

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
جامعة سعد دحلب بليدة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA
كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie
قسم للإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Projet de Fin d'Études

présenté par

MEDDAHIAbelkrim

&

REZIGDjamel

Pour l'obtention du diplôme Master en Électronique option Microsystème et conception de circuits électriques.

Thème

Etude et conception d'un micro capteur de température et simulation sous COMSOL 4.3

Proposé par : Mme ASSAD Zakia

Année Universitaire 2012-2013

Remerciements

Je remercie ALLAH le Tout-puissant de m'avoir donné le courage, la Volonté et la patience de mener à terme ce présent travail.

Nous tenons à remercier notre promotrice Mme Assad Zakia nous avoir encadré, aidé et encouragé pour mener à bien ce travail.

Sans oublier, Mme BOUGHERI Nadia,

Mme NACEUR, Mme BOUGHERI Hamida pour leur soutien et conseil qui nous ont incité à aller de l'avant.

Nous remercions également les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait de juger notre travail.

MEDDAH Abdelkrim.

REZIG Djamel.

ملخص:

الأنظمة المصغرة هي مركبات تقوم بوظائف الكترونية, ميكانيكية و ضوئية في نفس الشريحة. الهدف من هذه المذكرة هو دراسة لاقط مصغر لقياس الحرارة باستعمال المحرار الزوجي وقمنا بالمحاكاة بالاستعانة ببرنامج COMSOL قبل امكانية الانشاء.

كلمات المفاتيح: لاقط مصغر ، محاكاة .

Résumé :

les microsystèmes sont des composants miniaturisés réunissant des fonctions électroniques, mécaniques et optiques sur la même puce. L'objectif de ce mémoire est de concevoir un micro capteur de température à thermocouple et nous avons procédé une simulation à l'aide du logiciel COMSOL 4.3, en vue d'une éventuelle réalisation.

Mots clés : MEMS ; micro capteur ; simulation ; COMSOL.

Abstract :

The microsystems are miniaturized components gathering (combining) electronic, mechanical and optical functions (offices) on the same flea (chip). The objective of this report is to conceive (design) a micro sensor of temperature in thermocouple and we proceeded to a simulation by means of the software COMSOL 4.3, with the aim of a possible realization.

Keywords: MEMS; microsensors; simulation; COMSOL.

Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Généralités sur les MEMS	
I.1.Introduction.....	3
I.2. Définition d'microsystème.....	3
I.3. Succès des microsystème.....	4
I.4. Domaine d'application microsystèmes.....	4
I.5. Conception microsystèmes.....	5
I.6. Technologies de micro-fabrication des microsystèmes.....	6
I.6.1. Matériaux utilisés en microsystèmes.....	7
I.6.1.1. Le silicium.....	8
I.6.1.2. Dérivés de silicium.....	10
I.6.2. Principe général de fabrication des microsystèmes.....	11
I.6.2.1. Le nettoyage.....	11
I.6.2.2. Le dépôt.....	12
I.6.2.3. Le dopage.....	13
I.6.2.4. La lithographie.....	14
I.6.2.5. La gravure.....	14
I.6.2.5.1. Micro usinage de volume.....	15
I.6.2.5.2. Micro usinage de surface.....	15
I.7. Conclusion.....	16
Chapitre II : Les capteurs et les micros capteurs de température	
II.1.Introduction.....	18
II.2.Généralités	18
II.3.Définition	18
II.4.les différentes familles de capteurs	19
II.4.1. Capteurs actifs	19
II.4.1.1. Les effets physiques les plus classiques sont	19

II.4.2. Capteur passif	20
II.5. Les Capteurs température	21
II.5.1. Principe de fonctionnement	21
II.5.2. Les type de capteur de température	22
II.5.2.1. Les capteurs actifs	22
II.5.2.1.1. Le thermocouple	22
II.5.2.1.1.1. Principe de fonctionnement du thermocouple.....	23
II.5.2.1.2. Les capteurs à jonction semi-conductrice	24
II.5.2.2. Les capteurs passifs	25
II.5.2.2.1. Capteur de température de type résistance	26
II.5.2.3. Autres capteurs de température	29
II.6. Comparaison entre les types de capteur de température	29
II.7. Conclusion	30
Chapitre III : Micro capteur de température de type thermocouple.	
III.1. Introduction	32
III.2. Historique.....	32
III.3. Thermométrie par thermocouple.....	33
III.3.1. Caractères généraux-sensibilité thermique.....	33
III.3.2. Effets thermoélectriques	36
III.3.3. Principaux types de thermocouples et caractéristiques d'emploi.....	40
III.3.4. Les différents types de thermocouples	41
III.3.5. Mise en œuvre et dispositifs de mesure	42
III.4. Conclusion.....	47
Chapitre IV :simulation et conception	
IV.1 Introduction	49
IV.2. Présentation du logiciel COMSOL.....	49
IV.3. Modélisation d'un thermocouple.....	50

IV.3.1. Équation Modèle	50
IV.4. La simulation	51
IV.4.1. Géométrie du modèle	51
IV.4.2. Les matériaux	51
IV.4.3. Maillage de la structure	52
IV.4.4. Exploitation des résultats de simulation	54
IV.5. Conclusion	56
Conclusion générale	58
Références bibliographique.	
Annexe.	

Liste des figures

Figure I.1: Application des microsystèmes dans le domaine d'automobile.....4

Figure I.2 : Application des microsystèmes dans les satellites et dans l'avioniqu...5

Figure I.3: Domaines mis en jeu dans la fabrication et le fonctionnement des MEMS.....6

Figure I.4: Les techniques de fabrication en microélectroniques.....7

Figure I.5: Lot de wafer.....8

Figure I.6 : Divers plans et orientation des méplats du wafer.....9

Figure I.7 : Les différents axes et plans cristallographiques pour un cube cristallin.....9

Figure I.8 : Les étapes technologiques de fabrication des microsystèmes.....11

Figure I.9 : Méthode de centrifugation par moyen d'une tournette.....13

Figure I.10 : Procédé de lithographie.....14

Figure I.11 : Réalisation d'une structure de type cantilever par micro usinage de volume.....15

Figure I.12 : Réalisation d'une structure de type cantilever par micro usinage de surface.....15

Figure II.1 : Schéma de principe de fonctionnement du capteur.....21

Figure II.2 : Principes de l'effet Seebeck et du thermocouple.....23

Figure II.3 : Force électromotrice de Peltier.....23

Figure II.4 : Métal homogène A.....24

Figure II.5 : Assemblage de deux métaux homogène A & B.....24

Figure II.6 : Représentation schématique d'une caractéristique courant-tension d'une diode de silicium.....	25
Figure II.7 : Structure d'un capteur de température.....	26
Figure II.8 : Evolution de la résistance relative en fonction de la température pour le matériau exploité.....	27
Figure II.9 : Capteurs de flux platine intégrés dans un canal.....	27
Figure II.10 : Micro résistance chauffante libérée.....	28
Figure II.11 : Plateforme sur substrat métallisations sur une face du substrat.....	28
Figure III.1 : Relation Température/ f.é.m. pour le thermocouple considéré.....	34
Figure III.2 : variation thermique de la <i>f.é.m.</i> de différents types de thermocouple.....	34
Figure III.3 : variation thermique du pouvoir thermoélectrique de différents types de thermocouples.....	35
Figure III.4 : effet Peltier.....	36
Figure III.5 : Effet Thomson.....	37
Figure III.6 : Effet Seebeck.....	38
Figure III.7 : Schéma de principe de la liaison d'un thermocouple à un appareil de mesure.....	43
Figure III.8 : Mesure au millivoltmètre de la f.é.m. d'un thermocouple.....	45
Figure III.9 : Câbles de compensation.....	46

Figure.IV.1 :la géométries de la structure thermocouple.....	51
Figure IV.2 : chargement de matériaux.....	52
Figure IV.3 : Maillage extrêmement fin.....	53
Figure IV.4 : chargement de température.....	54
Figure IV.5 : transfère de la température dans la surface	54
Figure IV.6 : potentiel en fonction de température.....	55
Figure IV.7 : la transfère de température dans le volume.....	55

Liste des tableaux

Tableau I.1: Propriétés physiques de divers matériaux utilisés en microsystèmes.....	10
Tableau I.2 : Sources de contamination et leurs effets.....	12
Tableau II.1 :les effets physique	20
Tableau II.2 :capteur passif	20
Tableau II.3 : le principe physique en fonction d'une mesurande.....	22
Tableau II.4 : la caractéristique électrique sensible et les types de matériaux utilisés....	25
Tableaux II.5 : comparaison entre les types de capteur de température.....	29
Tableau III.1 : principaux types de thermocouples et leurs limites d'emploi.....	41

Introduction générale

Introduction générale :

Le capteur, premier élément d'une chaîne de mesure, est par définition un composant qui traduit une grandeur physique, telle une variation de température ou pression, en une grandeur généralement électrique.[1]

Son rôle est de donner une image interprétable d'un phénomène physique de manière à l'intégrer dans un processus plus vaste.

Le capteur forme ainsi une partie centrale fondamentale de l'interface entre le monde physique et le monde électrique.[2]

Dans notre étude nous nous sommes intéressés au capteur de température, dont les applications dans la vie courante sont très vastes, nous le trouvons dans le domaine médical, en météorologie ou en gastronomie.

Après avoir fait un tour d'horizon sur les différents capteurs de température, nous avons opté pour le capteur à thermocouple car il est plus simple à modéliser et donc à simuler sous COMSOL.

A ce titre, notre mémoire s'enchaîne comme suit :

Dans le premier chapitre, nous présentons l'état de l'art des MEMS

Le deuxième chapitre concerne les capteurs et le micro capteur de température en général

Dans le troisième chapitre, nous avons étudié et modélisé le micro capteur à thermocouple

Dans le quatrième chapitre, nous présentons la simulation sous COMSOL.

Enfin, nous terminons par une conclusion et perspectives.

Chapitre I :

Généralités sur les MEMS

I.1. Introduction :

Sans doute, l'une des plus excitantes évolutions technologiques au cours de la dernière décennie du 20ème siècle est le domaine des microsystèmes (MEMS). La technologie MEMS a pu profiter des avantages et des innovations créées pendant la révolution de la technologie des circuits intégrés (CI) en termes de procédés, équipements et matériaux. Étant donné qu'une structure MEMS comporte un empilement de couches de matériaux, chacun a un rôle critique, rassemblées parfois sur un même substrat. La compréhension des MEMS exige, à part des connaissances physique et électronique, une maturité dans la connaissance des matériaux utilisés pour construire les dispositifs ainsi que leurs propriétés. Dans la suite, une présentation d'une sélection de matériaux les plus répandus dans les procédés de fabrication des MEMS, sera présentée. Par la suite, nous nous attarderons sur les différentes techniques de fabrication des microsystèmes, compatible microélectronique, accessible industriellement ou au niveau de laboratoire. [3]

I.2. Définition d'un microsysteme:

Un microsysteme est un composant micrométrique destiné à manipuler ou détecter des paramètres physiques de son environnement. Ce concept est défini de différentes manières. En Europe, MST "Micro System Technologie" est un dispositif miniaturisé avec capteurs et/ou actionneurs, doté d'une électronique pour le traitement d'information. Au Japon, "Micro Machining Technology" est défini comme un dispositif réalisant des tâches complexes à l'échelle microscopique. Enfin, il est défini comme MEMS aux Etats-Unis, et désigne des systèmes miniaturisés électromécaniques fabriquées en technologie microélectronique (fabrication IC, Integrated Circuit). [4] [5] [6].

Ces notions ont beaucoup évoluées vue les différentes orientations des microsystèmes et les différentes applications utilisant les différents phénomènes physiques : thermique, magnétique, fluide, optique, etc.

Aujourd'hui diverses notions existent:

- Microsystèmes : capteurs/Actionneurs.
- MOEMS : microsystèmes optiques "Micro Opto ElectroMechanical System".

- RF-MEMS : switcher RF, composants passifs variables, résonateurs, filtres antennes, etc...
- BioMEMS : puce ADN, microréacteur chimique, micro valve/micro pompe, etc...

Souvent le terme « MEMS » est utilisé pour désigner les dispositifs miniaturisés, même si ceux-ci n'ont pas des fonctions électroniques ou mécaniques [7].

I.3. Succès des microsystèmes :

Les microsystèmes sont intégrés dans diverses applications, avec un grand succès économique dont on trouve des MEMS pour les airbags, têtes d'imprimante à jet d'encre, écrans géant, etc. De plus, ils sont intégrés sur des puces de quelques millimètres carrés, et sont connues pour être : robustes,

Fiables, utiles pour la détection et son produit à faible coût. Le succès des microsystèmes est dû aux atouts qu'ils procurent :

- La réduction de la taille, du poids et de la consommation d'énergie.
- L'amélioration des performances (vitesse de détection, sensibilité)
- La découverte de nouvelles propriétés et fonctionnalités.

I.4. Domaine d'application des microsystèmes :

Les microsystèmes s'imposent dans les domaines où leurs caractéristiques ont un réel avantage. Parmi les domaines d'application touchés par les microsystèmes, nous citons les domaines suivants:

➤ L'automobile :

Ce secteur est le plus grand domaine d'application des microsystèmes, [8]. Les applications automobiles profitent des avantages des microsystèmes en termes de coût et d'intégration et également en termes de taille et d'encombrement et la possibilité d'être interrogés à distance (cas des capteurs de pression dans les roues avec communication radiofréquences). La figure I.1 montre l'intégration de microsystèmes permet la multiplication de capteurs et des systèmes de mesure dans un modèle de voiture.

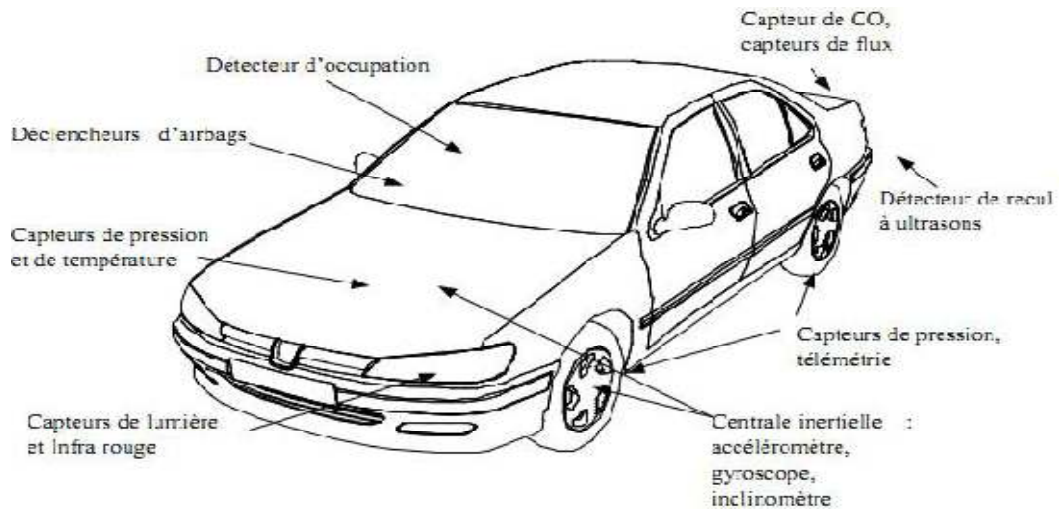


Figure I.1: Application des microsystèmes dans le domaine d'automobile.

➤ **Le spatial et l'avionique :**

La figure suivante montre les applications microsystèmes dans les microsattelites, [8], qui sont listées ci-dessous.

- Mesure inertielle. Accéléromètre, gyroscope,
- Stabilisation : capteur de terre, capteur d'étoile, ...
- Propulsion: micro propulseur, ...Etc.

En profitant des très petites dimensions des microsystèmes, il est possible d'intégrer un réseau de capteurs distribués qui fournissent une mesure de la pression et le flux d'air tout point, ainsi que les contraintes dans les matériaux ou de la température.

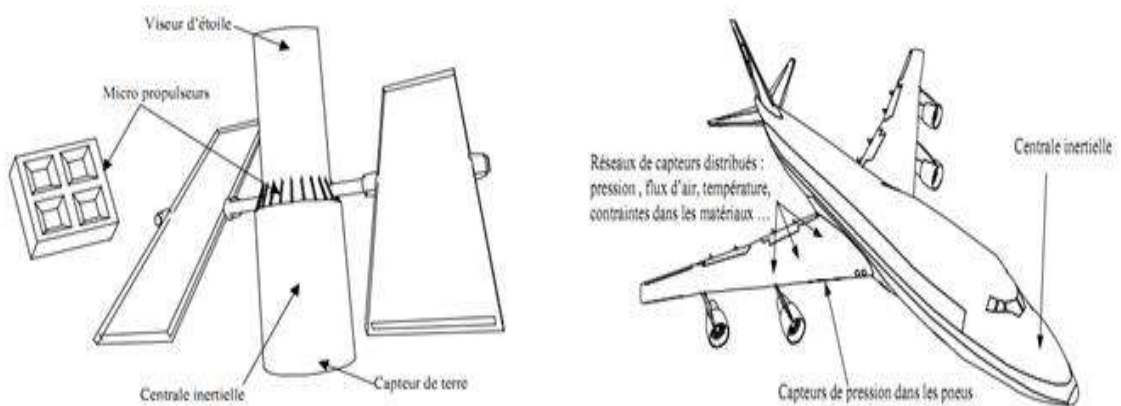


Figure I.2 : Application des microsystèmes dans les satellites et dans l'avionique.

I.5. Conception des microsystèmes :

La conception des MEMS bute sur de nombreux écueils : la coexistence de nombreux phénomènes physiques couplés (fig. I.3), les non-linéarités fortes (matérielles et géométriques) et les incertitudes importantes sur les dimensions géométriques des MEMS (dispersion), sur certains paramètres soumis aux procédés de fabrication (contraintes résiduelles), voire sur les propriétés des matériaux utilisés (module d'Young, coefficient de poisson, etc.) [9].

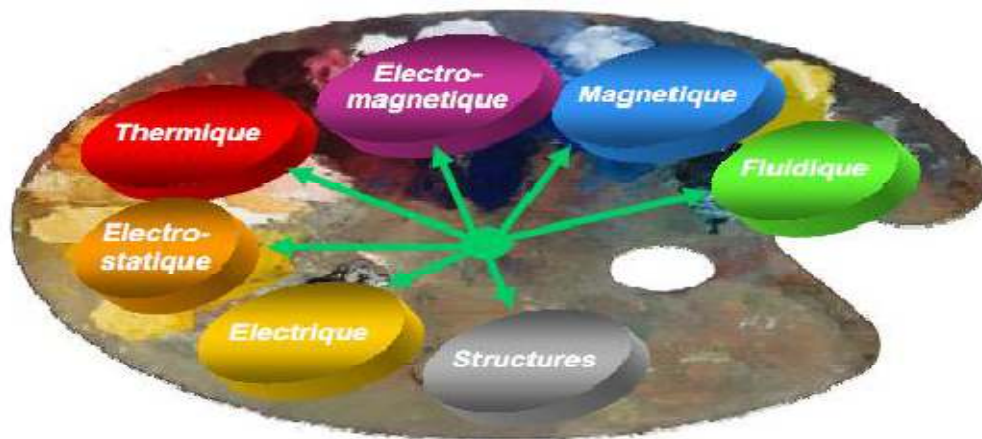


Figure I.3: Domaines mis en jeu dans la fabrication et le fonctionnement des MEMS.

La conception des microsystèmes suit le flot suivant :

- Le dessin du masque et la conception au niveau du plan ou schéma : ce sont les éditeurs de plans et les outils de vérification de règles de dessin.
- La simulation de procédé technologique: les simulateurs de procédé semi-conducteur et les simulateurs de gravure (Intellisuite, etc.).
- La simulation de composant : les simulateurs Eléments Finis (Solidworks, ansys, etc.)
- Vérification et mesures : validation de la simulation
- Analyse et contrôle de la conception (Optimisation)

Devant le panel d'outils dédiés à la conception des microsystèmes, il est nécessaire que ces outils puissent être couplés par transferts de données (importation/exportatio

I.6. Technologies de micro-fabrication des microsystèmes :

La technologie de fabrication MEMS est issue de la technologie microélectronique (fig. I.4) [5] [6][7]. Les techniques de cette dernière, peuvent être classées principalement en trois catégories : techniques additives (dépôts de couches minces, épitaxie, etc.), techniques de transfert de motifs (photolithographie) et les techniques soustractives (gravure humide et sèche, RIE, ...).

La différence qui existe entre la fabrication MEMS et celle de la microélectronique réside dans les matériaux utilisés.

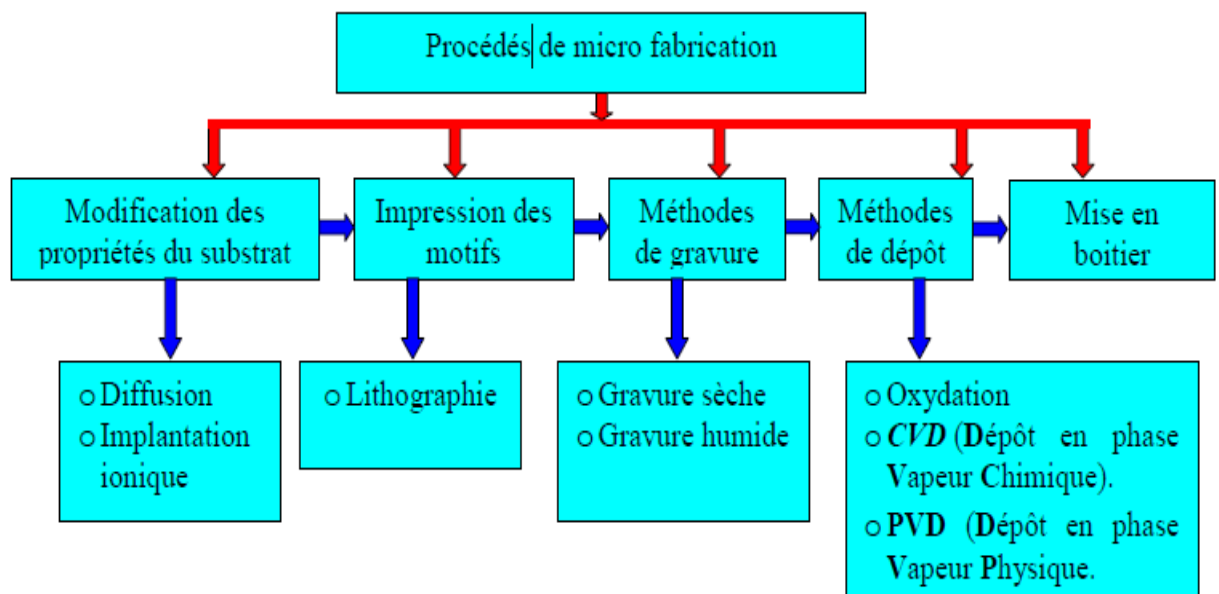


Figure I.4: Les techniques de fabrication en microélectroniques.

La fabrication des MEMS permet la réalisation de microstructures de types (cantilever, pont et membrane minces). Ces principales méthodes de fabrication sont: le micro-usinage de surface et de volume.

Il existe d'autres procédés utilisés pour la fabrication de MEMS, tels que :

- Les technologies HARM telles que le LIGA (lithographie, électrodéposition par bain d'électrolytes et moulage) [10].
- le micro-usinage par électroérosion (EDM).

I.6.1. Matériaux utilisés en microsystèmes :

Les microsystèmes sont réalisés avec diverses variétés de matériaux comprenant les verres, les céramiques, les polymères, les métaux, et divers autres alliages, [5][6][7].

Le choix du matériau utilisé est basé sur les propriétés électriques, physiques et mécaniques mises en œuvre dans l'orientation du microsystème à réaliser. En RF/MEMS, c'est la résistivité du matériau qui est recherché. En MOEMS c'est la transparence du matériau, vis-à-vis des longueurs d'ondes utilisées en télécommunications, qui est le critère de base. Pour les BioMEMS, la compatibilité du matériau avec son environnement est exigée.

I.6.1.1. Le silicium :

Le silicium est le matériau de base en microsystèmes. Il est obtenu par sciage d'un lingot cylindrique de silicium tiré par le procédé de Czochralski (A1). Il est livré sous la forme d'un wafer (fig. I.5) circulaire [11] où le diamètre peut atteindre plus de 300mm et l'épaisseur varie entre 180 μ m et 450 μ m [11]. Il est considéré comme une plateforme qui permet d'intégrer des fonctions électroniques, mécaniques, etc.[12]. Ce choix repose sur diverses raisons :

- Il est disponible, bien connu (utilisé en microélectronique) et bien caractérisé
- Ses propriétés physiques et mécaniques sont intéressantes pour de nombreuses applications.
- Il possède un coefficient de piézorésistivité important, un module d'Young, lui procurant une bonne élasticité qui est utile pour les parties mécaniques.
- Son usinabilité est à faible coût et bien maîtrisée. De plus, il est l'un des rares matériaux qui puisse être fabriqué sous forme de monocristal de façon économique.



Figure I.5: Lot de wafer.

➤ **Caractéristique du wafer :**

Le wafer est doté de paramètres spécifiques (orientation, dopage, épaisseur, polissage, etc.). Sur le bord du wafer deux méplats sont taillés :

- Un méplat principal (le plus grand) qui permet d'aligner de façon bien précise les motifs des circuits à réaliser par rapport à la direction principale du substrat, lors de la première photolithographie.
- Un second méplat (le plus petit), ayant une orientation précise par rapport au méplat principal. Il permet de déterminer l'orientation (fig.I.6) et le type de dopage (n ou p) du substrat.

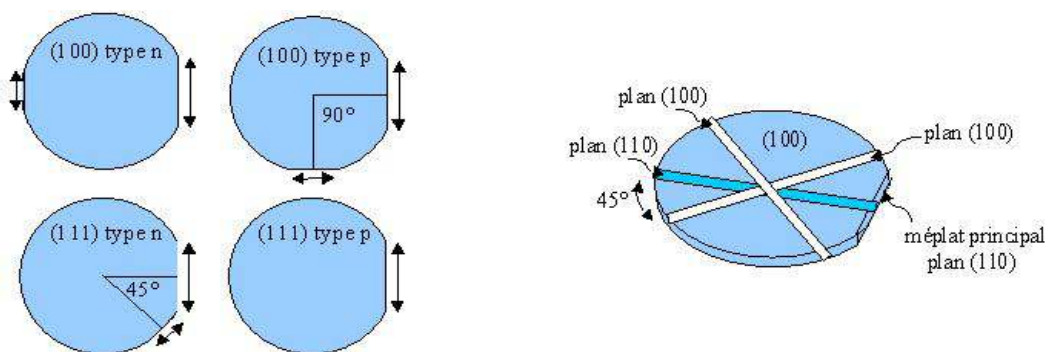


Figure I.6 : Divers plans et orientation des méplats du wafer.

Les mailles cubiques (fig. I.7) représentent un plan (100), deux plans équivalents (110) et un plan (111). Les directions cristallographiques notées entre crochets sont perpendiculaires aux plans de mêmes chiffres notés entre parenthèses

- Les plans (111) forment un angle de 54.74° avec les plans (100).
- Les plans (110) forment des angles de 35.26° , 90° ou 144.74° avec les plans (111)

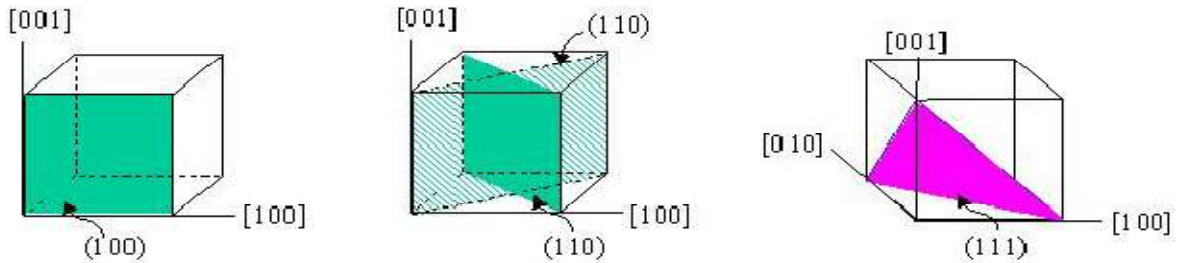


Figure I.7 : Les différents axes et plans cristallographiques pour un cube cristallin.

L'angle existant entre les plans (100) et (111) est particulièrement important. En effet, le micro usinage utilise beaucoup de solutions alcalines comme les hydroxydes de potassium (*KOH*) qui présente une sélectivité envers les plans (100) du silicium et non envers les (111). Le résultat de ces gravures chimiques est donc des cavités, délimitées par des plans (111). Pour identifier les plans cristallins d'un wafer de silicium, les fabricants de substrats effectuent une coupe sur un côté de ce dernier, suivant un code prédéfini. On trouve le plus souvent sur le marché des wafers de type (100), orientés « préférés » en technologie CMOS. En plus de l'orientation, le constructeur spécifie généralement le type d'impureté utilisé pour augmenter la conductivité (*n* ou *p*) ainsi que la résistivité.

I.6.1.2. Dérivés de silicium :

Ils existent d'autres matériaux pouvant être utilisés comme substrat tels que : les polymères et plastiques, les métaux, les céramiques, le quartz et les verres, [5][6][13]. Ils sont considérés comme plateforme des microsystemes, lorsque ceux-ci sont réalisés sur la surface des wafers de base. Dans ce cas, les propriétés du matériau ne sont pas importantes (reste la comptabilité avec l'environnement et l'équipement utilisé).

Les propriétés du matériau sont importantes lorsque les dispositifs sont formés dans le substrat lui-même. Suivant l'application visée le matériau est choisi en conséquence, d'où :

- Le quartz et les verres sont utilisés dans les capteurs/actionneurs. Ceci grâce à l'effet piézoélectrique qui domine dans ce type de matériau.
- Les verres et les polymères sont utilisés dans les applications biomédicales. Ceux-ci en plus qu'ils soient biocompatibles, ils sont maniables et transparent. Ils peuvent être choisis pour d'autres considérations tels que le coût du matériau et les matériels utilisés pour la fabrication.

Les MEMS sont fondés sur les technologies de type « film mince » [14].

Le tableau ci-dessous montre les propriétés physiques de divers matériaux utilisés en microsystèmes [12].

Propriétés	Silicium	SiO ₂	Poly- Si	Quartz	Al	Si ₃ Ni ₄
Module d'Young (GPa)	190	73	160	107	70	323
Coefficient de Poisson	0.22	0.17	≈0.2	0.16	0.33	0.25
Densité (g/cm ³)	2.3	2.3	2.331	2.6	2.7	3.1
Stress (GPa)	7	8.4	variable	9	0.17	14
Dilatation thermique (10/K)	2.3	0.55	2.8	0.55	24	3
Conductivité thermique à 300K (W cm ⁻¹ . K-1)	1.57	0.014	0.028	0.0138	2.37	0.19
Température de fusion (°C)	1415	1700	1400	1610	660	1800

Tableau I.1: Propriétés physiques de divers matériaux utilisés en microsystèmes.

Remarque :

Le choix du substrat repose sur divers critères et contraintes :

- Le matériau utilisé pour des produits ciblés (tels que les commutateurs qui sont généralement, fabriqués sur un substrat en silicium, en quartz ou en verre).
- Le coût, la technologie utilisée et les contraintes électriques, mécaniques et thermiques,

I.6.2. Principe général de fabrication des microsystèmes :

Le principe de fabrication repose sur une série d'étapes technologiques (fig. I.9).

La réalisation de structures sur ou dans un substrat passe par le dépôt de couches qui vont servir soit de masque de gravure ou de structures [6][13].

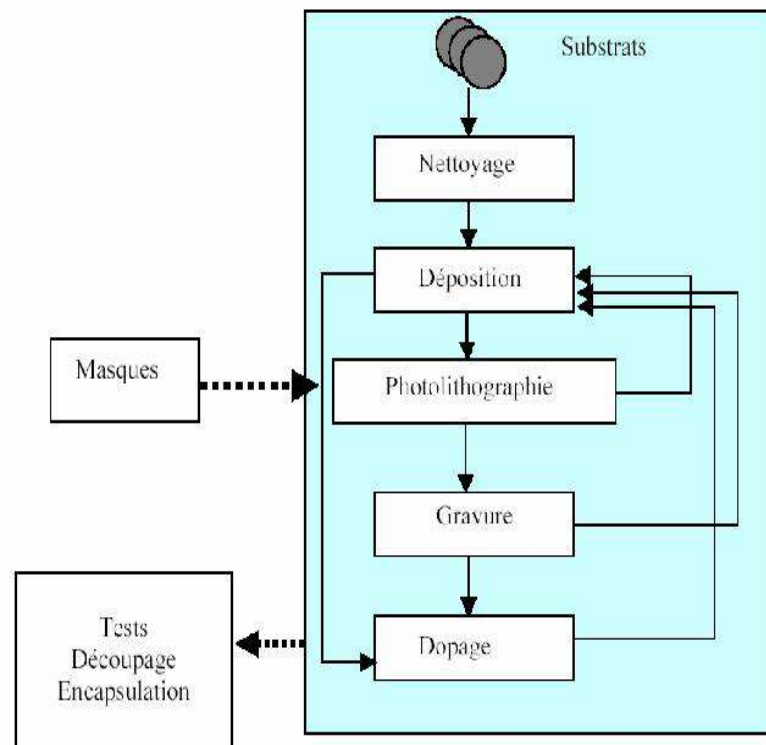


Figure I.8 : Les étapes technologiques de fabrication des microsystèmes.

I.6.2.1. Le nettoyage :

Cette opération est nécessaire pour enlever tout ce qui n'est pas du silicium. Le tableau I.2 indique les sources de contamination et leurs effets [13]. Le protocole de nettoyage des microsystèmes est donné en annexe.

Contamination	Sources	Effets
Organique	Traces de résine, équipement, humains, lubrifiant...	Courant de fuite, comportement bizarre des gravures sèche
Ions métalliques	Produits chimique contenant : Na^+ , K^+ , Ca^{+2}	durée de vie faible
Particules	Produits chimiques, eau, gaz, équipements, humains...	Courts-circuits, tentions de claquage faible dans les isolants,...
Atomique	Produits chimiques : Au, Fe, Cr, Cu, etc.	Courts-circuits, mauvaise performances,

Tableau I.2 : Sources de contamination et leurs effets.

I.6.2.2. Le dépôt :

Cette étape consiste à déposer des films minces de résines (typiquement de 2 μm d'épaisseur) par centrifugation, sur le substrat de base fixé sur une tournette (fig. I.10). Généralement, on commence par le dépôt d'un promoteur d'adhérence HMDS (l'hexamethyldisilazane) sur la surface afin d'améliorer l'adhérence résine/substrat[13]. L'application du HMDS peut s'effectuer à froid ou à chaud.

Dans la fabrication des microsystemes, on utilise deux types de résines en fonction du résultat attendus :

- **Résine positive :**

L'étape de développement conduit à l'élimination de la résine insolée au travers du masque, découvrant ainsi des ouvertures vers le substrat qui dessinent la structure en négatif.

- **Résine négative :**

L'étape de développement conduit à l'élimination de la résine non insolée (non exposée à l'UV), laissant ainsi la résine polymérisée sur le substrat qui dessine la structure en positif. Elle est plus difficile à utiliser, sert souvent de structure mécanique (résine épaisse nommée SU-8).

Remarque:

Le choix des vitesses de rotation et l'épaisseur de la résine sont donnés par le constructeur de la résine. Plus elles sont fines, plus la précision de la lithographie sera grande, mais moins elles résisteront pendant les étapes de fabrication.

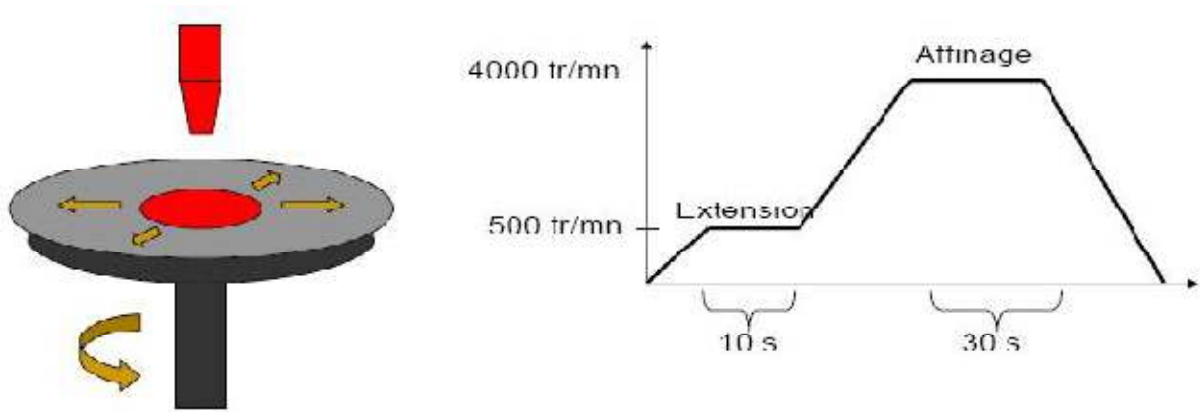


Figure I.9 : Méthode de centrifugation par moyen d'une tournette.

I.6.2.3. Le dopage :

Cette méthode consiste à ajouter une impureté en petites quantités à une substance pure pour modifier ses propriétés de conductivité électrique afin de réaliser des jauges et stopper une opération de gravure. Il existe plusieurs méthodes pour effectuer le dopage d'un matériau :

- **Dopage par diffusion :**

La diffusion des espèces dopantes dans le matériau est réalisée dans un four dont la température varie entre 850 °C et 1150 °C. Le dopant peut être obtenu à partir d'une source solide, liquide ou vapeur.

- **Dopage par implantation ionique :**

Cette méthode permet d'utiliser une grande variété d'éléments dopants (n ou p). Elle consiste à accélérer des impuretés ionisées avec un champ électrique, afin de leur conférer l'énergie nécessaire pour diffuser dans le matériau à doper.

Remarque : Les éléments dopants sont respectivement le phosphore (type n) et le bore (type p). Ils permettent d'augmenter la conductivité du matériau.

I.6.2.4. La lithographie :

On distingue plusieurs familles de techniques de lithographie (fig.I.11) en fonction de la longueur d'onde de la source du rayonnement utilisé : source à rayons X, source à électrons, source à faisceau d'ions, source de lumière visible, UV, etc. Evidemment plus la longueur d'onde est faible, plus la précision est grande

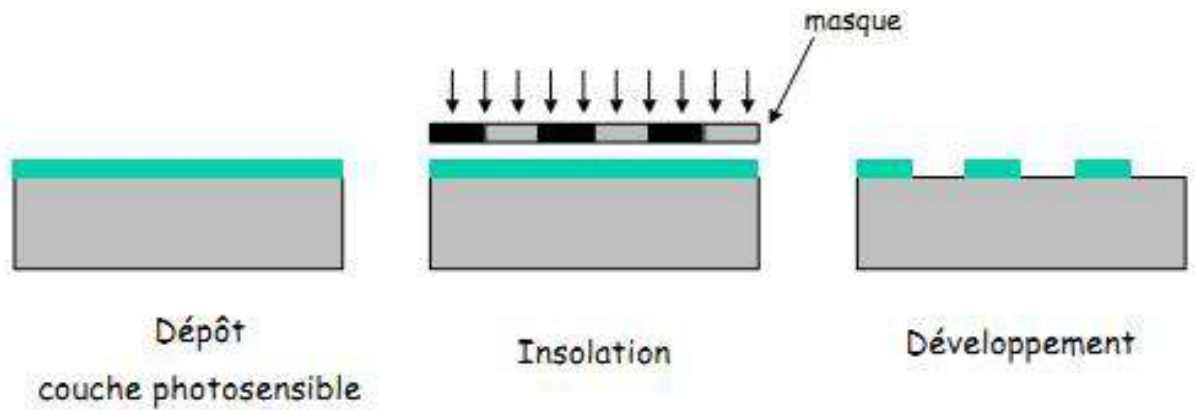


Figure I.10 : Procédé de lithographie.

Cette technique permet d'insoler la résine à travers un masque, préalablement déposé sur un substrat de façon à dessiner une structure ou un élément de structure, puis passer au développement de la résine insolée avec un solvant.

Les masques utilisés sont en général des plaques de quartz sur lesquelles un dépôt de chrome formant le motif a été réalisé, dans la plupart des cas, à l'aide d'un faisceau d'électrons avec une précision de l'ordre de la fraction de micron.

Remarque : Il n'est a priori pas possible de fabriquer un objet avec une précision géométrique supérieure à celle du masque.

I.6.2.5. La gravure :

Les microstructures sont formées directement à partir d'une gravure humide ou sèche du substrat en silicium ou autre. Ce procédé permet l'enlèvement de matière aux endroits qui sont restés exposés après l'étape de photolithographie, de manière sélective d'un matériau et de manière isotrope ou anisotrope. Les principales méthodes de fabrication en microsystemes sont les techniques de gravure en usinage en volume et en surface.

I.6.2.5.1. Micro usinage de volume :

Il permet de réaliser des structures passives ou actives dans le volume du substrat utilisé. Les premières microstructures (capteurs/ actionneurs) ont été réalisés par ce procédé, basé sur les techniques de fabrication en microélectronique, [12].

Le concept général est un usinage sélectif des structures dans le substrat, qui peut être réalisé par gravure sèche ou humide. Diverses structures (fig.I.12) peuvent être réalisées tels que les cantilevers, les ponts et les membranes [15].

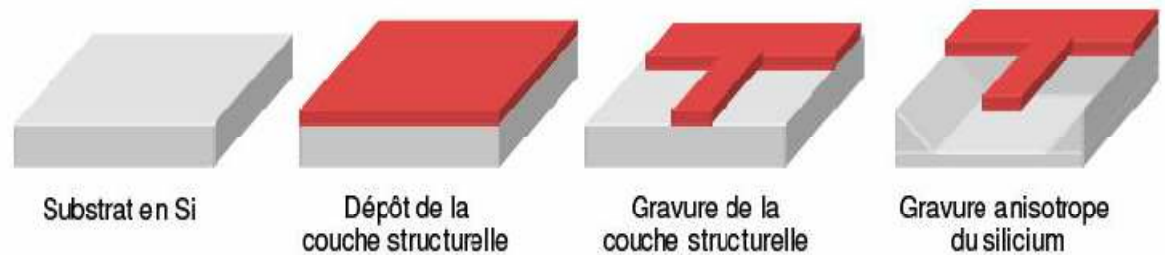


Figure I.11 : Réalisation d'une structure de type cantilever par micro usinage de volume.

Ce procédé permet d'avoir de grands et larges dispositifs homogènes, qui ont des structures uniformes (même matériau par rapport au dépôt de couches minces), ce qui permet d'éviter les problèmes de fissures ou de forces capillaires. De plus, il est peu coûteux et bien maîtrisé en fabrication des circuits intégrés sur silicium.

I.6.2.5.2. Micro usinage de surface :

Cette technique mise en œuvre exclusivement pour la fabrication de MEMS, et vient par opposition au micro usinage de volume. Les microstructures sont réalisées sur la surface du substrat, considéré dans ce cas comme une plateforme du dispositif à réaliser [5][6].

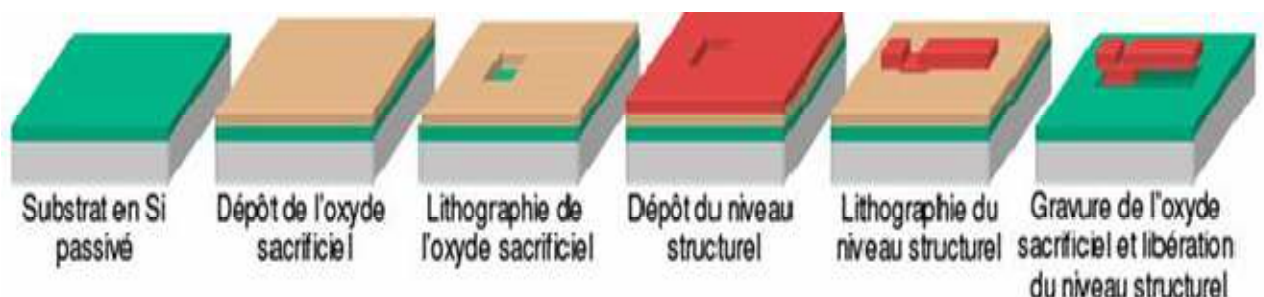


Figure I.12 : Réalisation d'une structure de type cantilever par micro usinage de surface.

Le principe consiste en un empilement des couches sacrificielles disposées au-dessus du substrat (fig.I.13), suivant le motif à imprimer, puis supprimées à la fin du processus de fabrication par gravure sélective [16].

Le silicium, le dioxyde de silicium SiO_2 et le polysilicium sont les plus utilisées dans cette technique. Le SiO_2 est utilisé comme couche sacrificielle et le polysilicium pour la structure mécanique. Cette disposition est justifiée par le fait que :

- Le SiO_2 est de même nature mécanique que le silicium, la gravure humide par HF permet de dissoudre complètement le dioxyde sans aucune influence sur la couche de polysilicium.
- La possibilité de dopage du polysilicium et le dioxyde pendant et après les divers techniques de fabrication. Cette méthode est efficace pour obtenir des structures mobiles fines de type cantilever et pont. Elle est dépendante des techniques et des équipements de dépôts de couches minces

I.7. Conclusion :

Dans cette partie, nous avons établi une étude bibliographique sur les microsystemes. C'est ce qui nous a induits à connaître :

La notion de microsysteme et leurs domaines d'application. Les microsystemes connaissent et vont connaître un développement considérable de part leurs applications qui intéressent de nombreux secteurs de l'activité industrielle (l'automobile, télécommunications, aéronautique, spatial, ...).

- Les matériaux mis en jeu, dont le silicium est le matériau de base.

Les méthodes de fabrication les plus utilisées sont :

- L'usinage de surface qui est bien maîtrisée en technologie microélectronique, permettant la fabrication de microstructure à faible coût.
- L'usinage de volume assure la réalisation des structures minces et complexes.

Nous allons maintenant entrer dans des considérations de conception de capteur et de micro capteur de températures.

Chapitre II

Les capteurs et le micro capteur de température

II.1. Introduction :

« Ce monde est pénétré des applications de la mesure ; toute connaissance, non mesurable, est frappée d'un jugement de dépréciation. Le nom de « science » se refuse de plus en plus à tout savoir intraduisible en chiffre. » — Paul Valéry, 1982

Cette affirmation de Paul Valéry est plus que d'actualité. Notre monde va être de plus en plus, pénétré des applications de la mesure. Et rien ne se fera sans le « capteur », qui est à la base même de l'édifice « mesure ».

Actuellement les technologies de circuits intégrés utilisent encore le silicium comme matériau semi-conducteur de base. Le silicium étant un matériau semi-conducteur de largeur de bande interdite moyenne, s'adapte bien aux contraintes imposées par les applications à des températures normales, soit de 0 à 100°C. A de plus hautes températures, la performance des technologies sur le silicium se dégrade progressivement [17].

A des températures très basses, la bande de conduction se trouve vide d'électrons et la bande de valence est complètement occupée, car l'énergie thermique n'est pas suffisamment importante pour ioniser les atomes du réseau cristallin. A des températures normales un bon nombre des atomes ionisés ont déjà cédé leurs électrons à la bande de conduction, dans laquelle ils participent à la conduction électrique avec une charge négative.[17].

Dans ce chapitre, nous nous intéressons de manière générale au domaine des microsystèmes et leurs applications, ensuite nous étudierons les différents types de capteurs de température.

II.2. Généralités :

Dans de nombreux domaines (industrie, recherche scientifique, services, loisirs ...), il est nécessaire de contrôler de nombreux paramètres physiques (température, force, position, vitesse, luminosité, ...).

Le capteur est l'élément indispensable à la mesure de ces grandeurs physiques.

II.3. Définition :

Un capteur est un organe de prélèvement d'information qui élabore à partir d'une grandeur physique, une autre grandeur physique de nature différente (très souvent électrique). Cette grandeur représentative de la grandeur prélevée est utilisable à des fins de mesure ou de commande

II.4. les différentes familles de capteurs :

Si l'on s'intéresse aux phénomènes physiques mis en jeu dans les capteurs, on peut classer ces derniers en deux catégories.

II.4.1. Capteurs actifs :

Fonctionnant en générateur, un capteur actif est généralement fondé dans son principe sur un effet physique qui assure la conversion en énergie électrique de la forme d'énergie propre à la grandeur physique à prélever, énergie thermique, mécanique ou de rayonnement.

II.4.1.1. Les effets physiques les plus classiques sont :

➤ Effetthermoélectrique :

Un circuit formé de deux conducteurs de nature chimique différente, dont les jonctions à des températures T_1 et T_2 , est le siège d'une force électromotrice d'origine thermique $e(T_1, T_2)$.

➤ Effetpiézo-électrique :

L'application d'une contrainte mécanique à certains matériaux dits piézo-électriques (le quartz par exemple) entraîne l'apparition d'une déformation et d'une même charge électrique de signe différent sur les faces opposées.

➤ Effetd'inductionélectromagnétique :

La variation du flux d'induction magnétique dans un circuit électrique induit une tension électrique (détection de passage d'un objet métallique).

➤ Effet photo-électrique :

C'est la libération de charges électriques dans la matière sous l'influence d'un rayonnement lumineux ou plus généralement d'une onde électromagnétique.

➤ **Effet Hall :**

Un champ magnétique B et un courant électrique I créent dans le matériau une différence de potentiel UH

➤ **Effete photovoltaïque :**

Des électrons et des trous sont libérés au voisinage d'une jonction PN illuminée, leur déplacement modifie la tension à ses bornes.

Grandeur physique mesurée	Effet utilisé	Grandeur de sortie
Température	Thermoélectricité	Tension
Flux de rayonnement optique	Photo-émission	Courant
	Effet photovoltaïque	Tension
	Effet photo-électrique	Tension
Force	Piézo-électricité	Charge électrique
Pression		
Accélération	Induction électromagnétique	Tension
Vitesse		
Position (Aimant)	Effet Hall	Tension
Courant		

Tableaux II.1 : Les effets physiques.

II.4.2. Capteur passif :

Il s'agit généralement d'impédance dont l'un des paramètres déterminants est sensible à la grandeur mesurée. La variation d'impédance résulte :

Soit d'une variation de dimension du capteur, c'est le principe de fonctionnement d'un grand nombre de capteur de position, potentiomètre, inductance à noyaux mobile, condensateur à armature mobile. Soit d'une déformation résultant de force ou de grandeur s'y ramenant, pression accélération (armature de condensateur soumise à une différence de pression, jauge d'extensomètre liée à une structure déformable).

Grandeur mesurée	Caractéristique électrique sensible	Type de matériau utilisé
Température	Résistivité	Métaux : platine, nickel, cuivre ...
Très basse température	Constante diélectrique	Verre
Flux de rayonnement optique	Résistivité	Semi-conducteur
Déformation	Résistivité	Alliage de Nickel, silicium dopé
	Perméabilité magnétique	Alliage ferromagnétique
Position (aimant)	Résistivité	Matériaux magnéto résistants : bismuth, antimoine d'indium
Humidité	Résistivité	Chlorure de lithium

Tableaux II.2 : Capteur passif .

II.5. Les Capteurs de température :

Plusieurs choix technologiques sont possibles pour l'intégration d'éléments de mesure de température et de chauffe. Nous distinguerons les détecteurs de température de type résistance, les thermocouples et les capteurs à jonction semi-conductrice [18]. La technologie de type résistance est la plus communément utilisée du fait de sa facilité de fabrication et de l'évolution linéaire de ces résistances avec la température.

Différentes approches ont été développées ces dernières années, pour lesquelles la nature du matériau varie (métal, polysilicium,..)Ainsi que la nature du support (Silicium, membrane diélectrique, verre,...) et la géométrie de la résistance. En particulier, le platine et le polysilicium dopé sont les plus utilisés car ils présentent une forte stabilité dans les cycles en température intrinsèque de l'élément chauffant, un coefficient en température contrôle les variations de la résistance.

II.5.1. Principe de fonctionnement :

Les capteurs thermiques sont des capteurs qui mesurent les quantités physiques d'abord et ensuite ils font la transduction des grandeurs thermiques en grandeurs électriques. Un capteur thermique fonctionne (fig.II.1) en trois étapes [11].

Premièrement, un signal non thermique se traduit dans un flux de chaleur : $A \rightarrow P$.

Deuxièmement, le flux de chaleur est converti, dans le domaine du signal thermique, en une différence de température : $P \rightarrow \Delta T$.

Troisièmement, la différence de température est traduite en un signal électrique :

$$\Delta T \rightarrow U.$$

Avec :

P : pression N/m²

T : température c°

U : tension électrique V

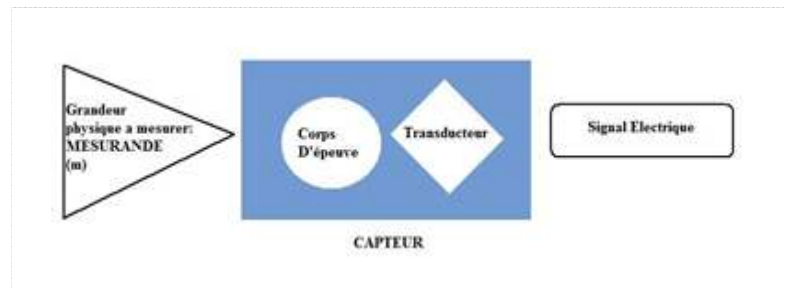


Figure II.1 : Schéma de principe de fonctionnement du capteur

II.5.2. Les types de capteur de température :

On distingue deux types de capteur : les capteurs actifs et les capteurs passifs.

II.5.2.1. Les capteurs actifs :

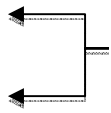
Ce capteur fonctionne comme un générateur, dès qu'il est soumis à l'action d'une mesurande, il la transforme en une grandeur directement exploitable, à savoir en énergie électrique. Dans le cas de notre étude (micro capteur thermique) nous allons illustrer le principe physique en fonction d'une mesurande dans le tableau suivant [11] :

Mesurande	Energie propre du mesurande	Principe physique	Grandeur en sortie
Température	Énergie thermique	Effet thermoélectrique	Tension
		Effet pyroélectrique	Charge

Tableau II.3 : le principe physique en fonction d'une mesurande.

II.5.2.1.1. Le thermocouple :

Le thermocouple est un capteur actif, il est basé sur l'effet thermoélectrique qui est l'interaction entre une énergie d'origine thermique (agitation des charges) et une énergie électrique (déplacement de charge). Le thermocouple est expliqué par deux phénomènes physiques :

- Effet de PELTIER
 - Effet de THOMSON
- 
- Effet de SEEBECK

II.5.2.1.1.1. Principe de fonctionnement du thermocouple :

Le principe de mesure par thermocouple est le suivant : deux métaux A et B, de nature différente, sont reliés par deux jonctions (formant ainsi un thermocouple) aux températures T_1 et T_2 (Fig.II.2) Par effet Seebeck, le thermocouple génère une différence de potentiel qui dépend de la différence de température entre les jonctions, $T_1 - T_2$. Pour une température inconnue l'une des deux jonctions doit être maintenue à une température fixée, il est également possible que cette température de référence soit mesurée par un capteur (température ambiante, par exemple). La mesure de température est donc une mesure indirecte, puisque les thermocouples mesurent en fait une différence de potentiel électrique [19].il est donc nécessaire de connaître la réponse du thermocouple utilisé en fonction de la température pour pouvoir relier la différence de potentiel électrique à la différence de température.

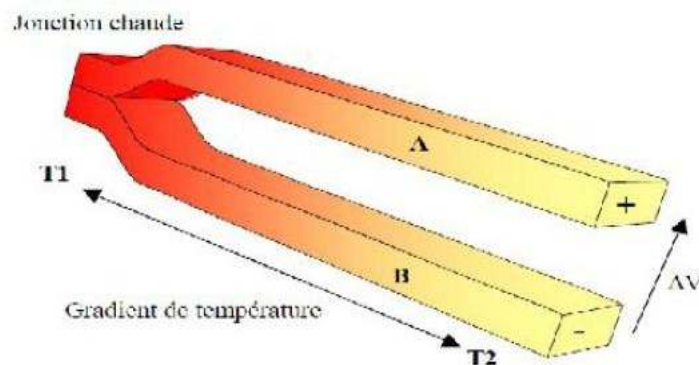


Figure II.2 : Principes de l'effet Seebeck et du thermocouple.

➤ Effet Peltier :

Cette force électromotrice s'explique par la différence entre les conductivités thermique des deux matériaux qui entraîne une dissymétrie électronique des charges aux niveaux des deux métaux.

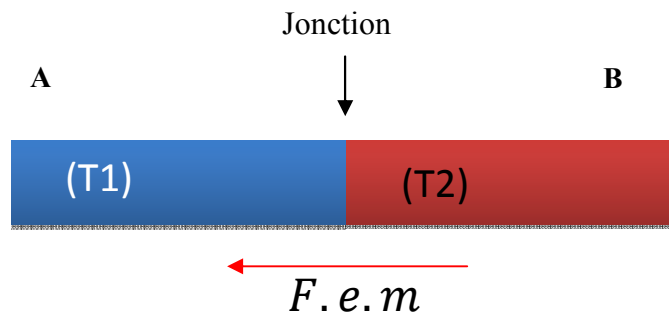


Figure II.3 : Force électromotrice de Peltier.

➤ Effet de Thomson :

Soit un métal homogène dont on porte les extrémités à deux températures différentes ($T1$ et $T2$ on suppose que $T2 > T1$).



Figure II.4 : Métal homogène A.

Du fait que $T2 > T1$ les électrons « chauds » (énergie la plus élevée) vont diffuser vers les électrons « froids » (énergie inférieure), ce déplacement de charge entraîne l'application d'une force électro motrice appelé F.E.M de Peltier.

➤ Effet Seebeck :

Quand on réalise la jonction entre deux métaux A et B de nature chimique différente et qu'on porte les extrémités des jonctions à deux températures différentes ($T1$ et $T2$), on aboutit à la combinaison des effets Peltier et Thomson qui définit l'effet Seebeck .

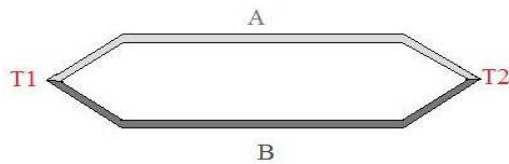


Figure II.5 : Assemblage de deux métaux homogène A & B.

II.5.2.1.2. Les capteurs à jonction semi-conductrice :

Les diodes peuvent donc être utilisées comme capteurs de température. Comme le montre la (figure II.6).en polarisation directe et à courant constant, la chute de tension à travers une diode silicium décroît quand la température de la diode augmente. La chute de tension est proportionnelle à l'inverse de la température absolue de la diode sur une large gamme de température. Généralement les diodes au silicium ont une chute de tension de 0.7 volts. A température ambiante, la sensibilité en température d'une diode est de $-2 \text{ mV}/^\circ\text{C}$. Chaque diode doit être calibrée afin de déterminer la relation chute de tension-variation de température qui la caractérise [20].

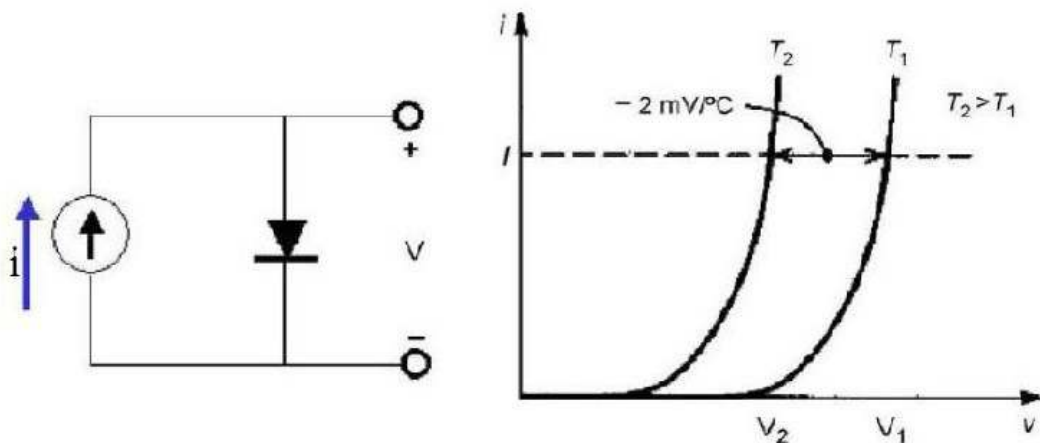


Figure II.6 : Représentation schématique d'une caractéristique courant-tension d'une diode de silicium.

II.5.2.2. Les capteurs passifs :

Un capteur passif est considéré comme une impédance dont l'un des paramètres est sensible au mesurande. Cette impédance doit ensuite être intégrée dans un circuit pour pouvoir retrouver une grandeur électrique en sortie. Le montage qui permet ceci est appelé conditionneur. Il existe plusieurs sortes de conditionneurs comme le montage potentiométrique, le pont de Wheatstone, les circuits oscillants ou les amplificateurs opérationnels. Ce tableau nous montre la caractéristique électrique sensible et les types de matériaux utilisés dans un capteur passif thermique.

Mesurande	Caractéristiques électriques sensibles	Types de matériaux utilisés
Température	Résistivité	Métaux : platine, nickel, cuivre
Très basse température	Constante diélectrique	Verres

Tableau II.4 : la caractéristique électrique sensible et les types de matériaux utilisés.

II.5.2.2.1. Capteur de température de type résistance :

La technologie de type résistance est la plus communément utilisée du fait de sa facilité de fabrication et de l'évolution linéaire de ces résistances avec la température. En particulier, le platine est un matériau populaire pour la réalisation de plaques chauffantes, il supporte de fortes densités de courant, il est fortement résistant à l'oxydation et il peut opérer à des températures de 550°C-600°C[21]. sans changement structurel. Il est adapté à la détection de température car son coefficient de température de la résistance (TCR) est stable. En effet son dépôt est maîtrisé, on utilise généralement les procédés CVD (évaporation ou pulvérisation cathodique) ou encore des dépôts électrolytiques ; suivant les méthodes employées, on conditionne les caractéristiques intrinsèques du matériau [20].

La (fig.II.7) représente la structure d'un capteur de température composée d'un substrat, d'un oxyde et un métal qui va capter la température et de l'air [22].

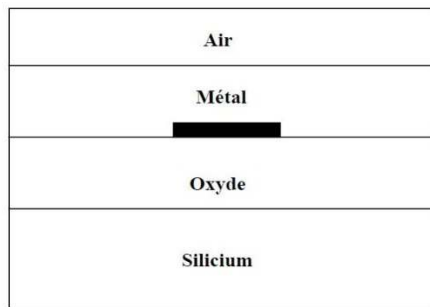


Figure II.7 : Structure d'un capteur de température.

La plupart des métaux présentent un coefficient de température de la résistivité de l'ordre de $3,4 \cdot 10^{-3}/^{\circ}\text{C}$. Trois matériaux sont principalement utilisés à l'état de résistance en raison, d'une part, de leur linéarité et d'autre part, de leur facilité de mise en œuvre :

Ce sont le cuivre, le nickel et le platine. Les valeurs normalisées à 25°C , sont 50Ω pour Ni et 100Ω pour Pt.

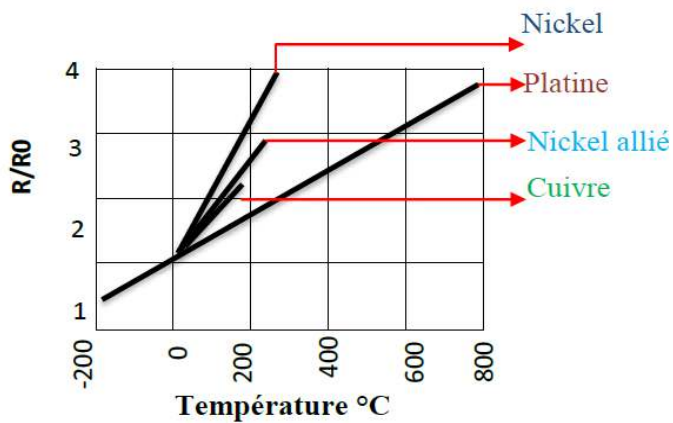


Figure II.8 : Evolution de la résistance relative en fonction de la température pour les matériaux exploités.

L'application du capteur de flux L.Schöler [23], montre des résistances de platine fabriquées sur des substrats de verre et intégrées dans un canal en résine époxy Su-8 (figure.II.9),[24], J.courbat étudie différents métaux que sont le PtTa, PtTaSi et IrPtTa ainsi que l'influence de la couche de tantale (Ta) sur les performances en fiabilité à haute température.

Comparé à une couche d'adhérence en Ti, le Tantale est compatible avec le dépôt de Si₃N₄ par LPCVD, ce qui procure des plaques chauffantes ayant des membranes plus robustes, et sa diffusion est moindre dans le platine.

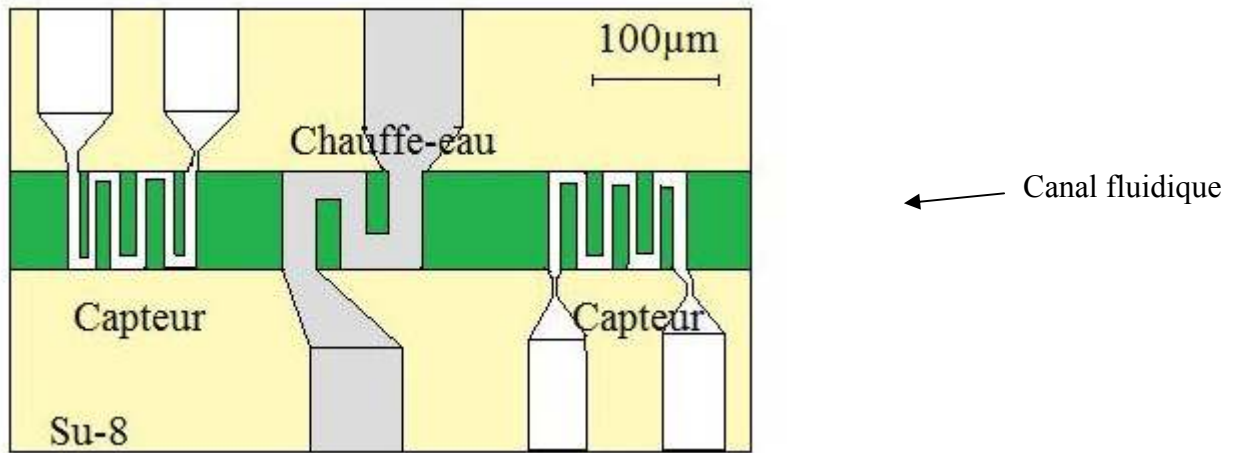


Figure II.9 : Capteurs de flux platine intégrés dans un canal.

« Le SU-8 est une [résine photosensible](#) négative couramment utilisée dans la fabrication de microsystèmes ».

Dans l'application de capteur de température, P.Ginet étudie la faisabilité de micro résistances chauffantes libérées. Les résistances sont réalisées à base de verre et d'oxydes métalliques, elles ont longtemps été une des voies d'applications de la microélectronique hybride. Pour augmenter la résistivité de l'argent, une couche de platine a été déposée sur la couche d'argent. La résistance est sérigraphiée sur un substrat d'alumine. Afin d'avoir une meilleure reproductibilité au niveau de la fabrication, seize échantillons identiques ont été réalisés collectivement sur une plaquette (1'x1') prédécoupée au laser (fig. II.10).

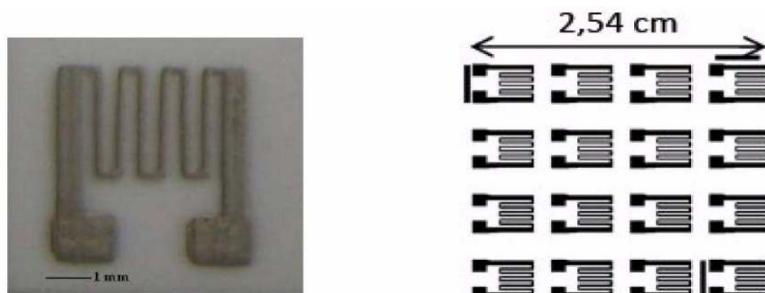


Figure II.10 : Micro résistance chauffante libérée.

D'autres matériaux, peuvent être utilisés pour la fabrication de microplaques chauffantes à base de résistances platine. D.Briand [25], propose une plaque chauffante sur membrane polyimide déposée soit sur du silicium soit sur du polyimide (fig.II.11), ces dernières sont plus robustes et plus adaptées à l'intégration de films métal-oxyde. Pour une membrane polyimide sur silicium de 1.5mm de largeur et 9µm d'épaisseur, la puissance consommée est de 66mW à 325°C.

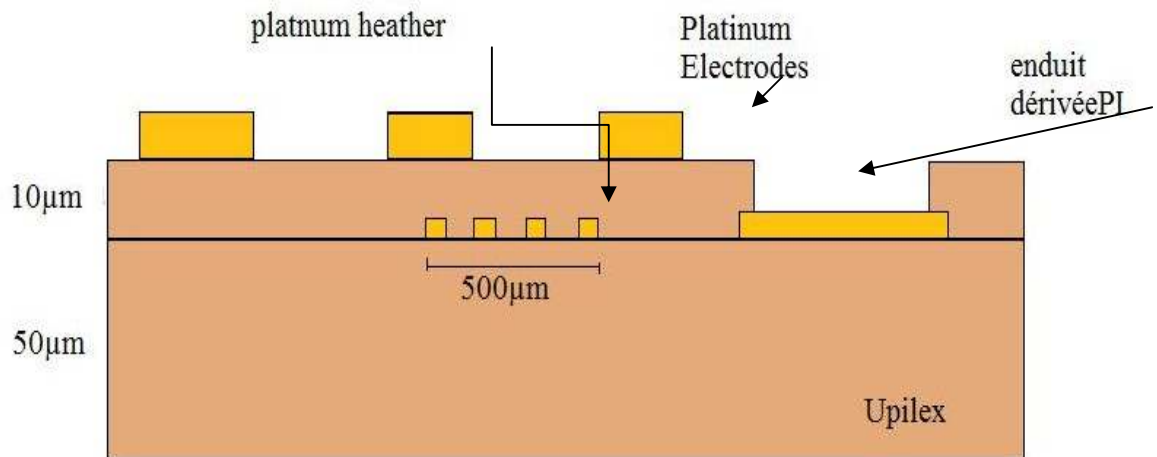


Figure II.11 : Plateforme sur substrat métallisations sur une face du substrat.

Upilex est un résistant à la chaleur polyimide film formé à partir dianhydride de biphényle monomère. L'inconvénient majeur de ce type de matériau (polyimide) est sa limitation en température à 350°C ; ce qui limite ses performances en termes de détection et de désorption.

II.5.2.3. Autres capteurs de température :

- Thermocouples à semi-conducteur, ce sont des capteurs de radiation utilisés dans les thermopiles.
- Le bolomètre mesure les radiations par variations de résistance.
- Les caméras IR sont constituées de matrices de bolomètres.
- Les capteurs pyro électriques transforment le rayonnement IR ou la température en charges électriques.

- Les capteurs à fibre optique mesurent les variations du spectre d'électroluminescence en fonction de la température.
- Les capteurs à quartz voient leur fréquence de résonance changer en fonction de la température.

II.6. Comparaison entre les types de capteur de température :

Type de capteur	Avantages	Inconvénients
Type résistance	Durée de vie (6000h). précision pratiquement linéaire.	Plage de mesure moins grande que les thermocouples.
thermocouple	Grande plage de mesure. Réaction rapide. Large gamme de température : de 0 à 1600 K. Robustes : résistance aux chocs et aux vibrations.	Durée de vie (1000h). Non linéaire gestion de la soudure froide. Température de référence nécessaire. Faible sensibilités pour certain type de thermocouple.

Tableaux II.5 : comparaison entre les types de capteur de température.

II.7. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons mis en évidence la définition d'un capteur et d'un micro capteur thermique ainsi que les différents types de ces capteurs, leurs principes de fonctionnements et les différents matériaux utilisés dans leur fabrication.

Chapitre III :

Micro capteur de

température de type

thermocouple

III.1. Introduction :

La température est une mesure de l'énergie cinétique moyenne des particules dans un échantillon de matière, exprimée en degrés sur une échelle standard. Il est possible de mesurer la température de plusieurs façons différentes qui se distinguent par le coût des équipements et la précision. Les types les plus courants de capteurs sont les thermocouples, les thermistances. Les thermocouples sont les capteurs les plus souvent utilisés pour la mesure de températures, car ils sont relativement peu onéreux, tout en étant précis, et peuvent fonctionner sur une large Gamme de températures.

Un thermocouple est créé lorsque deux métaux différents entrent en contact, ce qui produit, au point de contact, une faible tension en circuit ouvert qui correspond à la température. Nous pouvons utiliser cette tension thermoélectrique, communément appelée tension Seebeck, pour calculer la température. Pour de petites variations de température, la tension est approximativement linéaire. Nous pouvons choisir parmi les différents types de thermocouples désignés par des lettres majuscules qui indiquent leurs compositions selon les conventions ANSI (American National Standards Institute), nous citerons les B, E, K, N, R, S et T.

III.2. Historique :

En 1822-1823, Thomas Seebeck décrit, dans un mémoire à l'Académie des sciences de Prusse, un phénomène qui correspond bien à la découverte du courant thermoélectrique se produisant dans un circuit fermé, formé de conducteurs différents et dont les jonctions sont à des températures différentes.

L'explication par Seebeck de ce phénomène est erronée, mais les classements de matériaux qu'il a établis en fonction de ce que, actuellement, on nomme le pouvoir thermoélectrique sont tout à fait corrects.

Seebeck ne manque pas de noter le phénomène provoqué par une différence de température le long d'un conducteur homogène, ce phénomène sera redécouvert trente ans plus tard par William Thomson Vers 1834, Jean Charles Athanase Peltier publie dans les Annales de physique et chimie un article sur les anomalies de température observées aux jonctions de conducteurs de nature différente. Les expériences de Peltier sont confirmées, en 1838, par Antoine-César Becquerel et surtout Heinrich Lenz, mais les explications de Peltier concernant le phénomène découvert sont incorrectes. [18]

Il faut attendre 1857 pour avoir, avec Thomson, une vue d'ensemble convenable des trois effets thermoélectriques (effet Peltier, effet Thomson et effet Seebeck) et une formulation encore admise aujourd'hui. Le calcul des propriétés des circuits thermoélectriques a été, pour la première fois, effectué d'une manière satisfaisante par E. Altenkirch en 1909 [2]

III.3. Thermométrie par thermocouple:

III.3.1. Caractères généraux-sensibilité thermique :

Un thermocouple constitué de deux conducteurs A et B formant entre eux deux jonctions aux températures T_1 et T_2 délivre une f.é.m. $E_{A/B}^{T_1 T_2}$ 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 ($T_1 = T_{ref}$), celle T_2 de l'autre jonction 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 l'ensemble des échanges thermique possible avec d'autre milieux.

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 ponctuelle.
- La capacité calorifique du capteur peut être réduite assurant une vitesse de réponse élevée.

Par ces deux points de vue, l'emploi du thermocouple apparait avantageux par rapport à la résistance thermométrique.

Un autre intérêt du thermocouple est de délivrer un signal, une f.é.m. 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.

Cependant, et cela est un inconvénient du thermocouple, la mesure exige que la température de la jonction de référence soit connue: toute incertitude sur T_{ref} risque d'entraîner une incertitude du même ordre sur T_c .

La f.é.m. du thermocouple est sur de grands intervalles de température, une fonction non linéaire de T_c (fig.III.2).

La non-linéarité de la relation entre la f.é.m. du thermocouple et la température est mise en évidence par la forme polynomiale de l'équation qui les lie.

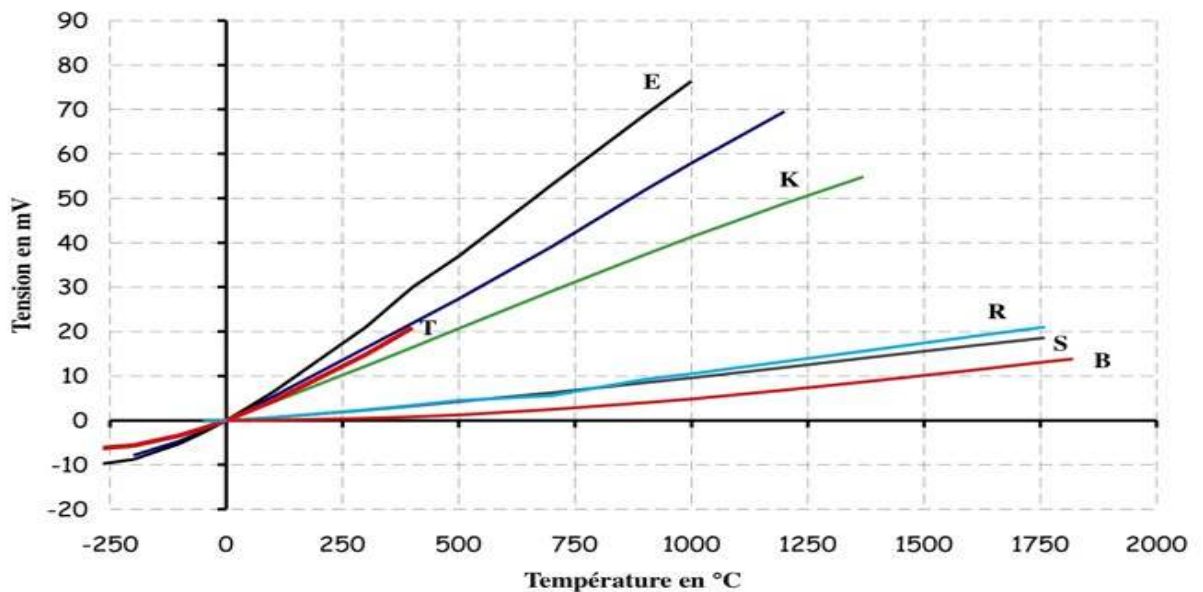


Figure III.2 : variation thermique de la f.é.m. de différents types de thermocouple.

Pour chaque type de thermocouple, une norme définit:

- D'une part, une table de valeurs de la f.é.m. E en fonction de la Température T .
- D'autre part, une expression polynomiale qui traduit algébriquement et en conformité avec la table la relation entre E et T .

Ainsi pour le couple Platine-Rhodium 30% Platine-Rhodium 6%, on a entre 0°C et 1.820°C , selon la norme NF C42-321.

Pour d'autres thermocouples, le domaine total d'emploi est divisé en plusieurs plages et à l'intérieur de chacune d'elles la norme définit une expression polynomiale spécifique qui traduit la relation entre E et T

S'il n'est pas possible de considérer la variation de la f.é.m. comme linéaire dans un domaine étendu de température, cela demeure néanmoins faisable dans une plage restreinte, dont l'extension de la précision recherchée.

Les thermocouples sont utilisables selon leur type, depuis les très basses températures:

-270 °C pour le couple Cuivre/Or-Cobalt

Jusqu'à des températures très élevées :

2700 °C pour le couple Tungstène-Rhénium 5 % Tungstène-Rhénium26%; dans ce dernier cas ils permettent de dépasser, et de beaucoup, les limites maximales d'utilisation des résistances thermométrique (1400 °C environ).

La sensibilité thermique d'un couple ou pouvoir thermoélectrique, à une température T_c , est définie par l'expression:

$$S(T_c) = \frac{dE_{A/B}^{T,0^\circ C}}{dT_c} \quad \text{III.2}$$

$S(T_c)$: La sensibilité.

$$dE_{A/B}^{T,0^\circ C} : \text{f.é.m}$$

T_c : la température

Elle est fonction de la température et s'exprime en $\mu V/^\circ C$ (fig.III.3).

Ces sensibilités sont très inférieures à celles de montages utilisant des résistances thermométriques.

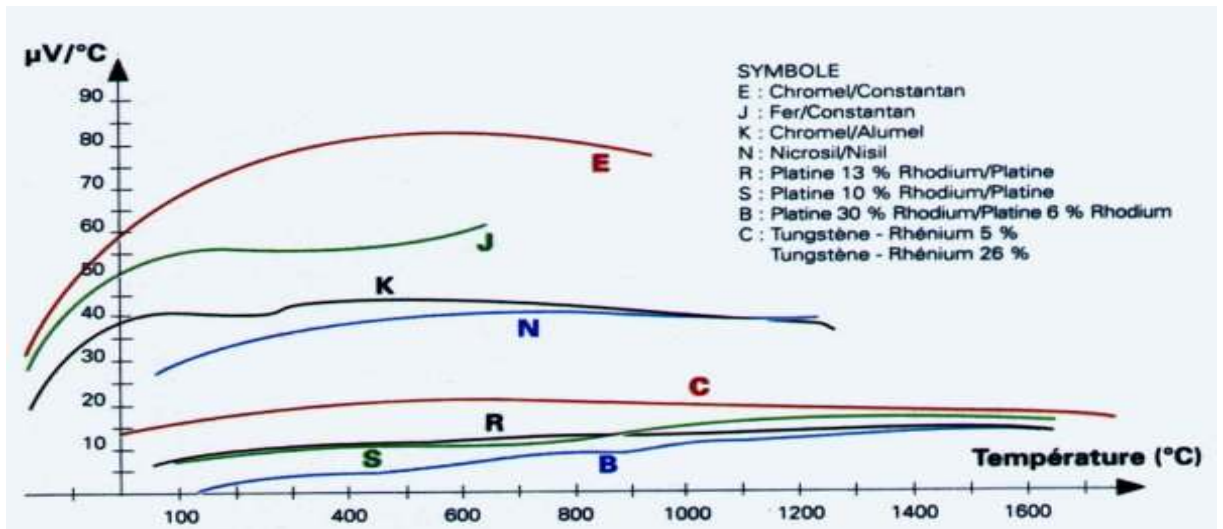


Figure III.3 : variation thermique du pouvoir thermoélectrique de différents types de thermocouples.

III.3.2. Effets thermoélectriques :

Les phénomènes thermoélectriques dans les chaînes de conducteurs métalliques ou semi-conducteurs mettent en évidence les conversions d'énergie qui s'opèrent en leur sein, l'effet Joule mis à part, entre énergie d'agitation thermique et énergie électrique des charges en mouvement.

➤ Effet Peltier :

Au niveau de la jonction de deux conducteurs A et B différents mais à même température T , (fig.III.4) s'établit une différence de potentiel qui ne dépend que de la nature des conducteurs et de leur température:

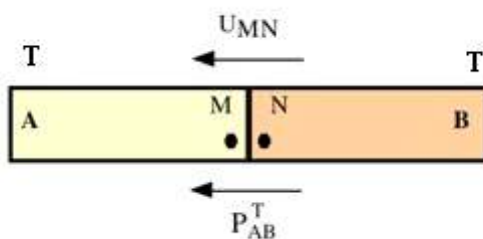


Figure III.4 : effet Peltier.

$$V_M - V_N = P_{A/B}^T \quad \text{III.3}$$

$P_{A/B}^T$: C'est la f.é.m. de Peltier.

- **Loi de volta :**

La loi de Volta montre que dans un circuit isotherme, constitué de conducteurs différents (A, B, C, D), la somme des f.é.m. de Peltier est nulle. On a donc :

$$P_{A/B}^T + P_{B/C}^T + P_{C/D}^T + P_{D/A}^T = 0 \quad \text{III.4}$$

L'équation précédente peut encore s'écrire:

$$P_{A/B}^T + P_{B/C}^T + P_{C/D}^T = -P_{D/A}^T \quad \text{III.5}$$

Soit :

$$P_{A/B}^T + P_{B/C}^T + P_{C/D}^T = P_{A/D}^T \quad \text{III.6}$$

Sachant que :

$$P_{A/D}^T = -P_{D/A}^T \quad \text{III.7}$$

$P_{A/D}^T$: C'est la f.é.m. de Peltier total.

On en conclut que lorsque deux conducteurs A et D sont séparés par des conducteurs intermédiaires, l'ensemble étant isotherme, la différence de potentiel entre les conducteurs extrêmes A et D est la même que si ces conducteurs étaient en contact.

- **Effet Thomson :**

Entre deux points M et N à température différente, à l'intérieur d'un conducteur homogène A (fig III.5) s'établit une f.é.m. ne dépendant que de la nature du conducteur et des températures T_M et T_N :

$$E_A^{T_M T_N} = \int_{T_N}^{T_M} b_A dT \quad \text{III.8}$$

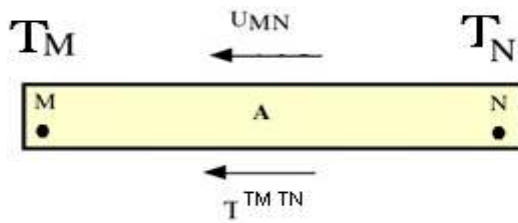


Figure III.5 : Effet Thomson.

C'est la f.é.m. de Thomson, b_A coefficient de Thomson du conducteur A est une fonction de la température [19].

- **Loi de Magnus :**

Si les extrémités d'un circuit constitué d'un conducteur unique et homogène sont à la même température, La f.é.m. de Thomson est nulle.

- **Effet Seebeck :**

Soit un circuit fermé, constitué de deux conducteurs A et B dont les jonctions sont aux températures T_1 et T_2 , il constitue un couple thermoélectrique (fig. III.6).

Ce couple est le siège d'une f.é.m. dite de Seebeck E qui résulte des effets Peltier et Thomson qui s'y produisent. On a en effet:

- f.é.m. entre a et b: $e_{ab} = \int_{T_1}^{T_2} b_A dT$ f.é.m. entre b et c : $e_{bc} = p_{A/B}^{T_2}$

- f.é.m. entre c et d: $e_{cd} = \int_{T_2}^{T_1} b_B dT$ f.é.m. entre d et a : $e_{da} = p_{B/A}^{T_1}$

La f.é.m. totale, somme des f.é.m. précédentes, est la f.é.m. de Seebeck:

$$E_{A/B}^{T_2 T_1} = p_{A/B}^{T_2} - p_{A/B}^{T_1} + \int_{T_1}^{T_2} (b_A - b_B) dT \quad \text{III.9}$$

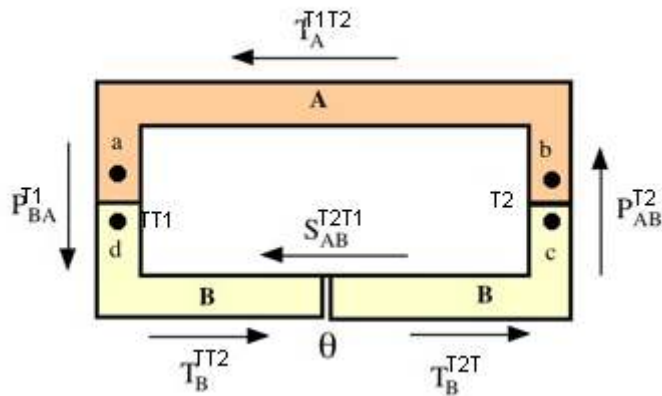


Figure III.6 : Effet Seebeck.

$E_{A/B}^{T_2T_1}$: F.é.m total. (De thermocouple).

b_A : Coefficient de Seebeck de conducteur A.

b_B : Coefficient de Seebeck de conducteur B.

Si par convention, on choisit pour l'une des températures, T_1 par exemple, une valeur de référence déterminée ($0\text{ }^\circ\text{C}$) la f.é.m. pour un couple de conducteur A, B donnés, ne dépend plus que de T_2 .

➤ **Loi des métaux successifs :**

On considère les deux couples que les conducteurs A et C forment respectivement avec un troisième conducteur B: les jonctions étant à températures T_2 et T_1 les f.é.m. de Seebeck correspondantes ont pour expression:

$$E_{A/B}^{T_2T_1} = p_{A/B}^{T_2} - p_{A/B}^{T_1} + \int_{T_1}^{T_2} (b_A - b_B) dT \quad \text{III.10}$$

$$E_{C/B}^{T_2T_1} = p_{C/B}^{T_2} - p_{C/B}^{T_1} + \int_{T_1}^{T_2} (b_C - b_B) dT \quad \text{III.11}$$

On en déduit facilement la f.é.m. du couple constitué par les métaux A et C:

$$p_{A/C}^{T_2T_1} = p_{A/B}^{T_2T_1} - p_{C/B}^{T_2T_1} \quad \text{III.12}$$

Cette relation, dite loi des métaux successifs, permet de déduire la f.é.m. de Seebeck du couple A/C lorsque l'on connaît les f.é.m. de Seebeck que délivrent les couples

constitués des conducteurs A d'une part, C d'autre part, associés à un troisième conducteur B.

Des tables ont ainsi été établies en prenant pour B un métal de référence (Pb ou Pt) et en lui associant divers métaux et alliages: elles permettent de connaître la f.é.m. de Seebeck des couples constitués à l'aide de deux matériaux quelconques (métaux ou alliages).

➤ **Loi des températures successives :**

Lorsque la température T_1 , considérée ici comme température de référence prend une nouvelle valeur T'_1 , La f.é.m. de Seebeck du couple A/B passe de la valeur $E_{A/B}^{T_2 T_1}$ à la valeur $E_{A/B}^{T_2 T'_1}$:

$$E_{A/B}^{T_2 T'_1} = p_{A/B}^{T_2} - E_{A/B}^{T'_1} + \int_{T'_1}^{T_2} (b_A - b_B) dT \quad \text{III.13}$$

Que l'on peut écrire:

$$E_{A/B}^{T_2 T'_1} = p_{A/B}^{T_2} - p_{A/B}^{T_1} + \int_{T_1}^{T_2} (b_A - b_B) dT - [p_{A/B}^{T'_1} - p_{A/B}^{T_1} + \int_{T_1}^{T'_1} (b_A - b_B) dT] \quad \text{III.14}$$

Soit :

$$E_{A/B}^{T_2 T_1} = E_{A/B}^{T_2 T'_1} - E_{A/B}^{T'_1 T_1} \quad \text{III.15}$$

Cette relation qui est dite loi des températures successives, est utilisée en particulier lorsque la mesure ayant été faite avec la jonction de référence à la température ambiante T'_1 et ayant fourni la f.é.m. $E_{A/B}^{T_2 T'_1}$. On souhaite connaître la valeur de $E_{A/B}^{T_2 0^\circ\text{C}}$ ($T_1 = 0^\circ\text{C}$) pour en déduire T_2 à l'aide de la Table du couple utilisé.

➤ **Loi des métaux intermédiaires :**

Quand on introduit dans le circuit comprenant le couple A/B un conducteur de nature différente, la f.é.m. dont le circuit est le siège n'est pas modifiée à condition que ce

conducteur ait ses extrémités à même température. En effet, le conducteur C placé dans le circuit du thermocouple entre les points M et M' dont les températures sont identiques (T_0) y développe une f.é.m. résultante nulle:

$$p_{B/C}^{T_0} + \int_{T_0}^{T_0} b_c dT + p_{C/B}^{T_0} = 0 \quad \text{III.16}$$

Cette conclusion demeure valable quel que soit le nombre de conducteurs introduits, à condition que leurs extrémités soient deux à deux à même température C'est cette loi des métaux intermédiaires qui justifie la mesure de la f.é.m. du couple à l'aide d'une installation dont les conducteurs sont différents de ceux du couple [19].

III.3.3. état de l'art de thermocouple :

La plage de température à l'intérieur de laquelle un thermocouple est utilisable est limitée :

- Aux basses températures, par la décroissance de son pouvoir thermoélectrique.
- À la température élevée, par les risques de contamination par l'atmosphère ambiante, par l'évaporation de l'un des constituants d'un alliage du couple, par la croissance de grains cristallins entraînant la fragilisation des conducteurs, enfin par la fusion de l'un des conducteurs.

Le tableau III.1 [19] indique pour les principaux types de couples les températures limites d'utilisation normale pour les diamètres de fil indiqués, ainsi que la précision standard lorsqu'elle a été définie par une norme. Des tables donnant la f.é.m. de ces couples en fonction de la température sont placées en annexe de présent chapitre.

Dans la désignation d'un thermocouple, le premier conducteur cité correspond à la borne positive du couple lorsqu'il est utilisé au-dessus de 0°C , la température de référence étant 0°C .

Afin de garantir la stabilité de la f.é.m. la température maximale d'utilisation doit être fixée en tenant compte des conditions réelles d'exploitation du couple, la température maximale est d'autant plus abaissée que le fil est plus fin, donc plus rapidement altérable en profondeur.

Pour chaque type de couple doivent être respectées des conditions relatives à la nature de l'atmosphère environnante (réductrice, oxydante, inerte, vide) sous peine de dégradation rapide des caractéristiques. En particulier, pour les couples des types B, R, S, le fil doit être isolé de l'enveloppe métallique par une gaine d'alumine évitant la diffusion des vapeurs du métal de l'enveloppe dans les conducteurs du couple.

Lorsque le couple est soumis à des flux de neutrons, il faut proscrire l'emploi de métaux pouvant subir des transmutations : c'est le cas du rhodium et du cuivre ; le fer et le nickel sont stables dans ces conditions.

Thermocouples	Plage de température	E mV(1)	Précision (2)
Cuivre/constantan Type T (diamètre 1.63mm)	-270°C a 370°C	-6.258 a 19.027	±2% de -100°C à -40°C ±0.8% de -40°C à 100°C ±0.75% de 100°C à 350°C
Fer/constantan Type j (diamètre 3.25 mm)	-210°C a 800°C	-8.096 a 45.498	±3 °C de 0 °C à 400 °C
Chromel/Alumel Type k (diamètre 3.25 mm)	-270°C a 1250°C	19.027 a 50.633	±0.75% de 400 à 800°C ±0.75% de 400 à 800°C
Chromel/constantan Type E (diamètre 3.25 mm)	-270°C a 870°C	-9.835 a 66.473	±3 °C de 0 °C à 400 °C ±0.75% de 400 à 800°C
Platine-Rhodium (10%) Platine Type s	-50°C à	-0.236 a	±2.5 °C de 0 °C à 600 °C

(diamètre 0.51 mm)	1500	15.576	±0.4% de 600°C à 1600°C
Platine-Rhodium (30%)/ Platine-Rhodium (6%) Type B (diameter 0.51 mm)	0°C a 1700°C	0°C a 12.426	±0.5% de 870°C à 1700 °C

Tableau III.1 : principaux types de thermocouples et leurs limites d'emploi.

III.3.4. Les différents types de thermocouples :

Il existe différents types de thermocouples, correspondant chacun à une gamme de température ou à une plus ou moins grande précision. Leurs propriétés peuvent également dépendre du type d'isolation (gaine) utilisée pour les fils métalliques. La liste suivante, non exhaustive, donne les références de quelques-uns de ces thermocouples (il est possible de trouver plus d'informations sur les sites web des fabricants).

- Type K : Chromel (alliage nickel + chrome) / Alumel (alliage nickel + aluminium)

Le thermocouple de type K est le plus standard. Il permet une mesure dans une gamme de température large : -200°C à 1200°C. Il est également bon marché.

- Type E : Chromel / Constantan (alliage cuivre + nickel)

Ce thermocouple est intéressant pour la mesure de températures basses. Il a également l'avantage de ne pas avoir de réponse magnétique.

- Type N : Nicrosil (alliage nickel + chrome + silicium) / Nisil (alliage nickel + silicium)

Sa bonne stabilité et sa bonne résistance aux températures élevées et à l'oxydation rendent ce thermocouple intéressant pour les mesures à hautes températures.

- Type J : Fer / Constantan (alliage cuivre + nickel)

Fonctionne bien dans le [vide](#) mais n'est pas recommandé pour les basses températures.

- Type T : Cuivre / Constantan (alliage cuivre + nickel)

Particulièrement adapté pour une utilisation à basse température comme pour des applications cryogéniques.

- Type R : Platine-Rhodium (13%) / Platine

Adapté aux températures élevées.

- Type S : Platine-Rhodium (10%) / Platine

Adapté aux températures élevées.

- Type B : Platine-Rhodium (30%) / Platine-Rhodium (6%)

Adapté aux températures élevées, utilisé en grande partie en verrerie industrielle.

III.3.5. Mise en œuvre et dispositifs de mesure :

- La réalisation du thermocouple et sa protection :

Il faut éviter que se créent lors de son montage ou de son utilisation des inhomogénéités dans sa structure qui risquent, en modifiant localement les propriétés thermoélectriques de former des couples parasites ; ces inhomogénéités ont trois causes principales :

- Les contraintes mécaniques dues à des pliures ou à la tension du fil : elles peuvent en général être supprimées par recuit.
- les contaminations chimiques : les fils doivent être protégés vis-à-vis de tout agent susceptible de réagir avec eux ; en particulier, lors de leur manipulation une propreté extrême est requise ;
- les rayonnements nucléaires provoquant des transmutations dans certains alliages de thermocouples.

La partie soudée du thermocouple doit être d'un volume aussi réduit que possible pour éviter entre ses divers points des différences de température qui donneraient naissance à des f.é.m. parasites, conséquence des modifications chimiques des métaux au niveau de la soudure. L'une des trois techniques suivantes est habituellement utilisée :

- Le brassage à l'étain quand la température d'utilisation n'est pas trop élevée (couple de type T) ;
- Le soudage autogène au chalumeau oxyacétylénique est la technique la plus courante ;
- Le soudage à l'arc électrique.

Les fils peuvent être torsadés sur une faible longueur au voisinage de la soudure afin d'accroître sa protection mécanique mais aux dépens de la précision de la localisation et de la vitesse de réponse.

Afin d'éviter tout contact en dehors des jonctions de mesure, les fils sont placés à l'intérieur d'isolateurs en céramique. Ceux-ci doivent être chimiquement inertes et avoir une grande résistance électrique d'isolement à température élevée. La fragilité de l'ensemble isolateur-thermocouple requiert le plus souvent une protection supplémentaire qui est assurée par une enveloppe ou gaine qui doit être étanche aux gaz et insensible aux chocs thermiques. Elle est réalisée généralement en céramique ou en acier ; dans ce dernier cas, la soudure du couple peut être isolée ou bien en contact avec la gaine ce qui améliore la vitesse de réponse mais risque d'introduire une tension de mode commun qui peut être gênante.

▪ Montage de mesure

Le montage généralement utilisé est schématisé (fig. III.7)

Le circuit n'est le siège que de la f.é.m. de Seebeck du thermocouple.

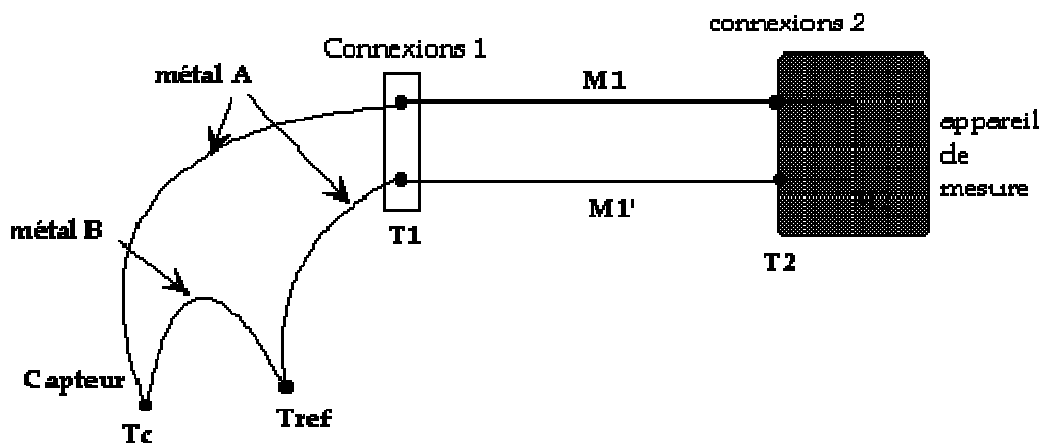


Figure III.7 : Schéma de principe de la liaison d'un thermocouple à un appareil de mesure.

En effet la somme des f.é.m. thermoélectriques a pour expression :

$$e = p_{A/B}^{T_C} + \int_{T_C}^{T_{ref}} b_B dT + p_{A/M_1}^{T_{ref}} + \int_{T_{ref}}^{T_{a1}} b_{M_1} dT + p_{M_1/M_2}^{T_{a1}} + \int_{T_{a1}}^{T_{a2}} b_{M_2} dT + p_{M_2/M_3}^{T_{a2}} + \int_{T_{a2}}^{T_{a2}} b_{M_3} dT + p_{M_3/M_2}^{T_{a2}} + \int_{T_{a2}}^{T_{a1}} b_{M_2} dT + p_{M_2/M_1}^{T_{a1}} + \int_{T_{a1}}^{T_{ref}} b_{M_1} dT + p_{M_1/A}^{T_{ref}} + \int_{T_{ref}}^{T_C} b_A dT$$

$$\text{Soit : } e = p_{A/B}^{T_C} - p_{A/B}^{T_{ref}} + \int_{T_C}^{T_{ref}} (b_A - b_B) dT = E_{A/B}^{T_C, T_{ref}} \quad \text{III.17}$$

L'égalité des températures des paires de jonctions de conducteurs intermédiaires est d'autant plus impérative que:

- La f.é.m. de Seebeck du couple est faible,
- Le pouvoir thermoélectrique des couples parasites est plus important.
- La température de référence:

La f.é.m. du thermocouple dépend à la fois de la température T de la jonction placée au point de mesure et de la température T_{ref} , de ses jonctions avec les fils de liaison. Pour ce qui est de cette dernière, on peut distinguer trois cas:

- $T_{ref} = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$
- T_{ref} est constante mais différence de $0 \text{ } ^\circ\text{C}$;
- T_{ref} est variable, généralement égale à la température ambiante.
- La température de référence est $0 \text{ } ^\circ\text{C}$:

C'est la température d'équilibre du mélange eau-glace à pression atmosphérique normale. La mesure de la f.é.m. du thermocouple permet dans ce cas de connaître immédiatement la température T_C à l'aide de la Table du thermocouple utilisé.

Pour des mesures de précision il y'a lieu de tenir compte de l'influence de la pression sur la température d'équilibre T du mélange eau-glace:

$$T_{eq} = 0.099 \left(1 - \frac{P_a}{P_n} \right) - 0.7 \cdot 10^{-6} H, T_{eq} \text{ en } ^\circ\text{C}, H \text{ en mm}$$

P_a étant la pression atmosphérique au moment de la mesure,

P_n : La pression atmosphérique normale (760 mm de mercure soit 101 325 Pa), le terme $0.7 \cdot 10^{-6} H$, où H est la profondeur d'immersion de la sonde, correspondant à l'influence de la pression hydrostatique au niveau de la jonction de mesure.

Cette température de 0°C peut aussi être obtenue avec une bonne précision ($\pm 0.02^\circ\text{C}$) dans des enceintes régulées et refroidies par effet Peltier. Le fonctionnement correct est assuré dans une plage limitée de variation de la température ambiante: de 0°C à 50°C par exemple

▪ **Méthodes de mesure :**

C'est la f.é.m. de Seebeck dont le thermocouple est le siège qui fournit l'information de température cherchée. Elle ne peut être connue avec précision que si l'on minimise la chute ohmique de tension due à la circulation d'un courant dans les éléments du thermocouple et les fils de liaison : leur résistance est en effet généralement mal connue car fonction de la température ambiante d'une part et de la température à mesurer d'autre part

Deux méthodes sont généralement employées :

- La mesure à l'aide d'un millivoltmètre qui permet de minimiser la chute ohmique si sa résistance interne est élevée.
- La méthode d'opposition qui autorise une mesure rigoureuse puisque dans ce cas le courant traversant le thermocouple est annulé.

Mesure avec millivoltmètre :

Par l'expression suivante :

$$V_m = E_{A/B}^{T_a T_{ref}} \cdot \frac{R_v}{R_t + R_\alpha + R_v} \quad \text{III.18}$$

R_t : résistances du thermocouple

R_l : résistances des fils de liaison

R_v : Résistance interne du millivoltmètre

V_m : la tension mesurée aux bornes du millivoltmètre

Soit :

$$E_{A/B}^{T_c T_{ref}} = V_m \left(1 + \frac{R_t + R_\alpha}{R_v}\right) \quad \text{III.19}$$

Les incertitudes sur R_t et R_α obligent à réduire leur influence en choisissant

$$R_v \gg R_\alpha + R_t$$

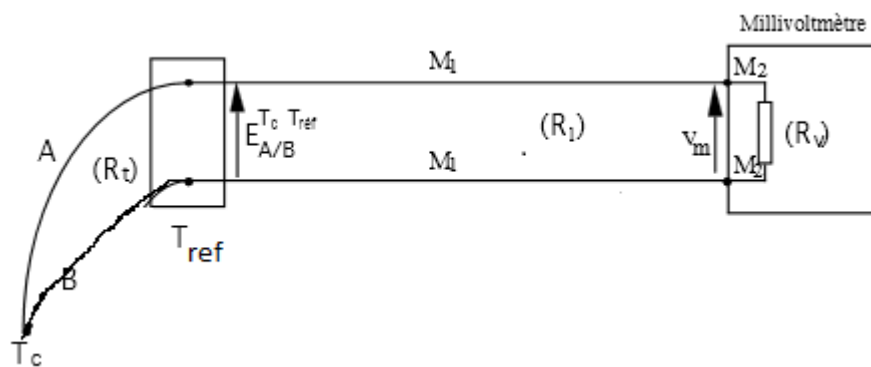


Figure III.8 : Mesure au millivoltmètre de la f.é.m. d'un thermocouple.

- **Câbles de compensation :**

On utilise les câbles de compensation dans deux cas :

- Lorsque les métaux formant le couple sont d'un prix très élevé (métaux précieux notamment).
- Lorsque la distance entre la prise de température et la jonction de référence est grande.

Il convient alors de réduire la résistance du circuit lorsque la résistance interne de l'appareil de lecture est plus élevée (galvanomètre). Le schéma de câblage de principe est représenté sur la (fig III.9.)

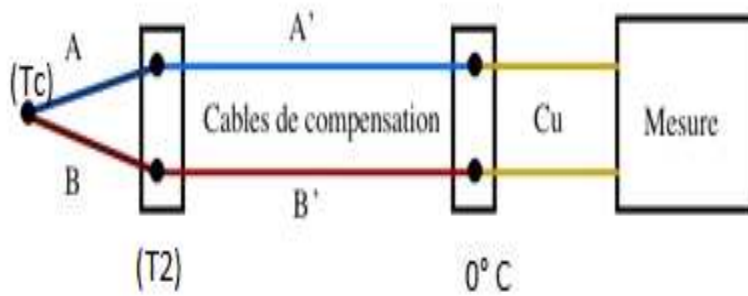


Figure III.9 : Câbles de compensation.

On limite au minimum la longueur des fils A et B du thermocouple. La liaison entre la jonction intermédiaire à température T_2 et la jonction de référence à température 0°C est assurée par les câbles de compensation A' et B' associés aux métaux A et B respectivement. La condition à respecter est que la force électromotrice aux bornes des conducteurs A' et B' réunis en couple soit la même que celle du couple (A, B). Cette condition s'exprime par l'équation :

$$E_{A/B}^{T_2, 0^\circ\text{C}} = E_{A'/B'}^{T_2, 0^\circ\text{C}}$$

En conclusion, les câbles de compensation A' et B' ne modifient pas la tension délivrée par le couple AB à condition que :

- Les jonctions AA' et BB' soient à même température T_2
- Les couples A'B' et AB aient la même force électromotrice de Seebeck entre T_2 et 0°C .

Au-delà de la jonction de référence et jusqu'à l'appareil de mesure, la liaison peut être assurée par des fils de cuivre moins résistants et beaucoup moins chers que les fils du thermocouple et les câbles de compensation eux-mêmes. Il est important évidemment d'associer convenablement les câbles de compensation et les thermocouples correspondants. Une erreur sur la polarité introduirait une erreur systématique considérable puisque la compensation ne jouerait pas.

III.4. Conclusion :

Dans ce chapitre, partant des lois de base caractérisant les thermocouples et après étude nous nous proposons d'utiliser la f.é.m. de Seebeck dont le thermocouple est le siège qui fournit l'information de la température à mesurer.

Chapitre IV

Simulation et modélisation

IV.1. Introduction :

Pour évaluer la performance (l'exécution) du thermocouple et obtenir les dimensions géométriques d'un thermocouple de réponse rapide une modélisation par élément fini du problème de transfert thermique a été faite utilisant le code commercial COMSOL. Deux modèles tant dimensionnels que tridimensionnels ont été développés pour résoudre le problème. Les effets des paramètres divers sur le temps de réponse du thermocouple ont été Analysés et présenté dans ce chapitre.

IV.2. Présentation du logiciel COMSOL :

Le logiciel Comsol, anciennement appelé FEMLab est avant tout un outil de résolution d'équations aux dérivées partielles (EDP) par éléments finis. Sa particularité est de disposer d'une base de données d'équations permettant de modéliser différents phénomènes physiques tels que : l'électrostatique, la thermique, l'écoulement des fluides ou encore la déformation des matériaux.

En effet, cet outil de simulation permet de traiter de nombreux problèmes couplés grâce à sa

banque intégrée d'équations physiques très variées (électrothermique, thermo-fluidique, etc.) décrits par les équations aux drivées partielles. Cette approche autorise une simulation numérique au plus près des systèmes réels. Le logiciel Comsol multi physique possède un environnement de programmation (Comsol script) dans lequel il est possible de modifier le maillage et les équations du problème. Ce logiciel possède de nombreux systèmes de résolution dits « Solveurs », pouvant être linéaires ou non, paramétriques, ou encore dépendants du temps. En effet, les différentes étapes proposées par cet outil sont :

1. La construction de la géométrie : la première étape est la création d'une géométrie 2D ou 3D.
2. Définition de la physique : définition des constantes et des expressions.
3. Définition des propriétés des matériaux : une bibliothèque de matériaux est à disposition dans Comsol multi physique. De plus, il est possible d'introduire d'autres propriétés des matériaux qui ne figurent pas dans cette bibliothèque.
4. Les conditions aux frontières : on impose des conditions sur certaines frontières (selon le cas voulu).

5. Le maillage de la géométrie : le maillage des domaines est automatique. Il est possible de le raffiner globalement ou de manière sélective.

6. Exploitation des résultats Post-traitement : Lorsque le programme converge vers une solution, il bascule automatiquement vers la fenêtre de calcul qui permet d'analyser et d'afficher les résultats.

IV.3. Modélisation d'un thermocouple :

Le temps de réponse du thermocouple dépend d'un certain nombre de paramètres. Une analyse paramétrique a été faite en ce qui concerne ces paramètres et son effet sur le temps de réponse a été obtenu. Les paramètres divers dans l'analyse area:

1. Diamètre du fil de thermocouple.
3. Position de la jonction chaude
4. Épaisseur d'isolation.

IV.3.1. Équation Modèle :

Le modèle mathématique pour le transfert thermique par conduction par équation :

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T) = Q \quad \text{IV.1}$$

T : la température

ρ : Masse volumique

C_p : Capacité calorifique

K : Conductivité thermique

Q : source de chaleur

Transfert thermique Général est par l'équation :

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T + \rho c_p T u) = Q$$

IV.2

Flux de la chaleur dans vecteur :

$$q = -k \nabla T + \rho c_p T u$$

IV.3

Avec :

Q : transfère de chaleur dans les conducteurs :

$$q = -k \nabla T \quad \text{IV.4}$$

$$q = -k\nabla T + \rho c_p T u$$

IV.5

Cette formulation permet de spécifier le flux de chaleur en termes d'un flux de chaleur explicite,

q_0 : et un coefficient de transfert thermique,

h : coefficient de transfère de chaleur

T_{inf} : quant à une température de référence,

$q_0=0$.

IV.4. La simulation :

IV.4.1. Géométrie du modèle :

La géométrie du modèle que nous proposons possède deux conducteur de forme rectangle reliée entre eux avec une jonction (chaude) (fig. VI.1) qui signifie une forme d'un thermocouple de type k. Ces dimensions sont :

1. Diamètre du fil de thermocouple : 100um
3. Position (poste) de la jonction chaude : 20um
4. Épaisseur d'isolation : 30um.

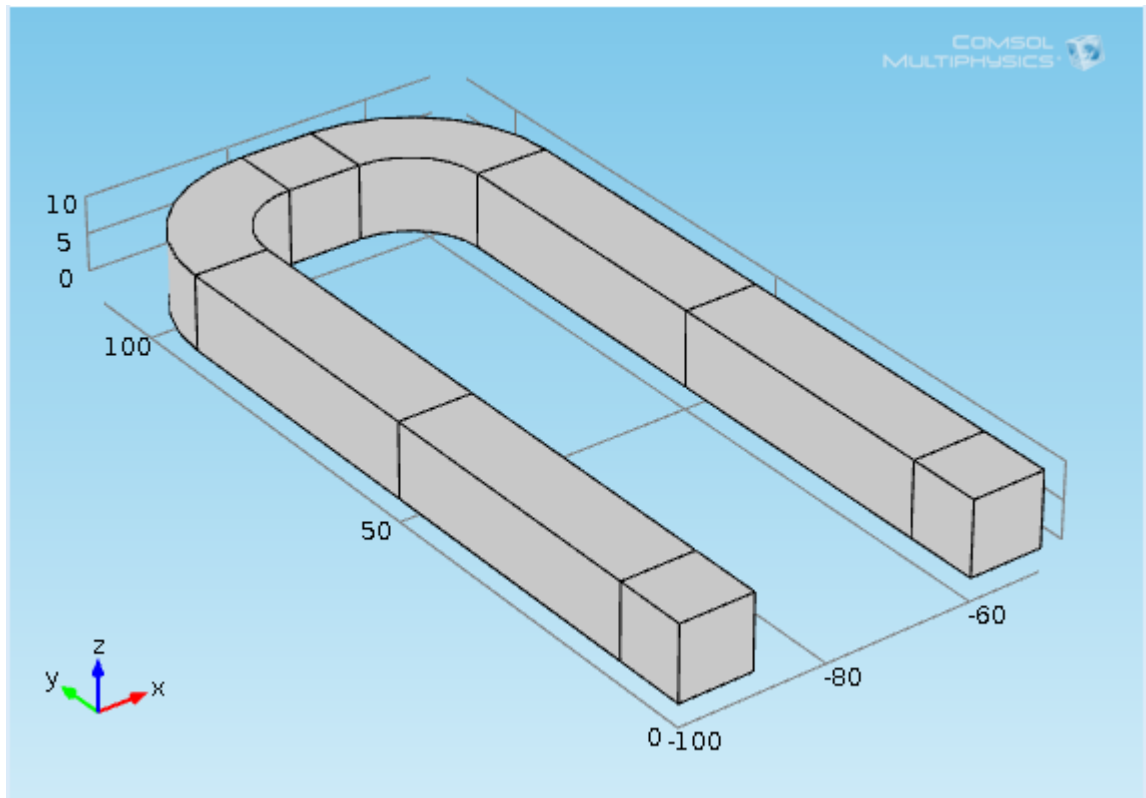


Figure. IV.1 : la géométrie de la structure thermocouple.

IV.4.2. Les matériaux :

Dans notre structure en utilisant deux matériaux différents par ce que en a deux conducteurs de différent nature, pour notre type en utilisant le couple **Chromel-Alumel** (le thermocouple de type K) (Fig. VI.2).

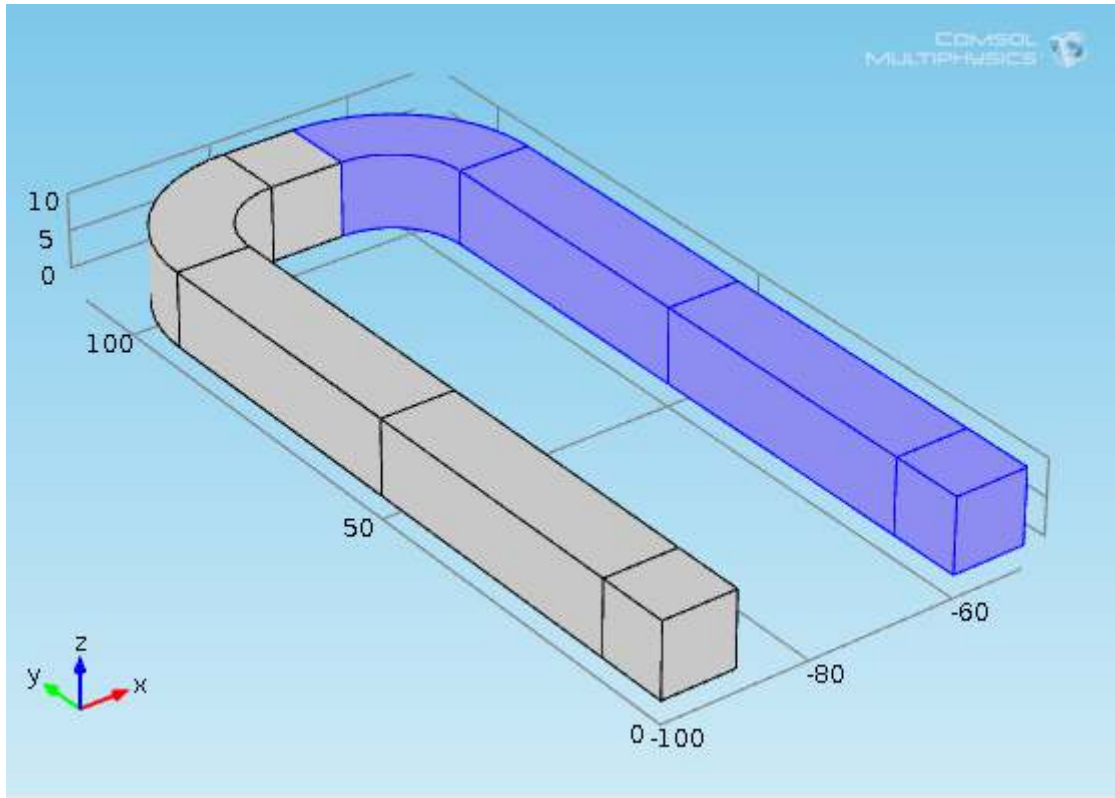


Figure IV.2 : chargement de matériaux.

Les paramètres de chaque matériau sont :

Alumel :

- Conductivité électrique (σ) : 29.7 S/m
- Conductivité thermique (k) : 237 W/ (m*k)
- Masse volumique (ρ) : 2700 W/ (m³)
- Capacité calorifique pression constant (C_p) : 523 J/ (kg*k)
- Module Young (E): 70^e9 (pa).

Chromel:

- Conductivité thermique (k) : 19.2 W/ (m*k)
- Capacité calorifique pression constant (C_p) : 448 J/ (kg*k)
- Module Young (E): 70^e9 (pa).

IV.4.3. Maillage de la structure :

L'optimisation du maillage est essentielle afin d'assurer la meilleure précision de calcul qui permet d'avoir une bonne qualité des résultats. Cette structure peut se présenter par une géométrie discrète, où les paramètres sont exprimés pour chaque nœud du maillage (le nombre total de degrés de liberté est égal au nombre de nœuds multiplié par le nombre de degrés de liberté par nœud).

Concernant la discrétisation des structures, le logiciel Comsol offre neuf possibilités de choix de maillage prédéfinies: extrêmement grossier, ..., grossier, normal, fin, plus fin, encore plus fin. Par ailleurs, il faut prendre en considération la taille de l'élément de base,

- Nous avons effectué cette opération par moyen d'un « PC TOSHIBA Satellite », Intel® Core i3 CPU M370@ 2.40GHz, 4.00Go de RAM.
- Avec un maillage extrêmement fin, nous avons obtenu le résultat suivant (fig. VI.3)

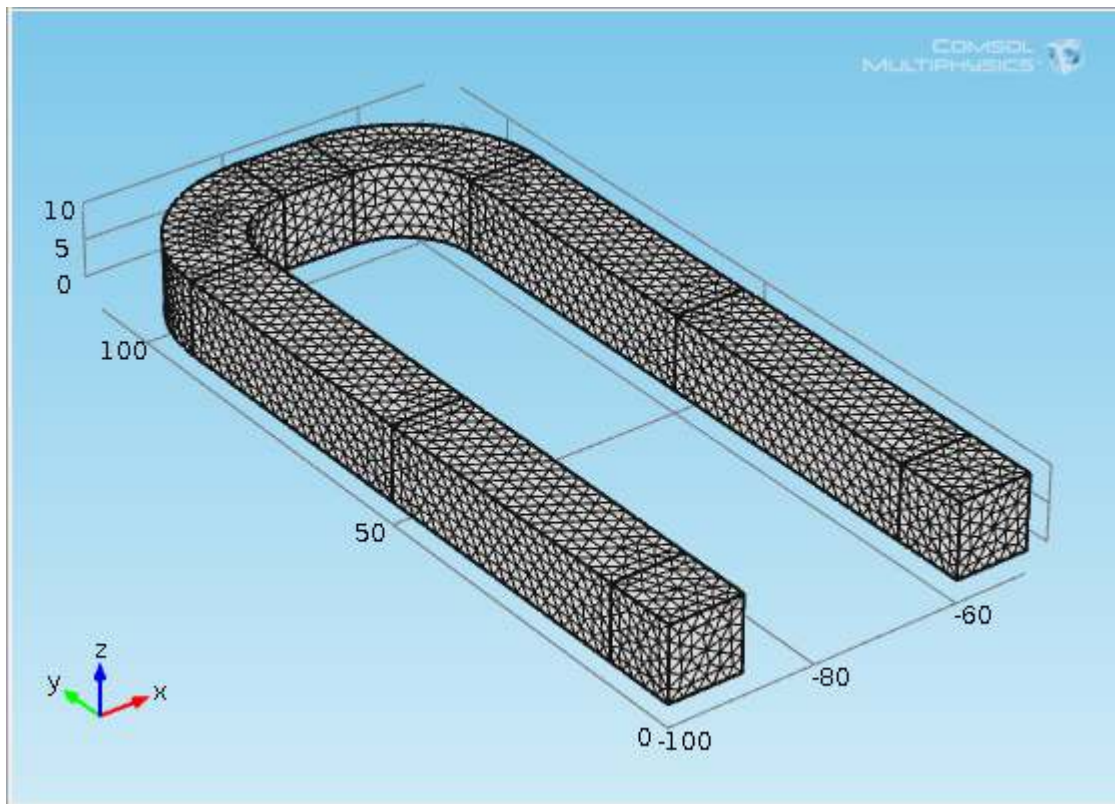


Figure IV.3 : Maillage extrêmement fin.

Pour le extrêmement fin, nous avons le résultat suivant :

- Le maillage comporte 35957 éléments.
- Nombre de degrés de liberté résolus: 108285
- Temps de calcul: 49

IV.4.4. Exploitation des résultats de simulation :

Après une étude de convergence en fonction de la qualité du maillage, nous avons obtenu les résultats suivants :

En appliquée une température dans les extrémités d'un conducteur A (fig. VI.4)

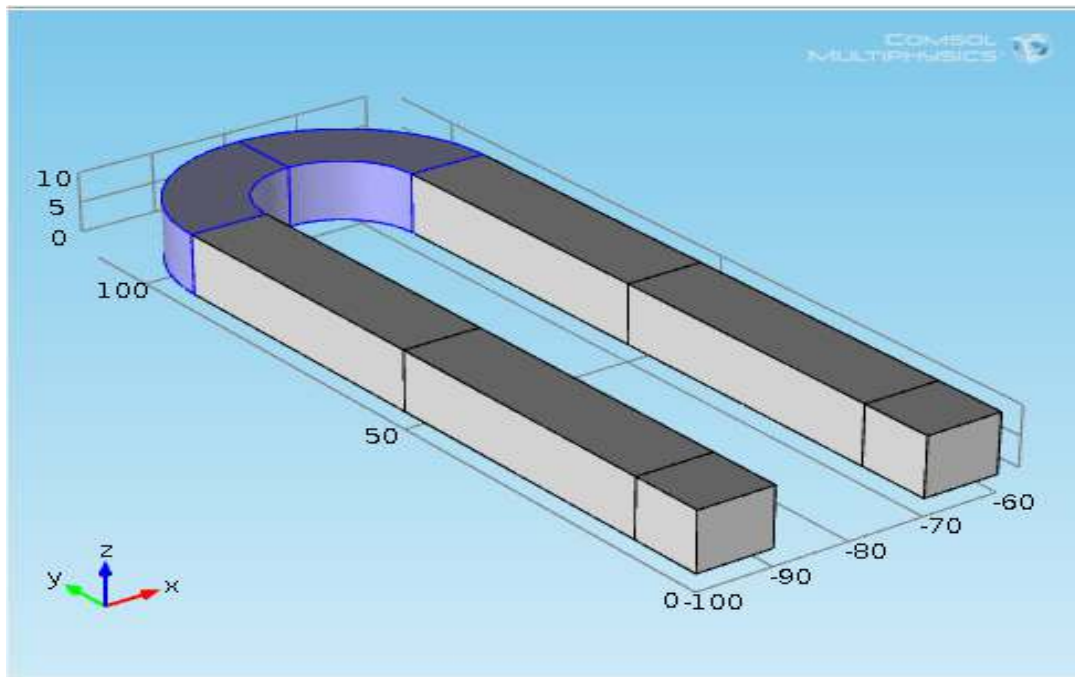


Figure IV.4 : chargement de température.

(Fig. VI.5) représente la variation de température dans la surface de notre structure .

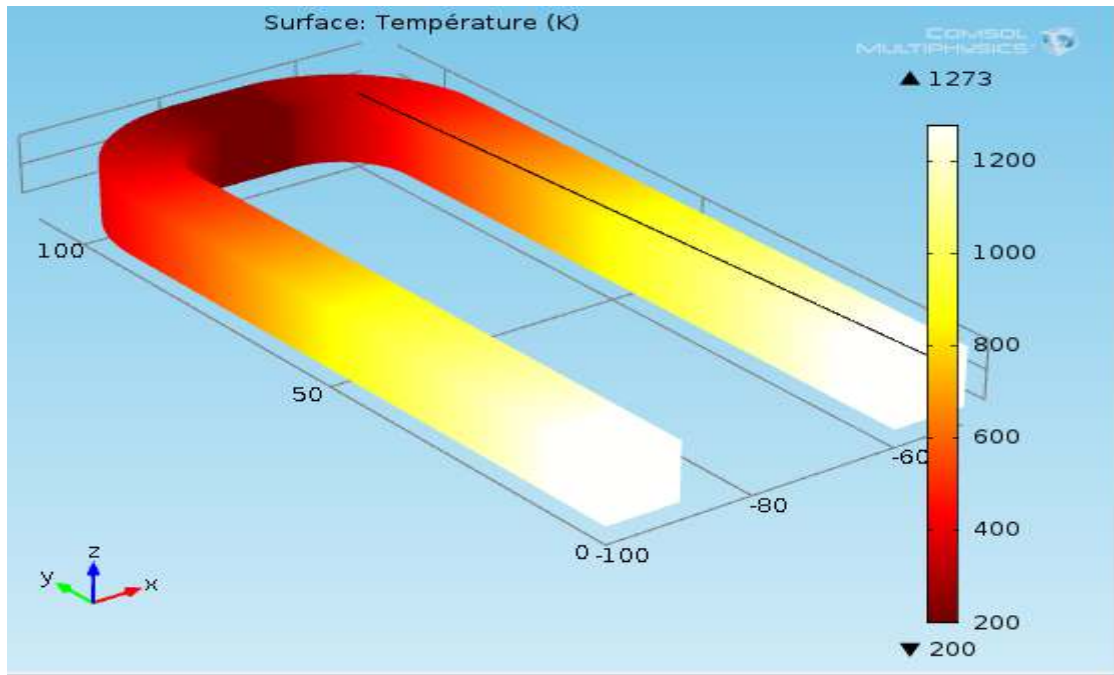


Figure IV.5 : transfère de la température dans la surface.

La (fig. IV.6) représente la différence de potentiel électrique en fonction de la température .on constate que le potentiel augmente si la température augmente.

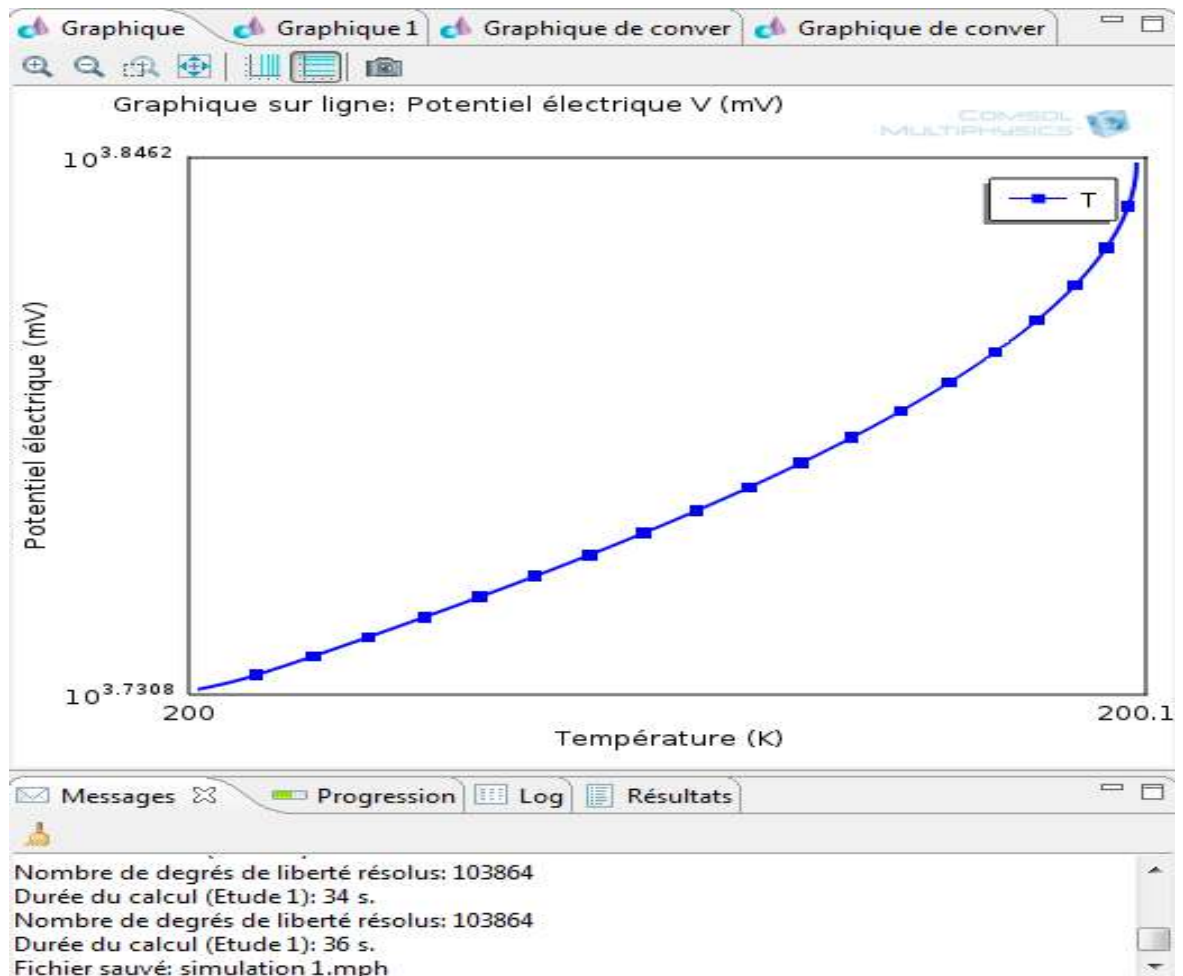


Figure VI.6: potentiel électrique en fonction de la température.

(Fig. VI.7) représente la variation de température dans le volume de notre structure

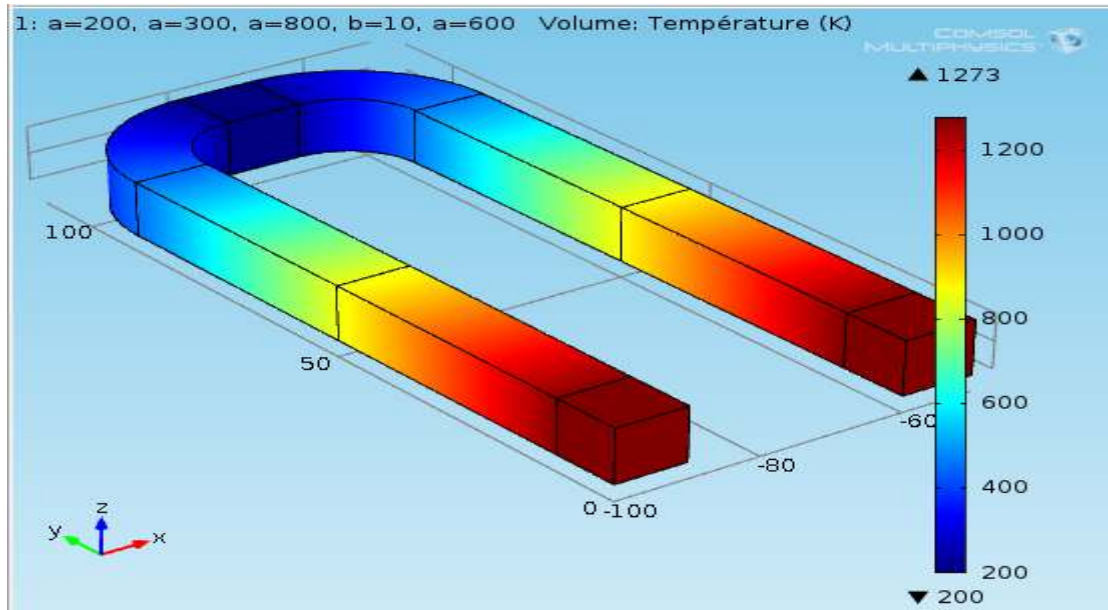


Figure IV.7 : la transfère de température dans le volume.

Détermination les paramètres de notre structure :

- Masse volumique (ρ) : $5872,34 \text{ W/ (m}^3\text{)}$
- Capacité calorifique pression constant (C_p) : $485.5 \text{ J/ (kg}\cdot\text{k)}$
- Source de chaleur total : 4.01^{e19} w/m^3
- Conductivité thermique : $122.90 \text{ W/ (m}\cdot\text{k)}$
- Flux de chaleur par conduction : $2.06^{e15} \text{ W/ (m}^2\text{)}$.
- Permittivité relative : 8672.86

IV.5. Conclusion :

Dans ce chapitre, partant des lois de base caractérisant le Transfer thermique dans les conducteurs lors' que on applique une température dans une jonction d'un thermocouple en obtient dan l'autre une f.é.m. qui va crée grâce a la différence de température de deux conducteur et la leur différence de mâtereaux cette f.é.m elle a une relation avec la température.

Conclusion générale

Conclusion générale :

L'évolution de la nouvelle génération de micro capteur de haute performance, basée sur les techniques standard de la microélectronique, complétée par le micro usinage de silicium, se focalise sur une intégration hybride du micro capteur et ceci pour augmenter les performances et réduire le coût.

Dans ce cadre vient l'objectif de ce mémoire à concevoir un micro capteur de température à thermocouple, le dit capteur sera ensuite destiné à la collecte d'information sur le climat pour dresser des bulletins météorologiques.

Nous avons commencé par une généralité sur les MEMS et un état de l'art des différentes technologies de fabrication des MEMS nous avons ensuite une étude bibliographique de ces trois types de micro capteur de température ainsi que leur mode de fonctionnement. Cette étude bibliographique nous a permis de nous familiariser avec diverses technologies employées à ce jour.

Le choix de ce capteur est fait à partir d'une étude bibliographique, la majeure partie des nouvelles cellules sensibles disponibles sur le marché pour la détection de température la technologie de type thermocouple est la plus communément utilisée du fait de sa facilité de fabrication.

Notre étude a porté sur la conception d'une structure micro capteur, nous nous sommes appuyés sur le savoir-faire acquis (procédés technologiques précédents), ensuite nous avons simulé les différentes étapes de mesure à l'aide du logiciel COMSOL multi physique.

Les perspectives pour ce travail sont assez nombreuses, étant donné que le thème des microsystèmes se compose d'un sujet multidisciplinaire assez vaste.

Références bibliographiques

Références bibliographiques:

- [1] benoit, C "modélisation des fautes et conception en vue de test structurel des micro système " thèse de doctorat, institut national poly technique de grenoble,2001.
- [2] www2.ac-lyon.fr.
- [3] Farès Tounsi, " Microphone électrodynamique MEMS en technologie CMOS : étude, modélisation et réalisation". Thèse doctorat, INSTITUT POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE, mars 2010.
- [4] S.D Senturia, "Microsystem Design". Traité EGEM, Hermès Science Publications (Paris) 2002.
- [5] M.Gad-el-Hak, "MEMS Handbook", CRC PRESS 2002.
- [6] N.Maluf, K.Williams, "An Introduction to Microelectromechanical Systems Engineering", Artech House 2004.
- [7] M.Madou , "Fundamentals of microfabrication " , Kluwer Academic (Boston) 2001.
- [8] Mir, Salvador, "Conception des microsystèmes sur silicium". EGEM, Hermès Science Publications, Paris, septembre 2002
- [9] David Petrou, " Etude théorique et expérimentale des techniques d'assemblage et de mise en boîtier pour l'intégration de microsystèmes radiofréquences". Thèse doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse, décembre 2006,
- [10] Tayeb Mohammed Brahim, "Micro Technologie de Surface ". Programme TEMPUS, CDTA, Alger, Juin 2005
- [11] www.microelectronique.univ-rennes1.fr.
- [12] K.E.Petersen, "Silicon as a Mechanical Material", Proceedings of the IEEE, Vol 70, No 5, May1982
- [13] N.Boudeau, G.Cabodevila, " Technologie de fabrication des microsystèmes". Polycopie du module MEC7 Procédés de micro fabrication, option : mécanique, ENSMM, version 2007.
- [14] S. Beeby, G. Ensell, M. Kraft, Neil White, "MEMS Mechanical Sensors", Artech House 2004.
- [15] A.Boukabache, P.Menini, P.Pons, "Microcapteurs de pression". R2 070-Techniques de l'ingénieur. Référence bibliographique
- [16] <http://myspace.hexabyte.tn>.
- [17] Mme BENAHMED BENABDALLAH Nadia, " *Propriétés physiques des semi-conducteurs(Si monocristallin et Ge) et Simulation des cellules solaires à base de Si et SiGe* ". THESE DE MAGISTER En PHYSIQUE ENERGETIQUE ET MATERIAUX, Juillet 2006.
- [18] Maurice .R " contribution a la méthodologie de conception systèmes " application a la réalisation d'un microsysteme multi capteur communicant pour le génie civil " thèse de doctorat institut national polytechnique de Toulouse ,2005.

- [19] Anders H ‘‘développement of a multi sensor for marine environment studies ‘‘ thèse de Magister, département for micro and technologie, DTU, 2005.
- [19] Georges Asch et coll ‘‘Les capteurs en instrumentation industrielle 7e édition préface de marc desjardins, 621_381_536.
- [20] Bertrand. M ‘‘conception, réalisation et mise en œuvre d’une plateforme d’instrumentation thermique par des applications micro fluidique ‘‘ thèse de doctorat université de Toulouse III- Paul sabtier, 2009.
- [21] Bertrand. M ‘‘conception et réalisation et mise en œuvre d’une plateforme d’instrumentation thermique par des applications micro fluidique ‘‘ thèse de doctorat université de Toulouse III-Paul sabtier , 2009.
- [22] Lefeuvre. E et al ‘‘silicon on insulator temperature and pressure sensor for MEMS smart pakaging ‘‘procédia chemistry 1_782_785_2009.
- [23] Scholer . L et al, ‘‘ monolithically integrated micro flow sensor for lab_on_chip application micoelectronic engineering 78_79_164_170_2005
- [24] Courba.J et al, ‘‘reliability improuvement of suspended platinnium based micro healing element‘‘, sensor and Actuator A 142_284_291_2008 .
- [25] Briand.D, ‘‘integration of max gas sensor on polyimide hotplates’’ sensor and actuator, I 143_234_2008.