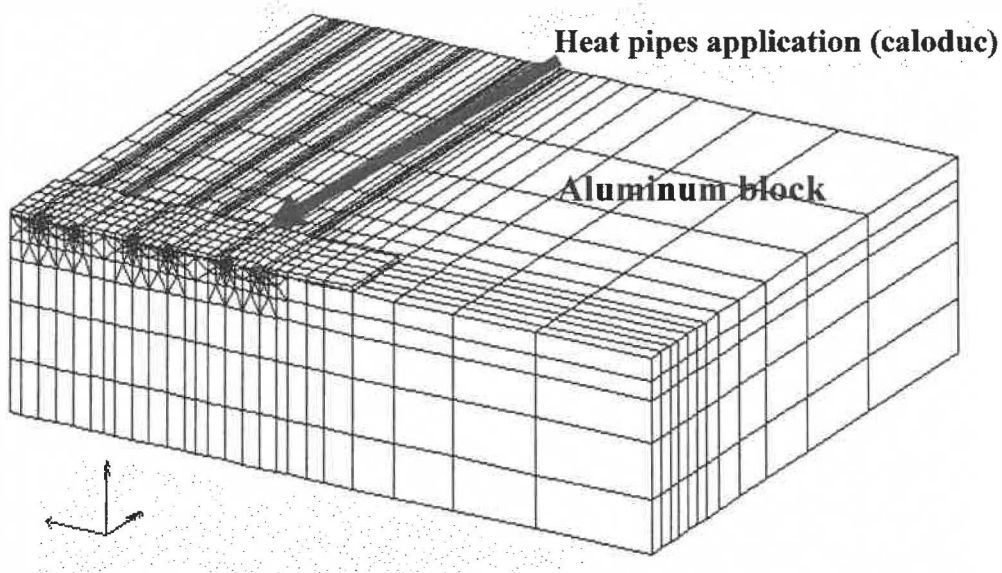


(Figure VI-8): Système au complet réalisé sur TAS. L'essai a été exécuté avec une charge résistive de 3.8 watts.

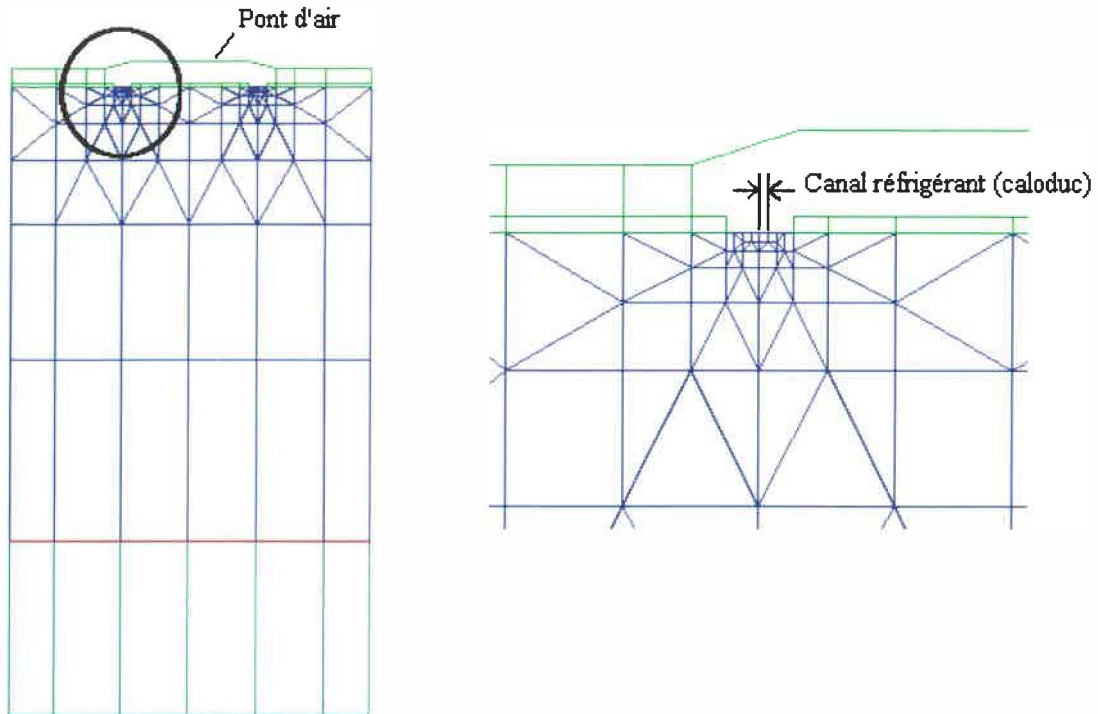
Les résultats d'états d'équilibres du modèle sont montrés dans le tableau VI-1. La différence de la température entre l'essai et le TAS était à moins de 1 °C pour chaque cas excepté près de la tension maximum où le réfrigérant thermoélectrique était inefficace. Dans l'essai 5, les résultats de la température delta du radiateur au réchauffeur étaient à moins de 4%. La figure VI-9 présente la puissance de résistance contre le temps par rapport au tableau VI-1.

Test #	TEC	TEC Current		Heat Sink	Cold temp (°C)	
	Voltage	Test	TAS	Hot temp (°C)	Test	TAS
1	2.46	0.83	0.82	25.6	13.4	13.2
2	4.78	1.61	1.58	28.2	2.1	1.2
3	7.19	2.49	2.41	31.2	-6.8	-7.6
4	10.0	3.48	3.36	37.1	-11.9	-11.7
5	12.5	4.36	4.14	41.9	-14.8	-13.0

(Tableau VI-1) : Comparaison d'états d'équilibres du modèle (Essai/TAS).



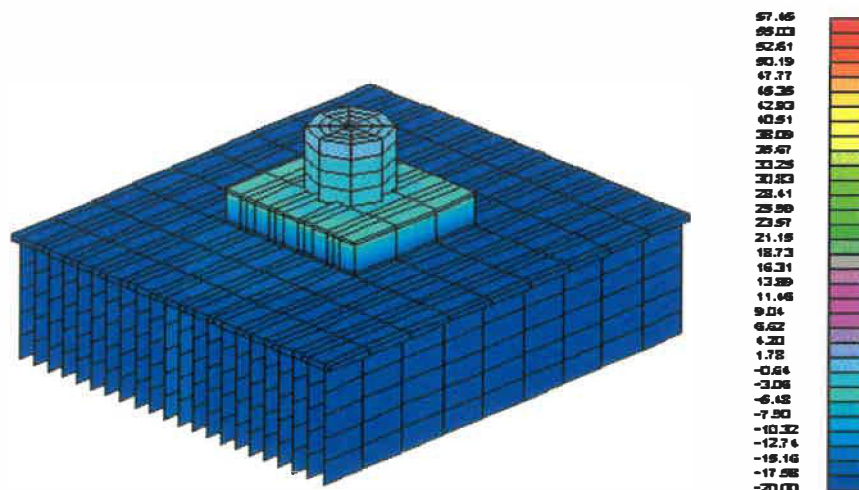
(Figure VI-9) : Schéma du principe démontrant l'introduction des nanotubes dans le block d'aluminium pour appliquer le liquide réfrigérant (caloduc).



(Figure VI-10): Application du liquide réfrigérant (caloduc) au système (block d'aluminium). Les dimensions des canaux ont été de l'ordre 0.5 micron par canal. Le tube a été divisé en 8 briques avec 30 nœuds et 2 éléments de convection. L'épaisseur radiale de brique était de 0,25 pouces. Le noeud central a été employé pour la convection aux murs du tube.

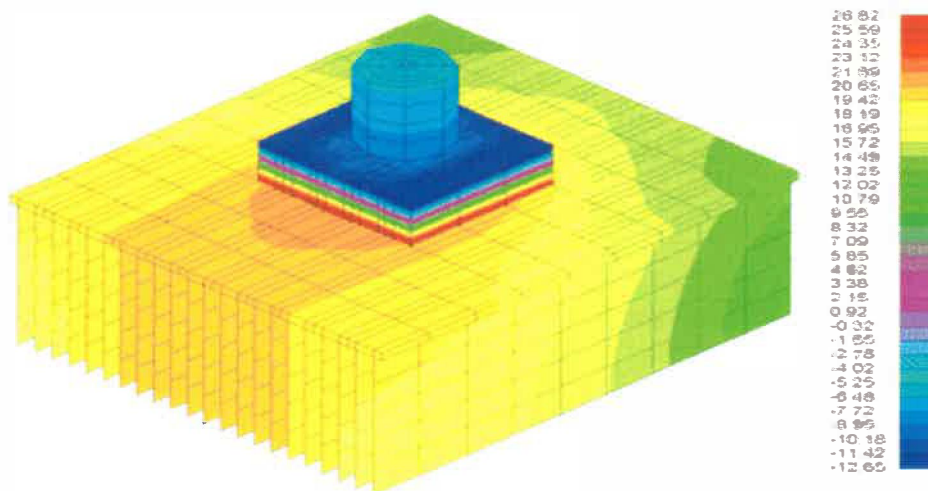
VI.5.1. Modélisation et simulation complète du système sur TAS

Le schéma TAS du système au complet est présenté à la figure VI-11. La simulation a été commencée avec une température froide imbibée de -20°C . Un thermostat proportionnel a été ajouté au modèle pour maintenir la température de résistance à $25.5^{\circ}\text{C} \pm 0.5^{\circ}\text{C}$. Le thermostat commute le refroidisseur caloduc au mode de refroidissement quand la résistance atteint 26°C et commute au mode de réchauffage quand la résistance s'est laissée tomber à la température de 22°C .

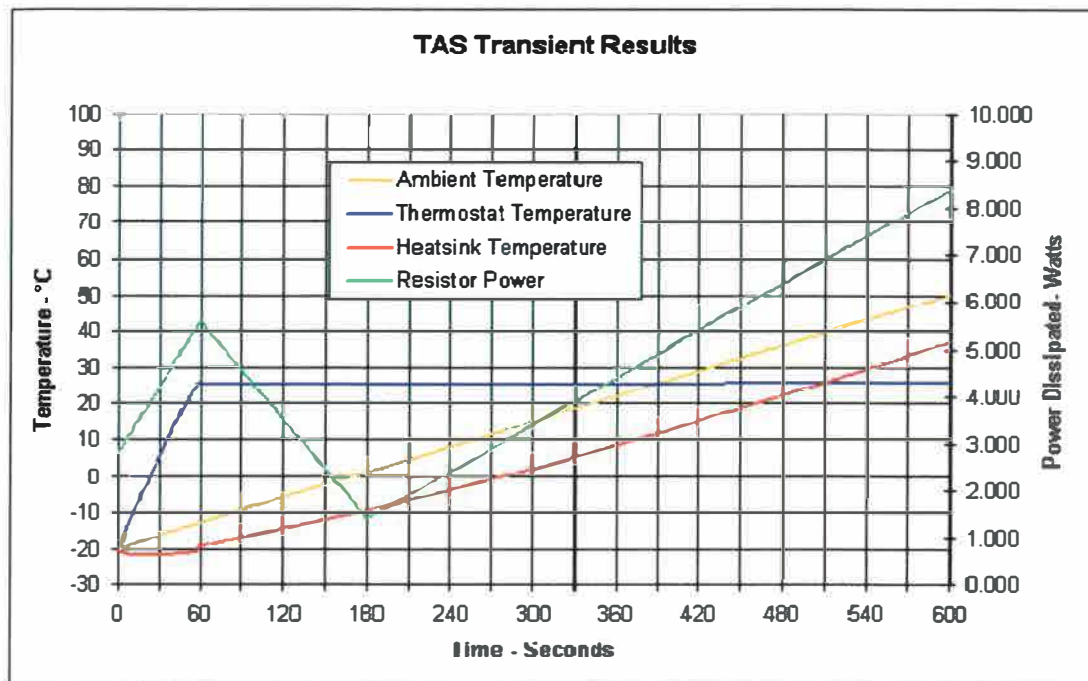


(Figure VI-11): La modélisation finale présentée sur TAS avant la simulation. Le système a été considéré sous une température ambiante froide de l'ordre -20 degré Celsius.

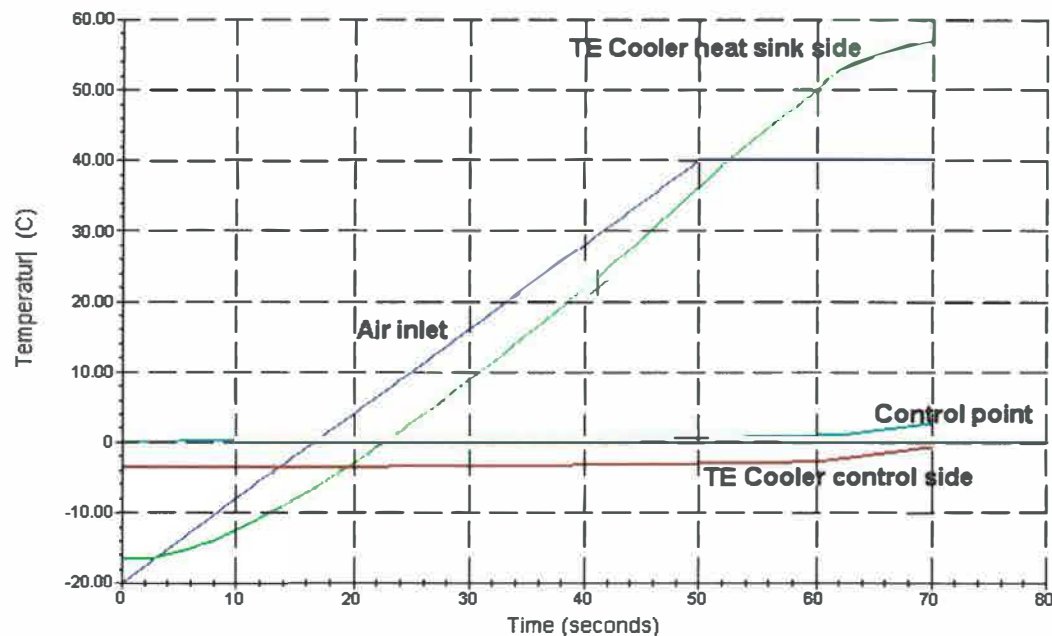
La température ambiante a changé linéairement de -20 °C à +50 °C en 10 minutes (600 secondes). Pour s'ajouter à la dynamique du problème, la puissance de résistance a été changée avec le temps figure VI-13.



(Figure VI-12): Le système telle qu'il est apparu après la simulation sur TAS. L'écoulement de la chaleur apparaît tellement fort au centre du système dont la puissance de la résistance a été changée avec le temps.



(Figure VI-13): Résultats obtenus sur TAS. Point de sens du thermostat, du radiateur, de la température ambiante et de la puissance de la résistance par rapport aux temps.

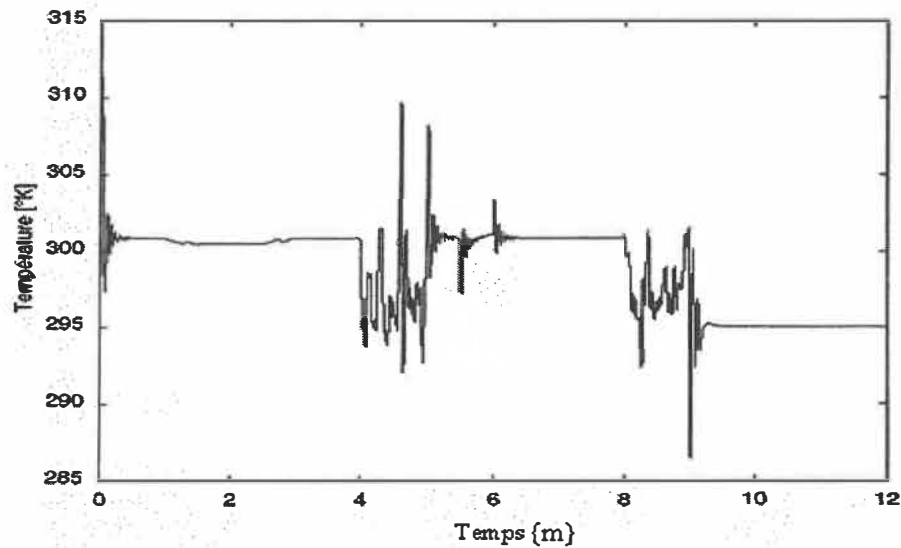


(Figure VI-14): Au début de la simulation à -20 °C, le refroidisseur fonctionne en mode de chauffage, l'entrée de l'air (angl. Air inlet) au radiateur augmente la température de -20 °C à +40 °C en 50 secondes.

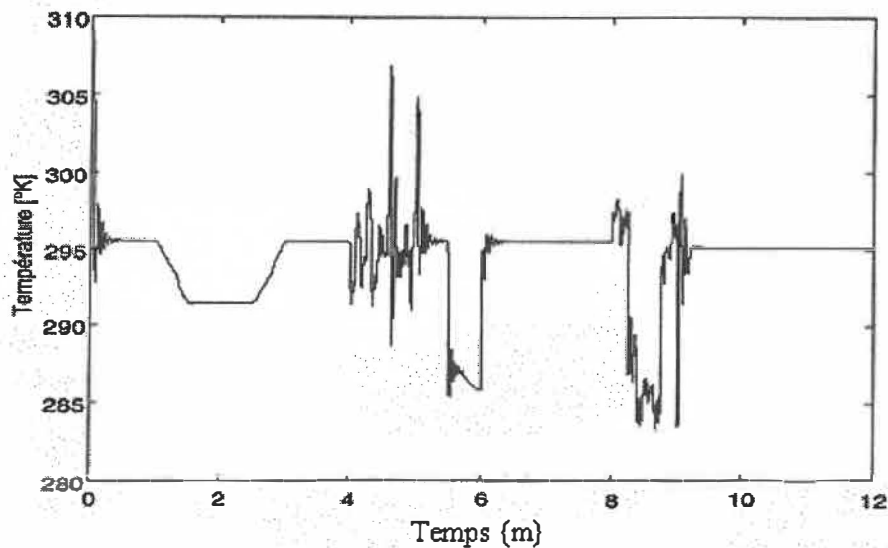
VI.6. Exploitation des résultats de simulation

VI.6.1. Pour une température extérieure variable

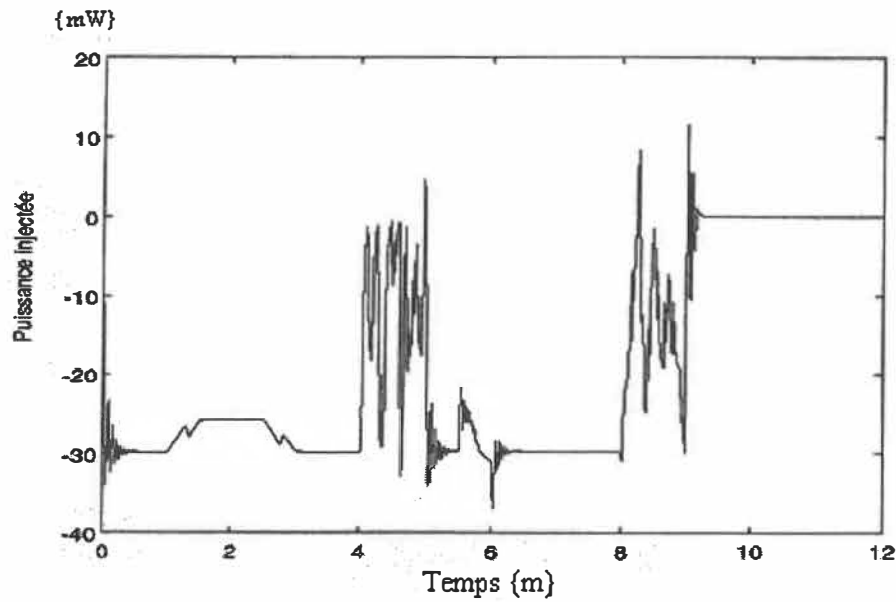
Les résultats de simulations sont présentés dans les figures VI-15, VI-16 et VI-17.



(Figure VI-15): Variations de T_a avec les variations de la température extérieure de la figure V-15.



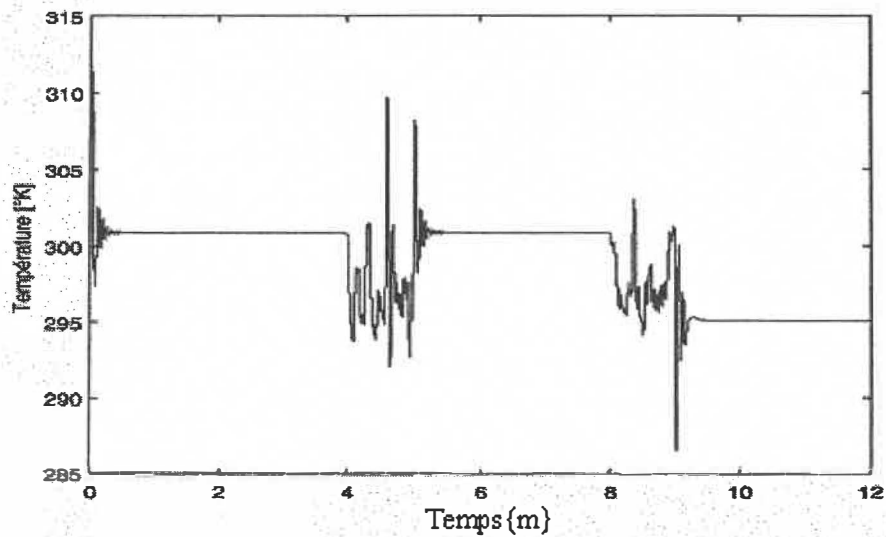
(Figure VI-16): Variations de T_b avec les variations de la température extérieure de la figure V-15.



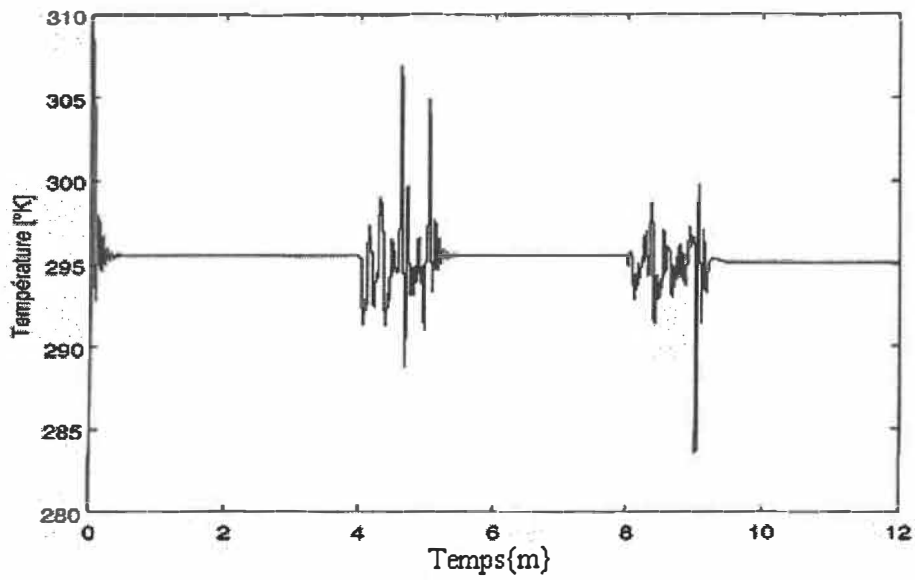
(Figure VI-17): Variations de $Q_{\text{rég.}}$ avec les variations de la température extérieure de la figure V-15.

VI.6.2. Pour une température extérieure constante

Les résultats de simulations sont présentés dans les figures VI-18, VI-19 et VI-20.



(Figure VI-18): Variations de T_a avec une température extérieure constante $T_{\text{ext}} = 295 \text{ } ^\circ\text{K}$.



(Figure VI-19): Variations de T_b avec une température extérieure constante $T_{ext} = 295$ °K.

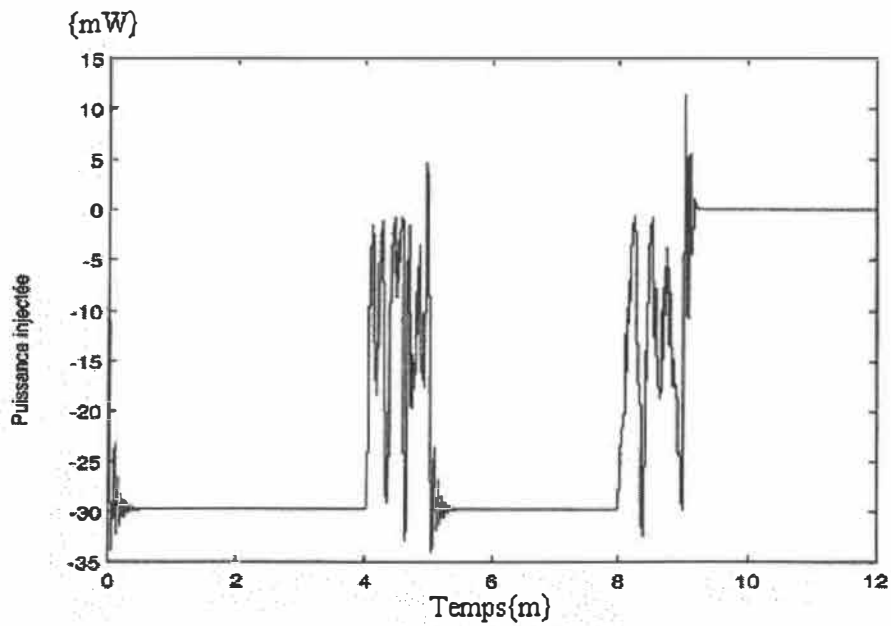


Figure VI-120): Variations de $Q_{rég.}$ avec une température extérieure constante

Malgré les fortes variations de la température extérieure et du pourcentage d'utilisation du processeur, les températures T_a et T_b restent dans des intervalles corrects.

Les variations de température du système, ainsi que la puissance injectée par le régulateur thermoélectrique, répondent aux critères de commande et par conséquent n'entraîneront pas une détérioration voire une destruction des composants.

Chapitre VII

Conclusion

Cette recherche a permis de toucher différentes domaines qui sont : la nouvelle technologie des systèmes électroniques, la mesure de température pour les micro et nanosystèmes, les régulateurs micro/nanothermoélectriques, la modélisation numérique et électrique et la commande des systèmes non linéaires. Les analogies entre les valeurs électriques et thermiques nous ont permis d'élaborer et de simuler le modèle mathématique et d'étudier son comportement.

L'originalité de ce projet a été d'apporter une contribution scientifique aux problèmes thermiques en électronique pour les micro/nanosystèmes en rassemblant différentes techniques déjà existantes : l'utilisation de régulateurs thermoélectriques au niveau micro nanométrique, et capable d'opérer dans les deux sens soit refroidissement et réchauffement.

La contribution se situe principalement dans le domaine de la modélisation par l'élaboration d'un modèle électrique équivalent à un ensemble de composants électriques en tenant compte des interactions mutuelles.

Les applications possibles de ce projet :

- Les cartes d'acquisition soumises à des conditions climatiques très rudes,
- Les systèmes ayant un fort gradient de température tels que les avions au décollage,
- etc...

Les développements futurs de ce projet devront permettre les améliorations suivantes :

- une expérimentation réelle du système pour la validation des modèles, et la vérification de la fonctionnalité du contrôleur dans des conditions réelles,
- la réduction du bruit dû à la présence de ventilateurs ainsi que la réduction de place prise par ces derniers.

Références

[ABIUS] <http://www.abit-usa.com>

[CEA] Commissariat à l'énergie atomique. <http://www.cea.fr>

[JMAG] <http://www.jri.co.jp/pro-eng/jmag/E/index.html>

[INTEL] <http://www.intel.com>

[ITR99] **Introduction à la microélectronique**. Guillien Robert/ 1ère éd. Paris : Presses universitaires de France 1999.

[ISDM] Jean P. Mercier, Gérald Zambelli, Wilfried Kurz, **Introduction à la science des matériaux** - 3e éd. ent. rev. et augm. Lausanne : Presses polytechniques et universitaires romandes, 1999.

[KRE67] F. Kreith, «**Transmission de la chaleur et thermodynamique**», Masson et Cie, 1997.

[KOD2003] K. AGBOSSOU «**Systèmes de mesure**», Notes de cours GEI-6035 Systèmes de mesure, Université du Québec à Trois-Rivières, Département de génie électrique, 2003/2004.

[LND] **Les Nanotechnologies/Dunod**. RATNER MARK, Upper Saddle River, NJ : Prentice Hall, c2003.

[M1C91] L. Michalski, K. Eckersdorf, J.McGhee, «**Temperature Measurement**», John Wiley & Sons Ltd, 1991.

[MIFAN] <http://www.mems.uc.edu/research/slide.html>

[MCG] T.D.MC Gee, «**Principles and Methods of Temperature Measurement**», John Wiley & sons Ltd, 1988.

[PDM] Alain Cornet, Françoise Hlawka, **Propriétés et comportements des matériaux : du microscopique au macroscopique** / Paris : Ellipses, 2003.

[PFEI] **Principes et fonctions de l'électronique intégrée** / Jacques Boucher, Jean Simone. Toulouse, France : Cépaduès, 1989-1995.

[SIM96] R.E. Simons, Electronic Cooling applications, «**Direct liquid immersion cooling for high power density microelectronics**», Electronics cooling, Vol. 2, No. 2, mai 1996.

[UNILIM] Université de Limoges/France. <http://www.unilim.fr/semi-conducteurs>