



Université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen

Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique et Electronique



THESE

Présentée à l'Université Abou Belkaïd de Tlemcen, faculté de Technologie

Pour obtenir le grade de Docteur

Spécialité : Microélectronique

Sur le thème

CONCEPTION ET MODELISATION D'UNE MICROSONDE METEOROLOGIQUE EN TECHNOLOGIE MEMS

Présentée par :

Mme MIDOUN Née MEDJAHDI Nadja

Soutenu en Janvier 2016

Devant le jury composé de :

<i>Président</i>	: Mr. CHABANE SARI Nasr Eddine	Professeur UABB Tlemcen
<i>Directeur de thèse</i>	: Mr. BENMOUSSA Nasr Eddine	Maître de conférences A UABB Tlemcen
<i>Examineur</i>	: Mr. LASRI Boumediene	Professeur Université de SAIDA
<i>Examineur</i>	: Mr. MERAD Lotfi	Maître de conférences A EPST Tlemcen
<i>Invité</i>	: Mr. GHAFfour Kheir Eddine	Professeur UABB Tlemcen



Université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen

Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique et Electronique



THESE

*Présentée à l'Université Abou Belkaïd de Tlemcen, faculté de Technologie
Pour obtenir le grade de Docteur
Spécialité : Microélectronique*

Sur le thème

CONCEPTION ET MODELISATION D'UNE MICROSONDE METEOROLOGIQUE EN TECHNOLOGIE MEMS

Présentée par :

Mme MIDOUN Née MEDJAHDI Nadja

Soutenu en Janvier 2016

Devant le jury composé de :

Président	: Mr. CHABANE SARI Nasr Eddine	Professeur UABB Tlemcen
Directeur de thèse	: Mr. BENMOUSSA Nasr Eddine	Maître de conférences A UABB Tlemcen
Examineur	: Mr. LASRI Boumediene	Professeur Université de SAIDA
Examineur	: Mr. MERAD Lotfi	Maître de conférences A EPST Tlemcen
Invité	: Mr. GHAFfour Kheir Eddine	Professeur UABB Tlemcen

Dédicace

Je dédie ce travail à :

- *Mes parents qui m'ont encouragé et motivé tout au long de mes études. Je leurs serai éternellement reconnaissant.*
 - *Mon mari, qui a su partager mes angoisses aussi bien que mes joies.*
 - *Mes enfants : Nour El Houda et Mohammed Tewfik.*
 - *Mes sœurs et frères.*
- *Tous mes ami(e)s.*

Remerciements

Ce travail de thèse a été effectué au sein de l'Unité de Recherche Matériaux et Energies Renouvelables de Tlemcen(URMER) sous la direction de Monsieur BENMOUSSA Nasr Eddine, Maître de Conférences à l'université Abou Bekr Belkaïd Tlemcen. Ses conseils utiles et avisés m'ont été d'une grande aide, non seulement d'un point de vue scientifique mais aussi pédagogique et humain.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance à Monsieur CHABANE SARI Nasr Eddine Professeur au département de génie électrique et électrique de la faculté de Technologie de l'université de Tlemcen pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de présider le jury de cette thèse.

Je remercie très sincèrement Monsieur LASRI Boumediene Professeur à l'Université de SAIDA pour avoir accepté d'examiner mon travail et de participer au jury de cette thèse.

Que Monsieur MERAD Lotfi maître de conférences à l'école préparatoire de bel-horizon de l'université de Tlemcentrouve l'expression de mes chaleureux remerciements pour avoir accepté d'examiner mon travail et de participer au jury de cette thèse.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance à Monsieur GHAFFOUR Kheir Eddine Professeur au département de génie électrique et Responsable de la formation doctorale de la faculté de Technologie de l'université de Tlemcen pour avoir accepté l'invitation.

Mes vifs remerciements s'adressent au Professeur Carles Ferrer Directeur au Département de Microélectronique et Systèmes électronique à l'université Autonome de Barcelone pour m'avoir accueilli au sein du laboratoire de l'école de Génie à l'Université Autonome de Barcelone (UAB) dans le cadre d'un stage de courte durée. Je remercie aussi Dr. Raul Aragones car c'est avec lui que j'ai eu l'occasion de monter une station météorologique.

Introduction générale1

Chapitre I : radiosondage météorologique

I.1. Météorologie.....	3
I. 1.1. Historique.....	3
I.1.2.Composition de l’atmosphère terrestre.....	4
I.1.3. La pression atmosphérique.....	5
I.1.3.1. Variations de la pression avec l’altitude.....	6
I.1.3.1. Variations de la pression au niveau de la mer.....	6
I.1.4. La température.....	6
I.1.4.1. Variations saisonnières de la température.....	6
I.1.4.2. Variations locales de la température.....	6
I.1.4.3. Evolution de la température avec l’altitude.....	7
I.1.5. L’humidité de l’air.....	7
I.1.5.1. Humidité relative de l’air.....	7
I.1.5.2. Saturation de l’air humide.....	8
I.1.6. Les masse d’air.....	8
I.1.6.1. Notion de masse d’air en météorologie.....	8
I.1.6.2. Les type de masse d’air	9
I.1.7. Le vent.....	9
I.1.7.1. La force de gradient de pression.....	10
I.1.7.2. La force de Coriolis.....	10
I.1.7.3. Les forces de frottements.....	10
I.1.8. Les précipitations.....	10
I.2. Radiosondage.....	11
I. 2.1. Historique.....	11
I.2.2.Ballon-sonde.....	12
I.2.3. Différents types de ballons-sondes.....	12
I.2.4. Eléments constituant le ballon-sonde.....	13
I.2.5. Composants du ballon-sonde moderne.....	14

Chapitre II : Capteurs de pression, de température et d’humidité

Introduction.....	17
II.1.	
Capteur.....	17
II.2. Différents types de capteurs à étudier	18
II. 2.1. Capteur de pression.....	18
II.2.1.1. Capteur de pression à détection capacitive.....	18
II.2.1.2. Capteur de pression à détection piézorésistive.....	19
II.2.1.3. Comparaison des approches capacitive et piézorésistive	20
II.2.2.Capteur de température.....	21
II.2.2.1. Les thermocouples.....	22
II.2.2.2. Les capteurs à jonction semi-conductrice.....	24
II.2.2.3. Les capteurs de température de type résistance.....	25
II.2.3. Capteur d’humidité.....	27
II.2.3.1. Détermination de l’humidité.....	27

Table des matières

1. L'humidité absolue.....	28
2. Le rapport de mélange.....	28
3. La température de rosée.....	29
4. L'humidité relative.....	29
5. Le point de rosée.....	29
II.2.3.2. Type de capteurs d'humidité.....	30
II.2.3.2.1. Capteurs optiques.....	31
II.2.3.2.2. Capteurs gravimétriques.....	31
II.2.3.2.3. Capteurs hygrométriques.....	32
II.2.3.2.4. Capteurs résistifs.....	33
II.2.3.2.5. Capteurs capacitifs.....	33
II.2.3.3. Généralités sur les matériaux polymères.....	35
II.2.3.3.1. Monomère et polymère.....	35
II.2.3.3.2. Nature dipolaire de l'eau.....	36
II.2.3.3.3. Absorption de l'eau dans les polymères.....	36
II.2.3.4. Les polyimides.....	37
Conclusion.....	39

Chapitre III :Modélisation des capteurs constituant la microsonde météorologique

Introduction.....	40
III.1. Modélisation du capteur de pression à détection piézorésistive.....	40
III.1.1. La piézorésistivité.....	41
III.1.2. Principe de fonctionnement du capteur de pression à détection piézorésistive.....	42
III.1.3. Réponse mécanique du capteur de pression	43
III.1.3.1. Déflexion de la membrane.....	43
III.1.3.2. Etude des contraintes.....	46
III.1.4. Réponse électrique du capteur de pression piézorésistif.....	49
III.2. Modélisation du capteur de température à détection résistive.....	53
III.3. Modélisation du capteur d'humidité à détection capacitive	55
III.3.1. Principe de fonctionnement.....	56
III.3.2. Modélisation de la diffusion.....	58
III.3.3. Permittivité du film de détection (Diélectrique).....	58
III.3.4. Modélisation de la capacité.....	59
Conclusion.....	61

Chapitre IV : Simulation des capteurs constituant la microsonde météorologique

Introduction.....	62
IV.1. Simulation par la méthode des éléments finis	62
IV.1.1. Principe de base.....	63
IV.1.2. Logiciel de simulation.....	63
IV.1.2.1. Principe de la modélisation sous le logiciel COMSOL.....	63
IV.1.2.2. Maillage.....	65
IV.2. Simulation du capteur de pression	65

Table des matières

IV.2.1. Simulation mécanique sur des membranes carrées.....	65
IV.2.2. Comparaison des résultats.....	68
IV.2.2.1. Déflexion de la membrane.....	68
IV.2.2.2. Répartition des contraintes.....	68
IV.2.2.3. Effets de la pression et de l'épaisseur de la membrane sur la déflexion.....	70
1. Effet de l'épaisseur de la membrane sur la déflexion.....	70
2. Effet de la pression appliquée sur la déflexion.....	72
IV.2.3. Simulation électrique du capteur de pression à détection piézorésistive.....	73
IV.2.3.1. Potentiel électrique.....	76
IV.2.3.2. Réponse du capteur de pression.....	77
IV.3. Simulation du capteur de température.....	77
IV.3.1. Distribution de la température.....	81
IV.3.2. Potentiel électrique.....	81
IV.3.3. Chaleur générée par l'élément chauffant.....	82
IV.3.4. Répartition des contraintes.....	82
IV.3.5. Réponse du capteur de température.....	83
IV.4. Simulation du capteur d'humidité.....	83
IV.4.1. Potentiel électrique.....	85
IV.4.2. Réponse du capteur du capteur d'humidité.....	85
Conclusion.....	86

Chapitre V : Conception des capteurs constituant la sonde météorologique

Introduction.....	88
V.1. Techniques spécifiques de fabrication.....	88
V.1.1. Choix du substrat.....	88
V.1.2. Oxydation du silicium.....	89
V.1.3. Nitrure de silicium.....	90
V.1.4. Le dépôt.....	90
V.1.5. La gravure.....	91
V.1.5.1. Gravure isotrope.....	91
V.1.5.2. Gravure anisotrope.....	92
V.1.6. La photolithographie.....	92
V.1.7. Dépôt par la technique d'alignement double face.....	93
V.1.8. Soudure thermoélectrique.....	94
V.2. Les principales étapes technologiques pour la réalisation du multicapteur.....	95
V.2.1. Croissance thermique de l'oxyde de silicium.....	96
V.2.2. Dépôt LPCVD de nitrure de silicium.....	96
V.2.3. Dépôt de platine et de polyimide.....	96
V.2.4. Métallisation.....	97
V.3. Conception du multicapteur – utilisation du logiciel SILVACO.....	101

Table des matières

V.3.1. Présentation du logiciel SILVACO.....	101
V.3.1.1. ATHENA	102
V.3.1.2. DECKBUILD	102
V.3.1.3. TONYPLOT	103
V.3.2. Simulation en 2D de dispositifs sous ATHENA.....	103
V.3.2.1. Maillage du dispositif	103
V.3.2.2. Choix du substrat	104
V.3.2.3. Oxydation thermique	104
V.3.2.4. Dépôt de nitrure de silicium	105
V.3.2.5. Formation de la membrane	105
V.3.2.6. Dépôt de platine suivi d'une photolithographie.....	106
V.3.2.7. Dépôt et gravure du polyimide	107
V.3.2.8. Dépôt de la deuxième couche de platine	108
V.5. Chaîne de mesure des paramètres de l'atmosphère (P, T, U et V)	109
Conclusion.....	110
Conclusion générale	111
Annexe A :	114
Annexe B :	116
Annexe C :	117
Annexe D :	118
Références Bibliographiques.....	125
Travaux de recherche scientifiques.....	135

Chapitre I :

- Figure I.1 : Structure verticale de l'atmosphère.*
Figure I.2 : Exemple d'anémomètre (a), de girouette (b) et de manche d'air (c).
Figure I.3 : Action des trois types de forces sur l'air en mouvement.
Figure I.4 : Exemples de pluviomètres (a) et d'image radar (b).
Figure I.5 : Ballon classique gonflé à l'hydrogène.
Figure I.6 : Ballon tétraédrique.
Figure I.7 : Schéma de la chaîne complète.
Figure I.8 : Chaîne typique de vol de radiosonde.
Figure I.9 : Exemples de radiosondes couramment utilisées dans le monde.

Chapitre II :

- Figure II.1 : Représentation schématique d'un capteur.*
Figure II.2 : Schéma d'un capteur de pression capacitif.
Figure II.3 : Schéma d'un capteur de pression piézorésistif.
Figure II.4 : Principe de l'effet Seebeck et du thermocouple.
Figure II.5 : Conversion tension température pour les différents thermocouples.
Figure II.6 : Topologie de surface des thermocouples Cu/CuNi sur membrane.
Figure II.7 : Représentation schématique d'une caractéristique courant-tension d'une diode silicium.
Figure II.8 : Vue en coupe schématique d'un capteur de température sur membrane.
Figure II.9 : Capteurs de flux Platine intégrés dans un canal.
Figure II.10 : Comparaison entre une géométrie de membrane et de résistance chauffante carrée et circulaire.
Figure II.11 : Point de rosée.
Figure II.12 : Capteur d'humidité gravimétrique avec module Peltier.
Figure II.13 : Capteur d'humidité hygrométrique : (a) Schéma de principe du capteur (b) Variation de la dilatation du cheveu en fonction de l'humidité relative.
Figure II.14 : Capteur d'humidité gravimétrique avec module Peltier.
Figure II.15 : Capteur d'humidité Capacitif en Si poreux.
Figure II.16 : Nature dipolaire de l'eau.
Figure II.17 : Formule chimique du Kapton.

Chapitre III :

- Figure III.1 : Schéma synoptique d'un capteur de pression piézorésistif.*
Figure III.2 : Architecture du capteur de pression piézorésistif.
Figure III.3 : Vue de dessus et en coupe de la membrane de forme carrée.
Figure III.4 : Schéma de la déflexion de la membrane soumise à une pression P.
Figure III.5 : Déflexion d'une membrane carrée sous une pression appliquée.
Figure III.6 : Représentation en 3D de la contrainte normale.
Figure III.7 : Représentation en 3D de la contrainte de cisaillement.
Figure III.8 : Schéma de principe du positionnement des jauges piézorésistives.
Figure III.9 : (a) Vue en coupe d'une membrane carrée avec Les piézorésistances. (b) Représentation schématique de la disposition des quatre jauges sur la membrane.
Figure III.10 : Sensibilité du capteur.

Figure III.11 : Résistance en fonction de la température du Pt100 pour : $-200 \leq T \leq 800$.

Figure III.12 : Résistance en fonction de la température du Pt100 pour : $-90 \leq T \leq 60$.

Figure III.13 : Structure du capteur d'humidité capacitif.

Figure III.14 : Principe de fonctionnement du capteur d'humidité capacitif.

Figure III.15 : Pression de saturation en fonction de la température ($-30 \text{ °C} \leq T \leq +80 \text{ °C}$).

Figure III.16 : Capacité en fonction de l'humidité.

Chapitre IV :

Figure IV.1 : Organigramme de la modélisation utilisant le logiciel COMSOL.

Figure IV.2 : Exemple d'éléments de maillage éléments finis.

Figure IV.3 : Membrane carrée encastrée à ces bords : (a) encastrement réel, (b) encastrement parfait.

Figure IV.4 : Application de la pression au centre de la membrane : (a) encastrement réel, (b) encastrement parfait.

Figure IV.5 : Maillage : (a)encastrement réel, (b) encastrement parfait.

Figure IV.6 : Déformation de la membrane pour $P = 100\text{kPa}$ et $t = 15\mu\text{m}$.

Figure IV.7 : Contraintes longitudinales pour $P = 100\text{kPa}$ et $t = 15\mu\text{m}$.

Figure IV.8 : Contraintes transversales pour $P = 100\text{kPa}$ et $t = 15\mu\text{m}$.

Figure IV.9 : Contraintes de cisaillement pour $P = 100\text{kPa}$ et $t = 15\mu\text{m}$.

Figure IV.10 : Contraintes de Von Mises pour $P = 100\text{kPa}$ et $t = 15\mu\text{m}$.

Figure IV.11 : Déflexion suivant la ligne de coupe pour différentes valeurs de l'épaisseur de la membrane et pour une pression de 100kPa pour un encastrement réel.

Figure IV.12 : Déflexion suivant la ligne de coupe pour différentes valeurs de l'épaisseur de la membrane et pour une pression de 100kPa pour un encastrement parfait.

Figure IV.13 : Maillage : (a)encastrement réel, (b) encastrement parfait.

Figure IV.14 : Déflexion pour différentes valeurs de la pression appliquée dans le cas d'un encastrement réel.

Figure IV.15 : Déflexion maximal pour différentes valeurs de la pression appliquée dans le cas d'un encastrement réel.

Figure IV.16 : Déflexion pour différentes valeurs de la pression appliquée pour le cas d'un encastrement parfait.

Figure IV.17 : Déflexion maximal pour différentes valeurs de la pression appliquée dans le cas d'un encastrement réel.

Figure IV.18 : capteur de pression piézorésistif.

Figure IV.19 : Les quatre résistances montées en pont de Wheatstone.

Figure IV.20 : structure maillée.

Figure IV.21 : Potentiel électrique à la surface du pont de Wheatstone.

Figure IV.22 : Tension de sortie en fonction de la pression appliquée.

Figure IV.23 : Diagramme de la plate forme chauffante.

Figure IV.24 : Différentes géométries de la résistance.

Figure IV.25 : capteur de température résistif.

Figure IV.26 : maillage du modèle.

Figure IV.27 : Distribution de la température.

Figure IV.28 : Distribution du potentiel électrique.

Figure IV.29 : Chaleur générée par l'élément chauffant.

Figure IV.30 : Contraintes de Von Mises.

Figure IV.31 : Réponse du capteur de température pour des températures allant de :

-20 °C à 80 °C.

Figure IV.32 : Capteur d'humidité capacitif.

Figure IV.33 : Propriétés des matériaux.

Figure IV.34 : maillage du modèle.

Figure IV.35 : Distribution du potentiel électrique.

Figure IV.36 : Capacité en fonction de l'humidité.

Chapitre V :

Figure V.1 : Exemple de cavité obtenue par gravure isotrope.

Figure V.2 : Exemple de cavité obtenue par gravure anisotrope.

Figure V.3 : Procédé de lithographie.

Figure V.4 : Schéma de l'appareillage de l'alignement double face.

Figure V.5 : Schéma de principe du montage de soudure thermoélectrique.

Figure V.6 : Structure des capteurs de la sonde météorologique.

Figure V.7 : Principe du dépôt métallique par lift-off.

Figure V.8 : Vue en coupe des principales opérations technologiques dédiées à la réalisation du multicapteur.

Figure V.9 : Schéma synoptique des modules utilisés dans la simulation par TCAD-SILVACO.

Figure V.10 : L'outil DeckBuild.

Figure V.11 : Choix du maillage.

Figure V.12 : Substrat de silicium dopé au bore.

Figure V.13 : Oxydation thermique double face.

Figure V.14 : Dépôt face arrière du nitrure de silicium.

Figure V.15 : Ouverture face arrière du film diélectrique (SiO_2 et Si_3N_4).

Figure V.16 : Création de la membrane.

Figure V.17 : Inversion de la membrane suivit d'un dépôt de nitrure de silicium.

Figure V.18 : Dépôt du platine.

Figure V.19 : Gravure du platine avec une étape de photolithographie.

Figure V.20 : Elimination de la résine.

Figure V.21 : Dépôt du polyimide.

Figure V.22 : Gravure du polyimide.

Figure V.23 : Dépôt de Platine.

Figure V.24 : Etape de photolithographie.

Figure V.25 : Libération des capteurs de température, de pression et d'humidité.

Figure V.26 : Principales blocs d'une chaine de mesure des paramètres météorologiques.

Annexe D :

Figure D.1 : barreau semiconducteur soumis à une contrainte longitudinale.

Figure D.2 : barreau semiconducteur soumis à une contrainte transversale.

Figure D.3 : Schéma de principe d'un pont de Wheatstone.

Chapitre I :

Tableau I.1 : Température du point de rosée à une pression $P = 1013$ mbar

Chapitre II :

Tableau II.1 : Comparaison des caractéristiques de capteurs de pression au silicium.

Tableau II.2 : Echelles de la température.

Tableau II.3 : Différent types de thermocouples commercialisés.

Tableau II.4 : caractéristiques des différents métaux.

Tableau II.5 : Module d'élasticité et constante diélectrique de quelques polyimides commerciales.

Chapitre III :

Tableau III.1 : Valeurs numériques des coefficients k_{ij} pour une membrane carrée.

Tableau III.2 : Valeurs numériques des coefficients d'élasticité du Silicium.

Chapitre IV :

Tableau IV.1 : Paramètres physiques du Platine et du l'Aluminium.

Annexe D :

Tableau D.1 : Caractéristiques d'alliage pour jauges métalliques.

Liste des notations utilisées :

- π : coefficient piézorésistif.
 π_l : coefficient piézorésistif longitudinal.
 π_t : coefficient piézorésistif transversal.
 ϵ_r : permittivité relative.
 E_{110} : module d'young dans le plan (100) et la direction [110].
 G_{110} : module de coulomb dans le plan (100) et la direction [110]
 N_A : nombre d'Avogadro égale à $6.023.10^{23} \text{ mol}^{-1}$.
 S_{ij} : tenseur des coefficients d'élasticité du matériau.
 S'_{ij} : coefficients d'élasticité du Silicium dans le nouveau repère (Ox'y'z').
 u_i : tenseur des déformations induites dans le matériau.
 V_e : tension d'entrée du pont de Wheatstone.
 V_i : volume de la couche de détection.
 V_s : tension de sortie du pont de Wheatstone.
 V_{S0} : tension de sortie du pont de Wheatstone à $P = 0$.
 V_{SL} : tension de linéarité de sortie du pont de Wheatstone.
 α_p : polarisabilité moléculaire.
 ϵ_0 : permittivité du vide.
 ϵ_l : déformation longitudinal.
 $\epsilon_{r(0)}$: permittivité avant absorption.
 $\epsilon_{r(RH)}$: permittivité après absorption.
 ν_{110} : coefficient de poisson dans le plan (100) et la direction [110].
 σ_1 : contrainte longitudinale.
 σ_j : tenseur des contraintes.
 τ_6 : contrainte de cisaillement.
 α : coefficient thermique.
 σ_e : conductivité électrique.
 $\Delta\epsilon_r$: variation de la permittivité de la couche de détection.
 ΔQ : variation de la quantité d'eau adsorbée dans le diélectrique.
 a : côté de la membrane.
 A : surface des armatures.
 a_m : première constante du métal.
 b_m : deuxième constante du métal.
 c_m : troisième constante du métal.
 C : capacité du condensateur.
 c : concentration.
 $CTFG$: coefficient de température du facteur de jauge.
 CTR : coefficient de température de la résistance.
 d : distance entre les armatures.
 D : le coefficient de rigidité.
 D_n : le coefficient de diffusion.

e : épaisseur des jauges.
 E : module d'Young.
 e_1 : épaisseur de la résistance en platine.
 g : accélération de la pesanteur.
 G_l : facteur de jauge longitudinal.
 G_t : facteur de jauge transversal.
 G : module de coulomb.
 G_F : facteur de jauge.
 h : épaisseur de la membrane.
 i : entier pair.
 j : entier pair.
 J_L : jauge longitudinale.
 J_T : jauge transversale.
 k_{ij} : constantes.
 L : longueur des jauges.
 L : longueur.
 L_1 : longueur de la résistance en platine.
 m : masse d'air humide.
 M : masse du polymère
 m_a : masse d'air sec.
 m_v : masse de la vapeur d'eau.
 P : pression.
 P_a : la pression de vapeur absolue.
 P_s : la pression de vapeur saturante.
 p_v : pressions de la vapeur d'eau.
 p_w : pressions partielles.
 R : résistance.
 R_0 : résistance à 0°C .
 RH : humidité relative.
 R_N : valeur de la résistance des jauges normales.
 R_P : valeur de la résistance des jauges parallèles.
 S : section.
 s_1 : séparation.
 T : température.
 t : temps.
 T_{ext} : température extérieure.
 u, v : coordonnées cartésiennes normalisées.
 v : volume de l'air humide.
 V_{in} : tension appliquée à la résistance de platine.
 V_p : volume du polymère.
 W : largeur des jauges.
 $W(0,0)$: déflexion au centre de la membrane.
 $w(x,y)$: déformation de la membrane.
 W_1 : largeur de la résistance en platine.
 W_e : largeur de la partie encastrée de la membrane.
 $W_N(u,v)$: déformation normalisée de la membrane.

- α_A : coefficient Seebeck du matériau A.
 α_B : coefficient Seebeck du matériau B.
 α_{Si} : coefficient d'anisotropie du silicium.
 ΔC : représente la variation de la capacité.
 $\Delta R/R$: variation relative des piézorésistance.
 ΔT : différence de température.
 ΔV : différence de tension.
 ΔV_S : variation de la tension de sortie.
 ΔV_{S0} : variation de la tension d'offset.
 ϵ_0 : permittivité du vide.
 ϵ_l : déformation du barreau en longueur.
 ϵ_r : permittivité du diélectrique.
 η : coefficient de non linéarité.
 θ : angle de rotation autour de l'axe (Oy).
 ν : coefficient de Poisson.
 ρ_m : masse volumique du silicium.
 ρ : résistivité.
 ρ_p : masse volumique du polymère.
 σ : contrainte mécanique.
 σ_2 : contrainte transversale.
 φ : angle de rotation autour de l'axe (Oz).
 ψ : deuxième Angle de rotation autour de l'axe (Oz).

INTRODUCTION GENERALE

Introduction Générale :

De tout temps, l'homme a cherché à percer les mystères des phénomènes atmosphériques. Ces derniers conditionnent en effet grandement la vie de l'être humain. Les chercheurs scientifiques cherchent toujours à expliquer ces phénomènes d'où la naissance du terme météorologie. Cette dernière désigne la science qui étudie les phénomènes atmosphériques en utilisant une technique d'observation en altitude. Longtemps unique moyen opérationnel disponible pour l'altitude, le radiosondage, subit maintenant la concurrence de nouveaux modes d'investigation, notamment les mesures par des avions de ligne. Ces derniers sont connus sous le nom de mesures Amdar (**A**ircraft **M**eteorological **D**ata **R**elay). Les données qui en résultent sont transmises au sol par les compagnies aériennes au moyen du système Acars (**A**ircraft **C**ommunication **A**dressing and **R**eporting **S**ystem). Cependant, ces nouveaux moyens de mesure ne semblent pas mettre en péril la technique du radiosondage, mais viennent plutôt la compléter. En effet, les mesures du radiosondage restituent le profil de tous les paramètres météorologiques fondamentaux : pression, température, humidité et vent. Au contraire, les mesures par avion ou par télédétection satellitaire ne donnent pas l'ensemble de ces paramètres et sont souvent moins précises et moins bien résolues dans l'espace [1]. Les sondages doivent être effectués quotidiennement à 0h et 12h UTC (**C**oordinated **U**niversal **T**ime) et atteindre un niveau d'environ 13 600 mètres pour l'ensemble des paramètres pression, température, humidité et vent.

L'objectif de cette thèse consiste à modéliser et concevoir une microsonde météorologique à base de MEMS (**M**icro **E**lectro **M**echanical **S**ystem) permettant de mesurer les paramètres de l'atmosphère.

Les systèmes microélectromécaniques se décrivent assez bien par leur nom : le terme « Micro » se réfère à la taille (d'un micromètre à un millimètre), « Electro » annonce que l'électronique est impliquée et « mécanique » que des parties mobiles y sont incluses.

Les MEMS comportent généralement une partie mobile susceptible d'être actionnée et/ou un capteur, associés à une électronique de commande et de traitement.

Parmi les MEMS commercialisés, on peut citer les microcapteurs et les microactionneurs dont la détection ou l'actionnement repose sur différents principes. Par ailleurs, la réalisation de microstructures à l'aide de la technologie silicium est de plus en plus demandée dans le domaine des microcapteurs.

L'emploi des technologies de fabrication des circuits intégrés a rendu possible une *miniaturisation*. Cette dernière permet, grâce à une réduction de masse et de volume des éléments mécaniques, outre la résolution des problèmes d'encombrement, d'atteindre des performances intéressantes (fréquence de résonance élevée, temps de réponse très court, sensibilités importantes et surtout un coût très faible etc...). De plus, il est possible d'intégrer sur un même substrat les fonctions de capteurs capables de mesurer les paramètres

d'environnement, d'actionneurs pouvant réagir sur le monde extérieur et de circuit électronique de traitement du signal.

La *multiplicité* inhérente du mode de fabrication rend possible le traitement parallèle qui mène à une fabrication en grande quantité et à faible coût, c'est à dire la fabrication de plusieurs millions de composants rapidement et simultanément.

Enfin, pour exploiter la miniaturisation et la multiplicité, *une électronique de commande* adaptée est nécessaire. Celle-ci fournit « l'intelligence » aux dispositifs et permet de contrôler les actionneurs ou de traiter le signal recueilli. Elle peut être fabriquée soit séparément soit en co-intégration du microsystème.

Cette thèse se décompose en cinq chapitres. Le premier chapitre s'intéressera aux phénomènes météorologiques et à l'étude de la technique de radiosondage. Dans un premier temps l'étude sera consacrée à l'atmosphère puisque c'est dans cette couche que la plupart des processus météorologiques prennent place. Chaque paramètre collecté par la sonde météorologique (pression, température, humidité et vent) sera discuté. Nous allons parler à la fin de ce chapitre de la technique de radiosondage.

Le deuxième chapitre récapitule l'état de l'art des capteurs de pression, de température et d'humidité avec la présentation des différentes techniques de détections pour chaque capteur.

Dans le troisième chapitre, nous modéliserons le capteur de pression à détection piézorésistive, le capteur de température à détecteur résistive et le capteur d'humidité à détection capacitive.

Le quatrième chapitre est consacré à la simulation en trois dimensions par la méthode des éléments finis en utilisant le logiciel COMSOL. Cette simulation prend appui sur la validation du modèle numérique à l'aide des données théoriques obtenues par l'analyse du dispositif présenté dans le chapitre précédent.

Dans le dernier chapitre, nous présenterons les principales opérations technologiques nécessaires pour la fabrication des capteurs constituant la sonde météorologiques que nous avons conçu. Des simulations en deux dimensions seront menées avec le logiciel Athéna de Silvaco.

Enfin, nous terminerons notre thèse par une conclusion générale où seront rassemblés nos principaux résultats et quelques perspectives.

CHAPITRE I

RADIOSONDAGE METEOROLOGIQUE

I.1 Météorologie :

La météorologie est une science d'observation et d'étude des phénomènes de la basse et moyenne atmosphère terrestre. Assurer la sécurité des biens et des personnes en temps de paix ou de guerre est un rôle important de la météorologie. Cette dernière a une étroite collaboration avec l'état, avec les armées, l'aviation et l'aéronautique, ainsi que tout ce qui concerne ; l'énergie, les transports, l'agriculture et le commerce.

I.1.1. Historique :

L'histoire de la météorologie semble au premier abord assez ancienne : on note en effet de premières allusions aux phénomènes météorologiques dès l'Antiquité. Cependant, ils étaient privés d'instruments de mesure, indispensables à l'étude de cette science. La météorologie a ainsi connu un véritable tournant à partir de l'invention du premier instrument de mesure au XV^{ème} siècle : la girouette.

Dès lors, les innovations s'enchaînèrent et permirent une grande avancée de la science. Nous étudierons l'histoire de la météorologie après 1500 à nos jours [2] :

Le premier tournant dans l'histoire de la météorologie intervient en 1500 : Léonard de Vinci crée la girouette afin de connaître la direction du vent. Ainsi commence la Renaissance qui s'annonce riche en découvertes. En outre, le développement de la météorologie implique une meilleure connaissance de l'atmosphère. C'est ainsi en 1610 le flamand Jan Baptist Van Helmont distingue les divers gaz de l'air, il nomme d'ailleurs le dioxyde de carbone « gaz sylvestre ». Puis en 1615 Isaac Beeckmann met partiellement en évidence la pression atmosphérique grâce à des pompes aspirantes. En 1630 le chimiste français Jean Rey démontre que l'air a une masse : il pèse des métaux après oxydation dans l'air et constate que leur masse est plus élevée. Grâce à ces découvertes plusieurs innovations marquantes vont être réalisées. Tout d'abord Castelli invente le pluviomètre en 1639, puis en 1640 Ferdinand II de Toscane met au point l'hygromètre. En 1641 Galilée met en place un thermomètre. Le physicien italien Evangélista Torricelli démontre ensuite l'existence de la pression atmosphérique grâce à l'expérience de vide : il met ainsi au point le premier baromètre constitué d'un tube recourbé rempli de mercure. Grâce à cette découverte Blaise Pascal démontre que la pression varie en fonction de l'altitude. En 1639 Ottaviano Castelli parvient à rendre compte assez précisément des quantités de précipitations tombées. En 1650, Hooke met au point le premier anémomètre. En 1654 le premier réseau météorologique voit le jour grâce à Antinori. L'allemand Otto Von Guericke est le premier à prévoir une tempête en 1660 ; de plus il met au point le baromètre à eau : il s'agit d'une boîte vide d'air qui se comprime et se dilate suivant la variation de la pression atmosphérique. En 1662, Boyle et Mariotte établissent la loi de compressibilité des gaz. En 1673, Christian Huygens invente le thermomètre en développant l'idée de Galilée. Puis, en 1680, l'Anglais Richard Towneley invente le pluviomètre qui porte aujourd'hui son nom. En 1735, Halley découvre les propriétés des alizés. En 1736, le Suédois Celsius introduit l'échelle centigrade.

En 1748, la météorologie connaît un nouveau fort tournant des instruments inventés jusqu'alors. Wilson et Melville effectuent les premières mesures grâce à un cerf-volant. Jacques Charles reprend cette idée et mesure les données à 3400 mètres d'altitude grâce à un

ballon : la météorologie prend ainsi une nouvelle dimension : l'étude de l'atmosphère. Au début du XIX^{ème} siècle, Lamarck et Howard établissent les premières classifications des nuages. En 1783, Lavoisier et Laplace démontre les échanges de chaleur. Puis, en 1824, Fourier met en évidence l'effet de serre. En 1836, Gustave Gaspard Coriolis établit le théorème qui porte son nom sur les courants aériens. Ce théorème est mis en évidence par l'expérience du pendule de Foucault. Au milieu du XIX^{ème} siècle, l'invention du télégraphe permet la mise en commun des relevés afin d'élaborer des prévisions plus fiables. En 1854, le Verrier jette les bases de la météorologie française en instituant un réseau de treize stations, pour éviter les accidents maritimes de la flotte française. En 1856, William Ferrel montre que la rotation de la terre influe sur la direction des vents. En 1860 naît le premier réseau européen pour la prévision du temps. Au début du XX^{ème} siècle sont découvertes la stratosphère puis la mésosphère. En 1921, Vilhem Bjerknes introduit les notions de masse d'air et de fronts. En 1938 est construite la première station météorologique sur l'eau. Cette même année, le tourbillon de Rossby est utilisé pour déterminer le sens de déplacement des perturbations. Il permet d'établir de très bonnes prévisions jusqu'à 24 heures. L'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) naît en 1951 afin d'établir un système d'échange plus rapide et plus complet des données.

Le premier avril 1960 est un nouveau moment fort dans le développement de la météorologie : le premier satellite météorologique nommé Tiros est lancé. Le premier satellite géostationnaire Météosat est lancé à son tour. En 1999, le rôle important de l'activité solaire sur le climat a été démontré.

Ainsi, la Renaissance a marqué un grand tournant dans l'avancée de la météorologie : les nombreuses inventions d'instruments et l'intérêt porté à l'étude de l'atmosphère ont permis de faire un grand pas en avant. A partir du milieu du XX^{ème} siècle, la météorologie a connu un nouveau tournant avec le lancement des premiers satellites. Toutefois, de nombreux progrès restent à faire dans cette science plutôt récente : l'étude du soleil et l'apparition de l'ordinateur ont marqué une nouvelle avancée dans cette science...

I.1.2. Composition de l'atmosphère terrestre :

L'atmosphère terrestre est une enveloppe gazeuse entourant la terre. Sa composition est la suivante [3]:

- 78 % d'azote (N₂)
- 21 % d'oxygène (O₂)
- 1 % de gaz divers (Ar, CO₂, ...)

A cela, il faut ajouter la vapeur d'eau (H₂O) dont la concentration varie entre 1 et 4%, surtout dans les basses couches de l'atmosphère. Azote, oxygène, argon et autres gaz rares sont en proportions très stables dans l'atmosphère. Seules les teneurs en gaz liés à l'activité humaine (gaz carbonique, ozone, etc) et la vapeur d'eau sont variables. L'atmosphère terrestre a permis l'apparition et le maintien de la vie, mais en retour, la présence de la vie a fortement modifié la composition de l'atmosphère. A titre d'exemple, l'activité humaine contribue dans la modification de la composition de l'atmosphère en y accroissant, par émission, l'importance de certaines substances (ex : le gaz carbonique) et en y injectant de nouvelles.

Dans son ensemble, l'atmosphère pèse près de 5 millions de milliards de tonnes. Une masse pourtant 3000 fois plus faible que la masse totale de l'eau du monde [4].

La couche la plus éloignée de l'atmosphère monte jusqu'à 400 km d'altitude. Toutefois la partie la plus importante de l'atmosphère est groupée dans les basses couches. La partie dans laquelle les phénomènes météorologiques sont concentrés évolue entre 7 km d'altitude aux pôles et 15 km à l'équateur. La moitié de la masse de l'atmosphère est concentrée dans les 5 premiers kilomètres d'altitude et 90 % dans les 20 premiers. Les hautes couches présentent donc une densité très faible. L'atmosphère est découpée par couches successives dont les principales sont les suivantes :

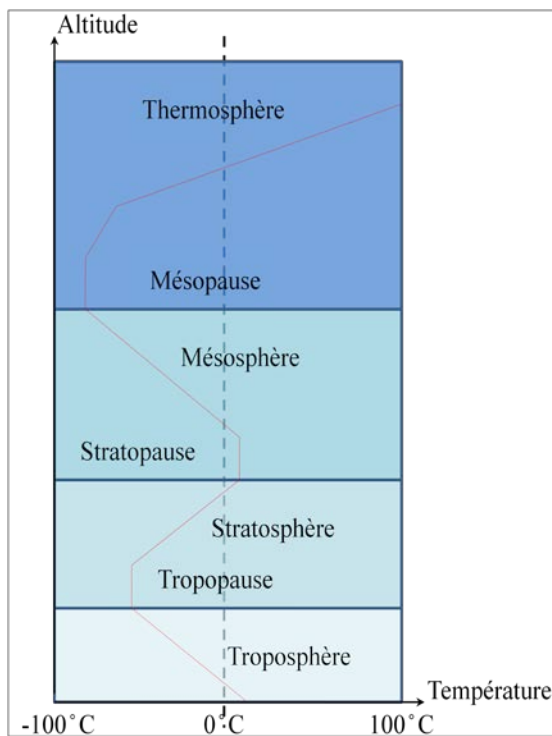


Figure I.1: Structure verticale de l'atmosphère

La thermosphère :

La température y croît fortement jusqu'à 500° C à la limite de l'atmosphère.

La mésosphère :

La température y croît fortement jusqu'à la limite de cette couche (environ 80 km).

La stratosphère :

Cette couche est déjà une couche de faible densité. La température y reste constante jusqu'à environ 25 km puis croît jusqu'aux environs de 0° C autour de 40 km d'altitude.

La troposphère :

C'est la plus basse couche. Son épaisseur varie de 7 à 15 km des pôles à l'équateur. Elle est de 11 km sous nos latitudes. C'est dans cette couche que se produisent les phénomènes météorologiques. La température diminue avec l'altitude pour descendre jusqu'à -50 à -60° C.

Les séparations entre les 4 couches s'appellent la **tropopause**, la **stratopause** et la **mésopause**.

I.1.3. La pression atmosphérique :

La pression atmosphérique résulte des chocs des molécules d'air entre elles et avec les objets dans l'atmosphère. C'est, avec la température, un paramètre fondamental en météo pour prévoir le temps qu'il fera.

Historiquement, les premières mesures de la pression atmosphérique ont été effectuées par TORRICELLI dans les canaux de VENISE. De là fut mis au point un instrument pour la mesure : le baromètre. Celui-ci utilise du mercure (Hg) pour mesurer la pression atmosphérique. La première unité de mesure de la pression atmosphérique fut le millimètre de mercure (mmHg).

Dans le système international d'unités, la pression se donne en Pascal. En météo il est plus pratique d'utiliser l'hectopascal (1hPa = 100 Pa). On utilise également le millibar (1mbar = 1 hPa). Sa valeur moyenne au niveau de la mer est de 1013 hPa soit 760 mmHg.

I .1.3.1. Variations de la pression avec l'altitude :

La pression atmosphérique diminue lorsque l'on gagne de l'altitude. Cette variation n'est pas linéaire. Pour la déterminer, il existe des calculs tenant compte de la variation d'altitude et de température. La diminution est plus importante en basse altitude qu'en haute altitude. Pour que la pression diminue de 1 hPa, il faut monter de 8,5m au niveau de la mer vers 3000m.

I .1.3.2. Variations de la pression au niveau de la mer :

La pression ne varie pas seulement en fonction de l'altitude mais aussi selon le lieu. Selon la nature du sol et divers autres paramètres. La température n'est pas uniforme au niveau de la mer. De ce fait, la pression ne l'est pas non plus.

I .1.4. La température :

La température est considérée comme une grandeur physique liée à la notion immédiate de chaud et froid. La température est la manifestation, à l'échelle macroscopique, du mouvement des atomes et molécules. Ainsi, une température élevée signifie une grande «agitation » atomique. L'unité internationale de température est le kelvin (K). Le degré Celsius (°C) est une autre unité très répandue en Europe. Certains pays anglo-saxons et les Etats-Unis utilisent une autre unité : le degré Fahrenheit (°F). La plus basse température du système Celsius est -273,15 °C correspondant à 0 K. Les formules de transformations d'unités sont les suivantes :

- °C = 0,55x (°F – 32),
- K = °C + 273,15,
- °F = 32 + (1,8 x °C).

Les variations de la température influent beaucoup sur les phénomènes météorologiques. Ces variations peuvent être regroupées en deux catégories. Les variations lentes, qui rythment les saisons. Les variations locales qui interviennent sur une échelle de temps beaucoup plus restreinte.

L'influence combinée de ces variations entraîne des changements de temps selon les lieux et les saisons.

I .1.4.1. Variations saisonnières de la température :

La position de la terre par rapport au soleil induit des changements dans la quantité d'énergie solaire reçue par les points de la surface globe. Le soleil émet des rayonnements électromagnétiques (dont la lumière fait partie) qui se propagent dans le vide sans être absorbés.

En revanche dans l'atmosphère les rayonnements les plus énergétiques sont absorbés en totalité ou partie. Plus la couche d'atmosphère à traverser est épaisse et moins il y a d'énergie qui parvient à la surface par rayonnement.

I .1.4.2. Variations locales de la température :

Selon la nature du sol (rocher, champs cultivés, forêts, eau,...) une même énergie arrivant du soleil par rayonnement ne produira pas le même échauffement. En effet, une part

plus ou moins importante de ce rayonnement sera réfléchi par le sol. Il n'y en a donc qu'une partie qui est absorbée. La température du sol n'est pas uniforme. Au contact des zones chaudes, l'air se réchauffe par convection. Sa masse volumique diminue alors et il s'élève pour laisser la place à l'air froid. Au-dessus des zones les plus chaudes il y a donc des mouvements ascendants de la masse d'air et au-dessus des plus froides des mouvements descendants. De plus la formation de nuages peut bloquer l'arrivée des rayonnements jusqu'au sol. La nébulosité de l'atmosphère (présence de nuage) engendre donc aussi des différences de température locales au sol. Ces variations locales ont une très grande influence sur l'évolution de la météo sur des durées faibles (quelques heures). Elles sont donc prises en compte par les météorologistes pour pouvoir prévoir le temps et son évolution sur une durée de quelques heures.

I.1.4.3. Evolution de la température avec l'altitude :

Afin de baser tous les altimètres sur une même loi de variation de la température et de la pression en fonction de l'altitude, l'O.A.C.I (Organisation de l'Aviation Civile Internationale) a défini une atmosphère standard. Elle correspond aux conditions moyennes de température et de pression que l'on rencontre dans l'atmosphère.

Caractéristiques de l'atmosphère standard O.A.C.I.[5] :

- Au niveau de la mer $T = 15^{\circ} \text{C}$ et $P = 1013 \text{ hPa}$,
- Gradient vertical température : $-6,5^{\circ} \text{C} / 1000 \text{ m}$ jusqu'à 11000 m, nul entre 11000 et 20000m puis 10°C jusqu'à 32000 m,
- La tropopause se situe à 11000 m,
- L'air est sec et de composition constante,
- L'accélération de la pesanteur est $g = 9,80665 \text{ m.s}^{-2}$.

Le gradient de température retenu n'est pas celui que l'on rencontre tous les jours . Pour la troposphère, couche des phénomènes météorologiques, le gradient de $-6,5^{\circ}\text{C}/1000 \text{ m}$ est un gradient moyen. Il se peut que la température évolue de façon différente.

I.1.5. L'humidité de l'air :

L'air atmosphérique contient de la vapeur d'eau. Celle-ci provient de l'évaporation au-dessus des mers, des lacs, des sols humides ou elle est produite par l'activité humaine.

I.1.5.1. Humidité relative de l'air :

La quantité de vapeur d'eau qui peut être contenue dans l'air dépend des conditions de température et de pression de ce dernier. Plus la température de l'air est élevée et plus la quantité d'eau qui peut être dissoute est importante.

L'humidité relative RH est le rapport entre la masse d'eau dissoute dans l'air et la masse maximale d'eau que l'on peut y dissoudre.

Lorsque l'humidité relative atteint 100%, on dit qu'il y a saturation ou que l'air est saturé en vapeur d'eau. Dans ce cas il va pouvoir se former des nuages ou du brouillard selon les conditions. L'humidité relative permet donc aux météorologues de prévoir les formations de nuages et même le type de nuage et les risques de précipitation.

I.1.5.2. Saturation de l'air humide :

Pour une même quantité de vapeur d'eau dissoute, l'humidité relative dépend de la température. Plus il fait froid, et plus elle est importante. Une masse d'air pourra atteindre la saturation de deux façons différentes :

- Par une augmentation de la masse de vapeur d'eau dissoute si elle passe au-dessus d'étendues maritimes ou de sols détrempés.
- Par un abaissement de température qui augmente l'humidité relative jusqu'à 100%. En effet, à plus faible température la quantité d'eau pouvant être dissoute dans l'air est plus faible.

Pour ce dernier mode on définit deux températures auxquelles on peut atteindre la saturation :

- La température du point de rosée (dew point) correspond à la température à laquelle on atteint la saturation si la pression reste constante au cours du refroidissement. Ce phénomène peut se produire au cours de refroidissement nocturne ou au petit matin et il provoque de la rosée ou des brouillards [4].

-P = 1013 mbar -T = 20 °C -RH = 85 %	-P = 1013 mbar -T = 05 °C -RH = 100 %
--	---

Tableau I. 1 : Température du point de rosée à une pression $P = 1013\text{mbar}$

- La température du point de condensation correspond à la température à laquelle on atteint la saturation si le refroidissement est provoqué par une baisse de la pression. Lorsqu'une particule d'air humide s'élève dans l'atmosphère, sa pression diminue. Il en résulte une diminution de température également. Lors de sa montée l'air subit une détente adiabatique (sans échanger de chaleur). Si l'air n'est pas saturé, la température diminue de 1° C tous les 100m. On appelle cette diminution, le gradient adiabatique en air sec. Si la température atteint le point de condensation, les gouttelettes d'eau en suspension apparaissent. Il se forme un nuage dont la base se situe au niveau du point de condensation. Lors de la condensation, l'eau cède de la chaleur à l'air dans lequel elle était dissoute. Le gradient de température change alors et le gradient en air humide est de 0,6° C pour 100m. L'humidité relative de l'air reste alors de 100 %. A partir du point de condensation, tout au long de sa montée l'air sec se sépare de la vapeur d'eau qu'il contient.

I.1.6. Les masses d'air :

I.1.6.1. Notion de masse d'air en météorologie :

Une masse d'air, en météorologie, est un volume important (quelques dizaines ou centaines de milliers de km^3) d'air de troposphère dont la température et l'humidité sont pratiquement uniformes dans un plan horizontal.

A l'intérieur d'une masse d'air il existe donc des surfaces horizontales de plusieurs centaines de km^2 sur lesquelles la température et l'humidité sont relativement constantes. Ces masses d'air se déplacent dans l'atmosphère en glissant les unes sur les autres sans se mélanger. Au cours de leur déplacement leurs caractéristiques (température et humidité) évoluent en fonction des surfaces au-dessus desquelles elles transitent (océans, sols humides, désert, ...). La rencontre de deux masses de caractéristiques très différentes influence beaucoup la météorologie dans la région de leur contact.

Les caractéristiques des masses d'air dépendent au départ de leur mouvement, de la zone au-dessus de laquelle elles se sont formées.

I.1.6.2. Les types de masses d'air :

Pour classer les masses d'air on utilise 2 critères.

- Leur humidité :
Si elles se forment au-dessus des océans elles seront très humides. On les qualifie alors de maritimes. Alors que si elles se forment au-dessus de régions plutôt désertiques, elles seront peu humides. On les qualifie alors de continentales.
- Leur température :
Pour celles qui se forment dans les régions de grande latitude, l'air les constituant est froid, alors que pour celles qui se forment aux latitudes proches de l'équateur, l'air est chaud. On en distingue trois types : les masses d'air Polaires, Arctiques ou Tropicales.

I.1.7. Le vent :

Le vent est le paramètre représentatif des mouvements de l'air. Il naît de la différence de pression. Le vent se déplace des hautes pressions (anticyclones) vers les basses pressions (dépressions).

Pour mesurer la vitesse du vent on se sert d'un anémomètre. Cet instrument se compose de trois petites coupelles hémisphériques, disposées à l'extrémité de bras métalliques espacés de 120° . Un compteur relié à l'axe de rotation permet de lire la vitesse et de l'enregistrer.

La direction du vent est exprimée comme un point de la boussole d'où le vent souffle. De l'air se déplaçant du Sud Ouest au Nord Est s'appelle un vent de Sud ouest. Il peut également être exprimé en degrés (pour un vent de Sud-Ouest : 220°). Pour connaître la direction des vents, on se sert soit d'un manche à air, soit d'une girouette, souvent associée à l'anémomètre. On se réfère alors aux quatre principaux points cardinaux pour juger de la direction d'où vient le vent.



(a)



(b)



(c)

Figure I.2 : Exemple d'anémomètre (a), de girouette (b) et de manche d'air (c)[6]

Le vent résulte de l'action de trois types de forces sur l'air en mouvement : la force de gradient de pression, la force de Coriolis et les forces de frottements.

I.1.7.1. La force de gradient de pression :

Elle est due à la différence de pression entre les points de la surface de la terre. Elle entraîne l'air des hautes pressions vers les basses pressions. Plus les différences de pression sont importantes et plus cette force est importante.

I.1.7.2. La force de Coriolis :

Tout objet en mouvement dans l'hémisphère nord est dévié vers sa droite (C'est le contraire dans l'hémisphère sud). Les particules d'air n'y font pas exception. Lors de son déplacement des hautes pressions vers les basses pressions, l'air est dévié vers la droite dans l'hémisphère nord et vers la gauche dans l'hémisphère sud.

I.1.7.3. Les forces de frottements :

Lors de son mouvement, l'air frotte contre les autres particules d'air et le sol. Cela entraîne des forces s'opposant à son mouvement. Elles ne le dévient pas mais le freinent.

L'action de ces trois forces a pour conséquence de stabiliser la direction du vent.

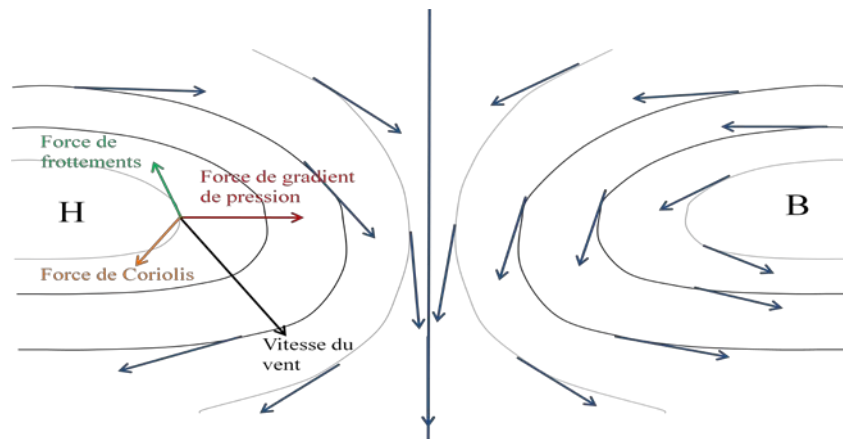


Figure I.3 : Action des trois types de forces sur l'air en mouvement.

On note H les zones de haute pression et B les zones de basse pression.

Le vent se stabilise dans une direction tangente aux isobares.

Dans l'hémisphère nord il tourne dans le sens horaire (sens des aiguilles d'une montre) autour des anticyclones et dans le sens anti-horaire autour des dépressions. Dans l'hémisphère sud c'est le contraire.

I.1.8. Les précipitations :

Les précipitations sont les eaux qui tombent sur la surface de la Terre, tant sous forme liquide (bruine, pluie, averse) que sous forme solide (neige, grésil, grêle) ou déposée (rosée, gelée blanche, givre,...).

Quelle que soit la forme de la précipitation, on mesure la quantité d'eau tombée durant un certain laps de temps. On l'exprime généralement soit en millimètres (mm), soit en litres par mètre carré (l/m^2). 1 mm de précipitations correspond à 1 l d'eau par m^2 . L'intensité de la pluie est la hauteur d'eau précipitée par unité de temps (généralement en mm/h).

Le pluviomètre recueille la quantité d'eau totale précipitée à l'intérieur d'un récipient calibré dans un intervalle de temps séparant deux relevés. Quant à lui, le pluviographe mesure les hauteurs d'eau ainsi que leur répartition dans le temps, c'est-à-dire les intensités des précipitations. Les radars (RADio Detection And Ranging) météorologiques envoient des ondes radios qui sont réfléchies par les pluies présentes dans l'atmosphère. Les informations reçues en « écho », permettent de localiser les précipitations en temps réel jusqu'à 200 km de distance et de mesurer leur intensité, puisque le signal réfléchi est proportionnel à la taille des précipitations. Les instituts nationaux gèrent généralement le réseau de mesure. Par exemple, MétéoSuisse récolte les données de précipitation de plus de 400 stations et trois radars répartis sur tout le territoire helvétique [3].

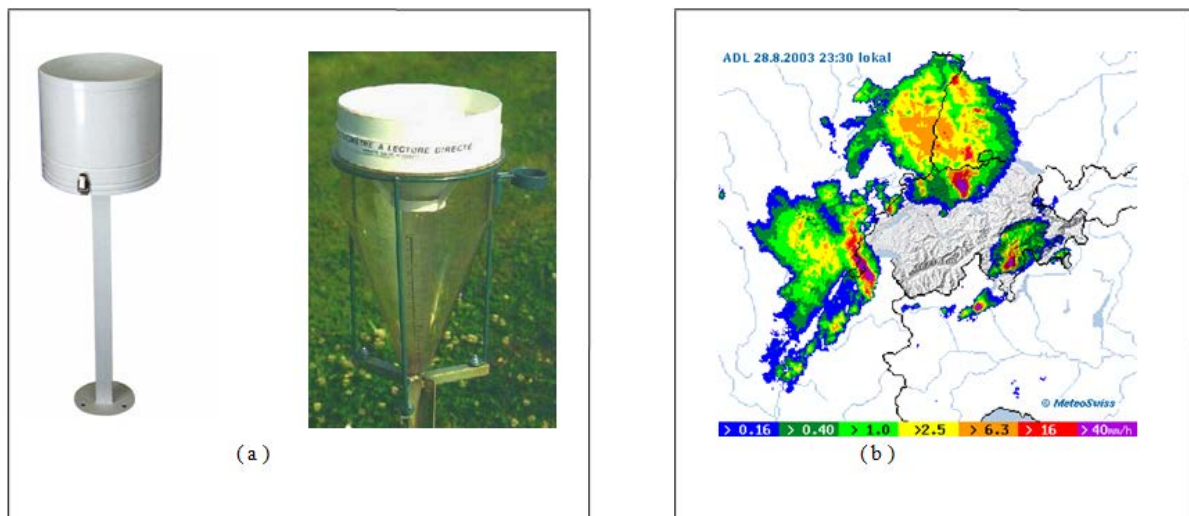


Figure 1.4 : Exemples de pluviomètres (a) et d'image radar (b) [6]

I.2 Radiosondage :

Le radiosondage est une technique d'observation en altitude des propriétés de l'atmosphère. L'appareil nécessaire utilisé est une radiosonde équipée des capteurs effectuant les mesures de la pression atmosphérique, la température et l'humidité relative. Ces capteurs sont entraînés à travers l'atmosphère par un ballon dilatable jusqu'à une altitude de 25 à 30km [7]. La vitesse ascensionnelle de l'ensemble est d'environ 300 mètres par minute, 18 Km/h, ou encore 5 m/s [7]. Le radiosondage se déroulera donc sur une période comprise entre 1 heure et 1 h 30mn.

I.2.1. Historique :

Le développement des connaissances en météorologie nécessite de connaître les paramètres mesurant la vitesse du vent, température, la pression et l'humidité tant au sol qu'en altitude. A la fin du XIX^e siècle, les chercheurs et météorologues ne disposent que de données très éparées en surface. Gustave Hermite, un inventeur français, a l'idée de relâcher un ballon auquel il attacherait des instruments. Cependant, la radio n'étant pas encore inventée, il doit récupérer ces instruments en recherchant le point chute après l'explosion du ballon. Le 17 septembre 1892, Hermite lâche son premier ballon-sonde conçu en papier enduit de pétrole. Il mesurait quatre mètres de diamètre et transportait un baromètre à mercure de 1,2 kg [8].

Son idée se répand d'abord lentement mais des chercheurs, comme Léon Teisserenc de Bort et Richard Abmann, découvriront grâce à ce système la tropopause, la stratosphère et les autres couches de l'atmosphère. Après quelques essais à partir de 1927, Pierre Idrac et Robert Bureau associent aux capteurs un petit émetteur radio à lampe qui retransmet au sol en temps réel les valeurs mesurées [9]. C'était le premier d'un ballon-sonde retransmettant par radiosondage moderne.

En 1940, les radiosondes ont complètement remplacé les météographes d'avion pour des sondages quotidiens. A partir de là, les météorologues utiliseront les informations recueillies pour développer un modèle conceptuel de la circulation atmosphérique et les intégreront dans la prévision météorologique.

I.2.2. Ballon-sonde :

Un ballon-sonde est un aérostat utilisé dans les domaines de la météorologiques et de l'aéronautique. Il s'agit d'un ballon libre, utilisé pour faire des mesures locales dans l'atmosphère grâce à un certain nombre d'instrument mis à bord dans une nacelle appelée radiosonde, ainsi que d'un réflecteur radar ou d'un système de radiolocalisation pour suivre et donc déterminer la vitesse des vents. Le ballon-sonde a été inventé par Gustave Hermite en 1892 [8].

Son principal intérêt est de pouvoir atteindre des altitudes de 35 km ou plus, difficile à obtenir avec des moyens plus conventionnels tels que les avions, et à un coût beaucoup moindre que celui d'une fusée-sonde ou d'un satellite.

I.2.3. Différents types de ballons-sondes :

Il existe plusieurs types de ballons-sondes :

- Les ballons-sondes standard sont gonflés en général à l'hélium et emportent des charges importantes en haute altitude. On utilise l'hydrogène dans les postes éloignés, comme dans l'Arctique canadien, car il est facile et peu coûteux à produire par hydrolyse, ce qui évite le transport coûteux d'hélium, mais sa manipulation est plus risquée. Le ballon est gonflé de façon à avoir une vitesse ascensionnelle d'environ 5 m/s.



Figure I.5 : Ballon classique gonflé à l'hydrogène [11]

- Les ballons ouverts (ou à volume constant [10]), constitués d'une enveloppe légère. Ils sont ouverts par le bas et permettent ainsi à l'hélium de sortir au fur et à mesure de la montée, ce qui évite l'explosion du ballon avec la chute de la pression environnante et permet de les concevoir dans des matériaux moins résistants et peu coûteux à produire. Ils peuvent atteindre jusqu'à 45 km d'altitude et y rester jusqu'à 4 jours. Ce type de ballon-sonde représente la majorité des ballons lancés dans un cadre scientifique ;
- Les ballons infrarouges, l'enveloppe permet l'entrée des rayons infrarouges du soleil, ce qui permet de chauffer l'air contenu dans le ballon de manière continue et ce même à haute altitude. Le jour, le ballon monte à environ 28 km et descend la nuit vers 20 km. Le grand intérêt de ce type de ballon est leur très longue durée de vie ; des vols de plusieurs mois ont ainsi déjà été réalisés et permettent de faire plusieurs fois le tour du monde ;
- Les ballons captifs [10], ballons retenus au sol emportant des instruments pour déterminer les valeurs d'un ou plusieurs éléments météorologiques en altitude.
- Les ballons cerfs-volants [10] ; ballons captifs de forme spéciale utilisé pour maintenir des instruments météorologiques à hauteur approximativement constante dans l'atmosphère ;
- Les ballons tétraédriques [10] ; ballons à volume constant de forme tétraédrique mieux adapté pour maintenir à haute altitude des appareils car leurs coutures sont plus solides que celles des ballons ronds. Ils sont utilisés pour suivre les mouvements des masses d'air à niveau constant;



Figure I.6 : Ballon tétraédrique [11]

- Les ballons dirigeables, ballons dirigeables équipés d'instruments pour la mesure d'éléments météorologiques en altitude ;
- Les ballons fusés, système de mesure à haute altitude utilisant une fusée de sondage emportée par un grand ballon et mise à feu près de l'altitude maximale que peut atteindre le ballon.

I.2.4. Eléments constituant le ballon-sonde :

Un ballon-sonde est constitué d'une chaîne de vol. La chaîne principale comporte la nacelle de mesure, raccordée à un réflecteur-radar passif (pour être détectée par les systèmes

de surveillance aériens à savoir les avions). Ce dernier étant relié à un parachute anti-torche. A cette chaîne principale de mesure vient se greffer la chaîne secondaire de transmission vidéo. Cette chaîne secondaire est aussi équipée d'un réflecteur radar passif et d'un parachute anti-torche. L'ensemble des deux chaînes est tracé par un ballon en latex, gonflé à l'hélium.

Au moment de décollage de la chaîne de vol, elle commence son ascension, filmée par la nacelle de transmission vidéo. Au bout de la durée de temporisation fixée, la chaîne secondaire larguée, redescendant lentement grâce au parachute. Pendant ce temps la chaîne principale continue son ascension. Durant cette ascension, la pression atmosphérique diminue et donc la densité de l'air ambiant aussi, entraînant une expansion de l'hélium contenu dans le ballon et une dilatation de ce dernier. Arrivé à une certaine altitude, la force exercée par l'expansion de l'hélium devienne supérieure à la pression atmosphérique. L'enveloppe du ballon atteint son point de rupture : le ballon explose. La nacelle de mesure effectue donc une chute ralentie progressivement par le parachute qui se gonfle.

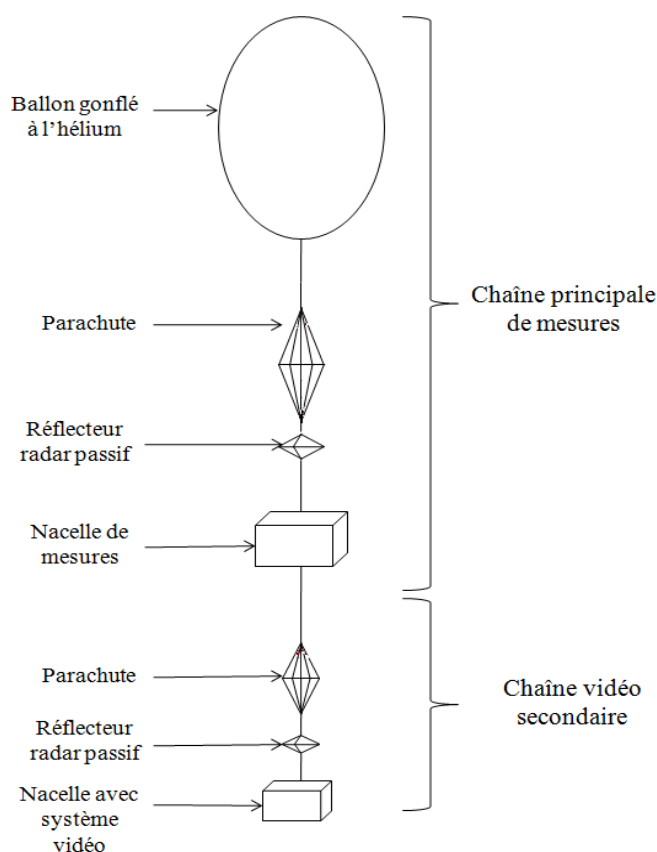


Figure I.7 : Schéma de la chaîne complète

I.2.5. Composants du ballon-sonde moderne :

La technique de radiosondage moderne consiste à lancer dans l'atmosphère une sonde accrochée sous un ballon en tant qu'élément d'une chaîne de vol et émettant des mesures en temps réel vers le sol par radio (**Figure I.8**). La masse de la chaîne de vol, le taux de montée désiré, le type de gaz utilisé, et la hauteur maximale du sondage déterminent la taille du

ballon. Les systèmes opérationnels de radiosonde utilisent généralement des ballons qui pèsent entre 300 à 1200 g; ils sont remplis pour assurer un taux de montée de 300m/min. Les profils de vent des radiosondes sont dérivés de suivi du déplacement du ballon à partir en fonction du temps. Le radiosondage lui-même peut être suivi à l'aide d'un théodolite radio, radar secondaire ou la réception de signaux de navigation se fait par une antenne sur le radiosondage. Des signaux de navigation terrestres Omega et Loran-C ont été couramment utilisés à partir de 1980, mais maintenant ont surtout été remplacé par le GPS [Global Positioning System] signaux satellites. Le taux de l'ascension des ballons peut être compris entre 5 et 8 ms⁻¹. Maintenant les signaux GPS permettent une résolution temporelle de quelques secondes.

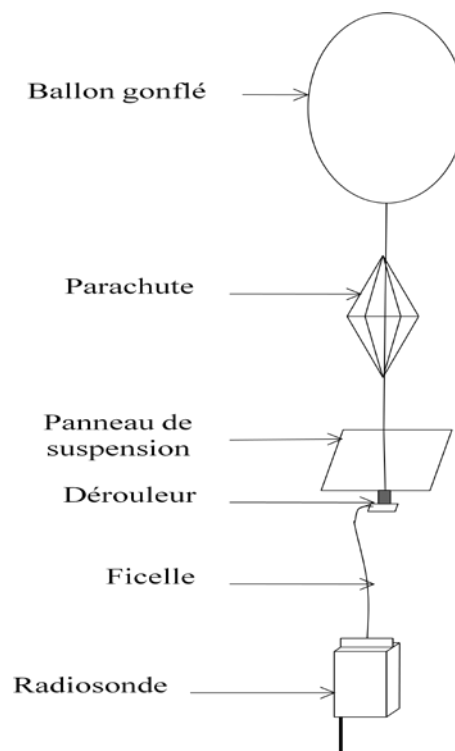


Figure I.8 : Chaîne typique de vol de radiosonde

La chaîne de vol moderne se compose de cinq éléments:

- le ballon;
- un parachute pour amener le retour en toute sécurité de la radiosonde sur Terre après le ballon éclate;
- ligne de séparation en nylon;
- un dérouleur pour laisser la ligne en nylon après le lancement;
- la radiosonde elle-même.

Quelques pays tels que les Etats-Unis et la Suisse cherchent activement à récupérer puis réutiliser leurs radiosondes. Aux Etats-Unis, il est estimé qu'environ 18% sont réutilisés après une rénovation complète, tandis qu'en Suisse, plus de 60% sont récupérés et réutilisés.

La radiosonde est une unité électronique qui comprend trois sections importantes : une suite des capteurs météorologiques sophistiqués; traitement de signaux électroniques; et un émetteur radio pour transmettre par relais les mesures de nouveau à un récepteur à la station de lancement de radiosondes. Les mesures météorologiques sont faites à des intervalles qui varient de 1 à 6 s, selon le type et le fabricant de la radiosonde. La communauté météorologique a été assignée deux bandes de radiofréquence pour l'utiliser dans la transmission de données météorologiques: 400-406MHz et 1675-1700MHz. Toutes les radiosondes du monde sont tenues pour répondre à certaines normes de performance qui ont été établies par l'WMO (**World Meteorological Organization**). La figure I.10 illustre quatre différentes radiosondes actuellement utilisé dans le monde entier.



Figure I.9 : Exemples de radiosondes couramment utilisées dans le monde [12]

CHAPITRE II

CAPTEURS DE PRESSION, DE TEMPERATURE ET D'HUMIDITE

INTRODUCTION :

Lorsqu'on souhaite traduire une grandeur physique en une autre grandeur, on fait appel à ce que l'on nomme classiquement « capteur ». Son rôle est de donner une image interprétable d'un phénomène physique de manière à pouvoir l'intégrer dans un processus plus vaste.

L'objectif de ce chapitre est de présenter les principales caractéristiques des principaux capteurs constituant la microsonde météorologique. Les capteurs constituant cette microsonde sont : capteur de pression, capteur de température et capteur d'humidité.

Pour le capteur de pression, nous exposerons deux types suivant le procédé de conversion. Le premier à détection capacitive et le deuxième à détection piézorésistive. Ces derniers forment la classe la plus aboutie des micro-capteurs de pression et sont traités plus en détail ci-dessous. En ce qui concerne le capteur de température, nous parlons des détecteurs de type résistif, les thermocouples et les capteurs à jonction semi-conductrice.

Le taux d'humidité, avec la température et la pression comptent parmi les grandeurs physiques les plus fréquemment mesurés, de par l'influence de ces paramètres sur le fonctionnement des systèmes. Suivant le procédé de détection, les capteurs d'humidité existant à ce jour sont : capacitifs, résistifs, hygrométriques, gravimétriques et optiques.

II. 1. Capteur :

Un capteur est un dispositif qui génère un signal électrique lorsqu'il est soumis à l'action d'une grandeur (objet de la mesure) appelée mesurande notée « m », dont la nature peut être physique, chimique ou biologique. Le rôle du capteur est donc de convertir « m » en une grandeur électrique notée « s » et qui peut être une impédance (capteurs passifs) ou une charge, un courant ou une différence de potentiel (capteurs actifs)

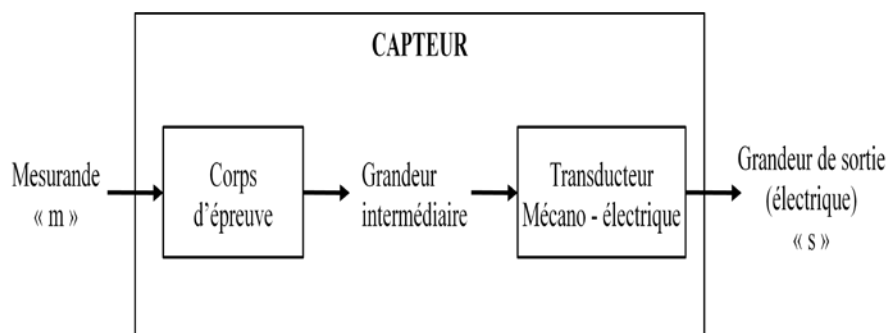


Figure II. 1 : Représentation schématique d'un capteur

Afin de classer les capteurs, plusieurs critères peuvent être adoptés :

- En fonction des principes de transduction utilisés (physiques, chimiques ou biologiques).
- En fonction du type de mesurande (capteur de : force, pression, d'accélération, d'humidité, etc...).
- En fonction de l'application visée (domaines de l'automobile, de l'aérospatial, du biomédical, de la météorologique etc...).

Traditionnellement, à travers l'ensemble de la littérature de spécialité, la classification des capteurs est faite sur la base de combinaisons entre le principe de transduction, le mesurande et l'application qui leur sont spécifiques.

II.2. Différents types de capteurs à étudier :

II. 2.1. Capteur de pression :

La pression est un paramètre important dans de nombreuses disciplines comme la thermodynamique, l'aérodynamique, l'acoustique, la mécanique des fluides, la biophysique, etc. Aussi, les capteurs de pression se trouvent dans de nombreux domaines comme étant le premier maillon d'un système de perception, de contrôle ou de mesure [13].

De nombreux travaux ont été entrepris dès 1970 aux U.S.A. [14-15]..., en vue de réaliser des capteurs de pression par les techniques de la microélectronique.

Parmi les différentes approches suivies, deux d'entre ont donné naissance à des produits industriels :

- Approche capacitive,
- Approche piézorésistive.

II. 2. 1. 1. Capteur de pression à détection capacitive :

La figure II. 2. représente le schéma de principe d'un capteur de pression capacitif. Il est constitué d'une pièce de silicium micro-usinée rapportée sur un support rigide constitué le plus souvent de silicium ou de verre Pyrex. La pièce micro-usinée comporte une membrane fine qui se déforme sous une pression appliquée. Cette membrane constitue aussi l'armature déformable d'un condensateur variable. La seconde armature est définie par une couche métallique déposée sur le support rigide.

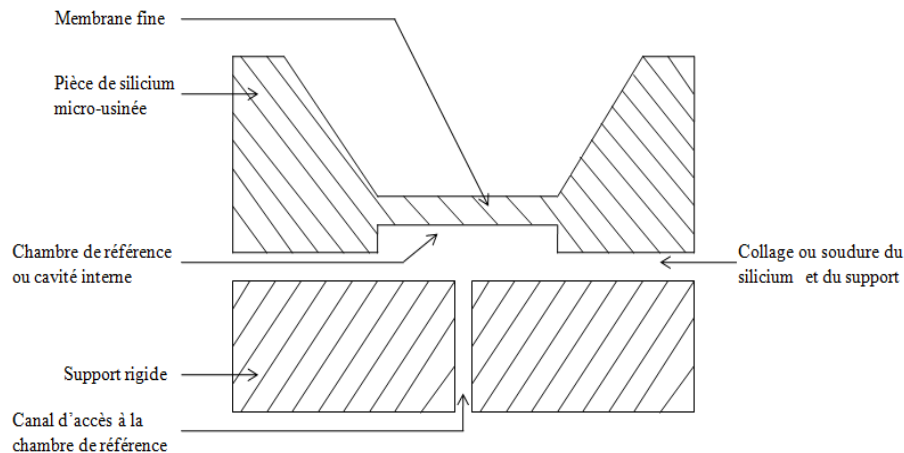


Figure II. 2 : Schéma d'un capteur de pression capacitif [16]

La distance entre les deux armatures au repos est déterminée par la profondeur de la cavité micro-usinée dans le silicium. Parfois, un micro-canal relie le milieu extérieur et l'intérieur de la chambre. La pression appliquée à la membrane est la résultante des pressions externe et interne. On dit que le capteur est de type différentiel. Dans le cas où le vide est effectué dans la cavité interne, on dit que le capteur est de type absolu.

En ce qui concerne les caractéristiques, le capteur de pression capacitif présente une réponse non linéaire. La sensibilité à la pression est de 10^2 à 10^4 ppm/mmHg [6]. Quant à la sensibilité à la température, elle est de 50 ppm/°C environ [7]. De construction simple, ces capteurs sont à priori robustes et fiables. Leur consommation électrique est quasiment nulle.

Les difficultés de réalisation se situent dans le contrôle de la profondeur de la chambre de référence (**Figure II. 2.**), de l'épaisseur de la membrane et de l'assemblage des deux pièces façonnées séparément.

II. 2. 1. 2. Capteur de pression à détection piézorésistive :

La **figure II. 3.** représente le schéma de principe du capteur de pression piézorésistif. On peut noter la ressemblance avec le capteur capacitif. La différence essentielle provient du fait que la membrane comporte des résistances diffusées ou implantées sur ses bords.

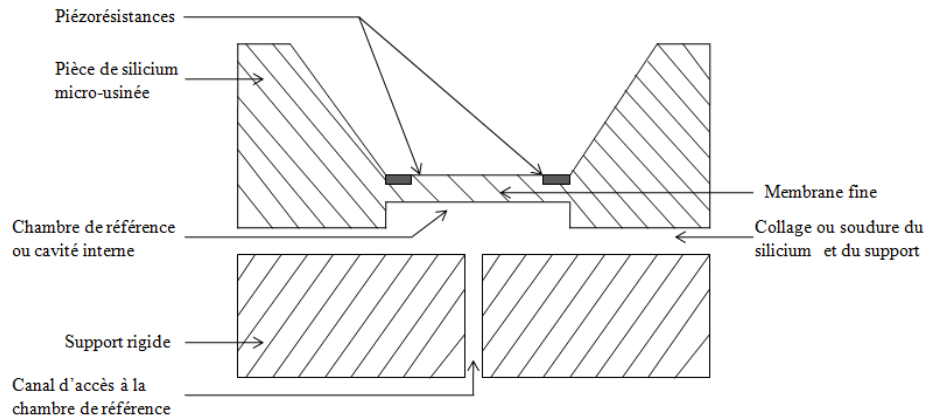


Figure II. 3: Schéma d'un capteur de pression piézorésistif

Sous l'action de la pression, les déformations de la membrane induisent des contraintes mécaniques qui engendrent des variations de résistances. La réponse est pratiquement linéaire. Typiquement, pour une tension d'alimentation de 5 Volts, la variation de la tension de sortie est de quelques centaines de millivolts pour une pression de quelques centaines de millimètres de mercure. Par contre, la sensibilité à la température des piézorésistances est assez élevée (4500 ppm/° C environ)[7]. Pour minimiser cet effet, ces résistances sont montées en pont de Wheatstone équilibré au repos. Sous l'action d'une pression différentielle P, la variation relative de ces piézorésistances est donnée par [17]:

$$\frac{\Delta R}{R} = 6,66 \times 10^{-11} \left(\frac{a}{h}\right)^2 . P \quad (\text{II.1})$$

Où a et h sont le côté et l'épaisseur de la membrane de forme carrée et P la pression exprimée en Pascals.

II. 2. 1. 3. Comparaison des approches capacitive et piézorésistive :

Le **tableau II. 1** est un tableau comparatif entre les deux approches pour pressions comprises entre 0 et 1,5 bar environ [18]. Le capteur capacitif est deux à trois ordres de grandeurs plus sensible à la pression et deux à trois ordres de grandeurs moins sensible à la température que le capteur piézorésistif. Par contre, sa réponse est non linéaire. Il nécessite, par conséquent, des circuits électroniques de conversion spécifiques lorsque le capteur est utilisé pour des mesures. Quant au capteur piézorésistif, il nécessite des dispositifs de compensation de la dérive thermique.

En ce qui concerne la réalisation technologique, les deux capteurs présentent quasiment les mêmes étapes de base. Le capteur piézorésistif nécessite, en plus, une étape de diffusion des

résistances alors que le second capteur nécessite le micro-usinage d'une chambre de référence contrôlée en profondeur.

En résumé, cette brève comparaison des caractéristiques techniques montre que chaque type a potentiellement ses avantages et ses inconvénients.

	Sensibilité à la pression	Réponse	Sensibilité à la température	Technologie	Coût
Capacitif	10 ² à 10 ⁴ ppm/mmHg	Non linéaire	0,05 mmHg/° C	Simple	Même ordre
Piézorésistif	20 à 200 ppm/mmHg	Linéaire	5 mmHg/° C	Plus compliquée	de grandeur

Tableau II. 1 : Comparaison des caractéristiques de capteurs de pression au silicium [19]

II. 2. 2. Capteur de température :

Il faut tout d'abord évoquer ce qu'est la mesure de température. En effet, la température est une grandeur physique traduisant l'agitation moléculaire, c'est donc une quantité d'énergie qu'il faut quantifier pour obtenir une valeur de la température. Cette énergie n'est pas mesurable directement contrairement à d'autres grandeurs comme une longueur ou une masse. L'accès à la température nécessite obligatoirement une transformation de l'énergie thermique en une autre grandeur physique mesurable en utilisant ce qu'on appelle : capteur de température.

Les échelles utilisées pour mesurer la température sont :

- Kelvin
- Celsius
- Rankine
- Fahrenheit

$$T(\text{Celsius}) = T(\text{Kelvin}) - 273,15$$

	Kelvin (K)	Celsius (° C)	Rankine (° R)	Fahrenheit (° F)
Zéro absolu	0	-273,15	0	-459,67
Fusion de l'eau	273,15	0	491,67	32
Vaporisation de l'eau	373,15	100	671,67	212

Tableau II. 2 : Echelles de la température [20]

Plusieurs choix technologiques sont possibles pour l'intégration d'éléments de mesure de température. Nous distinguerons les thermocouples, les capteurs à jonction semi-conductrice et les détecteurs de température de type résistance [21-13]. La technologie de type résistance est la plus communément utilisée du fait de sa facilité de fabrication, sa compatibilité avec la technologie planar et sa variation 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, une bonne conductivité thermique, ce qui assure une uniformité de la température intrinsèque de l'élément chauffant, un coefficient en température constant et relativement élevé qui permet aisément d'obtenir une mesure en température en contrôlant les variations de la résistance.

II. 2. 2.1. Les thermocouples :

Le principe de la 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 (jonction chaude) et T_2 (jonction froide) (**Figure II.4**). 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 mesurer une température inconnue, l'une des deux jonctions doit être maintenue à une température connue, par exemple celle de la glace fondante (0°C). Il est également possible que cette température de référence soit mesurée par un capteur (température ambiante, par exemple). La mesure de la température est donc une mesure indirecte, puisque les thermocouples mesurent en fait une différence de potentiel électrique. 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 [22]. Ceci nécessite donc un étalonnage préalable du capteur pour pouvoir l'utiliser.

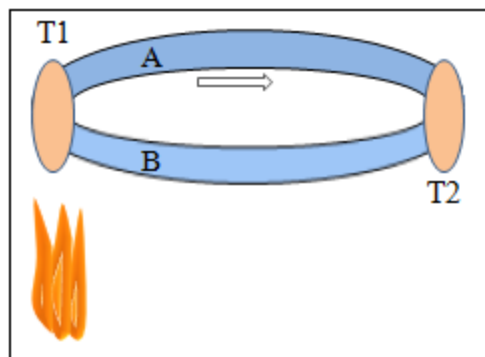


Figure II. 4 : Principe de l'effet Seebeck et du thermocouple

Ce phénomène a été découvert par Thomas Seebeck en 1823. Il permet de définir un coefficient pour chaque thermocouple et ainsi assurer la conversion de la mesure de tension en

mesure de différence de température. Ce coefficient, exprimé en volt par Kelvin ($V.K^{-1}$) est défini par la relation empirique (II. 2) . On peut ainsi, si l'on connaît le coefficient Seebeck des deux matériaux, remonter à la température du milieu.

$$\alpha_A - \alpha_B = \frac{\Delta V}{\Delta T} \quad (\text{II.2})$$

Où :

- α_A et α_B sont les coefficients Seebeck des matériaux A et B.
- ΔV et ΔT , sont respectivement la différence de tension et la différence de température.

Type	Métal A	Métal B	Limites théoriques	Coefficient de Seebeck ($\mu V/K$)
B	Platine (30%) Rhodium	Platine (6%) Rhodium	0 à 1820° C	5,96
E	Nickel (10%) Chromel	Constantan (Nickel + Cuivre)	- 270 à 1000° C	58,67
J	Fer	Constantan (Nickel + Cuivre)	- 210 à 1200° C	50,38
K	Chromel	Alumel	-270 à 1372° C	39,45
R	Platine (13%) Rhodium	Platine	-50 à 1768° C	11,36
S	Platine (10%) Rhodium	Platine	-50 à 1768° C	10,21

Tableau II. 3 : Différent types de thermocouples commercialisés [23]

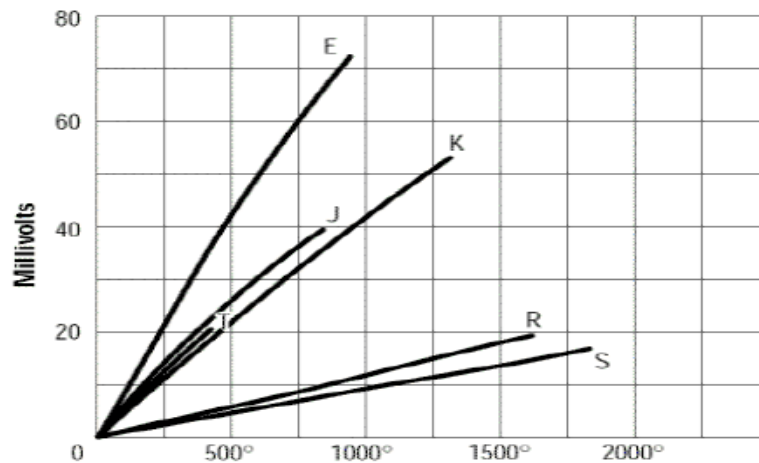


Figure II. 5 : Conversion tension température pour les différents thermocouples [11]

De nouveaux types de thermocouples ont vu le jour avec l'évolution technologique permettent l'intégration de ce type de capteur dans les dispositifs.

M.Klonz [13] présente dès 1989 un thermocouple fabriqué sur membrane SiO_2 (**Figure II.6**). La technologie couche mince permet l'intégration du thermocouple Cu/CuNi44 (résistance $5\text{k}\Omega$) et d'un élément chauffant en CuNi44 (résistance $600\ \Omega$). Dans l'air, les tensions mesurées varient entre 20 et 450mV.

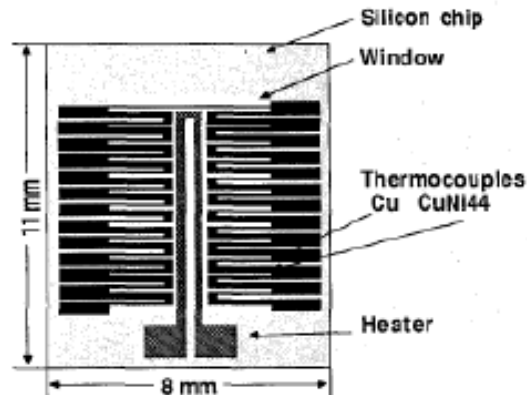


Figure II. 6 : Topologie de surface des thermocouples Cu/CuNi sur membrane [24]

II. 2. 2.2. Les capteurs à jonction semi-conductrice :

Les diodes peuvent être utilisées comme capteurs de température. Comme le montre la **figure II.7**, en fonctionnement en direct 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 silicium ont une chute de tension de 0.7volts. A température ambiante, la sensibilité en température d'une diode est de $-2\text{mV}/^\circ\text{C}$ [24].

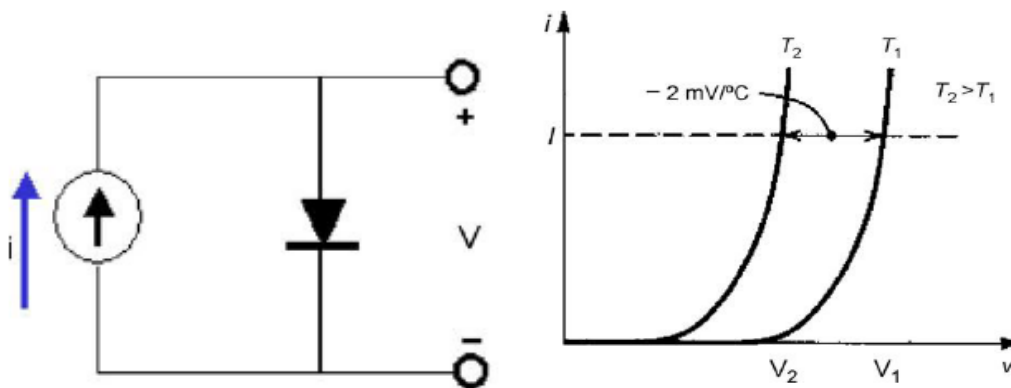


Figure II. 7 : Représentation schématique d'une caractéristique courant-tension d'une diode silicium [25]

II. 2. 2.3. Les 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. Différentes approches ont été développées ces dernières années, pour lesquelles la nature du matériau varie (métal, polysilicium, ...) ainsi que la nature de 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, une bonne conductivité thermique, ce qui assure une uniformité de la température de l'élément chauffant, un coefficient en température constant et relativement élevé qui permet aisément d'obtenir une mesure en température en contrôlant les variations de la résistance [24].

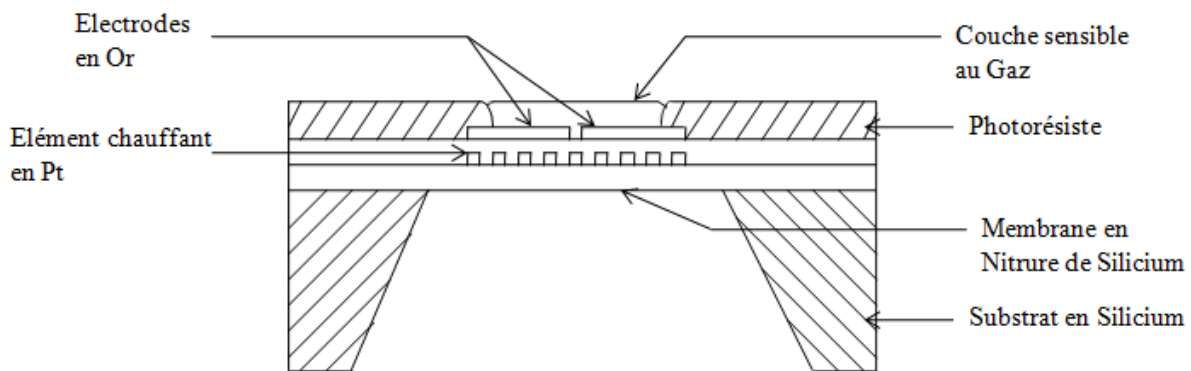


Figure II.8: Vue en coupe schématique d'un capteur de température sur membrane [25]

Le Platine est connu pour son comportement stable en température ($TCR \approx 38 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}$ pour le Platine pur) résistivité électrique ($2,96 \times 10^{-7} \text{ } \Omega \cdot \text{m}$) et son coefficient de température ($\alpha = 1,6 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) [27]., ce qui le rend particulièrement intéressant pour la réalisation de résistances chauffantes et pour la mesure de température.

Si la résistance électrique d'un matériau varie avec la température, le capteur résultant est appelé thermomètre à résistance (RTD : Resistive Temperature Detector). Dans le cas des métaux la résistance électrique croît avec la température [27]. Lorsque la température varie on a :

$$R(T) = R_0(1 + a_m T + b_m T^2 + c_m T^3 + \dots) \quad (\text{II.3})$$

Plus connue pour nous comme :

$$R = R_0(1 + a_m T) \quad (\text{II.4})$$

Avec :

- T la température en ° C ;
- R_0 la résistance à 0° C ;
- a_m , b_m et c_m des coefficients spécifiques au métal.

Métal	Résistivité à 0° C ($\mu\Omega.cm$)	Point de fusion (° C)	Domaine d'emploi (° C)	R_{100} / R_0
Cuivre	7	1083	-190 à +150	1,427
Nickel	6,38	1453	-60 à +180	1,672
Platine	9,81	1769	-250 à +1100	1,392
Indium	9	153	-269 à +27	

Tableau II. 4 : caractéristiques des différents métaux [23]

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 capteurs de température de précision les plus utilisés étaient traditionnellement ceux du type Pt 100, avec une résistance dépendant de la température (RTD) dont la valeur est de 100 Ohms pour une température de 0° C.

Dans l'application de capteur de flux L. Schöler [28] montre des résistances de Platine fabriquées sur des substrats de verre et intégrées dans un canal en résine époxy Su-8 (**figure II.9**)

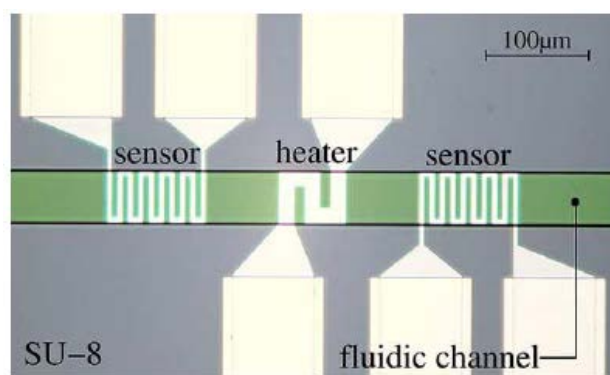


Figure II. 9 : Capteurs de flux Platine intégrés dans un canal [28]

J. Courbat [29] 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 Si_3N_4 par LPCVD, ce qui procure des plaques chauffantes ayant des membranes plus robustes, et sa diffusion est moindre dans le Platine. Ce même métal Ta/Pt est utilisé par R.M. Tiggelar [30] pour la fabrication de microréacteurs chimiques pour l'oxydation partielle catalytique de réactions en phase gazeuse à hautes températures.

Pour ce qui est de l'influence de la géométrie, on peut noter, par exemple, les travaux de P.Menini [31] sur l'influence de la forme de la membrane diélectrique et de la résistance chauffante. Le passage d'une membrane $\text{SiO}_2/\text{SiN}_x$ carrée de $2\mu\text{m}$ d'épaisseur à une membrane circulaire de $1,4\mu\text{m}$ d'épaisseur, ainsi que d'une résistance Ti/Pt de forme serpentine à une forme circulaire (**Figure II.10**) permet une diminution de 30 % de la puissance consommée (53mW à 300°C contre 37mW à 300°C).

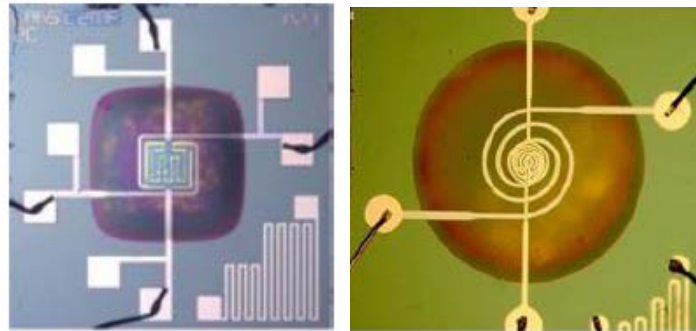


Figure II. 10 : Comparaison entre une géométrie de membrane et de résistance chauffante carrée et circulaire [32]

II. 2. 3. Capteur d'humidité :

L'humidité est le mélange d'air sec et de vapeur d'eau dans l'air ambiant. En général, quand on parle de mesure d'humidité, on fait allusion au taux d'humidité exprimé en % qui est en fait l'humidité relative. La détermination de cette mesure est complexe, car elle est étroitement liée à d'autres grandeurs physiques, telle que la température et la pression.

Le principe de fonctionnement d'un capteur d'humidité est basé sur la variation de l'impédance électrique (résistance ou capacité) due à l'adsorption des molécules d'eau par la couche sensible.

II. 2. 3.1. Détermination de l'humidité :

Considérons un volume v d'air humide à la température T . La masse m d'air humide contenue dans ce volume est la somme de la masse m_a d'air sec et celle de la vapeur d'eau m_v :

$$m = m_a + m_v \quad (\text{II.5})$$

La pression totale P , est la somme des pressions partielles p_w de l'air sec et celles de la vapeur d'eau p_v :

$$P = p_w + p_v \quad (\text{II.6})$$

Il existe plusieurs paramètres permettant de caractériser l'humidité. On peut citer :

- l'humidité absolue;
- le rapport de mélange;
- la température de rosée;
- l'humidité relative;
- le point de rosée.

1. L'humidité absolue :

L'humidité absolue est définie comme un rapport de la masse de vapeur d'eau par unité de volume d'air. Elle peut être exprimée comme suit :

$$\text{Humidité absolue } \left(\frac{g}{m^3}\right) = \frac{\text{la masse de la vapeur d'eau}}{\text{volume d'air}} \quad (\text{II.7})$$

L'humidité absolue change avec l'expansion de volume d'air de sorte qu'elle ne donne pas une représentation fiable de l'humidité globale dans l'air.

L'humidité spécifique est le rapport de la masse de vapeur d'eau par unité de la masse de mélange d'air-eau-vapeur.

$$\text{Humidité Spécifique} = \frac{\text{la masse de la vapeur d'eau}}{\text{unit é masse de mélange d'air - eau - vapeur}} \quad (\text{II.8})$$

2. Le rapport de mélange :

Il est noté r et est exprimé en g/Kg . Il exprime le rapport des masse m_v de vapeur d'eau et m_a d'air sec à température ambiante. Cependant, sa détermination est extrêmement délicate du fait des très faibles quantités de vapeur d'eau mises en jeu.

Le rapport de mélange est défini comme la masse de vapeur d'eau par unité de la masse

D'air sec :

$$\text{Rapport de mélange } \left(\frac{g}{Kg} \right) = \frac{\text{la masse de la vapeur d'eau}}{\text{masse d'aire sec}} \quad (\text{II.9})$$

3. La température de rosée :

C'est la température à laquelle il faut refroidir une masse m d'air humide, à pression constante, pour atteindre la saturation. La connaissance de cette température permet de déterminer le taux d'humidité de l'air.

4. L'humidité relative :

L'humidité relative est le rapport du contenu de vapeur d'eau dans l'air à la quantité maximale de vapeur d'eau que l'air peut maintenir à une température donnée :

$$\text{Humidité relative} = \frac{\text{quantité de vapeur d'eau dans l'air}}{\text{quantité de vapeur d'eau que l'air peut tenir}} \quad (\text{II.10})$$

Puisque la pression de vapeur de saturation est une fonction de la température, l'humidité relative change non seulement avec la quantité de vapeur d'eau dans l'air, mais également avec la température. L'humidité relative est importante parce que c'est un paramètre sans dimensions et il est associé à la sécheresse du matériel. C'est le paramètre le plus utilisé pour mesurer l'humidité.

L'humidité relative de l'air s'exprime en pourcentage. Un air saturé en vapeur d'eau a une humidité relative de 100% ; un air très sec, une humidité de 10 à 20 %. L'humidité relative de l'air indique donc suivant une échelle allant de 0 à 100%, l'état d'humidité ou de sécheresse de l'air. Elle caractérise donc le contenu de l'air en vapeur d'eau et la capacité de cette vapeur d'eau à se condenser.

La température à laquelle l'humidité relative est de 100% est appelée point de rosée. Quand la température augmente, l'humidité relative diminue et quand la température diminue l'humidité relative augmente.

5. Le point de rosée :

La rosée résulte de la condensation de la vapeur d'eau contenue dans l'air. Elle apparaît sous forme de gouttelettes qui se déposent sur des supports dont la température est suffisamment

basse par rapport à la température et au taux d'humidité de l'air ambiant. On dit alors que le point de rosée est atteint.



Figure II. 11 : Point de rosée [32]

En effet, pour une température donnée, l'air n'est capable de contenir qu'une quantité limitée de vapeur d'eau. Dans cette situation limite, on dit que l'air est arrivé à saturation par rapport à la vapeur d'eau : tout abaissement de la température provoque alors une condensation de la vapeur d'eau excédentaire sur les sites de nucléation disponibles.

II. 2. 3.2. Type de capteurs d'humidité :

Le besoin de protection de l'environnement a mené à l'expansion dans le développement de capteur. Les capteurs d'humidité ont attiré l'attention dans les domaines industriels et médicaux [33]. La mesure et la commande de l'humidité est importante dans beaucoup de secteurs comprenant l'industrie (papier, électroniques), l'environnement domestique (climatisation), la médecine (équipement respiratoire), etc....Différentes méthodes sont utilisées pour les mesures d'humidité : changements des propriétés mécaniques, optiques, et électriques des mélanges de vapeur d'eau de gaz [34].

Suivant le moyen de détection utilisé, on peut distinguer les capteurs d'humidité suivants :

- Capteur d'humidité capacitif
- Capteur d'humidité résistif
- Capteurs hygrométriques
- Capteurs gravimétriques
- Capteurs optiques

II. 2. 3.2.1. Capteurs optiques :

Ces capteurs reposent généralement sur l'utilisation de fibres optiques. Leur principe est basé sur la variation des propriétés physiques d'un composant de la fibre sous l'influence de l'humidité. Cela se traduit soit par une variation de l'intensité lumineuse transmise. Une variation du spectre de fluorescence, ou une variation d'indice d'optique qui permet des mesures par réflectométrie [35-36].

L'avantage de ces capteurs réside dans leurs performances. Ce sont des systèmes peu encombrants. Ils peuvent présenter des temps de réponse en dessous de la minute. Ils sont chimiquement stables et peu sujets aux perturbations électromagnétiques. Ils sont en revanche coûteux et lourds à concevoir et à intégrer.

II. 2. 3.2.2. Capteurs gravimétriques :

Le principe de transduction repose sur la variation de masse d'une couche sensible exposée à une variation du taux d'humidité. Ces capteurs utilisent généralement une microbalance à quartz pour détecter la variation de masse. La mesure est alors effectuée en mesurant la variation de fréquence de résonance du quartz (matériau piézoélectrique), excité par un signal électrique [37]. La résolution de ces microbalances atteint les quelques nano grammes par cm^2 de surface exposée.

Un exemple de capteur utilisant une microbalance à quartz est présenté sur la **figure II.12**. Ce dispositif ne comporte pas de matériau sensible. Il est associé à un refroidissement par élément Peltier [38] pour abaisser la température du Quartz et atteindre le point de rosée. L'effet Peltier ou thermoélectricité est le transfert de chaleur entre deux conducteurs de nature différente lorsqu'ils sont parcourus par le même courant. La condensation provoque une apparente variation de masse de quartz. Par étalonnage, le taux d'humidité est déterminé par le délai entre l'activation du module Peltier et la détection de variation de fréquence de résonance de la microbalance.

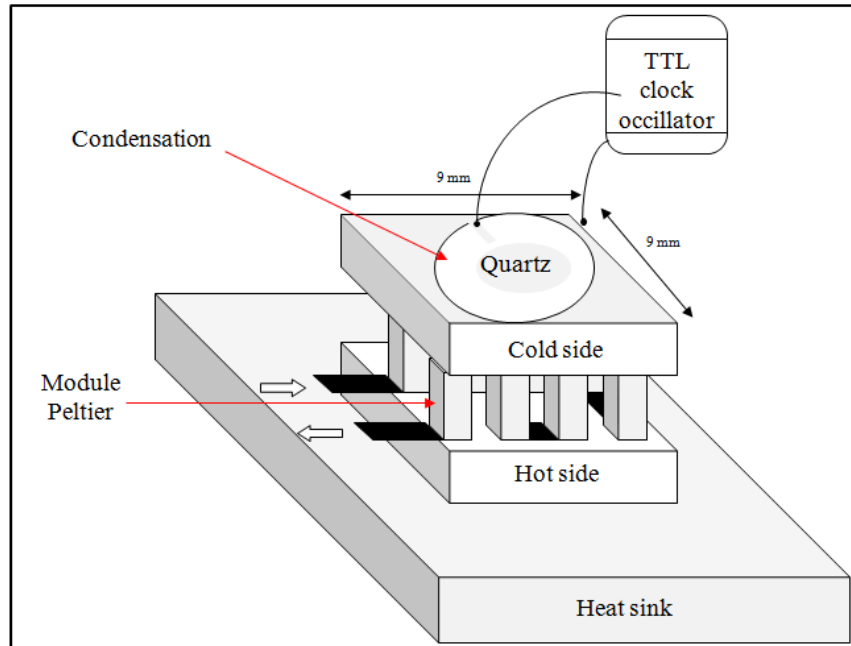


Figure II. 12 : Capteur d'humidité gravimétrique avec module Peltier [39]

II. 2. 3.2.3. Capteurs hygrométriques :

Ce principe est historiquement le premier utilisé pour évaluer le taux ambiant d'humidité. Le principe de transduction repose sur la déformation d'un solide : membrane, cheveu...après absorption d'humidité [40]. L'avantage de cette technique de transduction est qu'elle n'est pas sujette à la dérive en température. Le matériau est généralement fiable.

Un exemple de capteur hygrométrique est présenté sur la **figure II. 13 (a)**. Dans cette étude, les auteurs utilisent un cheveu comme matériau sensible. Un échantillon de matériau sensible de 25 cm de longueur présente une variation de 1,5 mm entre 1% et 100% HR. La transduction repose sur l'intensité lumineuse modulée par un cache solidaire du cheveu, La dilatation ou contraction du cheveu selon qu'il absorbe ou relâche de l'humidité déplace le cache et influe sur la quantité de lumière transmise par le dispositif. La **figure II.13 (b)** montre que lorsque le système est bien ajusté, la variation relative du photo-courant par rapport à la dilatation du cheveu entre 0 et 100 % RH varie de 0 à 100. La variation n'est cependant pas linéaire.

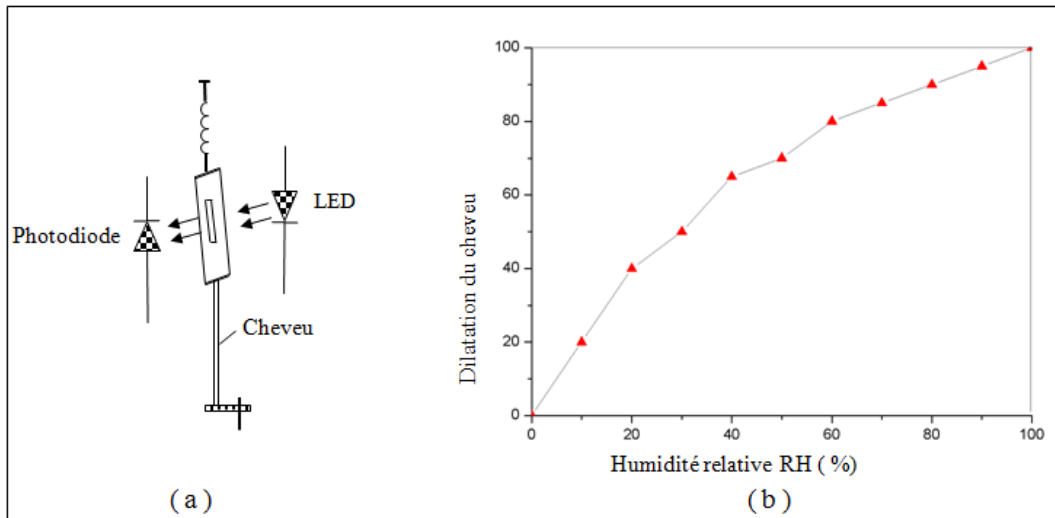


Figure II. 13 : Capteur d'humidité hygrométrique : (a) Schéma de principe du capteur (b) Variation de la dilatation du cheveu en fonction de l'humidité relative [40].

La courbe montre que la relation entre déformation et taux d'humidité n'est pas linéaire. D'après les auteurs, la linéarité peut être améliorée en agissant sur la forme et la taille du cache [41].

II. 2. 3. 2. 4. Capteurs résistifs :

Les capteurs résistifs sont basés sur le changement d'impédance d'une couche sensible après absorption d'humidité. Trois types de matériaux sont généralement utilisés : céramiques, polymères et électrolytes [42].

La résistivité est simplement donnée par la formule suivant :

$$\rho = \frac{R.S}{L} \quad (\text{II.11})$$

Où :

- R est la résistance de l'échantillon.
- S est la surface des électrodes.
- L est la distance entre deux électrodes métalliques.

II. 2. 3.2.5. Capteurs capacitifs :

Le principe de fonctionnement d'un capteur d'humidité capacitif est basé sur la variation, en fonction de l'humidité, de la permittivité relative d'un matériau pris comme diélectrique intercalé entre les deux armatures d'un condensateur.

Les capteurs d'humidité capacitifs sont des condensateurs à deux armatures. La valeur de la capacité augmente quand des molécules d'eau sont absorbées dans son polymère diélectrique actif. Le principe de ce capteur est basé sur la variation de la capacité d'une couche diélectrique exposée à un changement du taux d'humidité. Les capteurs de type capacitif représentent 75% des capteurs d'humidité commerciaux [43-44].

La valeur de la capacité peut se mettre sous la forme suivante :

$$C = \varepsilon_r \varepsilon_0 \frac{A}{d} \quad (\text{II.12})$$

C : Capacité du condensateur exprimée en Farad.

ε_r : Permittivité du diélectrique.

ε_0 : Permittivité du vide ($\varepsilon_0 \approx 8,854 \times 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$).

A : Surface des armatures.

d : Distance entre les armatures (épaisseur du diélectrique).

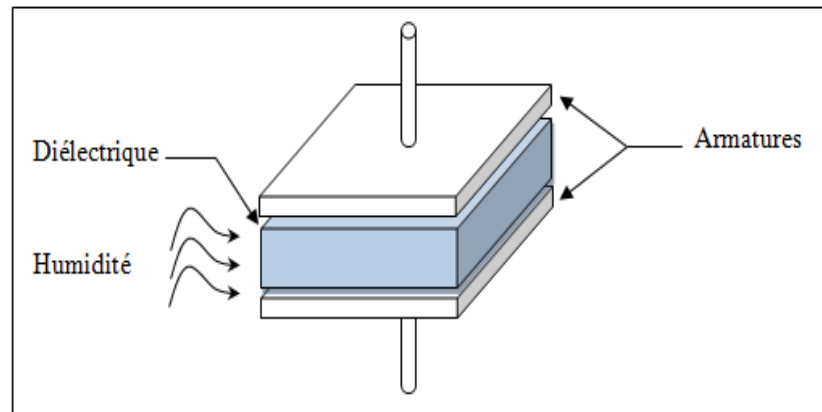


Figure II. 14 : Capteur d'humidité capacitif

Un exemple de capteur d'humidité capacitif en Si poreux est donné sur la **figure II.15**. Ce capteur a été réalisé en utilisant le silicium poreux comme diélectrique. Le principe du capteur repose sur un dépôt d'électrodes métalliques Cr/Au/Cr à la surface d'une couche de Si poreux épaisse de 1 μm . L'électrode consiste en un maillage de la couche métallique. Ce maillage permettra le passage de l'air humide. Une thermistance est incluse pour permettre l'évacuation de l'humidité.

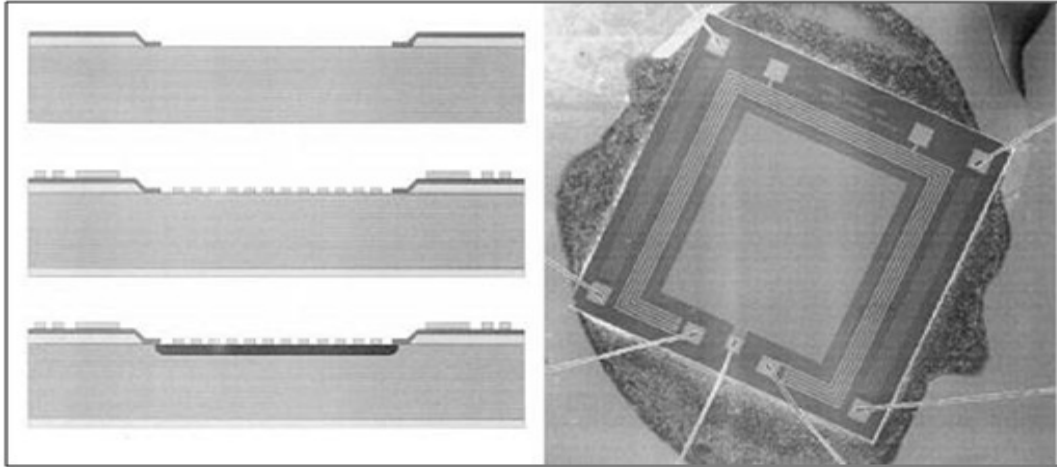


Fig. II.15. Capteur d'humidité Capacitif en Si poreux [45].

Les études portent principalement sur deux aspects :

- Les propriétés hygroscopiques du matériau sensible, ou la faculté d'un matériau à présenter un constant diélectrique sensible à la prise d'humidité.
- La configuration des électrodes disposée pour générer le champ électrique, ou comment optimiser la diffusion de l'humidité (obstruée par les électrodes) avec une distribution du champ électrique aussi uniforme que possible [46].

II. 2. 3.3. Généralités sur les matériaux polymères:

Grâce à leur performance physico-chimique, les matériaux diélectriques à base de polymères trouvent un champ d'application de plus en plus élevé dans l'industrie et notamment dans le domaine du génie électrique : câble de transport d'énergie, condensateurs...etc [47]

L'utilisation des polymères dans la microélectronique est plus récente (fin des années 70) avec la réalisation des premiers systèmes microfluidiques. Les polymères ont également été utilisés comme couches sensibles en utilisant directement certaines de leurs propriétés chimiques. Les polymères apparaissent comme des biomatériaux très prometteurs. En effet, leur utilisation est de plus en plus courante dans des domaines tels que la médecine où ils sont utilisés dans certains procédés chirurgicaux notamment oculaires, comme implants artificiels ou bien dans les systèmes de distribution automatique de médicaments [48]. Dans le domaine des micro-technologies, les polymères sont utilisés depuis très longtemps comme encapsulant avec des propriétés tels que la conduction thermique, la protection électromagnétique ou encore la protection contre l'UV [49].

II. 2. 3.3.1. Monomère et polymère:

Le monomère vient du grec « monos » : un seul ou une seule, et « meros » : partie. Le monomère est la molécule de base (pouvant être par exemple non saturée ou cyclique ou encore

comportant des fonctions réactives à ses extrémités), qui réagit par des réactions dites de polymérisation pour conduire un polymère.

Le mot polymère vient du grec « pollus » : plusieurs, et « meros » : partie. Un polymère est une macromolécule, organique ou inorganique, constituant de l'enchaînement répété d'un même motif ; les monomères reliés les uns aux autres par des liaisons covalentes [50]. Le nombre moyen des monomères dans les molécules finales (polymères) représente le degré de polymérisation.

D'une façon générale, un polymère est un mélange de macromolécules de différentes tailles et de compositions variées si l'on a différents monomères. Ainsi, on peut caractériser un polymère par :

- Sa composition chimique moyenne ;
- Sa masse moléculaire moyenne ; son degré de polymérisation ;
- Sa structure (amorphe ou semi-cristalline).

II. 2. 3.3.2. Nature dipolaire de l'eau:

Une propriété très importante de l'eau est sa nature polaire. La molécule d'eau forme un angle de $104,45^\circ$ au niveau de l'atome d'oxygène et entre les deux atomes d'hydrogène. Puisque l'oxygène a une électronégativité plus forte que l'hydrogène, le côté de la molécule d'eau où se trouve l'atome d'oxygène est chargé négativement, par comparaison avec le côté hydrogène. Une molécule avec une telle différence de charge est appelée un dipôle (molécule polaire) [51].

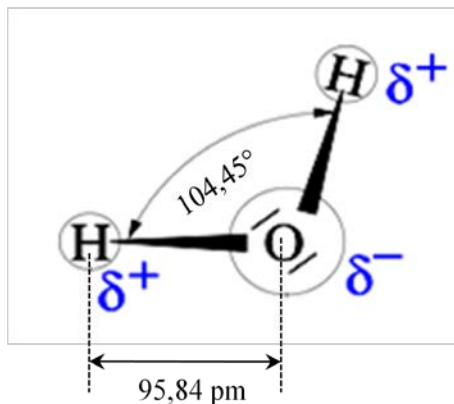


Figure II. 16 : Nature dipolaire de l'eau

II. 2. 3.3.3. Absorption de l'eau dans les polymères :

Les variations de densité, ou de gonflement d'un polymère, peuvent apporter des informations sur le mécanisme d'absorption de l'eau dans les polymères [52]. Ainsi, lorsqu'on s'intéresse au gonflement d'un film de polymère, il est important de garder à l'esprit que l'épaisseur initiale du film peut impacter les valeurs de gonflement, et primordial de spécifier la

direction de mesure. Les mesures de densité et de gonflement sont équivalentes comme on peut le voir à partir de l'équation suivante:

$$\rho_P = \frac{M}{V} \quad (\text{II.13})$$

Avec : ρ_P représente la masse volumique du polymère en g.cm^{-3} , M la masse du polymère en g et V_P le volume du polymère en cm^3 .

La diffusion de l'eau dans les polymères est généralement étudiée à partir de mesures de la masse d'échantillons au cours de l'absorption d'eau ou de sa désorption [53].

La constitution des polyimides permet de dresser un bilan des interactions entre l'eau et la chaîne polymère. Nous distinguerons des interactions purement physiques des interactions chimiques. Parmi les interactions physiques ; la liaison hydrogène et les forces d'interaction de Van der Waals sont à envisager entre le polyimide et l'eau [54]. En effet, la structure de l'imide révèle de nombreux sites permettant la création de liaisons hydrogène pour les atomes d'hydrogène de la vapeur d'eau qu'on veut détecter. En particulier, du fait de la répartition du nuage électronique, les atomes d'azote et d'oxygène au niveau de la fonction imide, sont plus électro-négatifs que l'oxygène de l'eau auquel sont liés les atomes hydrogènes de l'eau. Cette liaison hydrogène, de faible énergie, est compatible avec la bonne réversibilité observée [51-55].

II. 2. 3.4. Les polyimides :

Les recherches sur les matériaux organiques ont conduit à l'élaboration d'une famille de polymères « haute performance » dont les propriétés, ont suscité l'intérêt de différentes industries [56]. Parmi ces matériaux on peut citer la famille des polyimides (Kapton), obtenue par une réaction de condensation, c'est pourquoi ses caractéristiques sont affectées par la présence d'eau [57]. Le film polyimide possède un ensemble unique de propriétés qui le recommandent pour un grand nombre d'applications dans de nombreuses industries. L'aptitude du Kapton à conserver ses excellentes caractéristiques physiques, électriques et mécaniques dans une plage de température tendue ouvre aux films plastiques de nouvelles possibilités de conception et d'application. Le polyimide (PI) ne fond ni brûle, et il se voit attribuer la plus haute classification dans l'échelle de la non-flammabilité. Les caractéristiques exceptionnelles du film PI lui permettent d'être utilisé tant aux hautes qu'aux basses températures, là où d'autres polymères organiques ne seraient pas fonctionnels [56-58]. Ce matériau est populaire dans la technologie des circuits intégrés (IC) grâce à son excellente résistance thermique (jusqu'à 450°C), son élasticité élevée par rapport à l'époxy à température ambiante et sa flexibilité. Les polyimides gardent leurs propriétés dans le volume et sur l'interface avec les autres matériaux même s'ils ont été soumis aux contraintes superficielles liées à l'humidité et à la température.

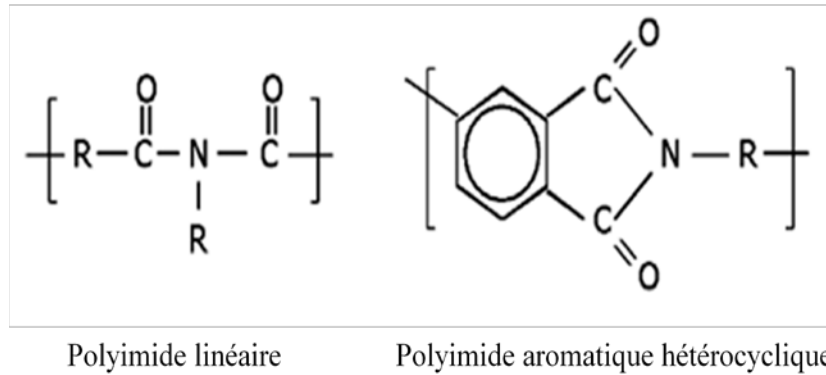


Figure II. 17 : Formule chimique du Kapton [59]

Les films polyimides conservent leurs propriétés sur une plage étendue de températures. Ils ont été utilisés dans des applications pratiques où la température peut s'abaisser à -269°C et s'élever à 400°C [60].

Matériaux	G-7621A ^a	TL-530A ^a	I-8320A ^a	MX-91C2 ^a	PI-2722 ^b	PI-2732 ^b
Module d'élasticité(Gpa)	3.3	6	2.8	3.5	3.8	6
Constante diélectrique (RH=0%)	3.3	3	3.5	3.3	3.3	2.9
Matériaux	Prob.7500 ^c	Prob.7000 ^c	UR 3800 ^d	UR 5100 ^d	Prob.400 ^c	Ultr.7501 ^e
Module d'élasticité(Gpa)	3.3	2.97	3.4	2.1	2.9	3.5
Constante diélectrique (RH=0%)	3.2	3.2	3.3	3.2	2.9	2.8

a : Pimel/Asahi Chemical

b :Pryalin/Du Pont

c :Probimide/OCG

d :Photoneece/Toray

e :Ultradel/Amoco

Tableau II. 5 : Module d'élasticité et constante diélectrique de quelques polyimides commerciales [61]

Nous remarquons d'après ce tableau que la constante diélectrique des différents polyimides varie entre 2,8 et 3,5.

L'absorption de l'eau dans les polymères modifie leurs différentes propriétés, tels que la constante diélectrique, la conductivité, etc. Sachant que l'eau a une constante diélectrique importante par rapport au polyimide (de l'ordre de 80), et prenons le cas du polyimide ULTRADEL 7501, après absorption de l'eau ϵ_r prend une valeur de 2.8 à 0% et 4 à 100%.

Conclusion :

Nous avons passé en revue différents types de détections permettant de développer soit des capteurs de pression, des capteurs de températures ou bien des capteurs d'humidité.

La majeure partie des nouvelles cellules sensibles disponibles sur le marché pour la détection de la pression est basée sur le principe de détection de type piézorésistif vu la compatibilité de cette structure avec la technologie silicium. Pour la détection de la température, la technologie de type résistance est la plus communément utilisée du fait de sa facilité de fabrication et de l'évolution linéaire des ces résistances avec la température. La plupart des capteurs d'humidité existants sont de type capacitif ou résistif à cause de la simplicité de fabrication de ces dispositifs. Les autres systèmes sont généralement plus performants en sensibilité et temps de réponse mais plus lourds à mettre en œuvre et donc plus coûteux.

CHAPITRE III

MODELISATION DES CAPTEURS CONSTITUANT LA MICROSONDE METEOROLOGIQUE

INTRODUCTION :

La technique du radiosondage consiste à lâcher dans l'atmosphère un ballon gonflé. Sous le ballon est fixée une sonde constituée de capteurs de pression, de température et d'humidité. Capteurs dont les mesures sont transmises au sol par transmission hertzienne.

Dans ce chapitre, il sera donc question de modéliser le comportement et la réponse des trois capteurs qui constituent la microsonde météorologique.

Dans une première partie de ce chapitre, nous allons modéliser le comportement mécanique et électrique du capteur de pression à détection piézorésistive. Ce dernier transforme généralement une déformation mécanique en un signal électrique. Nous passerons ensuite à la modélisation du capteur de température résistif. Ce dernier est constitué d'une résistance électrique qui varie avec la température. Nous finirons ce chapitre par l'étude du capteur d'humidité capacitif. Son principe de fonctionnement est basé sur la variation, en fonction de l'humidité, de la permittivité relative d'un matériau pris comme diélectrique intercalé entre les deux armatures d'un condensateur.

III. 1. Modélisation du capteur de pression à détection piézorésistive :

Les capteurs de pression connaissent ; depuis les années 80 un essor de plus en plus important. Cet essor s'est surtout ressenti depuis le développement des capteurs miniatures sur silicium, c'est-à-dire depuis l'utilisation des techniques issues de la microélectronique.

De nos jours, la majeure partie des nouvelles cellules sensibles disponibles sur le marché, est basée sur le principe de détection piézorésistive. Cela signifie que la détection de la pression se fait par la mesure d'une variation de résistance.

L'évolution des jauges métalliques déposées vers celles en poly silicium ou encore en silicium dopé, directement implantées dans le corps d'épreuve, a permis à ces composants d'atteindre de très bonnes performances et donc de monopoliser le marché [13].

En dépit de leurs avantages (bonne précision, faible non linéarité, électronique associée simple), ces composants sont extrêmement sensibles à la température et nécessitent un circuit de compensation spécifique, ce qui élève considérablement leur prix de revient unitaire.

Les capteurs de pression piézorésistifs occupent une place de première importance dans des domaines bien plus variés comme la robotique, le génie biologique et médical, l'environnement (notamment dans la métrologie et météorologie), la domotique et l'automobile.

III. 1.1. La piézorésistivité :

La piézorésistivité est la variation de la résistivité électrique d'un matériau lorsque celui-ci est soumis à des contraintes mécaniques et donc à des déformations. Cette propriété physique fut découverte par Sir Lord Kelvin en 1956 dans le cas de métaux, dans le cas des semi conducteurs l'effet est cent fois plus prononcé que pour les métaux [68].

La qualité d'un capteur à jauges de contraintes passe tout d'abord par un choix de matériaux adaptés pour le corps d'épreuve, le support isolants et la jauge elle-même [62]. La tendance naturelle consiste à choisir des matériaux se prêtant à des déformations importantes, afin d'obtenir des signaux de grande amplitude. Il faut alors éviter d'aller aux limites d'élasticité des matériaux afin de s'affranchir des risques de déformations permanentes voire des ruptures.

Il existe deux types de jauges de contraintes : les jauges à semi conducteurs et les jauges métalliques (**Annexe D**).

Les principaux matériaux pouvant servir dans la réalisation de capteurs à jauges de contraintes se distinguent par leur comportement thermique, leur résistance à la fatigue ainsi que par leurs propriétés de linéarité et d'hystérésis :

- Le poly silicium ne possède pas de structure cristalline propre puisque il est formé d'un agglomérat de grains présentant chacun une direction cristallographique particulière. De plus les phénomènes de conduction au niveau des joints de grains semblent apporter une grande influence sur la résistivité globale d'un conducteur formé de poly silicium. Ce dernier possède une résistivité relativement élevée par rapport à celle d'un métal (20 Ω .cm contre 10,6 μ Ω .cm pour le platine par exemple) [63].
- Constantan (alliage cuivre-nickel) : c'est l'alliage le plus courant . Il offre une bonne aptitude au soudage et peut être utilisé jusqu'à 200° C.
- Karma (alliage nickel-chrome) : par rapport à l'alliage précédent, le karma présente une sensibilité plus importante pour une contrainte similaire et sur le même corps d'épreuve. Il offre aussi de meilleures performances à haute température (jusque vers 350° C).
- Platine-tungstène 92% Pt, 8% W : ce matériau présente la meilleure résistance à la fatigue, la gamme de température la plus large et un facteur de jauge élevé de 4,6. Il reste cependant employé pour des applications très spécifiques.

III. 1.2. Principe de fonctionnement du capteur de pression à détection piézorésistive:

Un capteur de pression à détection piézorésistive est composé d'une membrane qui constitue le corps d'épreuve (**Figure III.1**). Cette membrane se déforme sous l'effet d'une pression appliquée.

Des jauges piézorésistives implantées en surface du corps d'épreuve forme un conditionneur passif qui permet de détecter la déformation qui sera transformée en variation de résistance.

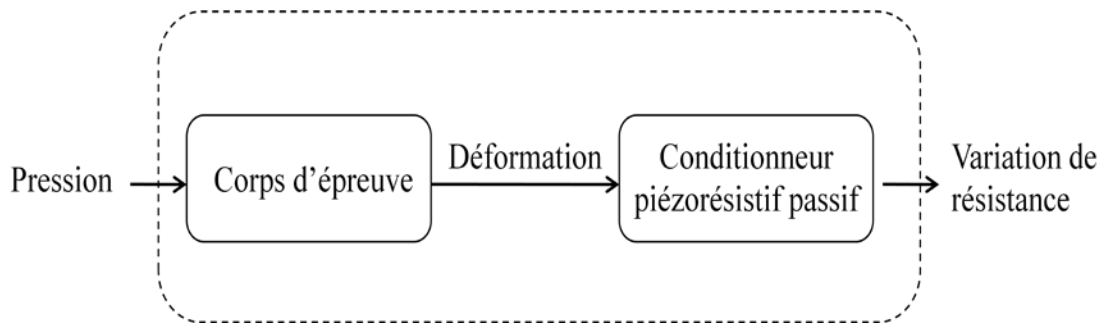


Figure III. 1 : Schéma synoptique d'un capteur de pression piézorésistif

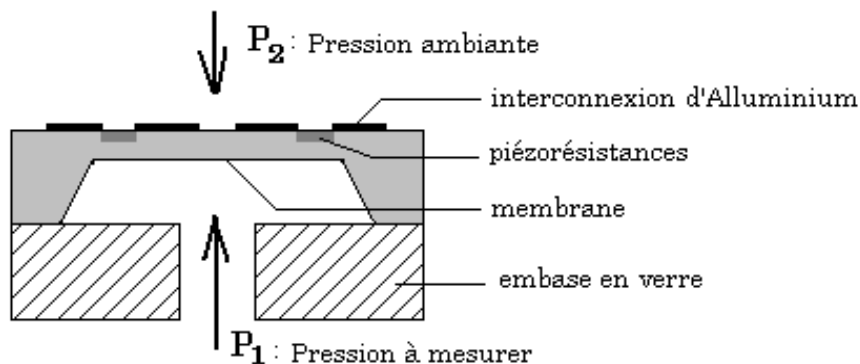


Figure III. 2 : Architecture du capteur de pression piézorésistif

Nous allons déterminer analytiquement, dans une première étape, le comportement mécanique de la membrane utilisée.

Dans ce qui suit, nous établirons les équations qui régissent le comportement mécanique de la membrane de silicium en se basant sur la théorie d'élasticité dans les cristaux cubique [64] et sur la théorie des plaques minces [65].

Lorsque nous évoquons depuis le début le terme « membrane », nous considérons en fait une plaque carrée encadrée sur les quatre cotés, comme illustrée sur la **figure III.3**. Les

paramètres géométriques caractérisant la membrane sont : le coté « a » et l'épaisseur « h », située dans le plan (O x y) d'un repère orthonormé (O x y z), représentée sur la figure ci-dessous :

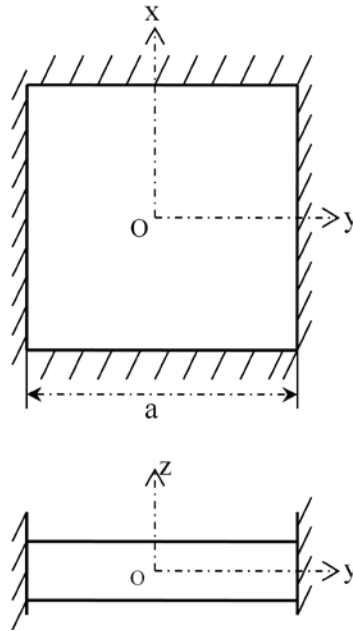


Figure III. 3 : Vue de dessus et en coupe de la membrane de forme carrée

III. 1.3. Réponse mécanique du capteur de pression :

III. 1.3.1. Déflexion de la membrane :

Sous l'effet d'une pression constante et uniforme parallèle à l'axe (Oz), la membrane subit une déformation temporaire suivant (Oz). Cette déformation est définie par une déflexion $W(x,y)$ en un point de coordonnées (x,y) (**Figure III.4**). En appliquant la théorie des plaques minces, nous montrons que l'équation différentielle décrivant la position d'équilibre s'écrit [65-66] :

$$\frac{\partial^4 W(x,y)}{\partial x^4} + 2\alpha_{Si} \frac{\partial^4 W(x,y)}{\partial x^2 \cdot \partial y^2} + \frac{\partial^4 W(x,y)}{\partial y^4} = \frac{P}{D} \quad (\text{III.1})$$

où :

- P la pression appliquée ;
- α_{Si} une constante du Silicium traduisant l'anisotropie de ses propriétés mécaniques ;
- D le coefficient de rigidité à la flexion de la membrane.

Les deux paramètres ci-dessus se calculent par les relations suivantes [67] :

$$\alpha_{Si} = \nu + \frac{2G(1-\nu^2)}{E} \quad (\text{III.2})$$

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \quad (\text{III.3})$$

Où :

G représente le module de coulomb, E le module d'Young et ν le coefficient de Poisson du matériau constituant la membrane.

Dans ce qui suit, il est admis que les hypothèses suivantes sont vérifiées:

- La membrane est totalement encadrée sur ses bords.
- La membrane est assimilable à une plaque mince ($h \ll a$).
- La théorie des faibles déflexions reste valable ($W \ll h$).
- La pression est telle que la théorie de l'élasticité reste applicable.
- Toutes les forces extérieures, autres que celle dues à la pression, sont négligeables.

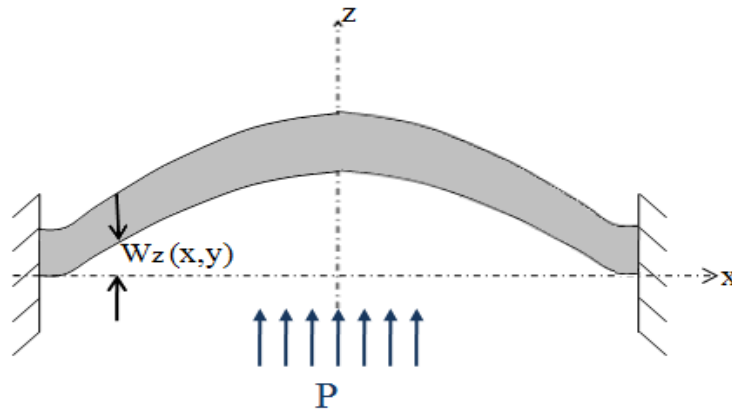


Figure III. 4 : Schéma de la déflexion de la membrane soumise à une pression P.

L'encastrement parfait de la membrane sur ces bords impose les conditions aux limites suivantes:

$$\left\{ \begin{array}{l} W(x = \pm \frac{a}{2}, \forall y) = 0 \\ W(\forall x, y = \pm \frac{a}{2}) = 0 \end{array} \right. \quad Et \quad \left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial W}{\partial x}(x = \pm \frac{a}{2}, \forall y) = 0 \\ \frac{\partial W}{\partial y}(\forall x, y = \pm \frac{a}{2}) = 0 \end{array} \right. \quad (\text{III.4})$$

La solution analytique exacte du système formé de l'équation différentielle (III.1) et des conditions aux limites (III.4) n'est pas connue. Parmi les méthodes de recherche de solutions approchées de ce problème, les deux suivantes sont les plus utilisées : celle dite de RITZ-RALEIGH, faisant appel au principe de minimisation de l'énergie et celle dite de GALERKIN, basée sur le théorème des travaux virtuels [68].

L'application de la méthode de GALERKIN au cas d'une membrane carrée dont les bords sont parfaitement encastés, aboutit à une solution semi-analytique qu'on peut mettre sous la forme suivante :

$$W(x, y) = W(0,0) \left[1 - \left(\frac{2x}{a}\right)^2\right]^2 \left[1 - \left(\frac{2y}{a}\right)^2\right]^2 \sum_{i,j}^n k_{ij} \left(\frac{2x}{a}\right)^i \left(\frac{2y}{a}\right)^j \quad (\text{III.5})$$

Avec :

- i et j sont des entiers pairs ;
- k_{ij} sont des constantes dépendant, pour une membrane carrée, uniquement du facteur d'anisotropie α_{Si} ;
- $W(0,0)$ est la déflexion au centre de la membrane ($x=0, y=0$) dont l'amplitude se calcule par la relation suivante [68]:

$$W(0,0) = \frac{P}{16D} a^4 k \quad (\text{III.6})$$

Pour une membrane usinée dans un plan cristallographique (100) et dont les côtés sont orientés selon la direction [110], les coefficients k_{ij} ($n = 2$) pour une membrane carré sont données dans le **Tableau III.1**. Ce calcul a été effectué dans un programme écrit sous Matlab [Annexe C] .

k_{ij}	k_{00}	k_{02}	k_{20}	k_{22}
Membrane carré	0,0213	0,0046	0,0046	0,0074

Tableau III. 1 : Valeurs numériques des coefficients k_{ij} pour une membrane carrée.

En posant : $u = \frac{2x}{a}$, $v = \frac{2y}{a}$ et $W_N(u, v) = \frac{W(x,y)}{W(0,0)}$, l'expression de la déflexion normalisée par rapport au centre s'écrit :

$$W_N(u, v) = (1 - u^2)^2 (1 - v^2)^2 \sum_{i,j}^4 k_{ij} u^i v^j \quad (\text{III.7})$$

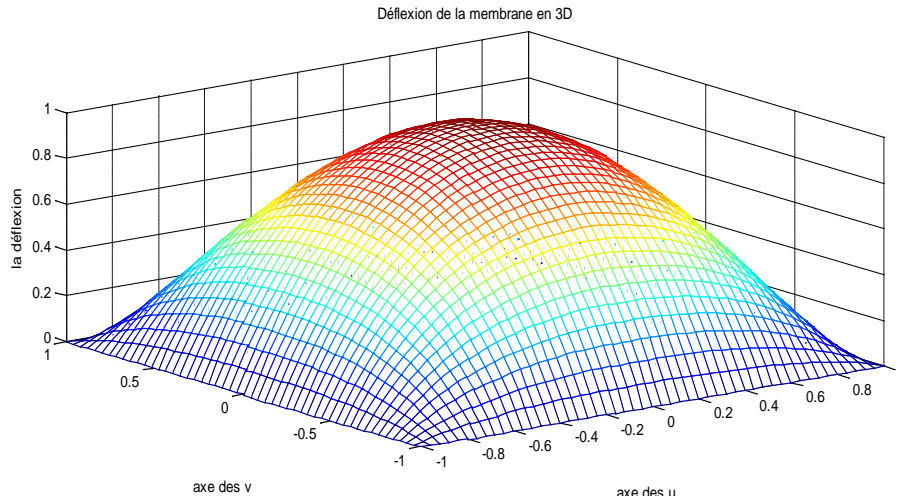


Figure III. 5 : Déflexion d'une membrane carrée sous une pression appliquée.

D'après cette figure, nous remarquons que la valeur maximale de la déflexion se trouve au centre de la membrane.

III. 1.3.2. Etude des contraintes :

Dans un solide élastique soumis à des contraintes, la loi de HOOKE généralisée s'écrit [9] :

$$u_i = \sum_{j=1}^6 S_{ij} \sigma_j \quad (\text{III.8})$$

Où :

- u_i est le tenseur des déformations induites dans le matériau,
- σ_j est le tenseur des contraintes,
- S_{ij} est le tenseur des coefficients d'élasticité du matériau.

Dans le cas du Silicium, les propriétés de symétrie cristalline permettent de montrer que les composantes de la matrice S_{ij} sont soit nulles soit égales à S_{11} , S_{12} ou S_{44} .

En définissant un repère $(Ox'y'z')$ obtenu, à partir du système d'axes liés aux directions cristallographiques [100], par une série de rotation définies dans l'**annexe A**, et positionné de telle façon que le plan $(Ox'y')$ soit contenu dans le plan moyen non déformé de la membrane, et en faisant l'hypothèse d'un état bidimensionnel de contraintes planes (i.e : $\sigma_3 = \sigma_4 = \sigma_5 = 0$) les relations entre les composantes non nulles des matrices de déformation et de contrainte s'écrivent :

$$\begin{cases} u_1 = S'_{11}\sigma_1 + S'_{12}\sigma_2 \\ u_2 = S'_{12}\sigma_1 + S'_{11}\sigma_2 \\ u_6 = S'_{44}\sigma_6 \end{cases} \quad (\text{III.9})$$

Où S'_{11} , S'_{12} et S'_{44} sont les coefficients d'élasticité du Silicium dans le nouveau repère ($Ox'y'z'$).

En utilisant les modules : d'Young \mathbf{E} de Coulomb \mathbf{G} et le coefficient de Poisson ν , définis comme suit [67] :

$$\begin{cases} E = \frac{1}{S'_{11}} \\ G = \frac{1}{S'_{44}} \\ \nu = -\frac{S'_{12}}{S'_{11}} \end{cases} \quad (\text{III.10})$$

Les trois équations (III.9) se mettent sous la forme suivante :

$$\begin{cases} u_1 = \frac{1}{E}(\sigma_1 - \nu\sigma_2) \\ u_2 = \frac{1}{E}(\sigma_2 - \nu\sigma_1) \\ u_6 = \frac{\sigma_6}{G} \end{cases} \quad (\text{III.11})$$

Comme les coefficients d'élasticité S'_{11} , S'_{12} et S'_{44} dépendent de l'orientation cristallographique, les paramètres mécaniques présents dans les équations des contraintes en dépendent également.

S_{11} (Pa ⁻¹)	S_{12} (Pa ⁻¹)	S_{44} (Pa ⁻¹)
$0,768 \cdot 10^{-11}$	$-0,214 \cdot 10^{-11}$	$1,26 \cdot 10^{-11}$

Tableau III. 2 : Valeurs numériques des coefficients d'élasticité du Silicium [69].

En utilisant les expressions de S'_{11} , S'_{12} et S'_{44} , données dans l'**annexe B** et les valeurs des modules d'élasticité du Silicium données dans le **tableau (III.2)** pour les directions cristallographiques [100], nous avons calculé les valeurs de \mathbf{E} , \mathbf{G} et ν dans le cas particulier d'un plan (100) et la direction [110] :

$$\begin{cases} E_{110} = 1,6892 \cdot 10^{11} \text{ Pa} \\ G_{110} = 1,5092 \cdot 10^{11} \text{ Pa} \\ \nu_{110} = 0,0642 \end{cases} \quad (\text{III.12})$$

Par ailleurs, sachant que les trois composantes de la déformation de la membrane sont reliées à sa déflexion par les équations différentielles suivantes [69] :

$$\begin{cases} \varepsilon_1(x, y) = -z \frac{\partial^2 W(x, y)}{\partial x^2} \\ \varepsilon_2(x, y) = -z \frac{\partial^2 W(x, y)}{\partial y^2} \\ \varepsilon_6(x, y) = -z \frac{\partial^2 W(x, y)}{\partial x \partial y} \end{cases} \quad (\text{III.13})$$

Les équations des contraintes induites par l'application d'une pression P à la surface de la membrane ($z = -h/2$) s'écrivent :

$$\begin{cases} \sigma_1(x, y) = \frac{h}{2} \frac{E}{1-\nu^2} \left(\frac{\partial^2 W(x, y)}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 W(x, y)}{\partial y^2} \right) \\ \sigma_2(x, y) = \frac{h}{2} \frac{E}{1-\nu^2} \left(\frac{\partial^2 W(x, y)}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 W(x, y)}{\partial x^2} \right) \\ \tau_6(x, y) = hG \frac{\partial^2 W(x, y)}{\partial x \partial y} \end{cases} \quad (\text{III.14})$$

La relation (III.14) traduit les équations des contraintes normales (longitudinale et transversale) et de la contrainte de cisaillement. Le calcul de ces contraintes passe d'abord par la détermination la déflexion W (x, y) en tout point de la membrane.

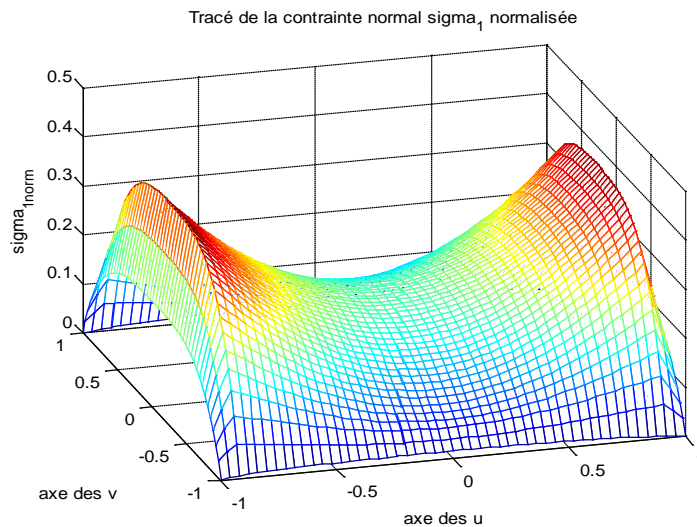


Figure III. 6: Représentation en 3D de la contrainte normale.

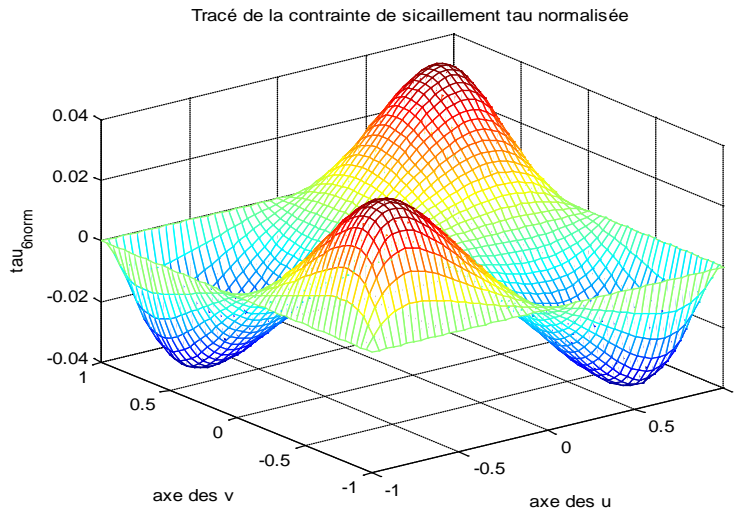


Figure III. 7: Représentation en 3D de la contrainte de cisaillement.

III. 1.4. Réponse électrique du capteur de pression piézorésistif :

Afin d'obtenir un maximum de sensibilité du capteur, nous devons placer des piézorésistances aux endroits dont la contrainte est maximale. Comme le montre la **figure III.8** obtenue par le logiciel Comsol, ces zones sont situées sur les axes médians de la structure près des bords de la membrane. La figure schématise une membrane déformée sous l'effet d'une pression appliquée sur sa face supérieure. Une jauge longitudinale J_L est parcourue par un courant parallèle de la déformation ε_x . Sa résistance augmente (facteur de jauge longitudinale positif). Une jauge transversale J_T est parcourue par un courant perpendiculaire à la déformation ε_y . Sa résistance diminue (facteur de jauge transversal négatif). Pour un montage en pont de Wheatstone complet, deux jauges de chaque type sont nécessaires et doivent avoir la même valeur de résistance au repos pour que la tension de décalage du pont (offset) soit nulle.

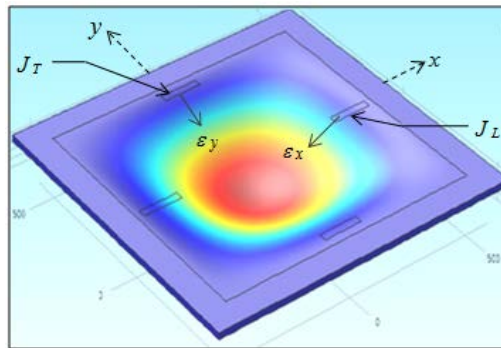


Figure III. 8 : Schéma de principe du positionnement des jauges piézorésistives.

Le pont de Wheatstone est le circuit le mieux adapté pour la mesure de petite variation de résistances électriques telles que rencontrées lors de l'utilisation de jauges de déformation (**Figure III.9**).

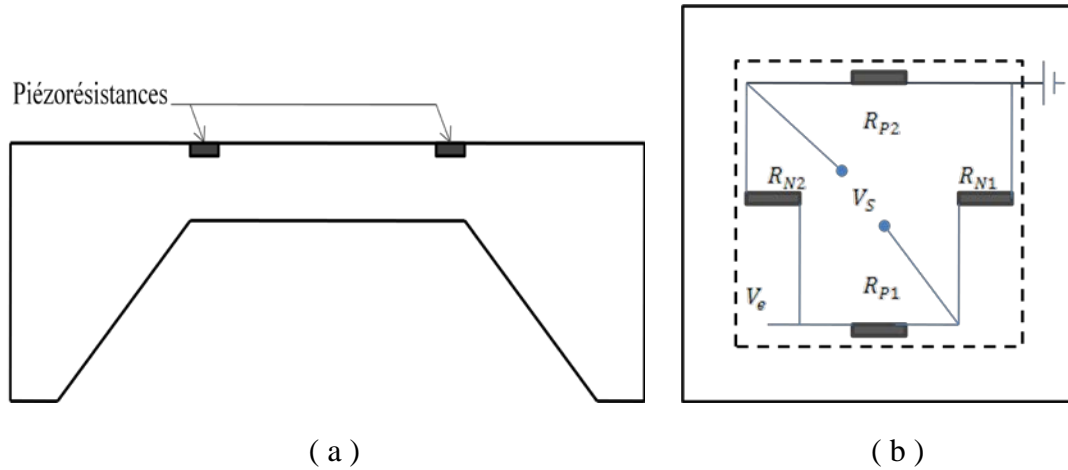


Figure III. 9 : (a) *Vue en coupe d'une membrane carrée avec Les piézorésistances.* (b) *Représentation schématique de la disposition des quatre jauges sur la membrane.*

Le pont de Wheatstone a été inventé en 1833 par Samuel Hunter Christie [70] et amélioré par Sir Charles Wheatstone [71]. A l'origine, le pont est utilisé pour mesurer des résistances inconnues. C'est aussi le cas dans l'utilisation des jauges de contrainte où les variations de courants sont relativement faibles pour être mesurées. L'utilisation de ponts de Wheatstone est attestée dès l'invention des jauges de contraintes par Simmons [72]. Les jauges ont des valeurs de résistance normalisées : 120Ω, 350Ω et 1000Ω étant les valeurs les plus courantes.

Dans un montage à quatre résistances, montées en pont de Wheatstone, la tension de sortie s'écrit :

$$\frac{V_{S0}}{V_e} (P = 0) = \frac{R_{N1}}{R_{P1} + R_{N1}} - \frac{R_{P2}}{R_{N2} + R_{P2}} \quad (\text{III.15})$$

Cette tension de sortie, à tension d'alimentation \$V_e\$ constante, dépend de chacune des valeurs des quatre résistances du pont.

En particulier, ce type de montage permet de faire une rejection de la tension d'alimentation, ce qui lui donne une sensibilité très élevée. Par ailleurs, un autre de ses avantages réside dans le fait qu'il élimine les effets de la température. Il permet aussi la compensation de tous les phénomènes parasites qui peuvent intervenir dans la structure.

En présence d'une pression s'exerçant sur la membrane, les valeurs des résistances varient et dans le cas où les résistances sont égales deux à deux ($R_{p1} = R_{p2}$) et ($R_{N1} = R_{N2}$), la tension de sortie s'écrit :

$$\frac{\Delta V_S}{V_e} = \left[\left(R_{N1} \left(1 + \frac{\Delta R_{N1}}{R_{N1}} \right) - R_{P1} \left(1 + \frac{\Delta R_{P1}}{R_{P1}} \right) \right) / \left(R_{N1} \left(1 + \frac{\Delta R_{N1}}{R_{N1}} \right) + R_{P1} \left(1 + \frac{\Delta R_{P1}}{R_{P1}} \right) \right) \right] \quad (\text{III.16})$$

Nous allons à présent analyser la linéarité de la réponse du pont. La linéarisation de l'équation (III.16) permet d'écrire :

$$\frac{\Delta V_{SL}}{V_e} = \left[\left(R_{N1} \left(1 + \frac{\Delta R_{N1}}{R_{N1}} \right) - R_{P1} \left(1 + \frac{\Delta R_{P1}}{R_{P1}} \right) \right) / (R_{N1} + R_{P1}) \right] \quad (\text{III.17})$$

Le coefficient de non linéarité η est donné par:

$$\eta = \frac{V_{SL} - V_S}{V_{SL}} = \frac{\Delta R_{N1}}{R_{N1}} \left[\left(\frac{R_{N1}}{R_{P1}} + \left(\frac{\Delta R_{P1}}{R_{P1}} / \frac{\Delta R_{N1}}{R_{N1}} \right) \right) / 1 + \frac{R_{N1}}{R_{P1}} \right] \quad (\text{III.18})$$

Si nous prenons :

$$q = \frac{R_{N1}}{R_{P1}} \quad (\text{III.19})$$

$$\Delta q = \frac{\Delta R_{N1}}{R_{N1}} / \frac{\Delta R_{P1}}{R_{P1}} \quad (\text{III.20})$$

La relation (III.20) devienne alors:

$$\eta = \frac{\Delta R_{N1}}{R_{N1}} \left[\left(q + \frac{1}{\Delta q} \right) / 1 + q \right] \quad (\text{III.21})$$

Si nous supposons le cas idéal des résistances parfaitement appariées, le coefficient η s'annule et la tension de sortie du pont s'écrit:

$$\frac{\Delta V_S}{V_e} = \frac{\Delta R_{N1}}{R_{N1}} \quad (\text{III.22})$$

Cependant, ce cas idéal est impossible à réaliser, malgré qu'on puisse s'y approcher étroitement. Pour annuler l'erreur de linéarité, une des solutions est de créer volontairement un déséquilibre dans le pont pour compenser l'écart entre les valeurs des variations relatives des résistances. C'est-à-dire que :

$$q = -\frac{1}{\Delta q} \quad (\text{III.23})$$

Le déséquilibre du pont fait apparaître une tension de décalage due à la différence entre les valeurs des jauges. Cette tension s'écrit :

$$\frac{V_{s0}}{V_e} = \frac{1+\Delta q}{1-\Delta q} \quad (\text{III.24})$$

La sensibilité du capteur dans ce cas serait :

$$\frac{\Delta V_s}{V_e} = \frac{2}{\Delta q - 1} \left(\frac{\Delta R_{N1}}{R_{N1}} \right) \quad (\text{III.25})$$

La tension de sortie est donc la somme de tension de décalage (III.24) avec le signal utile (III.25) :

$$\frac{V_s}{V_e} = \left[\frac{1+\Delta q}{1-\Delta q} + \frac{2}{\Delta q - 1} \left(\frac{\Delta R_{N1}}{R_{N1}} \right) \right] \quad (\text{III.26})$$

La relation de la tension de sortie s'écrit sous la forme :

$$\frac{\Delta V_s}{V_e} = \left[\left(\frac{\Delta R_{N1}}{R_{N1}} \left(1 - \frac{1}{\Delta q} \right) \right) / \left(2 + \frac{\Delta R_{N1}}{R_{N1}} \left(1 + \frac{1}{\Delta q} \right) \right) \right] \quad (\text{III.27})$$

L'erreur de linéarité s'écrit dans ce cas :

$$\eta = \frac{\Delta R_{N1}}{2R_{N1}} \left[\left(1 + \frac{1}{\Delta q} \right) \right] \quad (\text{III.28})$$

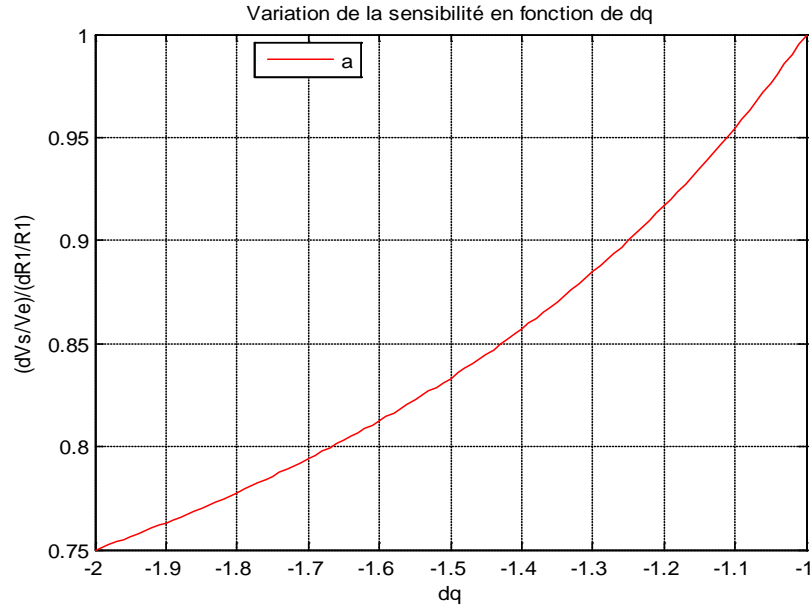


Figure III. 10 : Sensibilité du capteur

Nous remarquons à partir des courbes ci-dessus, que la sensibilité du capteur reste aux environs de 75% de sa valeur maximale lorsque Δq tend vers -2.

III. 2. Modélisation du capteur de température à détection résistive :

Le capteur de température à détection résistive est constitué d'une résistance électrique qui varie en fonction de la température.

Lorsque la température varie, on a :

$$R = R_0(1 + aT + bT^2 + cT^3 + \dots) \quad (\text{III.29})$$

où :

- T la température en ° C ;
- R_0 la résistance à 0° C ;
- a, b et c des coefficients spécifiques au métal.

Le Platine est connu pour son comportement stable en température ($\text{TCR} \approx 38 \times 10^{-4} \text{C}$ pour le Platine pur), résistivité électrique $2,96 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$ et son coefficient de température $\alpha = 1,6 \times 10^{-3} \text{C}^{-1}$ [27], ce qui le rend particulièrement intéressant pour la réalisation de résistances chauffantes et pour la mesure de température. A cause de sa faible adhésion sur les matériaux

isolants (SiNx , Si_3N_4 , SiO_2, \dots), il est nécessaire de mettre en œuvre une couche intercalaire avant son dépôt [73-74]. Dans le cas particulier, le Tantale (Ta) est choisi car sa diffusion dans le Platine à hautes températures est moindre que pour le Titane (Ti) plus classiquement utilisé néanmoins.

$$R(T) = R_0(0^\circ\text{C}) [1 + a_m T + b_m T^2 + c_m (T - 100) T^3] \quad (\text{III.30})$$

où, les valeurs de a_m , b_m et c_m pour le platine sont données par :

- $a_m = 3,90802 \cdot 10^{-3}$,
- $b_m = -5,80195 \cdot 10^{-7}$,
- $c_m = 0$ pour $T > 0^\circ\text{C}$ ou $c_m = -4,27350 \cdot 10^{-12}$ pour $T < 0^\circ\text{C}$

Le graphe suivant représente la résistance RTD du Pt100 en fonction de la température :

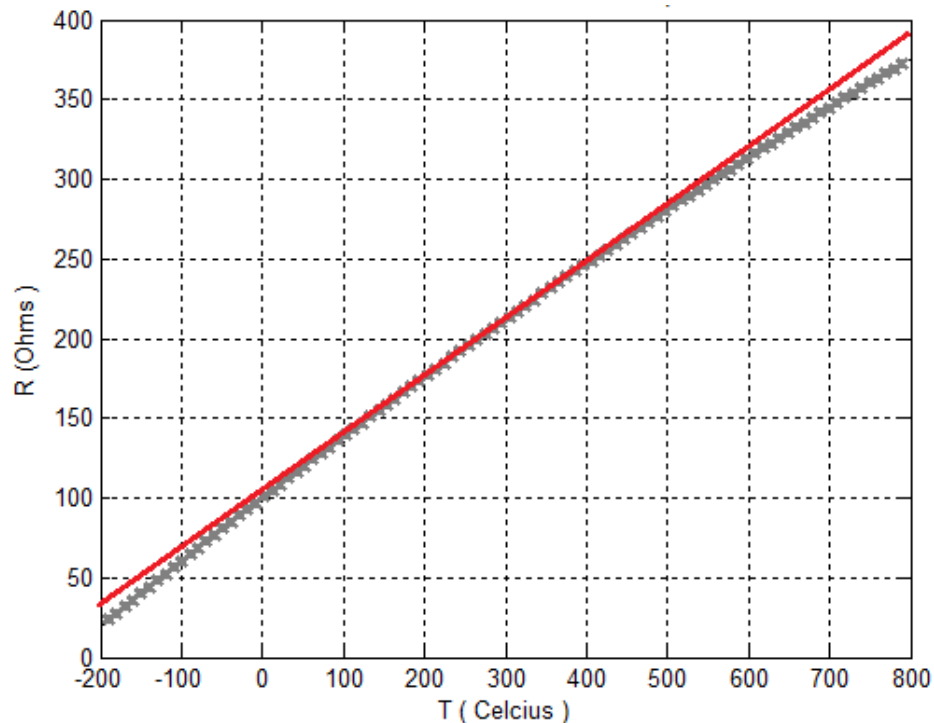


Figure III. 11 : Résistance en fonction de la température du Pt100 pour : $-200 \leq T \leq 800$

Sur le graphe la droite montre un écart de quelques ohms aux extrêmes de la gamme mais l'erreur est très répétable et donc corrigeable.

En météorologie la gamme de températures est de -90°C à 50°C [75].

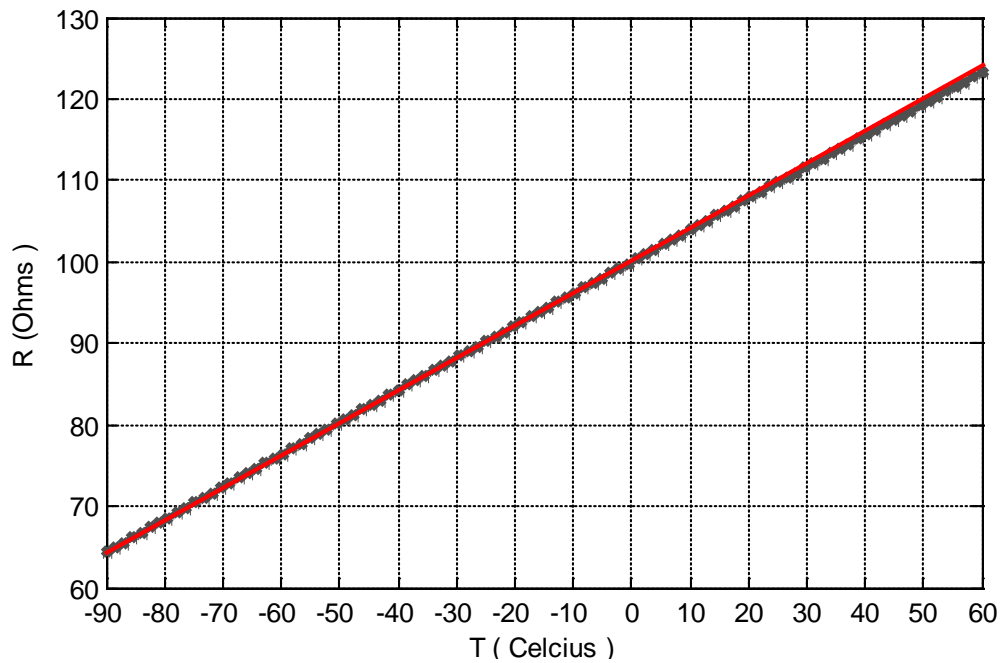


Figure III. 12 : Résistance en fonction de la température du Pt100 pour : $-90 \leq T \leq 60$

Nous remarquons que la réponse est linéaire.

III. 3. Modélisation du capteur d'humidité à détection capacitive :

Le capteur est un condensateur à plaques parallèles. La couche sensible à l'humidité est un diélectrique pris en sandwich entre les armatures.

L'électrode inférieure est une plaque pleine, l'électrode supérieure est une grille qui permet à la vapeur de pénétrer dans la couche sensible.

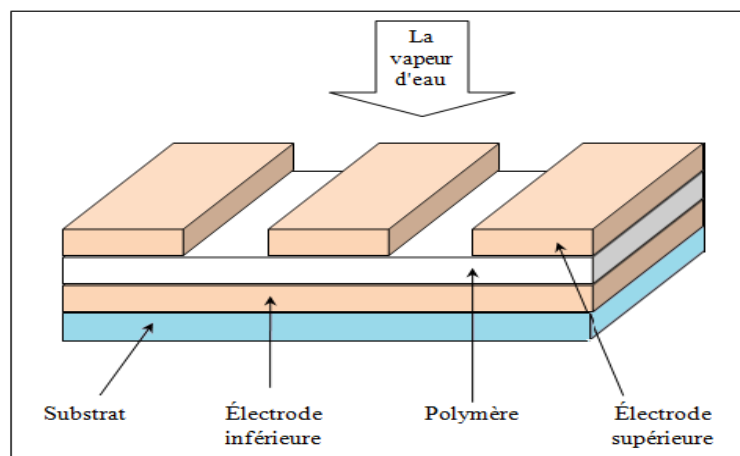


Figure III.13. Structure du capteur d'humidité capacitif

III. 3. 1. Principe de fonctionnement :

Lorsque la vapeur d'eau se pose sur la surface, elle est absorbée par la surface sensible.

Les molécules d'eau sont ensuite absorbées et diffusent dans le diélectrique induisant une variation de sa permittivité.

La variation de la permittivité provoque une variation de la capacitance comme indique la relation suivante :

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A}{d} \quad (\text{III.31})$$

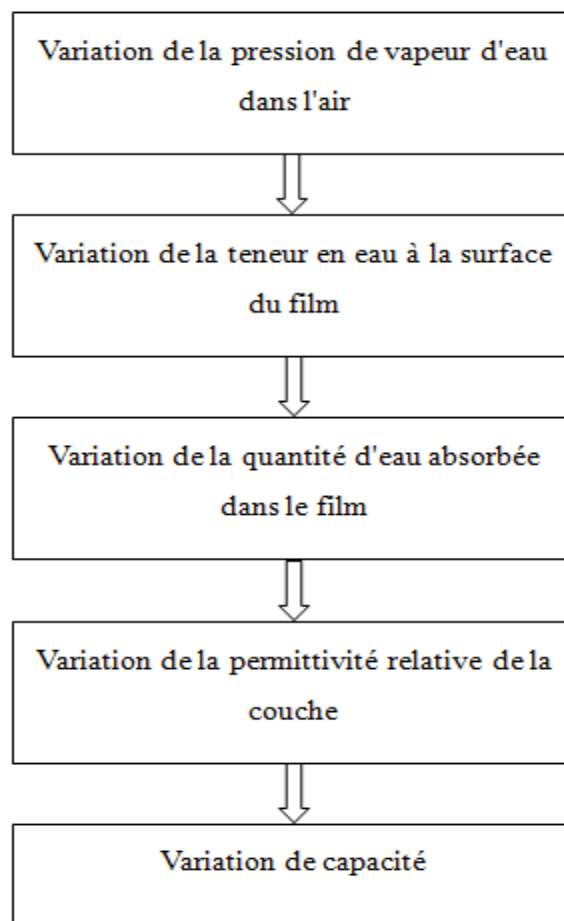


Figure III.14. Principe de fonctionnement du capteur d'humidité capacitif

L'humidité relative correspond au rapport de la pression partielle de la vapeur d'eau contenue dans l'air et la pression de vapeur saturante (ou tension de vapeur) à la même température. Elle est donc une mesure du rapport entre le contenu en vapeur d'eau de l'air et sa capacité maximale à en contenir dans ces conditions. Ce rapport changera si on change la température ou la pression. Elle est définie comme suit :

$$RH(\%) = \frac{P_a}{P_s} \quad (\text{III.32})$$

- P_a est la pression de vapeur absolue.
- P_s est la pression de vapeur saturante.
- P_s dépend de la température. En déterminant P_s à la température particulière, nous pouvons tirer P_a pour diverse humidité.

La formule de référence permettant de calculer la pression de saturation en fonction de la température d'après A. Wexler [76] corrigée par D. Sonntag [77] est :

$$\ln(P_s) = +21,2409642 - 6096,9385 \cdot \frac{1}{T} - 2,711193 \cdot 10^{-2} \cdot T + 1,673952 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 + 2,433502 \ln(T) \quad (\text{III.33})$$

Avec : $-50 \text{ °C} \leq T \leq +100 \text{ °C}$.

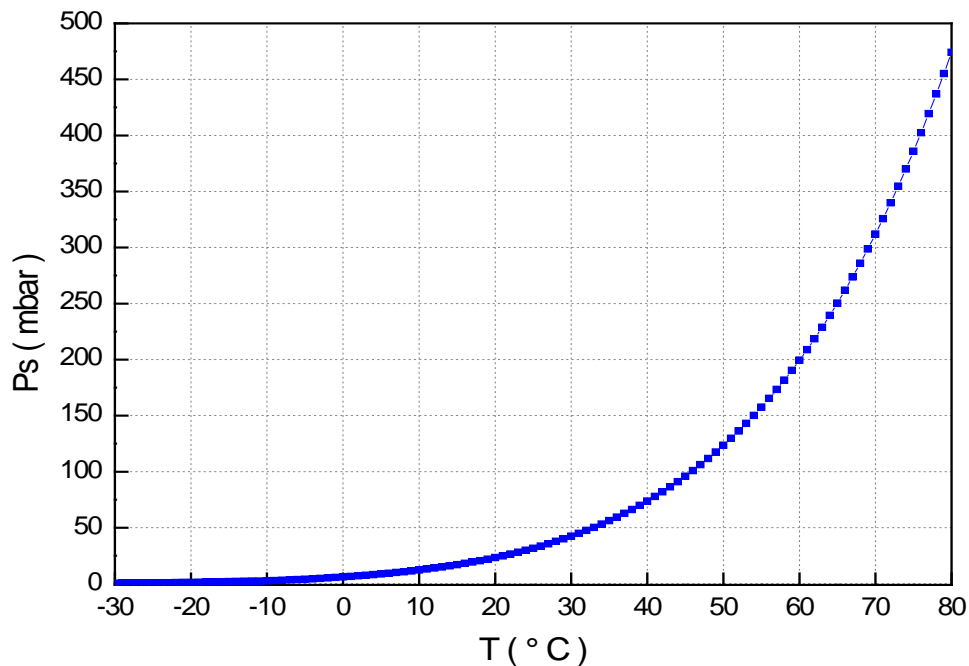


Fig.III.15. Pression de saturation en fonction de la température ($-30 \text{ °C} \leq T \leq +80 \text{ °C}$)

III. 3. 2. Modélisation de la diffusion :

Pour un modèle unidimensionnel, la diffusion de l'eau dans le film est décrite par la deuxième loi de Fick [78]:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{D \partial^2 c}{\partial x^2} \quad (\text{III.34})$$

Où :

c représente la concentration (mols/m³), **t** le temps (s), **Dn** le coefficient de diffusion et **x** la position. Pour trois dimensions :

$$\frac{\partial c(x,y,z,t)}{\partial t} = \frac{Dn_x \partial^2 c(x,y,z,t)}{\partial x^2} + \frac{Dn_y \partial^2 c(x,y,z,t)}{\partial y^2} + \frac{Dn_z \partial^2 c(x,y,z,t)}{\partial z^2} \quad (\text{III.35})$$

La loi de Fick prédit comment la diffusion provoque le champ de concentration à changer avec le temps. Elle dépend principalement du coefficient de diffusion [79-80].

III. 3. 3. Permittivité du film de détection (Diélectrique):

Pour un condensateur à armatures parallèles de surfaces différentes, la variation de la capacité du capteur est :

$$\Delta C = \frac{\Delta \epsilon_r \epsilon_0 A}{d} \quad (\text{III.36})$$

Où :

ΔC: représente la variation de la capacité, **A**: la surface de l'électrode supérieure et **d**: l'épaisseur du diélectrique.

La variation de la permittivité de la couche de détection est donnée par :

$$\Delta \epsilon_r = \epsilon_{r(RH)} - \epsilon_{r(0)} \quad (\text{III.37})$$

Où :

- **Δε_r** : la variation de la permittivité relative
- **ε_{r(RH)}** : la permittivité après absorption
- **ε_{r(0)}** : la permittivité avant absorption.

ε_{r(RH)} peut être calculé à partir de l'équation de Clausius-Mossotti [81] :

$$\frac{\Delta Q \cdot N_A \cdot \alpha_P}{3V_i \cdot \epsilon_0} = \left(\frac{\epsilon_r(RH)-1}{\epsilon_r(RH)+2} \right) - \left(\frac{\epsilon_r(0)-1}{\epsilon_r(0)+2} \right) \quad (\text{III.38})$$

Où :

- ϵ_0 : la permittivité du vide ;
- N_A : le nombre d'Avogadro égale à $6.023 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$;
- α_P : polarisabilité moléculaire en (cm^2/v) dépendant du matériau utilisé ;
- V_i : le volume de la couche de détection ;
- ΔQ : la variation de la quantité d'eau adsorbée dans le diélectrique (exprimé en mole).

III. 3. 4. Modélisation de capacité :

D'après la relation (III.36) la capacité est donnée par :

$$\Delta C = \Delta \epsilon_r \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (\text{III.39})$$

D'après les références [82-83], $\Delta \epsilon_r$ est donné par l'expression suivante :

$$\Delta \epsilon_r = 1 + \frac{\alpha}{T} \left(p + \frac{\beta \cdot P_s}{T} \right) \cdot RH \quad (\text{III.40})$$

Où :

- T : la température absolue en K ;
- P : La pression de l'air humide en mmHg ;
- P_s : La pression de vapeur saturante à la température T en mmHg ;
- $\alpha = 211^\circ\text{K}/\text{mmHg}$;
- $\beta = 48^\circ\text{K}^2/\text{mmHg}$;
- RH : L'humidité relative en %.

Donc :

$$\Delta C = \frac{\epsilon_{0,A}}{d} \left[1 + \frac{211}{T} \left(P + \frac{48P_s}{T} \right) \cdot RH \right] \quad (\text{III.41})$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow \Delta C &= \frac{\epsilon_{0,A}}{d} \left(1 + \frac{211pT + 10128P_s}{T^2} \cdot RH \right) \\ \Rightarrow \Delta C &\approx C_0 (1 + \alpha_h \cdot RH) \end{aligned} \quad (\text{III.42})$$

D'après la relation précédente, la variation de la capacité est une fonction linéaire de l'humidité.

Par identification, on en déduit :

$$\left\{ \begin{array}{l} C_0 = \frac{\varepsilon_0 A}{d} \\ et \\ \alpha_h = \frac{211pT + 10128P_s}{T^2} \end{array} \right. \quad (III.43)$$

avec : $\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$ F/m et C_0 est la capacité pour : RH = 0% :

Dans ce qui suit, nous allons nous concentrer sur la variation de **C** en faisant varier **RH** de 0 à 100%

Prenons :

- $A = 20 \mu\text{m} * 4\mu\text{m} = 80 \mu\text{m}^2$
- $d = 2 \mu\text{m}$
- $T = 26 \text{ }^\circ\text{C} = 26 + 273.16\text{k} = 299.16 \text{ K}$
- à $T = 26 \text{ }^\circ\text{C}$, $P_s = 33,60 \text{ mbar} = 25,20 \text{ mmHg}$ [77]

Pour : $P = 1013 \text{ mbar} = 759,81 \text{ mmHg}$, La capacité en fonction de l'humidité peut s'écrire sous la forme suivante

$$\Rightarrow \Delta C = 354 \times 10^{-6} (1 + 538,752 \times \text{RH}) \quad (III.44)$$

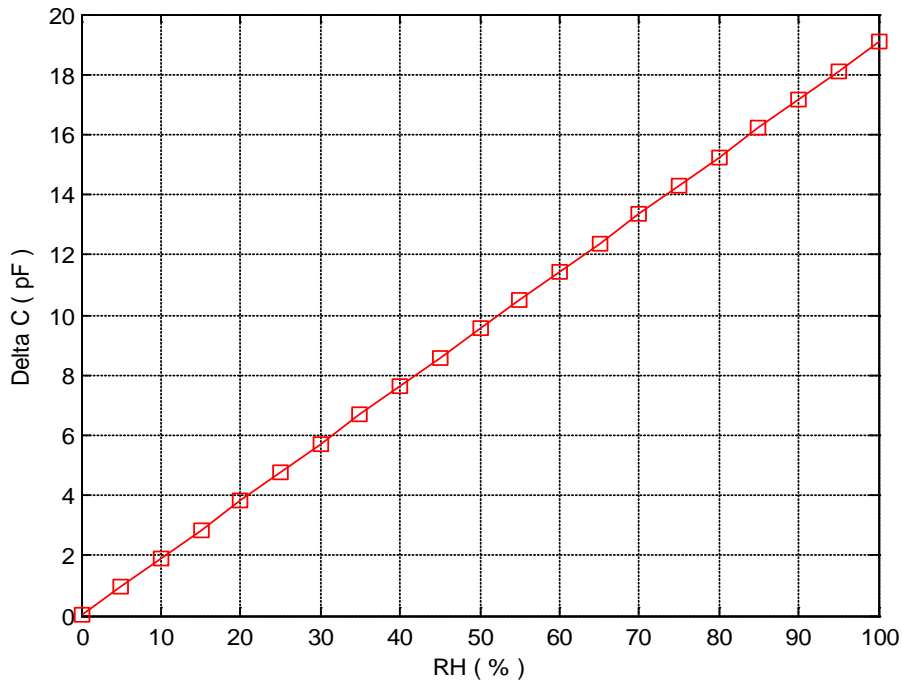


Tableau III.16. Variation de la capacité en fonction de l'humidité

Conclusion :

Afin d'optimiser la réponse électrique du capteur de pression piézorésistif, nous avons étudié théoriquement ses propriétés mécaniques et électriques. En ce qui concerne les propriétés mécanique nous nous sommes basés sur l'étude de la déflexion et de la répartition des contraintes et de déduire ces valeurs maximales. Afin d'augmenter la sensibilité à la pression, nous avons établi une répartition des contraintes où nous avons mis en évidence l'endroit où les contraintes sont maximales. L'étude a montré que celle-ci est maximale au bord de la membrane. L'analyse des résultats obtenus montre que l'emplacement idéal de la piézorésistance est donc sur les parties encastrées de la membrane. Nous avons étudié la réponse électrique du capteur en étudiant une configuration à quatre jauges montées en pont de Wheatstone. Cette configuration présente, en plus de la grande sensibilité et de la bonne linéarité.

Pour la détection de la température, 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 d'un capteur de température.

La conception d'un capteur d'humidité capacitif performant dépend de la structure physique. Ainsi, il est recommandé de savoir quelle est la nature de la couche sensible. Ce chapitre nous a permis de découvrir les paramètres extérieurs qui influent sur la couche sensible (pression, température ...etc) et par conséquent, la linéarité de la variation de la capacité en fonction de l'humidité.

CHAPITRE IV

SIMULATION DES CAPTEURS CONSTITUANT LA MICROSONDE METEOROLOGIQUE

INTRODUCTION :

Une étude bibliographique portant sur différentes structures des capteurs météorologiques nous a permis de fixer notre choix sur un dispositif qui combine trois types de capteurs à savoir un capteur de pression, un capteur de température et un capteur d'humidité. Afin de simplifier la fabrication, il est souhaitable d'employer seulement une étape de métallisation. Ceci signifie le même métal pour les trois capteurs. Le choix du métal n'est pas important pour le capteur d'humidité [84] comme électrode et pour le capteur de pression comme jauges piézoresistives. Cependant pour la thermistance, le métal devrait avoir une résistivité élevée dans le but d'avoir une résistance élevée et un coefficient de température élevé [73-85].

La théorie de la thermistance a prouvé que le platine est le meilleur choix du métal. Il présente une bonne conductivité thermique. Ceci assure une uniformité de la température de l'élément chauffant et un coefficient de température relativement élevé ce qui permettra de contrôler les variations de la résistance [86].

Cependant, l'application la plus répandue est l'utilisation de résistances de platine pour le capteur de température. Le capteur de pression piézorésistif est composé d'une membrane qui constitue le corps d'épreuve et qui se déforme sous l'effet d'une pression appliquée. Des jauges piézorésistives en platine en surface du corps d'épreuve forment un conditionneur passif [73]. Le capteur d'humidité est constitué de deux électrodes en platine [87] séparées par un diélectrique. Ce diélectrique est un polyimide PI.

Cette partie de notre étude est consacrée à la simulation numérique de la réponse des différents capteurs. Cette simulation prend appui sur la validation du modèle numérique à l'aide des données théoriques obtenues par l'analyse du dispositif présenté dans le chapitre précédent. Pour cela, nous avons utilisé un logiciel de simulation par éléments finis : COMSOL Multiphysics. Ce type de logiciel permet de simuler le comportement d'un système à partir d'un modèle prenant en compte les caractéristiques des matériaux et les phénomènes physiques associés.

En songeant aux objets réels, on souhaite que toute simulation pour les trois types de capteur soit réalisée en trois dimensions. Les caractéristiques et les performances peuvent être mises en évidence que dans un modèle tridimensionnel.

IV.1. Simulation par la méthode des éléments finis:

Apparues avec la naissance de l'informatique dans les années 50, les simulations numériques se sont imposées comme un outil permettant de reproduire des phénomènes réels et sont devenues un outil indispensable d'ingénierie pour l'étude de structures complexes grâce à leur rapidité d'exécution [88].

Ces simulations numériques reposent sur la mise en œuvre des modèles théoriques utilisant souvent la technique dite des éléments finis. Cette technique est tout particulièrement

adaptée à la résolution numérique du comportement de structures continues et décrites par une équation aux dérivées partielles linéaires. Elles sont donc une adaptation de la modélisation mathématique permettant d'optimiser, de prédire et d'étudier le fonctionnement et les propriétés des structures modélisées en 2D ou 3D pour différents types de sollicitations et sous différentes conditions.

Toutefois, la simulation numérique n'est qu'une représentation du réel à partir d'un modèle théorique sous-jacent et dépend du type de modélisation employé pour résoudre un problème physique.

A travers ce chapitre, nous nous proposons de vérifier les résultats obtenus théoriquement du comportement des capteurs constituant la sonde météorologique étudiée durant cette thèse avec celles obtenus par simulations avec le logiciel COMSOL.

IV.1.1. Principe de base :

Les simulations par éléments finis permettent l'analyse des structures discontinues ou continues. Ces dernières sont fractionnées en sous ensembles dits « éléments ». Ces éléments sont raccordés les uns aux autres par des points appelés « nœuds » ou « points nodaux » afin de former la structure dans son ensemble. Les éléments finis sont choisis de telle manière qu'ils soient les plus simples possibles afin que l'étude comportementale de la structure soit facile à mettre en œuvre. En effet, l'approximation de la solution (déplacements, contraintes,...) est définie pour chaque élément définissant. Le comportement structurel de l'élément est décrit par une matrice de rigidité qui lie les déplacements des nœuds de l'élément aux charges appliquées sur ces mêmes nœuds auxquelles on peut adjoindre des contraintes. Chaque nœud, issu d'un élément, peut avoir plusieurs composantes de déplacement et de charge. La difficulté réside dans le calcul de la matrice de rigidité du système à partir des matrices de rigidité de chaque élément [89-90].

IV.1.2. Logiciel de simulation :

Dans l'objectif de modéliser notre problème par éléments finis, le logiciel COMSOL se montre en premier temps, bien adapté à ce domaine de travail vu sa performance dans le couplage de différents modules multiphysiques et la simplicité dans le post-traitement des données collectées [91]. Grâce à des modèles prédéfinis, on peut simuler des phénomènes physiques comme l'électrostatique, la mécanique des fluides, le transfert thermique ou la déformation des matériaux, et les coupler entre eux avec facilité grâce à une interface graphique ou avec d'autres algorithmes comme Matlab [92]. Une interface graphique rapide et interactive fournit à l'utilisateur différents moyens pour décrire un problème en 1D, 2D et 3D. Pour étendre les simulations possibles, le logiciel COMSOL Multiphysics comprend plus de 30 modules complémentaires qui offrent des interfaces et des outils spécialisés en génie électrique, mécanique, fluide et chimique.

IV.1.2.1. Principe de la modélisation sous le logiciel COMSOL:

Les étapes de modélisation sous le logiciel COMSOL sont énumérées comme suit :

1. Création de la géométrie,
2. Choix des équations et des paramètres physiques des différents matériaux,
3. Détermination des conditions aux limites,
4. Choix du Maillage,
5. Résolution du problème,
6. Visualisation des résultats.

Ces étapes de calcul s'effectuent indépendamment, suivant le diagramme suivant:

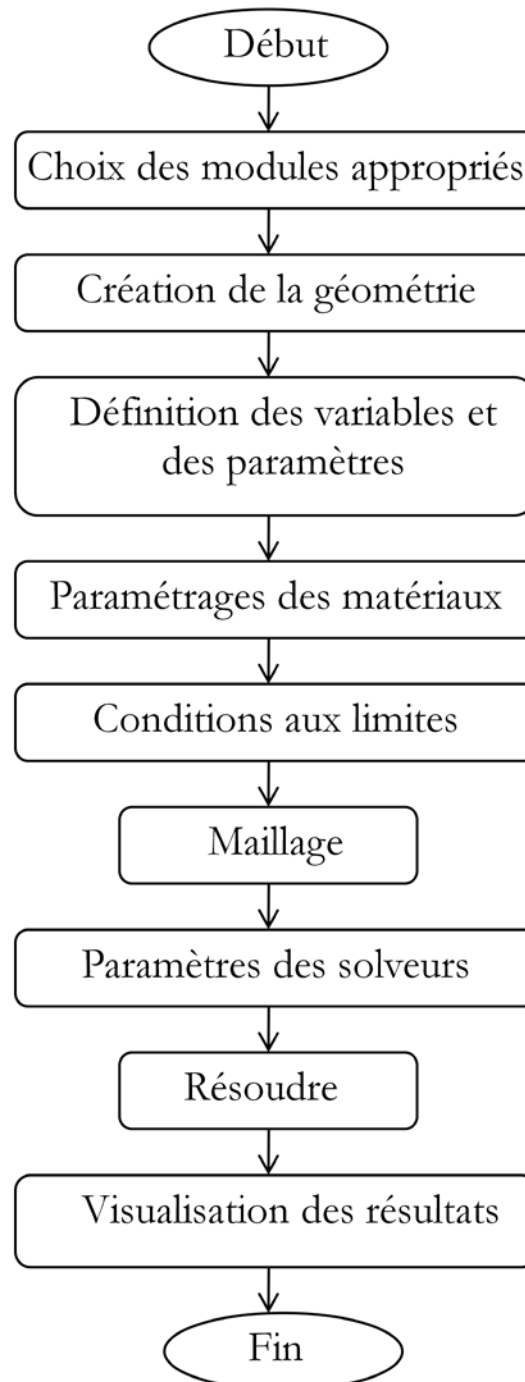


Figure IV. 1 : Organigramme de la modélisation utilisant le logiciel COMSOL

IV.1.2.2. Maillage :

Dans l'analyse des éléments finis, le domaine de résolution est discrétisé en sous domaines appelés éléments. Ces éléments sont les briques élémentaires dont le maillage va représenter le système géométrique à simuler. Les éléments sont des primitives géométriques composant plusieurs nœuds, **la figure IV.2** représente des exemples d'éléments classiques qu'on rencontre généralement dans le maillage éléments finis [93].

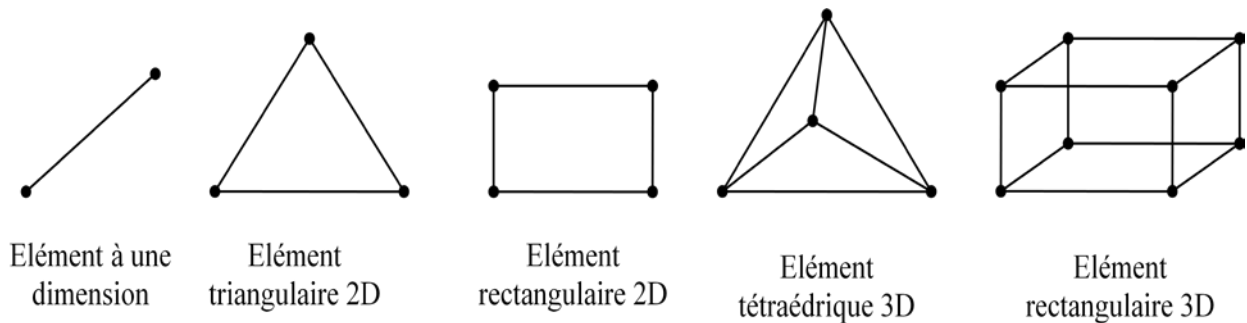


Figure IV. 2 : Exemple d'éléments de maillage éléments finis

IV.2. Simulation du capteur de pression :

La simulation de la réponse du capteur de pression piézorésistif est composée de deux parties. La première est la simulation mécanique qui nous permettra de choisir l'emplacement parfait des piézorésistances suivi d'une simulation électrique (piézorésistive) pour déterminer la sensibilité du capteur. A travers cette section de ce chapitre, nous allons comparer les résultats de simulation pour deux types d'encastrement de la membrane : l'encastrement parfait et l'encastrement réel. Nous allons justifier notre choix d'encastrement pour faire la simulation électrique.

IV.2. 1. Simulation mécanique sur des membranes carrées:

Nous allons simuler le comportement d'une membrane carrée en silicium encadrée sur les bords. En appliquant une pression à la surface de la membrane, on essaiera de déterminer la déflexion en tout point ainsi que la répartition des contraintes et de déduire ses valeurs maximales.

1. Choix des modules appropriés :

Nous avons choisi l'interface « Mécanique des solides » du module « mécanique des structures » du logiciel COMSOL pour simuler la réponse mécanique du capteur. Nous avons choisi une analyse stationnaire avec des variations de la pression et de l'épaisseur.

2. Création de la structure :

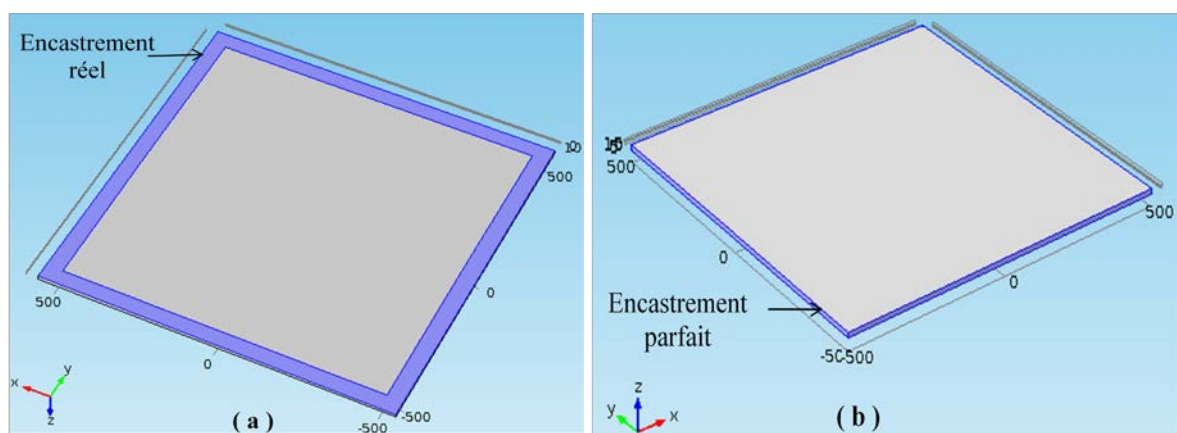
Comme la membrane du capteur a une forme carrée, son côté est de l'ordre du millimètre et son épaisseur de l'ordre de la dizaine des microns. Ces dimensions sont choisies

en fonction de la plage de pression à mesurer. Comme la microsonde mesure des pressions en ascendant, la pression va varier entre 1 bar et 0 bar. Dans le cadre de notre étude, nous avons pris :

- Coté : $a = 1000 \mu\text{m}$,
- Epaisseur : $h = 15 \mu\text{m}$
- Largeur de la partie encastrée de la membrane : $W_e = 50 \mu\text{m}$ (pour un encastrement réel).

Ce choix des dimensions est basé sur les conditions technologiques : $a/h \geq 38$ [94].

Nous avons créé deux géométries. La première utilise un encastrement réel, l'autre un encastrement parfait.



*Figure IV. 3 : Membrane carrée encastrée à ces bords :
(a) encastrement réel, (b) encastrement parfait*

3. Définition des variables et des paramètres :

Nous avons défini les paramètres d'entrées tels que : les dimensions de la membrane et la pression appliquée. Les variables sont : la pression et l'épaisseur pour voir ses influences sur la réponse mécanique du capteur.

4. Paramètres mécaniques du matériau :

Nous avons choisi comme matériau le silicium monocristallin. Les paramètres mécaniques du silicium monocristallin dans le plan (100) suivant la direction [110] trouvées dans la littérature [95-96] sont :

- Module d'Young : $E = 169 \text{ GPa}$
- Coefficient de Poisson : $\nu = 0,38$
- Masse volumique : $\rho_m = 2330 \text{ kg/m}^3$

5. Conditions aux limites :

La membrane a été modélisée avec un encastrement sur les quatre cotés. Une pression constante parallèle à l'axe (Oz) est appliquée.

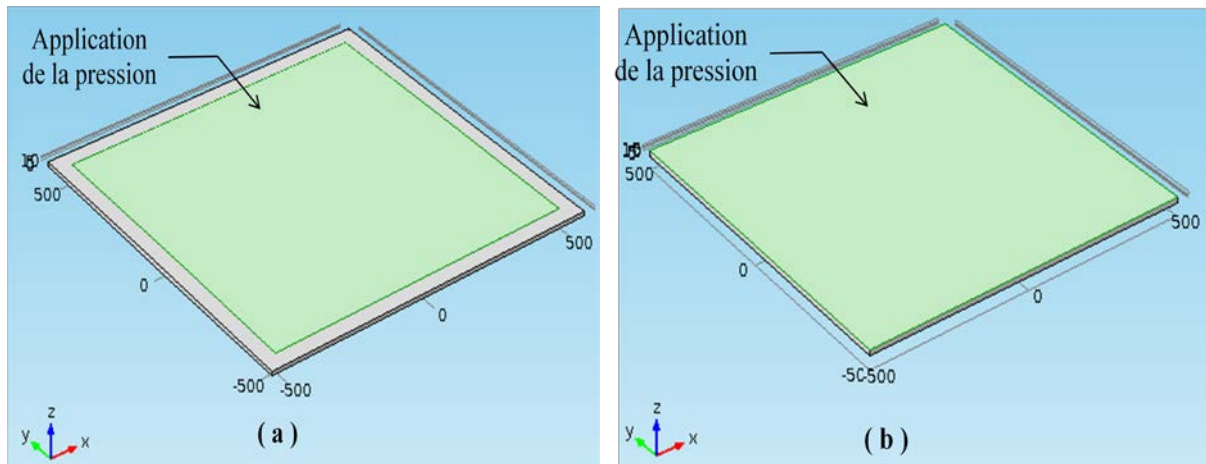


Figure IV. 4 : Application de la pression au centre de la membrane :
 (a) encastrement réel, (b) encastrement parfait

6. Choix du maillage :

La structure après le maillage est la suivante :

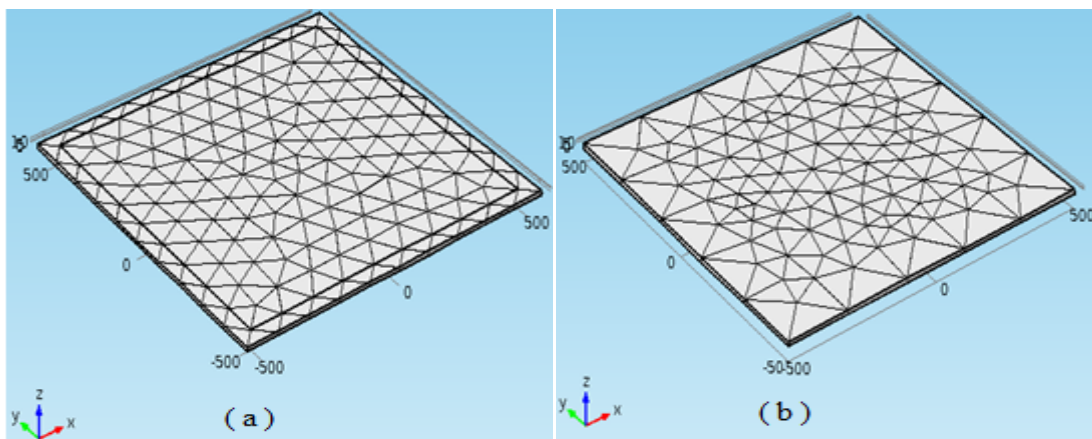


Figure VI. 5 : Maillage : (a) encastrement réel, (b) encastrement parfait

7. Paramètres des solveurs :

Pour étudier l'influence de la pression appliquée et de l'épaisseur de la membrane sur la déflexion maximale, nous avons utilisé l'analyse paramétrique de l'étude stationnaire. Nous avons choisi des pressions allant de 0 à 100 kPa avec un pas de 10kPa et des épaisseurs allant de 12 μ m à 17 μ m avec un pas de 0,5 μ m.

8. Visualisations des résultats :

Une fois la géométrie de la membrane est créée, maillée et les conditions au limites sont définis, nous pouvons lancer l'exécution pour faire une étude stationnaire avec une analyse paramétrique. Les résultats obtenus sont présentés dans le paragraphe suivant.

IV.2. 2. Comparaison des résultats :

IV.2. 2. 1. Déflexion de la membrane :

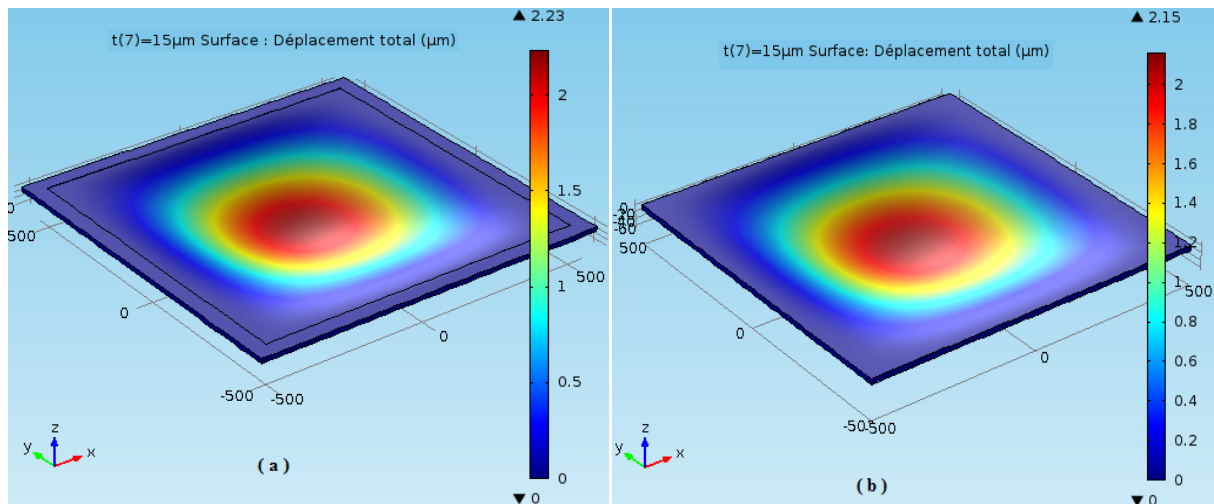


Figure IV. 6 : Déformation de la membrane pour $P = 100\text{kPa}$ et $t = 15\mu\text{m}$:
(a) encastrement réel, (b) encastrement parfait

D'après la figure IV.6, nous remarquons que la valeur maximale de la déflexion se trouve au centre de la membrane. Cette valeur vaut $2,15\mu\text{m}$ pour un encastrement parfait et $2,23\mu\text{m}$ pour un encastrement réel. La déflexion est nulle à ces bords.

IV.2. 2. 2. Répartition des contraintes :

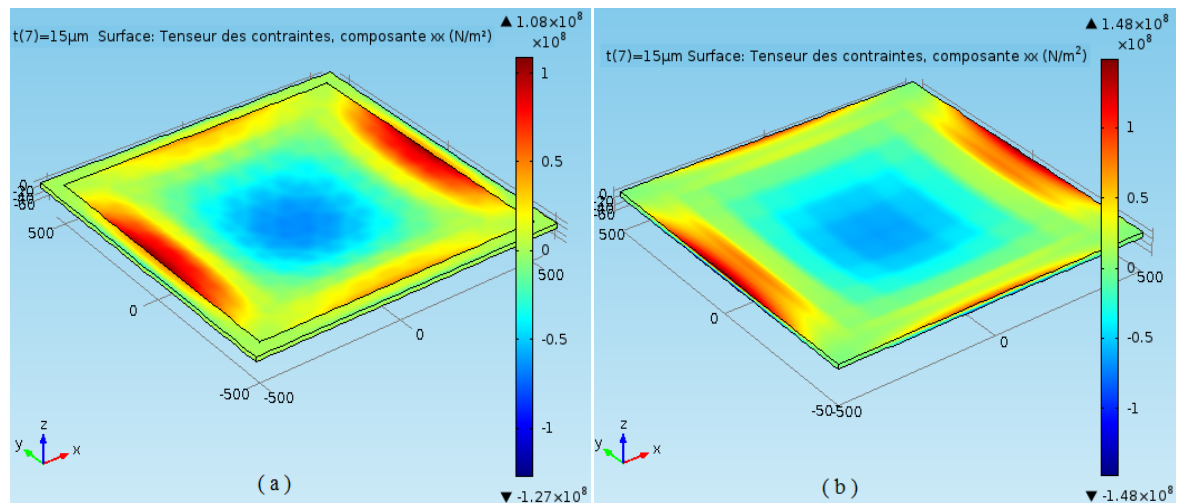


Figure IV. 7 : Contraintes longitudinales pour $P = 100\text{kPa}$ et $t = 15\mu\text{m}$:
(a) encastrement réel, (b) encastrement parfait

La figure IV.7 montre que les contraintes longitudinales pour les deux encastres et de l'ordre de 10^8 avec une différence de $0,4 \times 10^8 \text{ N/m}^2$.

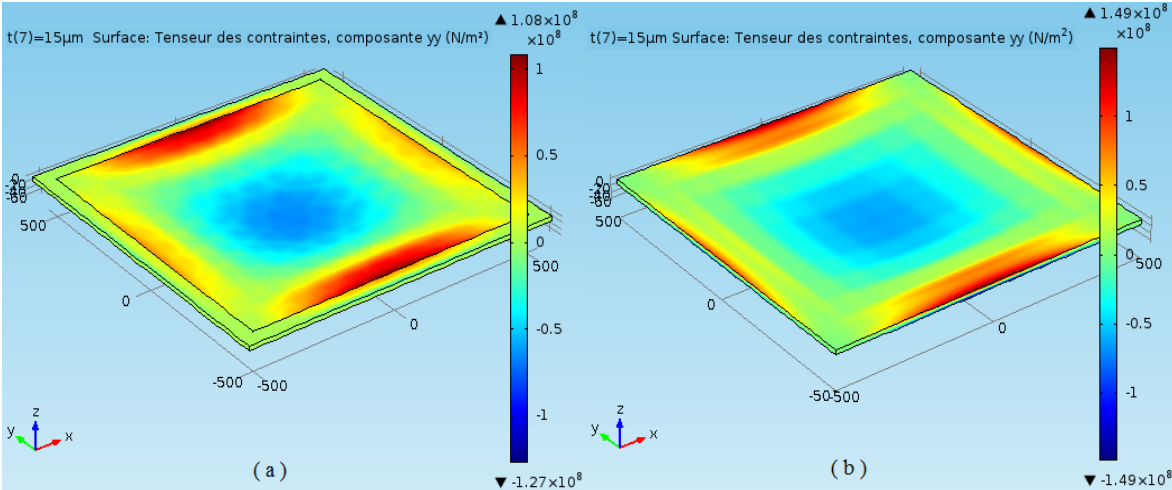


Figure IV. 8 : Contraintes transversales pour $P = 100 \text{ kPa}$ et $t = 15 \mu\text{m}$:
(a) encastrement réel, (b) encastrement parfait

Nous remarquons que comme le cas des contraintes longitudinales la différence des contraintes transversales entre les deux cas d'encastrement vaut $0,4 \times 10^8 \text{ N/m}^2$.

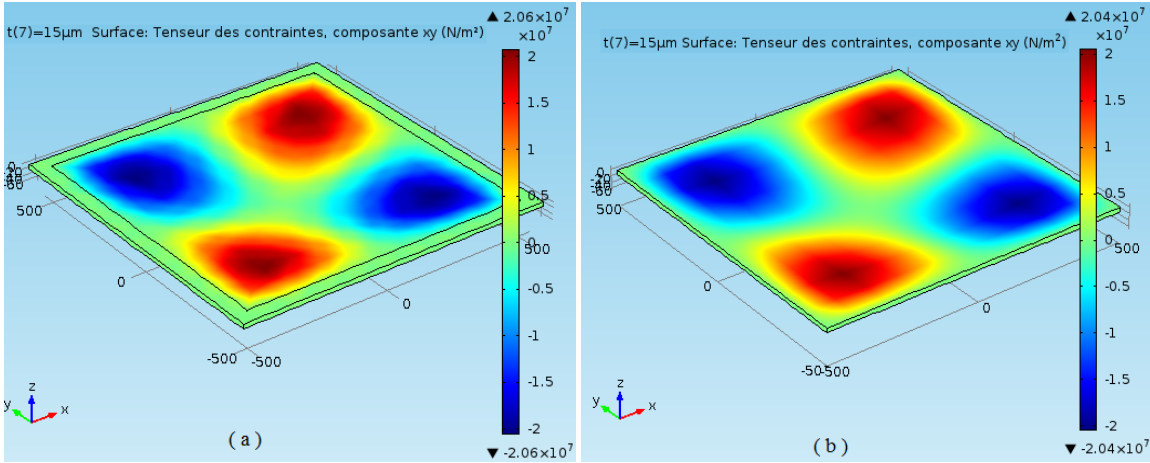


Figure IV. 9 : Contraintes de cisaillement pour $P = 100 \text{ kPa}$ et $t = 15 \mu\text{m}$:
(a) encastrement réel, (b) encastrement parfait

En ce qui concerne les contraintes de cisaillement, les résultats sont presque identiques pour les deux d'encastrement.

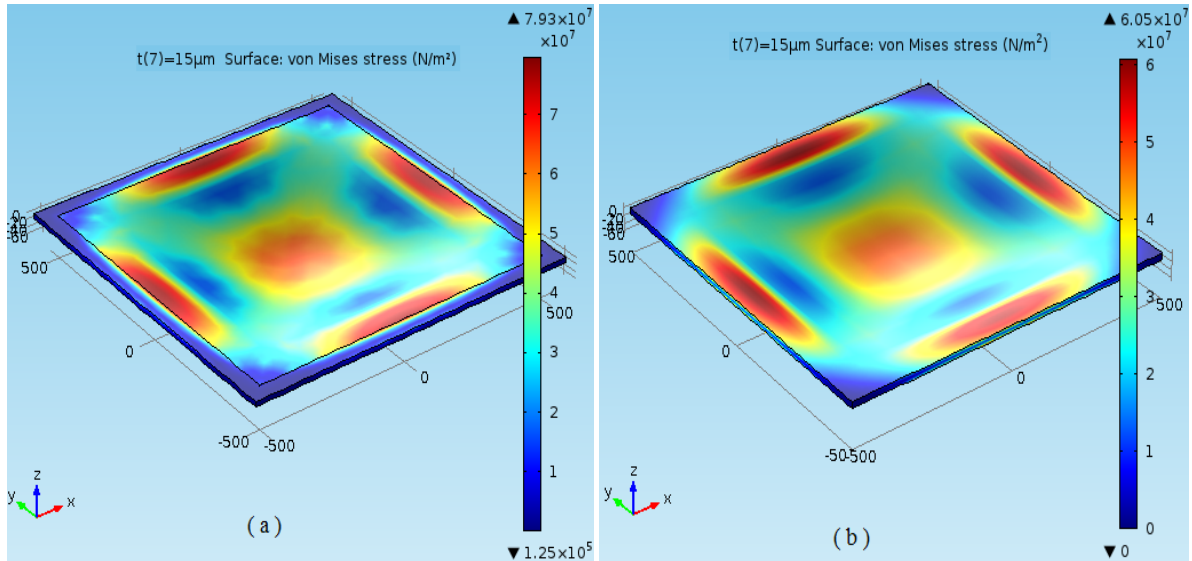


Figure IV. 10 : Contraintes de Von Mises pour $P = 100\text{kPa}$ et $t = 15\mu\text{m}$:
 (a) encastrement réel, (b) encastrement parfait

Cette figure montre bien que les contraintes sont maximales sur les bords de la membrane. La différence des contraintes entre les deux d’encastrement vaut $1,88 \times 10^7 \text{N/m}^2$.

IV.2. 2. 3. Effets de la pression et de l’épaisseur de la membranesur la déflexion :

Nous avons fait d’autres simulations en utilisant le logiciel COMSOL pour différentes valeurs de la pression appliquée et de l’épaisseur de la membrane. La figure suivante montre le déplacement de la membrane en fonction de l’épaisseur avec une pression de 100 kPa.

1. Effet de l’épaisseur de la membrane sur la déflexion :

a. Encastrement réel :

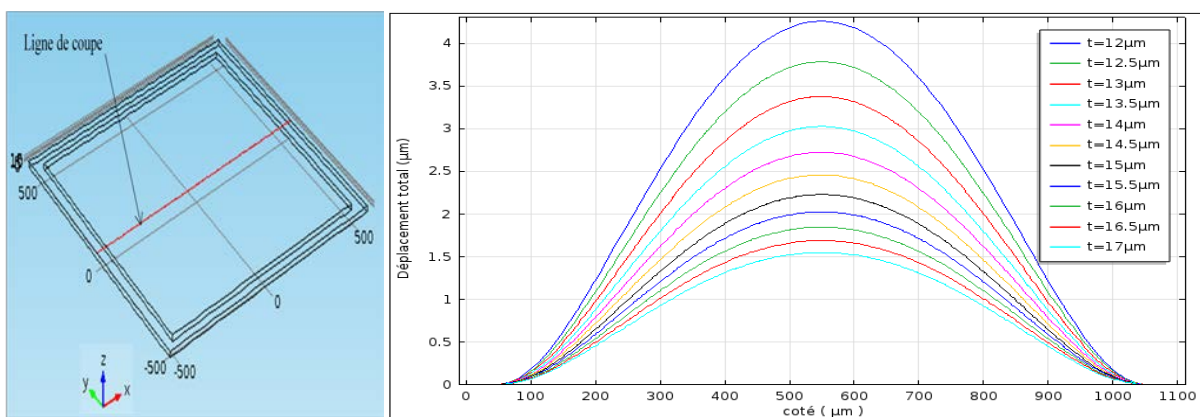


Figure IV. 11 : Déflexion suivant la ligne de coupe pour différentes valeurs de l’épaisseur de la membrane et pour une pression de 100kPa pour un encastrement réel

b. Encastrement parfait :

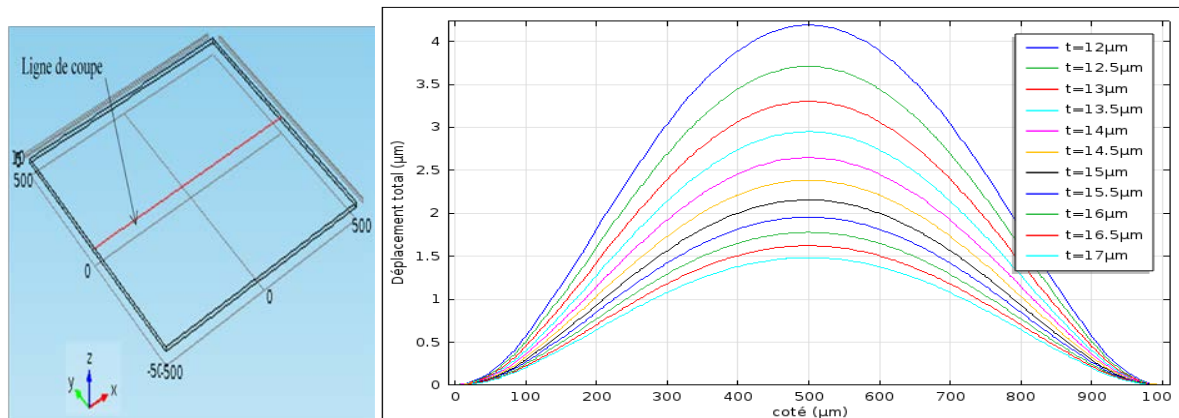


Figure IV. 12 : Déflexion suivant la ligne de coupe pour différentes valeurs de l'épaisseur de la membrane et pour une pression de 100kPa pour un encastrement parfait

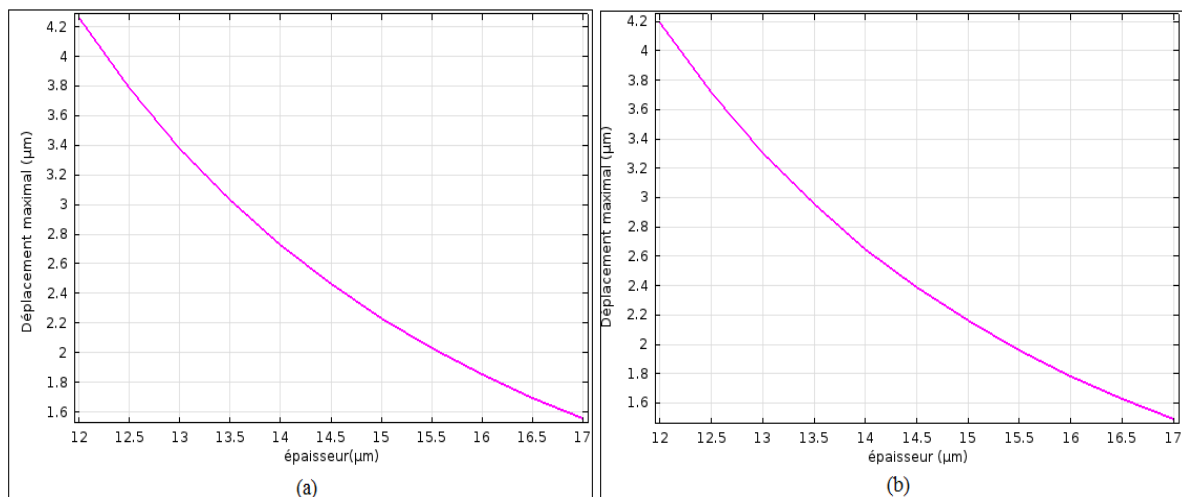


Figure IV. 13 : Déflexion maximal pour différentes valeurs de l'épaisseur de la membrane et pour une pression de 100kPa (a) encastrement réel, (b) encastrement parfait

Nous remarquons que les résultats obtenus par simulation avec le logiciel COMSOL de la déflexion maximale en fonction de l'épaisseur sont proches des résultats trouvés dans la littérature [97]. Ainsi nous remarquons que la déflexion est très faible devant l'épaisseur. Cela signifie qu'on est toujours dans le cas des faibles déflexions.

2. Effet de la pression appliquéesur la déflexion :

1. Encastrement réel :

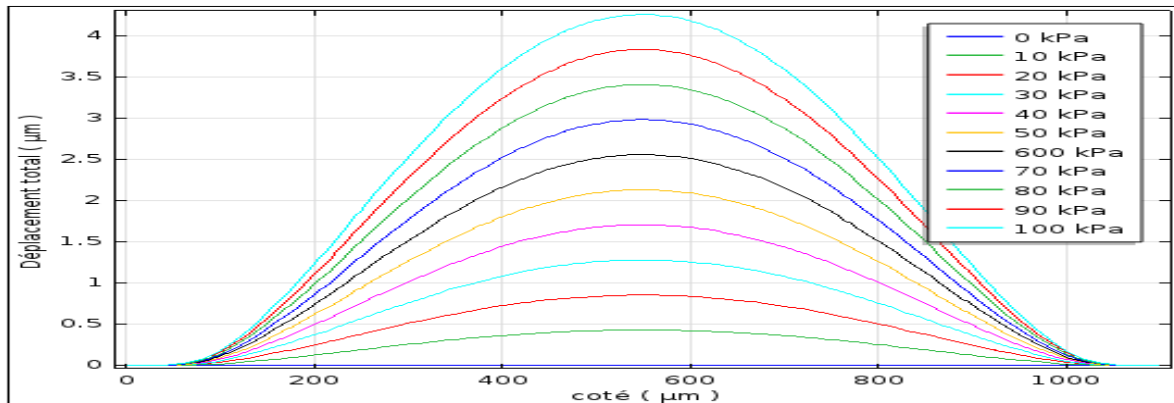


Figure IV. 14 : Déflexion pour différentes valeurs de la pression appliquée dans le cas d'un encastrement réel

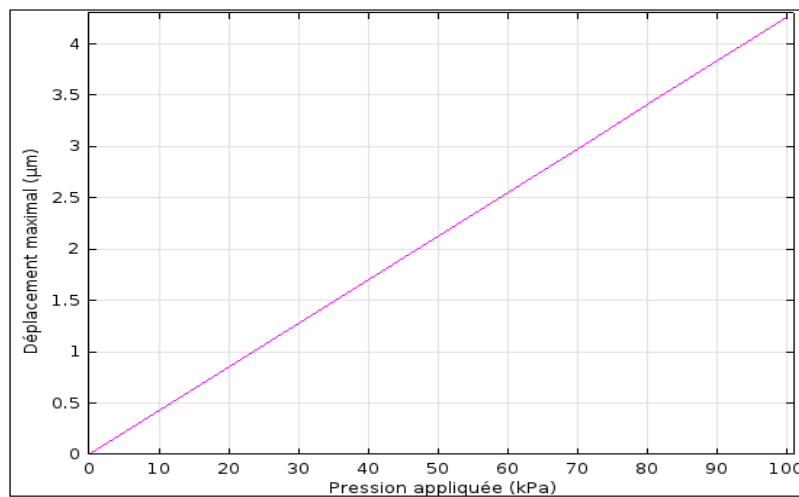


Figure IV. 15 : Déflexion maximale pour différentes valeurs de la pression appliquée dans le cas d'un encastrement réel

1. Encastrement parfait :

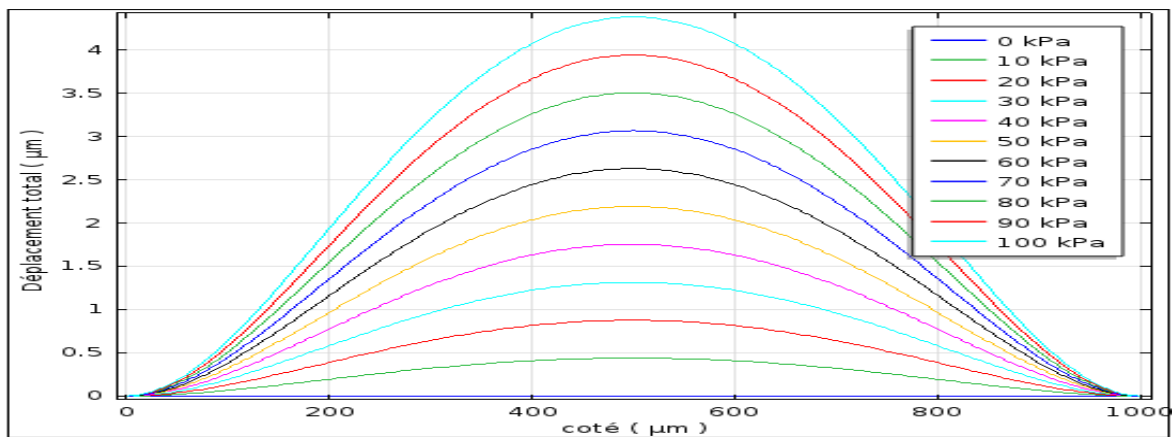


Figure IV. 16 : Déflexion pour différentes valeurs de la pression appliquée pour le cas d'un encastrement parfait

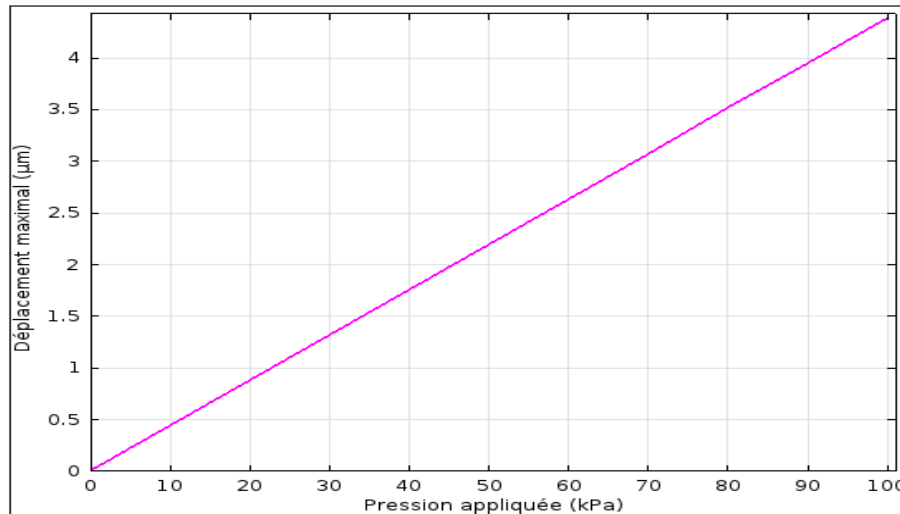


Figure IV. 17 : Déflexion maximale pour différentes valeurs de la pression appliquée dans le cas d'un encastrement réel

Nous constatons que la déflexion maximale de la membrane varie linéairement en fonction de la pression appliquée. La forme de la droite qui passe par l'origine pour les deux cas d'encastrement est identique à celle trouvée dans la littérature [97].

IV.2.3. Simulation électrique du capteur de pression à détection piézorésistive :

Pour faire la simulation électrique du capteur, nous avons choisi une membrane de forme carrée avec un encastrement parfait. Nous avons choisi cet encastrement car il n'y a pas une grande différence dans les résultats entre les deux cas d'encastrement. Ainsi, Ce choix nous a permis de minimiser le temps de calcul.

La simulation par éléments finis de la réponse mécanique de la membrane nous a permis de connaître les zones de sa surface où les contraintes sont maximales. Comme le montrent **la figure IV.10**, ces zones sont situées sur les axes médians de la structure près des bords de la membrane. Les jauges piézorésistifs seront alors placés à ces endroits pour avoir un maximum de sensibilité.

Il existe deux types de jauges de contraintes : les jauges semi-conductrices et les jauges métalliques. Pour ces dernières, la variation de la résistance électrique due à la déformation est très faible. Une bonne stabilité thermique de la résistance est indispensable [61]. Comme la limite élastique des métaux est supérieure à celles des semi-conducteurs, ils présentent une meilleure résistance à la fatigue.

Dans notre cas, nous avons choisi des jauges piézorésistives en platine pour simplifier le processus de fabrication.

1. Choix des modules appropriés :

Pour simuler la réponse électrique du capteur, nous avons choisi l'interface « Piezoresistivity, boundarycurrents » du module « mécanique des structures » du logiciel COMSOL.

2. Création de la structure :

Les paramètres géométriques des jauges piézorésistifs sont [94] :

- Longueur : $L = 150 \mu\text{m}$,
- Largeur : $W = 10 \mu\text{m}$,
- Epaisseur : $e = 0,2 \mu\text{m}$.

La figure suivante montre la structure créée pour faire la simulation électrique :

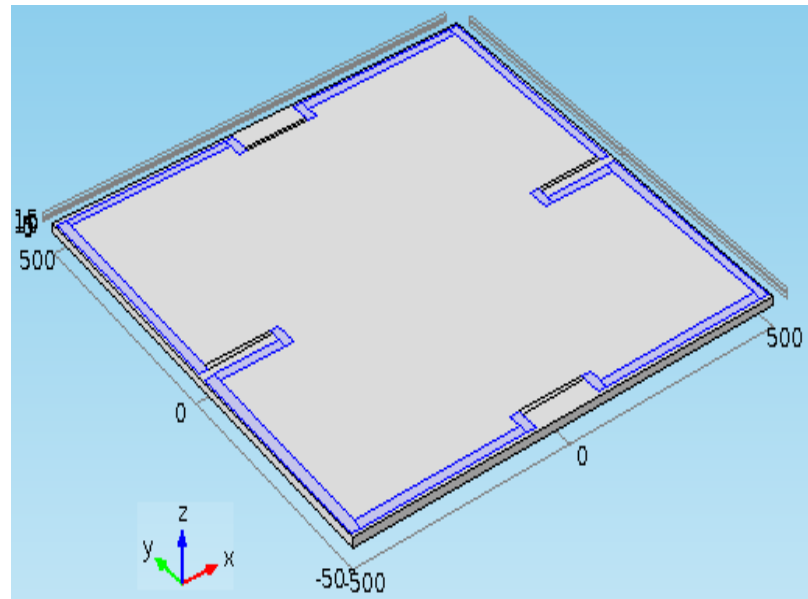


Figure IV. 18 : capteur de pression piézorésistif

3. Définition des variables et des paramètres d'entrée :

Les paramètres d'entrés sont :

- Pression appliquée : $P = 1000 \text{ mbar}$,
- Tension d'entrée : $V_e = 5V$.

Nous avons fait varier la pression appliquée pour voir son influence sur la tension de sortie.

4. Paramétrages du matériau :

Pour faire la simulation électrique, nous avons utilisé trois matériaux :

- Le silicium monocristallin pour la membrane. Nous avons cité ses paramètres dans la partie précédente.
- Le Platine pour les jauges et L'Aluminium pour les interconnexions. Ses paramètres physiques tirés du logiciel Comsol sont représentés sur le tableau qui suit :

Propriété	Valeurs pour le Platine	Valeurs pour l'Aluminium
Conductivité électrique	$8,9 \times 10^6$ [S/m]	$35,5 \times 10^6$ [S/m]
Permittivité relative	4	2,9
Coefficient de dilatation thermique	$8,80 \times 10^{-6}$ [1/K]	$23,10 \times 10^{-6}$ [1/K]
Masse volumique	21450 [kg/m ³]	2700 [kg/m ³]
Conductivité thermique	71,60 [W/(m.K)]	237 [W/(m.K)]
Module de Young	168×10^9 [Pa]	70×10^9 [Pa]
Coefficient de Poisson	0,38	0,35

Tableau IV.1 : Paramètres physiques du Platine et du l'Aluminium

5. Conditions aux limites :

La membrane a été modélisée avec un encastrement parfait sur les quatre cotés. Une pression constante parallèle à l'axe (Oz). Le pont des piézorésistances est alimenté avec une tension continue $V_e = 5V$.

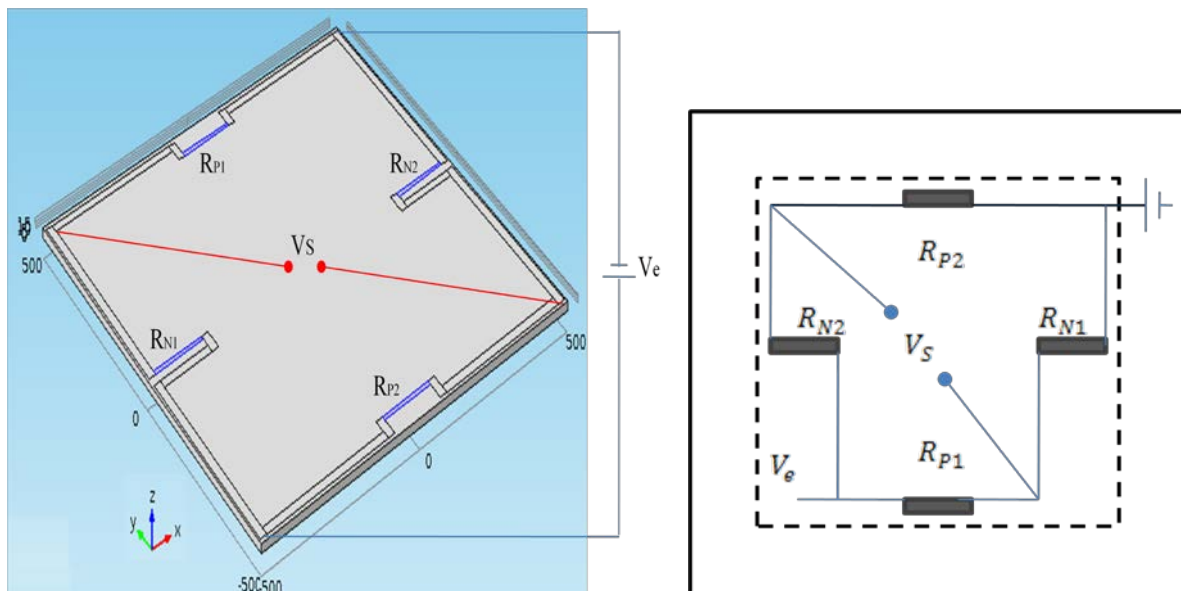


Figure IV. 19 : Les quatre résistances montées en pont de Wheatstone

6. Choix du maillage :

La structure après le maillage est la suivante :

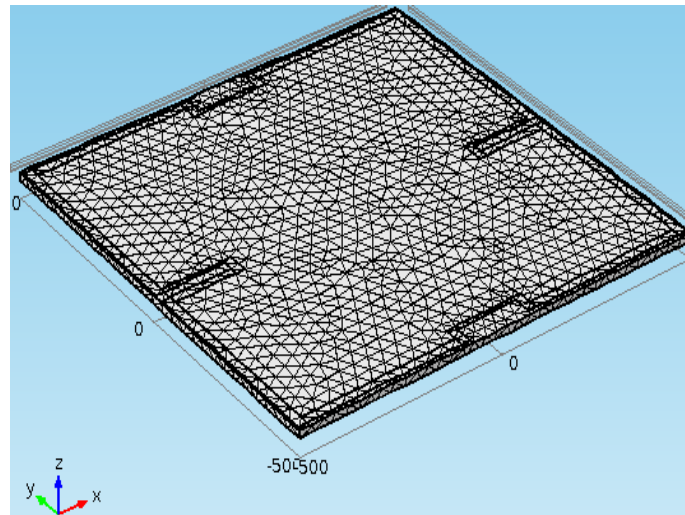


Figure IV. 20 : structure maillée

7. Paramètre des solveurs :

Pour étudier l'influence de la pression appliquée sur la tension de sortie, nous avons utilisé l'analyse paramétrique de l'étude stationnaire. Nous avons choisi des pressions allant de 550 à 1000mbar.

IV.2.3.1. Potentiel électrique :

La figure suivante montre la répartition du potentiel électrique à la surface du pont. La partie rouge correspond à la tension d'entrée. Elle vaut 5V. La partie en bleue correspond à la masse. La tension de sortie se trouve entre les deux autres points.

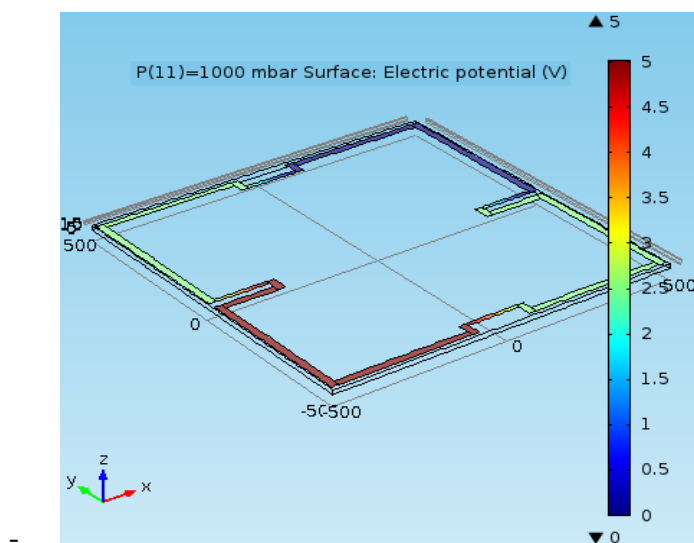


Figure IV. 21 : Potentiel électrique à la surface du pont de Wheatstone

IV.2.3.2. Réponse du capteur de pression:

La figure suivante montre la tension de sortie en fonction de la pression.

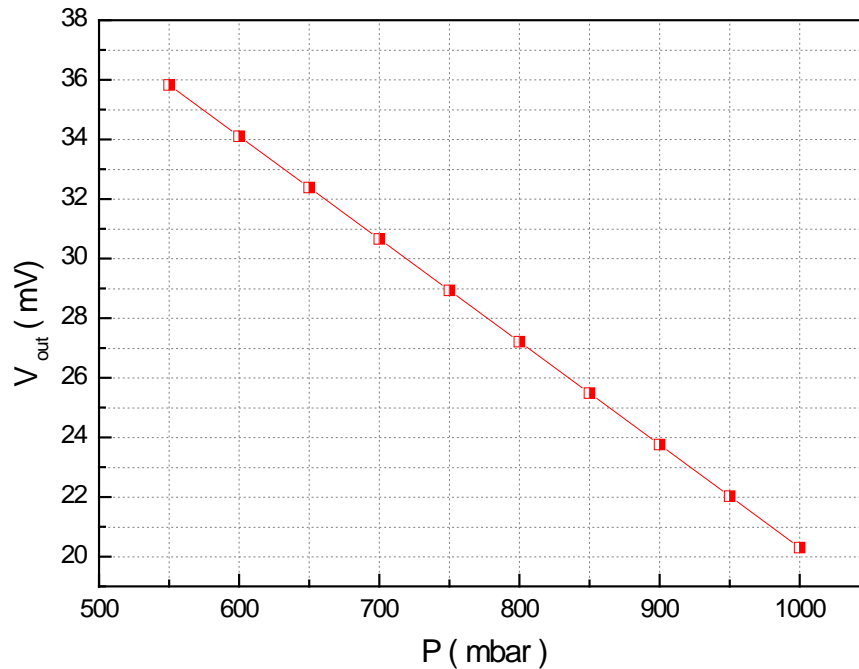


Figure IV. 22 : Tension de sortie en fonction de la pression appliquée

Nous remarquons d'après la figure ci-dessus que la réponse électrique du capteur de pression piézorésistif simulé est linéaire.

IV.3. Simulation du capteur de température :

1. Choix des modules appropriés :

Cette section consiste à simuler le fonctionnement de la plate forme chauffante. Le système complet doit fournir une quantité de chaleur maximale pour une puissance minimale, tout en assurant la meilleure répartition thermique possible pour l'élément sensible de détection. Pour le platine, la conductivité électrique en fonction de la température est donnée par [61] :

$$\sigma_e = \frac{\sigma_e(T_0)}{1 + \alpha(T - T_0)} \quad (\text{V.1})$$

Avec:

σ_e : Conductivité électrique (S/m),

T_0 : Température ambiante (°C),

T : Température imposé (°C),

α : Coefficient thermique de résistivité (°C⁻¹).

Le module de transfert thermique du logiciel Comsol Multiphysique permet la prise en compte de plusieurs phénomènes thermiques : conduction , convection et rayonnement. Le diagramme de **la figure IV.23** illustre les différents paramètres du modèle [98].

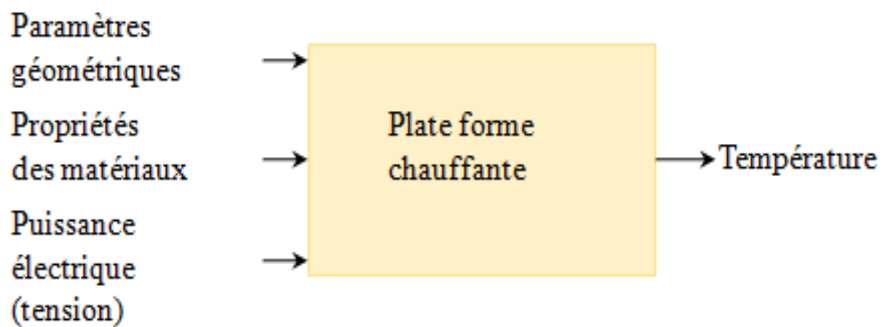


Figure IV. 23 . Diagramme de la plate forme chauffante

Pour la simulation électrothermique du capteur de température, nous avons choisi l’interface « Transfert de chaleur dans les solides » du module « Transfert de chaleur » et l’interface « courants électriques » du module « AC/DC » du logiciel COMSOL. Pour la simulation mécanique, nous avons utilisé l’interface « Mécanique des solides » du module « mécanique des structures ».

2. Création de la structure :

La figure III.24 répertorie différentes géométries basées sur trois formes : méandre, la spirale et l’anneau

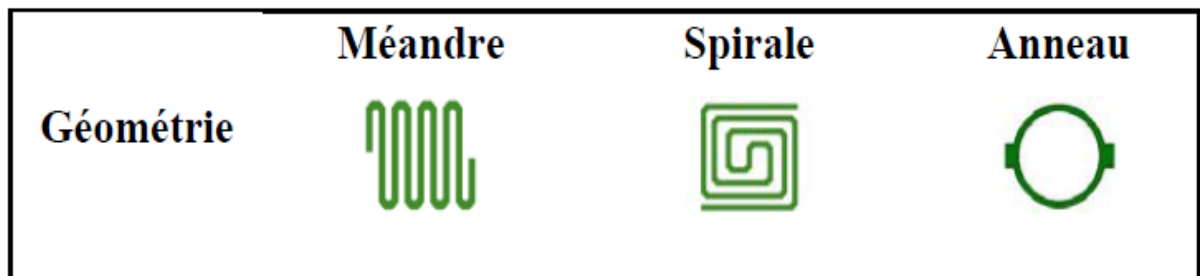


Figure IV.24 : Différentes géométries de la résistance [63]

➤ **Le méandre :**

Dans la littérature, les résistances métalliques se présentent couramment sous forme d'un méandre. Cette forme géométrique a pour but d'augmenter la longueur de la résistance pour compenser la faible résistivité du métal. La largeur de la piste est égale à la distance séparant deux pistes [63].

➤ **La spire :**

La forme de spirale a été modélisée. Les travaux de Baroncini [99] ont notamment montrés que cette géométrie présentait un bon gradient de température ($0,2^{\circ}\text{C}\cdot\mu\text{m}^{-1}$).

➤ **L'anneau :**

La troisième géométrie est en forme fermée en anneau. L'intérêt de cette forme, peu courante dans la littérature, est double : en théorie la chaleur générée par la résistance ne peut pas être perdue par conduction à l'intérieur de l'anneau, ce qui peut théoriquement permettre de diminuer la puissance à fournir, ensuite l'absence de pistes métalliques proches l'une de l'autre évite à priori les points chauds de la surface utile [100].

Dans notre cas, nous avons choisi la forme méandre puisque cette forme est la plus utilisée dans la littérature. Les paramètres géométriques de l'élément chauffant en Platine sont [101]:

- Longueur : $L_1 = 6500 \mu\text{m}$,
- Largeur : $W_1 = 100 \mu\text{m}$,
- Séparation : $s_1 = 100 \mu\text{m}$,
- Epaisseur : $e_1 = 0,2\mu\text{m}$

Les contacts en Aluminium sont de coté de $200 \mu\text{m}$.

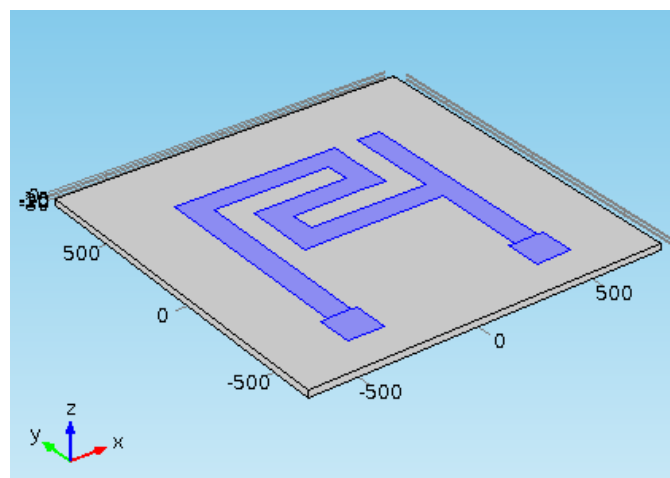


Figure IV.25 : capteur de température résistif

La résistance calculée de l'élément chauffant est de l'ordre de 110,5 Ω

3. Définition des variables et des paramètres :

Les paramètres d'entrés sont :

- Tension appliquée : $v_{in} = 0,8V$,
- Température initiale : $T_0 = 20^\circ C = 293,15 K$,
- Température extérieure : $T_{ext} = 25^\circ C = 298,15 K$,

4. Paramètres du matériau :

Les matériaux constituant le capteur de température sont :

- Le Silicium monocristallin pour le substrat.
- Le Platine pour l'élément chauffant,
- L'Aluminium pour les contacts.

Nous avons cité les paramètres du Silicium et des deux métaux au niveau de la partie capteur de pression.

5. Excitations extérieures :

- Domaine électrique :

Le courant ou la tension affectés sur les faces représentant les bornes des contacts.

- Domaine thermique :

Les températures imposées et le flux thermique de l'air.

6. Choix du maillage :

La structure après le maillage est la suivante:

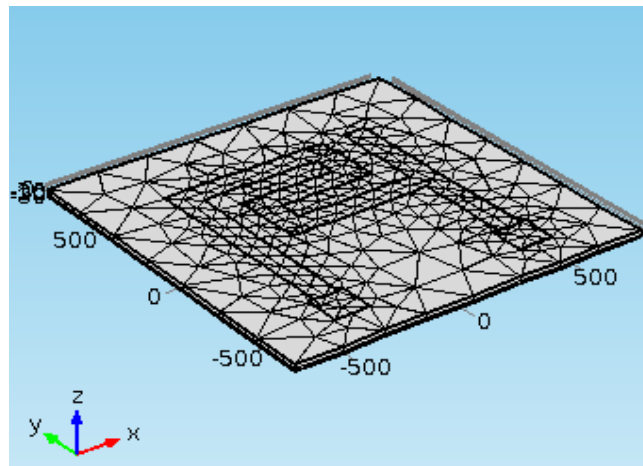


Figure IV. 26 : maillage du modèle

IV.3.1. Distribution de la température :

Compte tenue des conditions aux limites, la solution conduit à la distribution de la température à l'intérieur du domaine d'étude. La figure suivante montre la distribution de la température pour une tension d'alimentation de 0,8V.

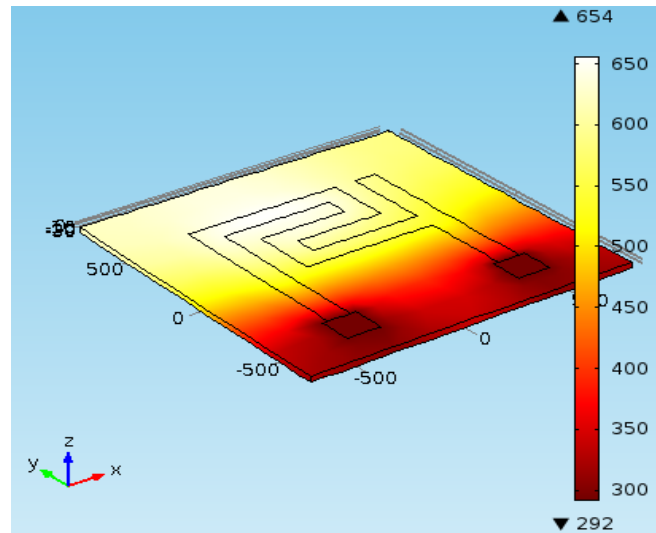


Figure IV. 27 . Distribution de la température.

La structure permet d'atteindre des températures de l'ordre de 654K.

IV.3. 2. Potentiel électrique :

La figure suivante montre la distribution du potentiel électrique dans l'élément chauffant avec une tension appliquée de 0,8 V sur l'électrode en rouge. L'électrode en bleu est reliée à la masse.

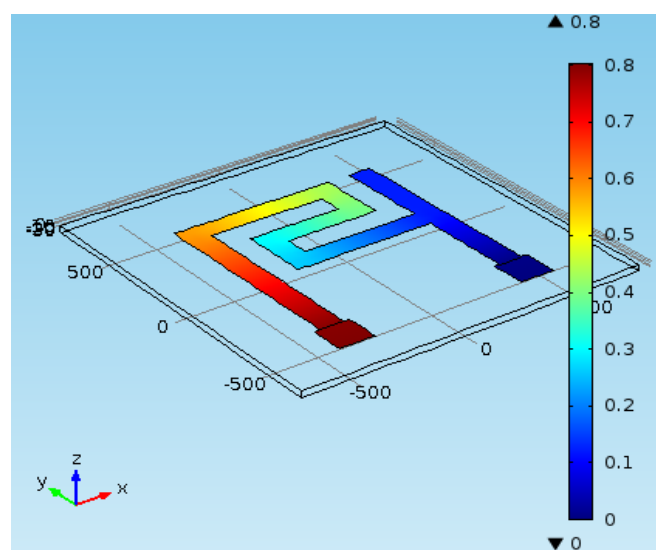


Figure IV. 28. Distribution du potentiel électrique.

IV.3. 3. Chaleur générée par l'élément chauffant :

La figure suivante montre la chaleur générée par la couche résistive.

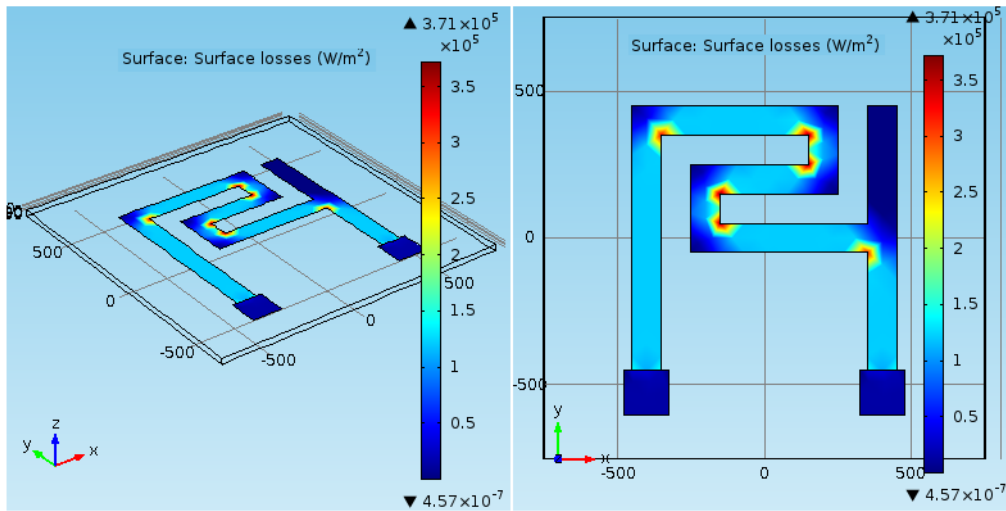


Figure IV. 29. Chaleur générée par l'élément chauffant.

Nous remarquons que la valeur maximale de la puissance d'échauffement se produit au niveau des angles intérieurs de l'élément chauffant. Cette valeur est due à la densité de courant qui est élevée à ces endroits.

IV.3. 4. Répartition des contraintes :

L'échauffement induit également des contraintes thermiques dues aux différents coefficients de dilatations thermiques des différents matériaux. En conséquence, les contraintes mécaniques provenant de la couche résistive et de la plaque en silicium. La **IV. 30** représente la distribution des contraintes effectives au niveau du capteur et les déformations qui en résultent.

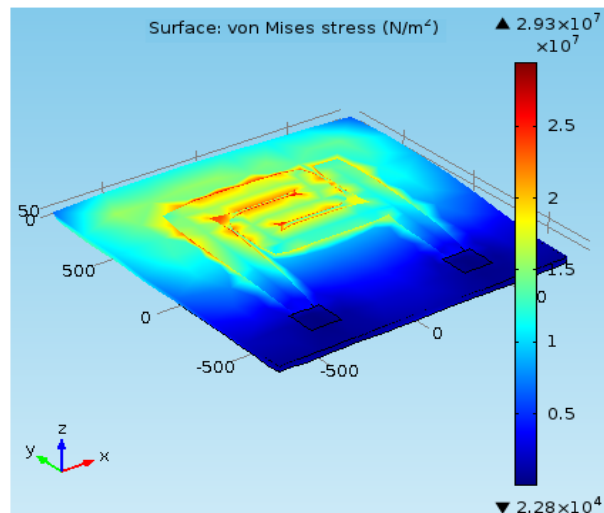


Figure IV. 30. Contraintes de Von Mises.

La contrainte maximale est d'environ 29 MPa.

La figure suivante représente la résistance du capteur de température étudié en fonction de la température.

IV.3. 5. Réponse du capteur de température:

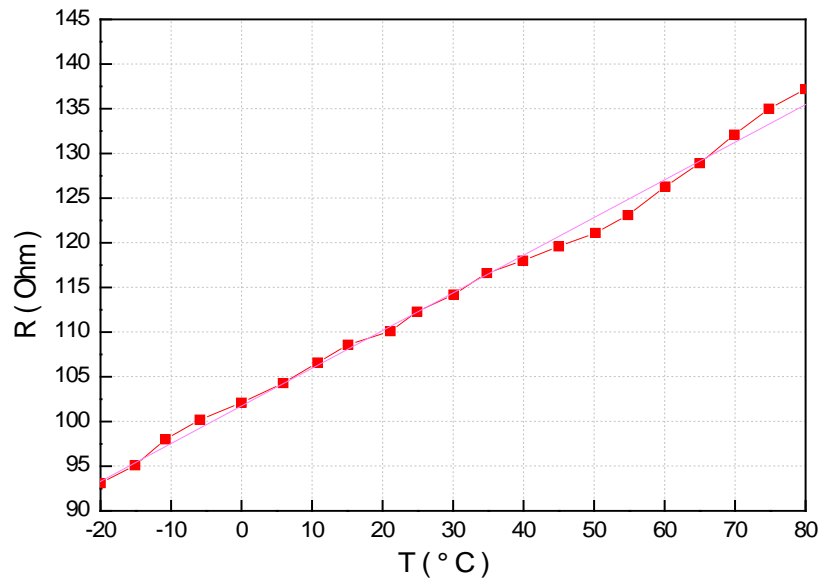


Figure IV. 31. Réponse du capteur de température pour des températures allant de : -20 °C à 80 °C.

La figure ci-dessus montre que la réponse du capteur à la température est linéaire pour des températures allant de -20 °C à 45 °C. Pour des températures supérieures à 45 °C, la réponse n'est pas vraiment linéaire. La pente de la courbe complète est de 0,42163 avec une erreur de 0,00698.

IV.4. Simulation du capteur d'humidité :

1. Création de la structure :

Les paramètres géométriques utilisés sont [102] :

Première couche (Substrat Si) :

- Longueur : 20 μm ,
- Largeur : 20 μm ,
- Epaisseur : 2,5 μm .

Deuxième couche (Electrode inférieure):

- Longueur : 20 μm ,
- Largeur : 20 μm ,
- Epaisseur : 0,2 μm .

Troisième couche(Polymère) :

- Longueur : 20 μm ,
- Largeur : 20 μm ,
- Epaisseur : 2 μm .

Quatrième couche (Electrode supérieure) :

- Longueur : 4 μm ,
- Largeur : 20 μm ,
- Epaisseur : 0,2 μm .

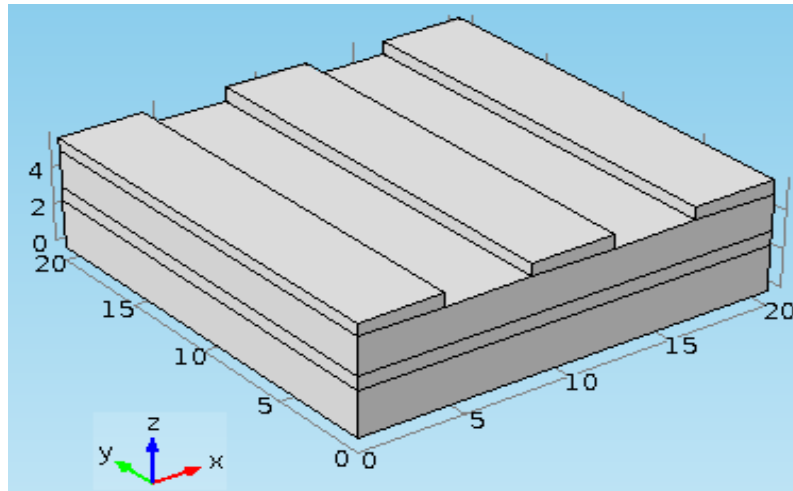


Figure IV.32 : Capteur d'humidité capacitif

2. Propriétés des matériaux :

Pour faire la simulation électrique nous avons utilisé trois matériaux :

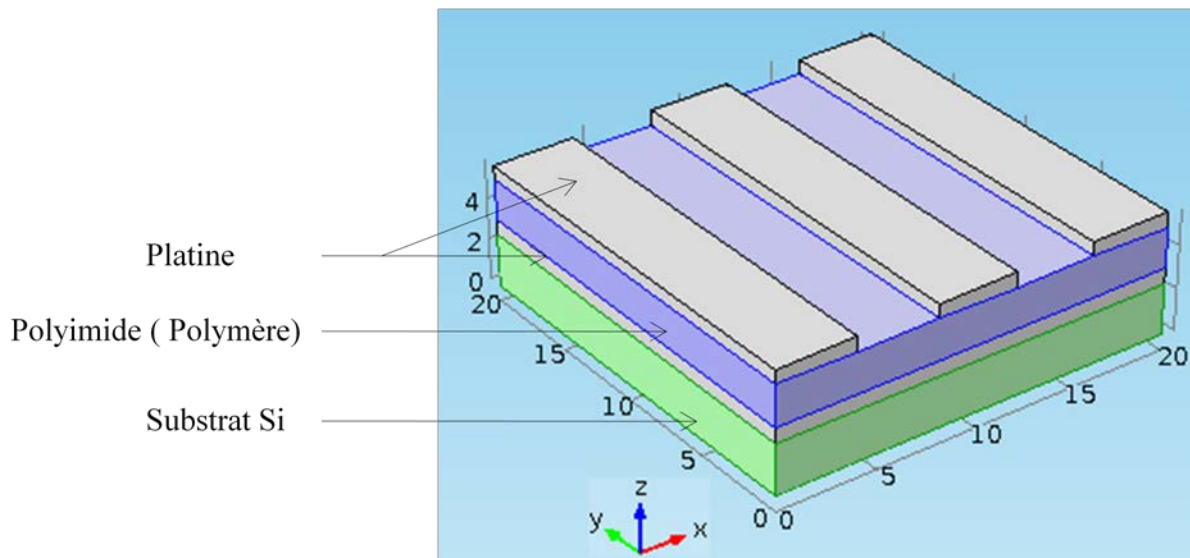


Figure IV.33. Propriétés des matériaux

3. Tension appliquée :

La tension appliquée entre les deux électrodes est de l'ordre de 4V .

4. Choix du maillage :

La structure après le maillage est la suivante:

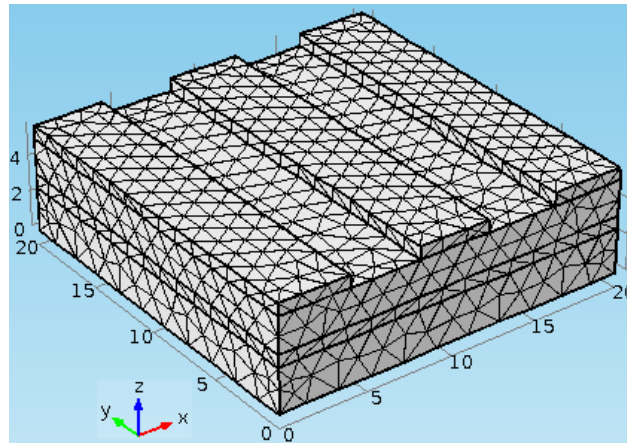


Figure IV. 34 : maillage du modèle

IV.4. 1. Potentiel électrique :

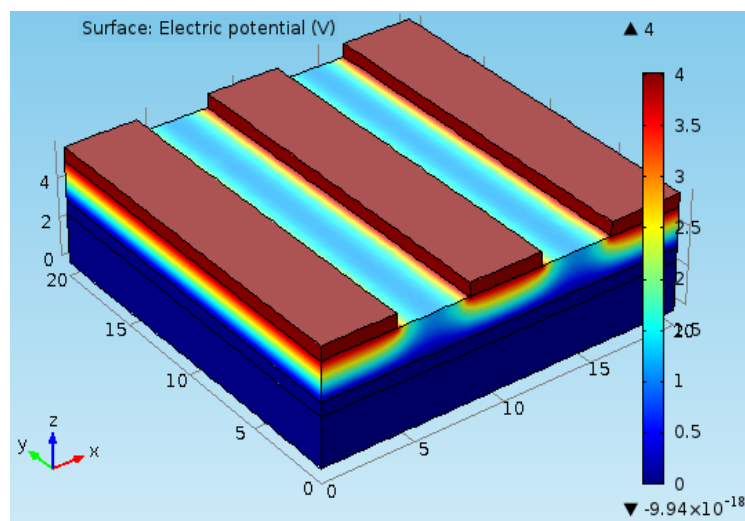


Figure IV. 35 : Distribution du potentiel électrique

IV.4. 2. Réponse du capteur d'humidité :

Pour vérifier la linéarité de la structure d'essai, une simulation avec le logiciel a été faite en faisant varier l'humidité de 0 à 100% pour une température de 26°C.

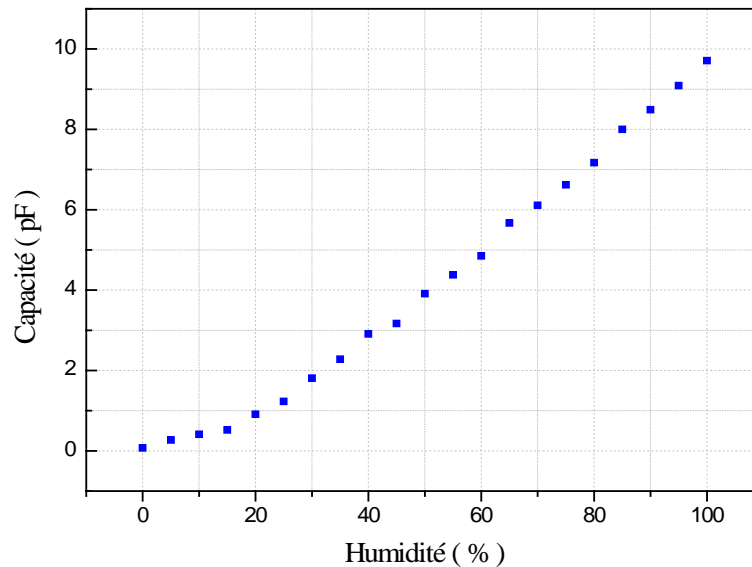


Figure IV.36. Capacité en fonction de l'humidité

La réponse du capteur d'humidité étudiée est presque linéaire, comme l'indique la **figure IV.36**.

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons utilisé le logiciel COMSOL pour modéliser les différents capteurs constituant la microsonde météorologique.

Pour le capteur de pression à détection piézorésistive, nous avons simulé, dans un premier temps, le comportement mécanique de la membrane. Nous nous sommes basés sur l'étude de la déflexion et de la répartition des contraintes et de déduire ses valeurs maximales. En faisant varier la pression appliquée et l'épaisseur de la membrane, nous avons remarqué que les résultats obtenus de la déflexion maximale se rapprochent des résultats trouvés dans la littérature. En établissant une répartition des contraintes, nous avons mis en évidence l'endroit où la contrainte est maximale. L'étude a montré que celle-ci est maximale au bord de la membrane. L'analyse des résultats obtenus montre que l'emplacement idéal de la piézorésistance est donc sur les parties encastrées de la membrane pour avoir le maximum de sensibilité. Nous avons utilisé le platine en tant que matériau des jauges pour rester compatible avec le processus de fabrication de la microsonde.

En ce qui concerne le capteur de température, notre choix est basé sur un capteur de forme méandre puisque cette forme est la plus utilisée dans la littérature. Le capteur de température optimisé à des profils de distribution de température uniforme. La valeur maximale de la température est de 654K. de la chaleur produite par l'élément chauffant, nous remarquons que la valeur maximale de la puissance d'échauffement se produit au niveau des angles intérieurs de l'élément. Cette valeur est due à la densité de courant élevée à ces endroits. L'échauffement induit également des contraintes thermiques dues aux différents coefficients de dilatations thermiques des différents matériaux.

Le troisième capteur constituant la microsonde météorologique est le capteur d'humidité à détection capacitive. Un modèle simple a été conçu pour la simulation et l'optimisation de capteur d'humidité capacitif. Ce modèle est constitué de deux électrodes en platine séparés par un diélectrique : le polyimide. La valeur de la capacité augmente quand des molécules d'eau sont absorbées dans ce polyimide. Le principe de ce capteur est basé sur la variation de la capacité de cette couche diélectrique exposée à un changement du taux d'humidité.

CHAPITRE V

CONCEPTION DES CAPTEURS CONSTITUANT LA MICROSONDE METEOROLOGIQUE

Introduction :

Nous allons présenter dans ce dernier chapitre les principales opérations technologiques nécessaires pour la fabrication des capteurs constituant la microsonde météorologique que nous avons conçu.

Nous commencerons par détailler les procédés technologiques utilisés pour la réalisation des microsystèmes. Ces procédés sont issus de techniques et d'étapes de fabrication conventionnelles de la microélectronique.

A ces procédés viennent s'ajouter des techniques spécifiques telles que le micro-usinage du silicium et la technique d'alignement double face. Cette dernière permet d'aligner les motifs d'une face par rapport à celle des autres.

Nous terminerons ce chapitre par la simulation des différentes étapes de fabrication en utilisant le simulateur TCAD-SILVACO. Les simulateurs TCAD (Technology Computer-Aided Design) permettent la modélisation du comportement physique et électrique d'un composant électronique dans le but d'économiser le temps et le coût de développement et de pouvoir envisager et optimiser des solutions pour améliorer les performances des dispositifs. Pour la simulation des processus technologiques, nous allons utiliser le module de simulation ATHENA du logiciel SILVACO.

V.1. Techniques spécifiques de fabrication :

En général, la fabrication d'un dispositif consiste à mettre en œuvre un ensemble d'étapes technologiques élémentaires dans des séquences précises. L'élément de départ est le substrat qui présente un matériau bien défini.

A la surface du substrat seront déposés des films en couche mince par l'une des différentes techniques de déposition. Différents matériaux peuvent être déposés, tels que l'oxyde de silicium, nitrure de silicium, métaux, etc.

Après déposition, le film est soit dopé pour modifier ses propriétés électriques, soit subit un procédé de photolithographie. Cette dernière opération a pour but de transférer sur le film des motifs ayant la forme géométrique des composants à réaliser. La gravure sert à éliminer les parties du film ou du substrat non désirées pour obtenir différentes formes [103]. Certaines étapes peuvent apparaître plusieurs fois.

V. 1.1. Choix du substrat :

L'élément de départ est le support sur lequel sera réalisé le dispositif. Le support est un substrat de silicium (Si). Ce dernier peut être considéré comme le matériau régnant, encore

aujourd'hui et depuis près de 50 ans dans le monde de la microélectronique. Il est en fait l'élément principal utilisé pour la fabrication de la majeure partie des composants de la microélectronique. Ses propriétés semiconductrices et la facilité de croissance de son oxyde, le SiO₂, contribuent considérablement à la multiplication et à l'amélioration des performances des circuits intégrés [104-105].

V. 1.2. Oxydation du silicium :

L'oxydation est une étape très importante dans la réalisation des circuits intégrés au silicium, puisque c'est grâce à cette propriété spécifique du silicium, qui n'est pas a priori un très bon semi-conducteur, est devenu le matériau le plus utilisé en microélectronique. Cette opération est nécessaire tout au long des procédés modernes de fabrication des circuits intégrés.

L'oxyde peut servir [106]:

- de masque d'implantation ou de diffusion de dopants,
- de couche de passivation à la surface du silicium,
- De couche active dans les transistors MOS (oxyde de grille),
- D'isolation électrique entre des couches adjacentes pour améliorer l'intégration et la diminution des dimensions,
- D'isolation électrique entre les différents niveaux de métallisation,
- De couches sacrificielles permettant d'améliorer les performances et l'intégration des circuits. Ces couches sacrificielles peuvent aussi être utilisées pour fabriquer des microstructures à base de silicium poly cristallin et intervenir dans des microsystèmes intégrés (MEMS).

Il existe plusieurs techniques pour obtenir un oxyde :

- L'oxydation thermique en présence d'oxygène, dite oxydation sèche,
- L'oxydation thermique par voie humide en présence d'oxygène et de vapeur d'eau,
- L'oxydation thermique vapeur en présence de vapeur d'eau uniquement,
- L'oxydation anodique, obtenue par voie électronique,
- L'oxydation plasma, réalisée à l'aide d'un plasma d'oxygène.

L'opération d'oxydation consiste donc à oxyder le Silicium depuis la surface du substrat. Les principales réactions sont les suivantes :



En général, la croissance de l'oxyde avec de l'oxygène pur donne une croissance plus lente de l'oxyde qui lui confère de bonnes propriétés électroniques (peu de défauts électroniques actifs). La croissance avec de l'eau donne une croissance plus rapide mais plus de défauts électroniques.

L'opération d'oxydation thermique s'effectue en plaçant des substrats de silicium dans un four porté à des températures de 800°C à 1200°C suivant la qualité et la vitesse de croissance de l'oxyde. On fait ensuite circuler de l'oxygène sec ou de la vapeur d'eau [107]. Cette opération consiste à oxyder le silicium depuis la surface du substrat pendant un certain temps dépendant de l'épaisseur de la couche d'oxyde désirée. La couche de silicium initiale réagit avec l'élément oxydant pour former le SiO₂. On va donc ainsi consommer le silicium de la surface du substrat.

V. 1.3. Nitrure de silicium :

Le nitrure de silicium est largement utilisé dans l'industrie des circuits intégrés grâce à ses propriétés diélectrique et mécaniques intéressantes. En effet, le nitrure de silicium est un matériau extrêmement dur ce qui le rend un matériau attrayant pour les applications dans lesquelles l'usure physique est une considération majeure. En plus, le nitrure de silicium est un bon matériau de masquage efficace dans de nombreuses solutions de gravures [108-109]. Son dépôt en surface ne peut se faire qu'avec les procédés de dépôt classiques. Son prix de revient est relativement plus élevé que la croissance d'une couche d'oxyde Si O₂.

Le nitrure de silicium le plus répandu, de formule chimique Si₃N₄, est largement utilisé en MEMS pour l'isolation électrique, la passivation et les masques de gravure.

V. 1.4. Le dépôt :

Cette opération est nécessaire lorsqu'il faut réaliser une couche conductrice, isolante ou de masquage dans un procédé qui n'utilise pas directement le matériau du substrat. Par exemple, dans le cas où l'on souhaite obtenir un oxyde de silicium lorsque le substrat et /ou la couche sous-jacente ne sont pas constitués de Silicium (celle-ci peut être par exemple une couche métallique ou une couche de nitrure de Silicium). La seule solution consiste à déposer de l'oxyde car l'oxydation thermique n'est plus possible. Celui-ci s'effectue dans un four ou un bâti qui comprend tous les constituants de la couche à réaliser [110-111].

Plusieurs techniques de dépôt sont possibles, on peut citer [82]:

- évaporation thermique (pour un dépôt de métal par exemple);
- pulvérisation cathodique ;
- dépôt chimique en phase vapeur ou CVD (Chemical Vapor Deposition)

- dépôt chimique en phase vapeur à basse pression LPCVD (Low Pressure Chemical Vapor Deposition).

V.1.5. La gravure :

Deux types de gravure sont couramment utilisés :

- Gravure isotrope,
- Gravure anisotrope.

V. 1.5.1. Gravure isotrope :

Dans la gravure isotrope, la vitesse d'attaque est approximativement constante dans toutes les directions. Dans ce cas, il est difficile de contrôler avec précision les dimensions latérales des motifs résultants. L'inconvénient majeur de cette technique est la gravure des zones situées sous le masque dans le cas où l'usinage latéral n'est pas souhaité. **La figure V.1** montre un exemple de motif réalisé par cette technique.

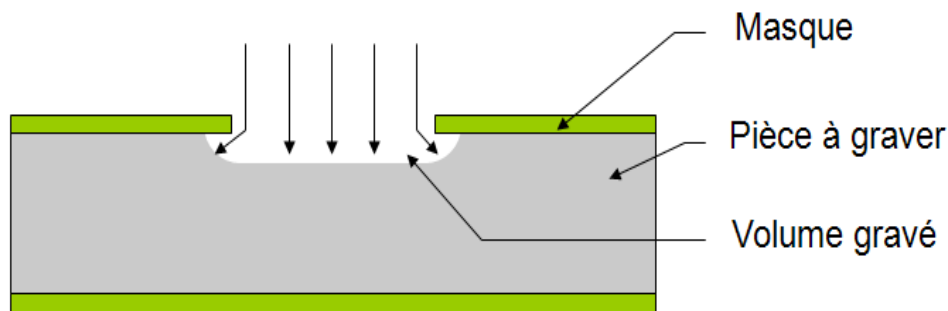
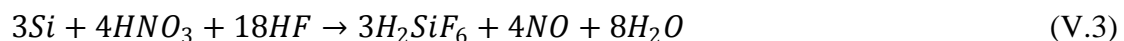


Figure V.1 : Exemple de cavité obtenue par gravure isotrope [16].

L'attaque chimique utilisée se fait dans une solution contenant HF, HNO₃ et H₂O (ou CH₃COOH).

L'acide nitrique et l'acide fluorhydrique servent respectivement à oxyder et à désoxyder la surface du silicium. L'eau et l'acide acétique jouent le rôle de modérateurs. La réaction chimique régissant la gravure est :



Cette réaction s'effectue à la température ambiante.

Le masquage peut être effectué par une couche d'oxyde de silicium. La vitesse d'attaque de SiO₂ est de quelques centaines d'angströms (100°A/min) par minute. Dans le cas où la gravure du silicium est de longue durée, le masque SiO₂ peut être totalement attaqué. Dans ces conditions, il est préférable d'utiliser des masques en nitrure de silicium dont la vitesse d'attaque par cette solution est très faible.

V. 1.5.2. Gravure anisotrope :

Contrairement aux procédés de gravure humide isotropes [112], les gravures anisotropes permettent de contrôler, avec précision, les dimensions des structures micro usinées. Ce type de gravure est généralement réalisé dans des solutions aqueuses. Parmi ces solutions, on peut citer :

- Hydroxyde de potassium KOH.
- Hydrazine N_2H_4 .
- Ethylène diamine-pyrocathécol.

Dans ce type de gravure, la vitesse d'attaque des plans (100) est de l'ordre de 100 fois à celle des plans (111) (**Figure V.2**). L'explication généralement donnée de l'anisotropie est que la vitesse de gravure pour un plan donné est déterminée par la densité d'atomes dans ce plan et par le nombre de liaisons Si-Si exposées à la solution ou restant à l'intérieur du matériau [113-114]. On peut donc réaliser des cavités de formes diverses dont les faces sont délimitées par plans cristallographiques donnés.

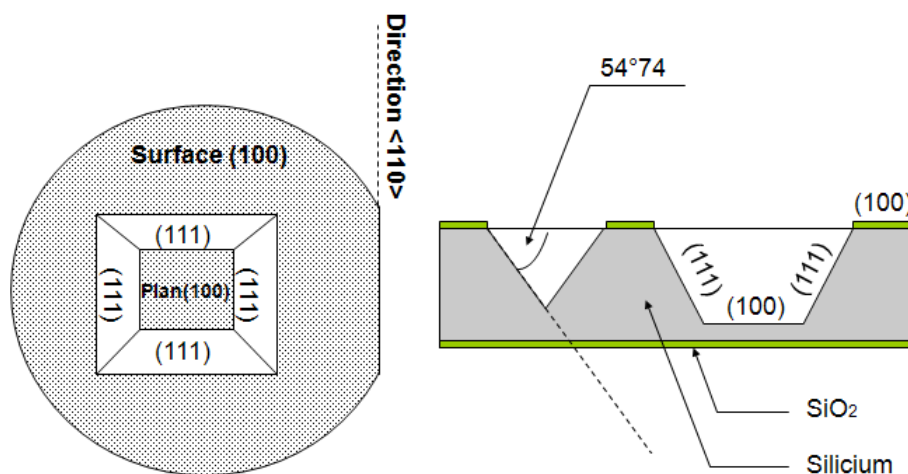


Figure V.2 : Exemple de cavité obtenue par gravure anisotrope [115].

V.1.6. La photolithographie :

Toutes les étapes du procédé technologique font appel à la photolithographie dont nous allons rappeler le principe.

La photolithographie concerne le transfert d'un motif sur la plaquette par lithographie UV de la résine déposée. Le transfert du motif est réalisé à partir d'un masque constitué d'une plaque de verre recouvert partiellement de chrome aux endroits où l'on veut empêcher le passage de la lumière UV.

Selon la composition de la résine, il y a deux comportements possibles quand on les expose à un rayonnement de photons émettant dans la gamme des ultra-violets. Une résine est

dite positive si elle est sensible aux photons UV, d'où une solubilité accrue des zones exposées dans le révélateur. Elle est dite négative si les parties soumises aux photons UV se réticulent et deviennent alors insolubles dans le solvant.

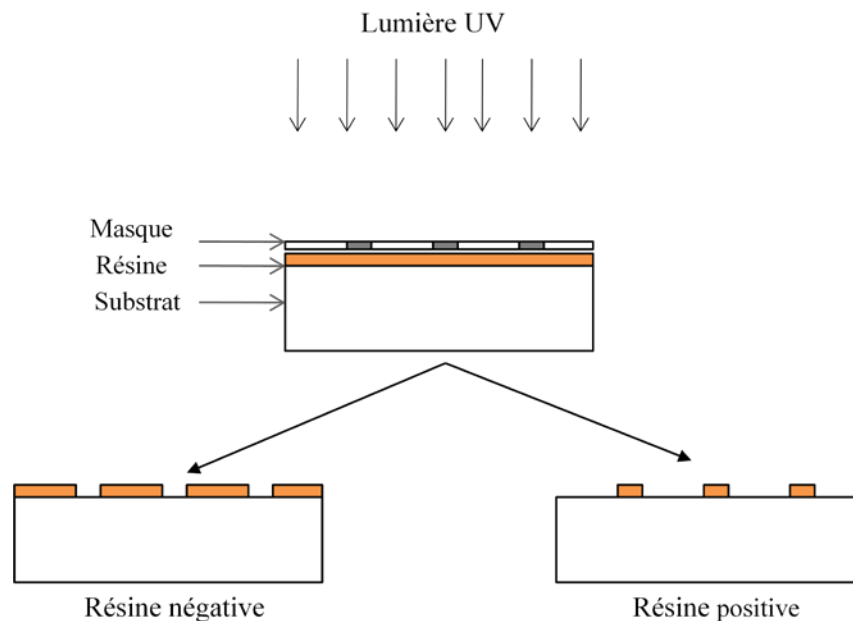


Figure V. 3 : Procédé de lithographie

La résine photosensible visqueuse après son étalement sur l'échantillon, est alors durcie dans un four, de façon à pouvoir manipuler la plaquette sur une machine d'alignement de masques.

V. 1.7. Dépôt par la technique d'alignement double face :

Cette étape consiste à réaliser des dépôts sur la face opposée à celle de la cavité. Dans notre cas l'ensemble des procédés de fabrication se déroule sur la face avant du corps de preuve. Ainsi, une technique spécifique de photolithographie double face est nécessaire. Cette technique utilise un microscope à infrarouge permettant d'aligner et de positionner les masques.

Une machine d'alignement double face classique est équipée d'une source de lumière infrarouge et d'un microscope. Un écran permet de visualiser les deux faces et d'aligner celle du dessous par rapport au masque (**Figure V. 4**).

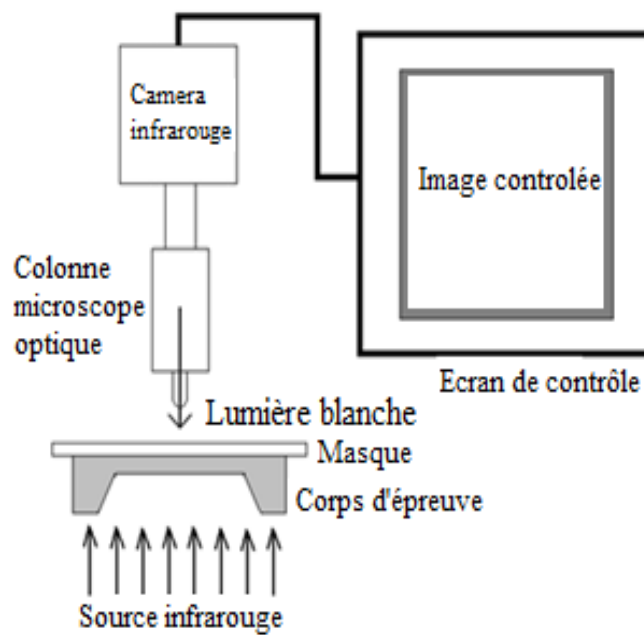


Figure V. 4 : Schéma de l'appareillage de l'alignement double face [116].

V. 1.8. Soudure thermoélectrique :

Pour réaliser le multicapteur microélectronique, il faut un assemblage contrôlé des pièces le constituant. Le corps d'épreuve doit être monté sur une embase en verre pour isoler la cavité du capteur de sa partie supérieure (**Figure V.5**). Les techniques classiques de collage impliquent le dépôt de couches fines intercalaires qui introduisent beaucoup d'effets secondaires tels que la dispersion des contraintes entre le boîtier et le composant à cause de la différence de leurs coefficients de dilatation thermique. Dans ce cas, le multicapteur se trouvera à tout instant contraint sans qu'aucune excitation extérieure ne lui soit appliquée. Pour remédier à ce problème, on utilise une autre technique d'assemblage qui repose sur une soudure par un procédé thermique et électrique qui évite l'emploi de ces couches intercalaires.

Le principe utilisé consiste à appliquer une tension continue sur une structure verre-silicium à température élevée. Le verre généralement choisi est le Pyrex (7740 de Corning) qui présente un coefficient de température très voisin de celui du silicium. La tension continue est généralement comprise entre 200V et 2000V et qui sera appliquée pendant quelques dizaines de secondes à une température située entre 300 °C et 600°C (**Figure V.5**).

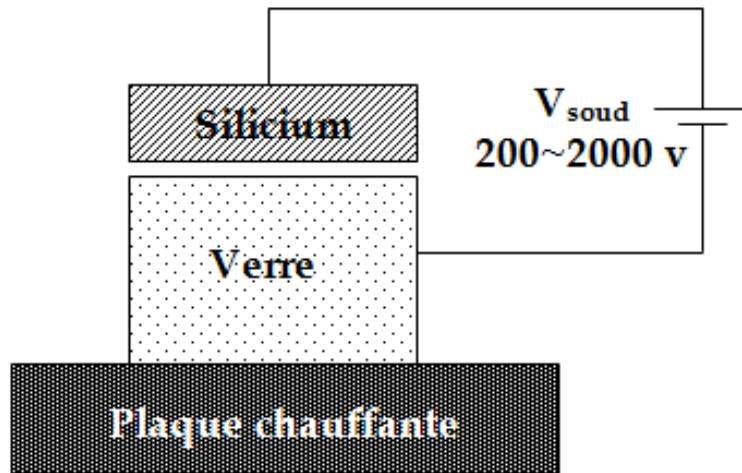


Figure V.5 : Schéma de principe du montage de soudure thermoélectrique [117].

V.2. Les principales étapes technologiques pour la réalisation du multicapteur :

Notre structure combine trois capteurs à savoir un capteur de pression, un capteur d'humidité et un capteur de température. Afin de simplifier la fabrication, il est souhaitable d'employer le même métal avec la même épaisseur (le Platine) pour les trois capteurs. Nous allons utiliser pour le capteur de température une résistance en Platine. Le capteur de pression est composé d'une membrane qui se déforme sous l'effet d'une pression appliquée. Des jauges en platine en surface permettent de transformer la déformation en variation de résistance. Le capteur d'humidité est constitué de deux électrodes en platine séparées par un diélectrique. Ce dernier est le polyimide qui permet de piéger les molécules d'eau de l'air modifiant de la sorte la capacité du capteur. La figure ci-dessous schématise cette structure :

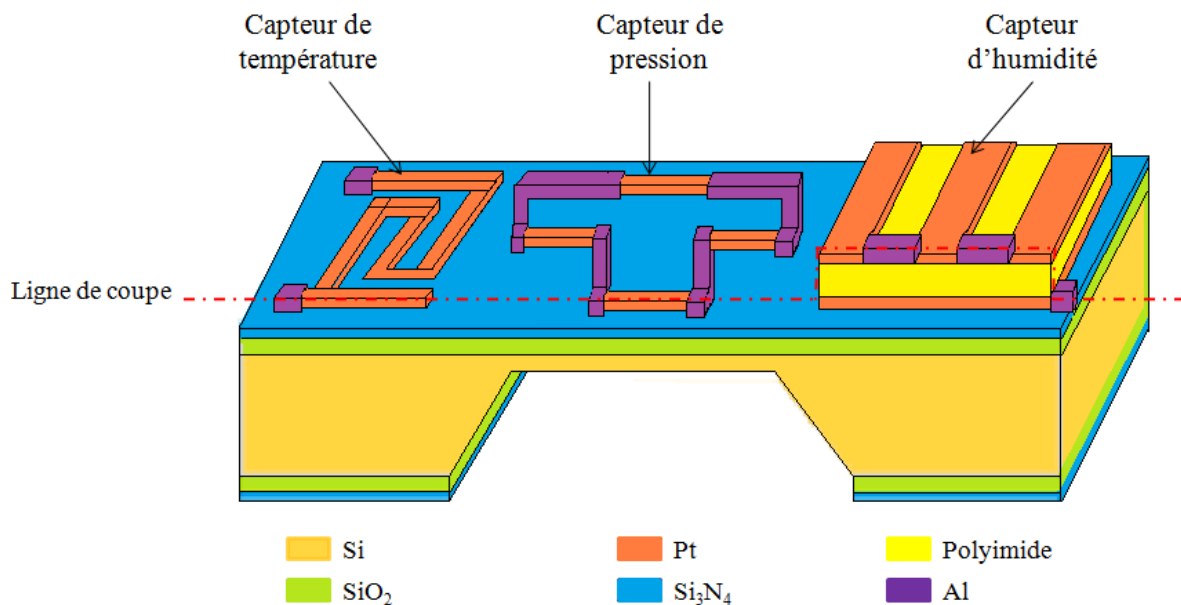


Figure V.6 : Structure des capteurs de la sonde météorologique.

Nous allons à présent décrire les différentes étapes technologiques menant à la réalisation des trois capteurs.

V .2. 1. Croissance thermique de l'oxyde de silicium :

Afin d'obtenir la couche d'oxyde de silicium (SiO_2), le choix s'est porté sur l'oxydation sèche. Cette oxydation s'effectue en plaçant le substrat de silicium sous une atmosphère en oxygène sec dans un four porté une température de 1100°C . Nous avons choisi ce type d'oxydation dans le but d'avoir un oxyde de bonne qualité à l'interface SiO_2/Si , en particulier pour minimiser les pièges présents à cette interface.

V .2.2. Dépôt LPCVD de nitrure de silicium :

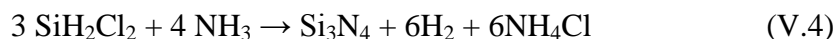
Le procédé de dépôt chimique en phase vapeur sous basse pression LPCVD met en présence un ou plusieurs substrats avec des gaz réactifs spécifiques. Pour des conditions de température et de pression données, le mélange gazeux subit un ensemble de transformations chimiques qui aboutit à la formation d'une couche solide à la surface des substrats.

Les mécanismes du dépôt chimique en phase vapeur peuvent alors se décomposer de la manière suivante [118] :

- Activation et transport des réactifs gazeux vers la surface du substrat,
- Adsorption et réaction chimique des réactifs gazeux à la surface du substrat,
- Désorption des produits de réaction gazeux,
- Diffusion des produits de réaction solides à la surface du substrat vers des sites de plus basse énergie.

Suivant les gaz utilisés, la réaction globale de synthèse du nitrure à basse pression (LPCVD) s'écrit :

Dichlorosilane + ammoniac :



Silane + ammoniac :



V .2.3. Dépôt de platine et de polyimide :

L'étape suivante est le dépôt d'une couche de platine par la technique de Lift off. Elle consiste dans un premier temps à déposer et structurer par photolithographie une couche épaisse en utilisant une résine photosensible [119]. Une couche de platine est déposée pour réaliser l'électrode inférieure du capteur d'humidité. Le platine présente une faible adhésion sur les matériaux isolants, il est nécessaire de mettre en œuvre une couche d'accroche titane

(Ti) avant son dépôt [120]. L'absence de cette couche d'adhésion à certains endroits de la plaquette provoque le décollement du Pt [121]. Par l'augmentation de l'épaisseur du Ti, ce phénomène est minimisé.

Le « lift Off » est une étape relativement simple qui consiste à plonger l'échantillon dans un bain d'acétone (Figure V.7). La résine utilisée pendant la photolithographie est soluble dans l'acétone. Ainsi après le bain d'acétone, il ne subsiste du métal que sur les parties du substrat qui n'étaient pas protégées par la résine. Les flancs obliques de la résine permettent de briser la continuité de la couche métallique et obtenir un décrochage propre du métal et une piste conforme au dessin de masque.

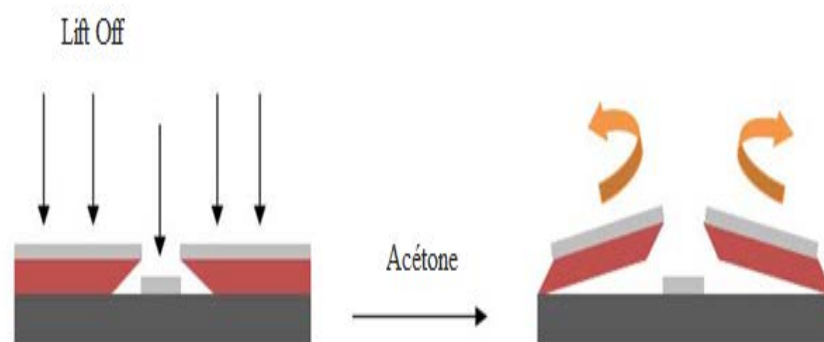


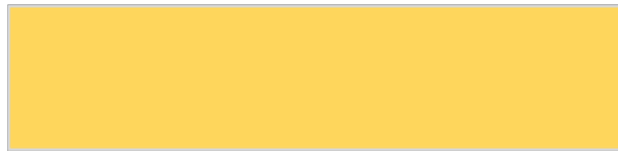
Figure V.7 : Principe du dépôt métallique par lift-off.

On dépose par la suite une couche de polyimide, un matériau sensible à l'humidité. Pour réaliser l'électrode supérieur du capteur d'humidité, la résistance métallique pour le capteur de température et les gauges piézorésistives pour le capteur de pression, une deuxième couche de platine est déposée.

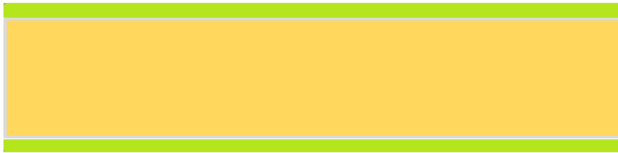
V.2.4. Métallisation :

Les contacts métalliques du composant sont réalisés par un dépôt sur la surface face avant du composant d'une couche d'aluminium. Une opération de gravure est ensuite nécessaire pour enlever le métal des zones non désirées. L'aluminium est le matériau le plus utilisé pour les interconnexions métalliques dans les microsystèmes, à cause de sa haute conductivité électrique et thermique, de facilité à le déposer et le graver, et de son coût peu élevé.

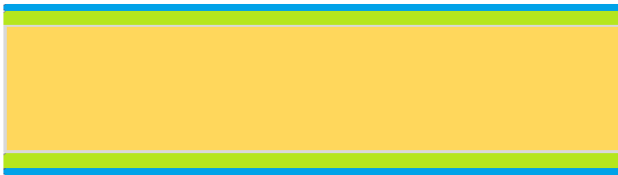
Les étapes du procédé de fabrication que nous venons d'exposer sont illustrées sur la figure suivante :



1- Substrat de départ



2- Oxydation thermique face avant et face arrière du silicium



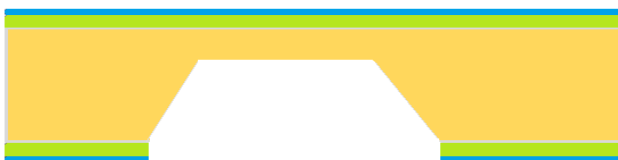
3- Nitruration de la face arrière de la plaquette



4- Application de la résine sur la couche de Nitrure



5- Sensibilité de la résine et gravure de $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ pour créer l'ouverture d'attaque du Si



6- Micro-usinage anisotrope du Silicium pour créer la membrane



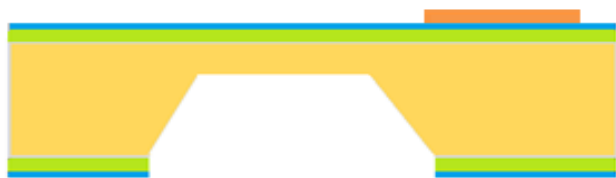
7- Application de la résine sur la couche de Nitrure



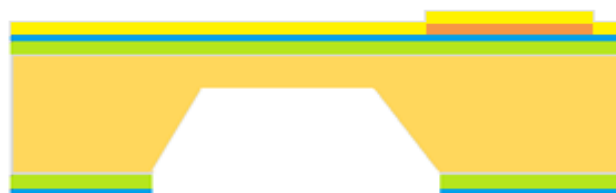
8- Développement de la résine



9- Dépôt de la première couche de Platine



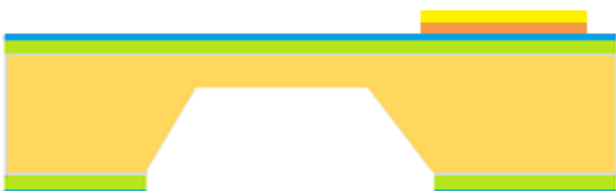
10- Retrait de la résine (lift-off)



11- Dépôt du Polyimide



12- Application de la résine



13- Sensibilité de la résine et gravure du polyimide



14- Application de la résine



15- Développement de la résine

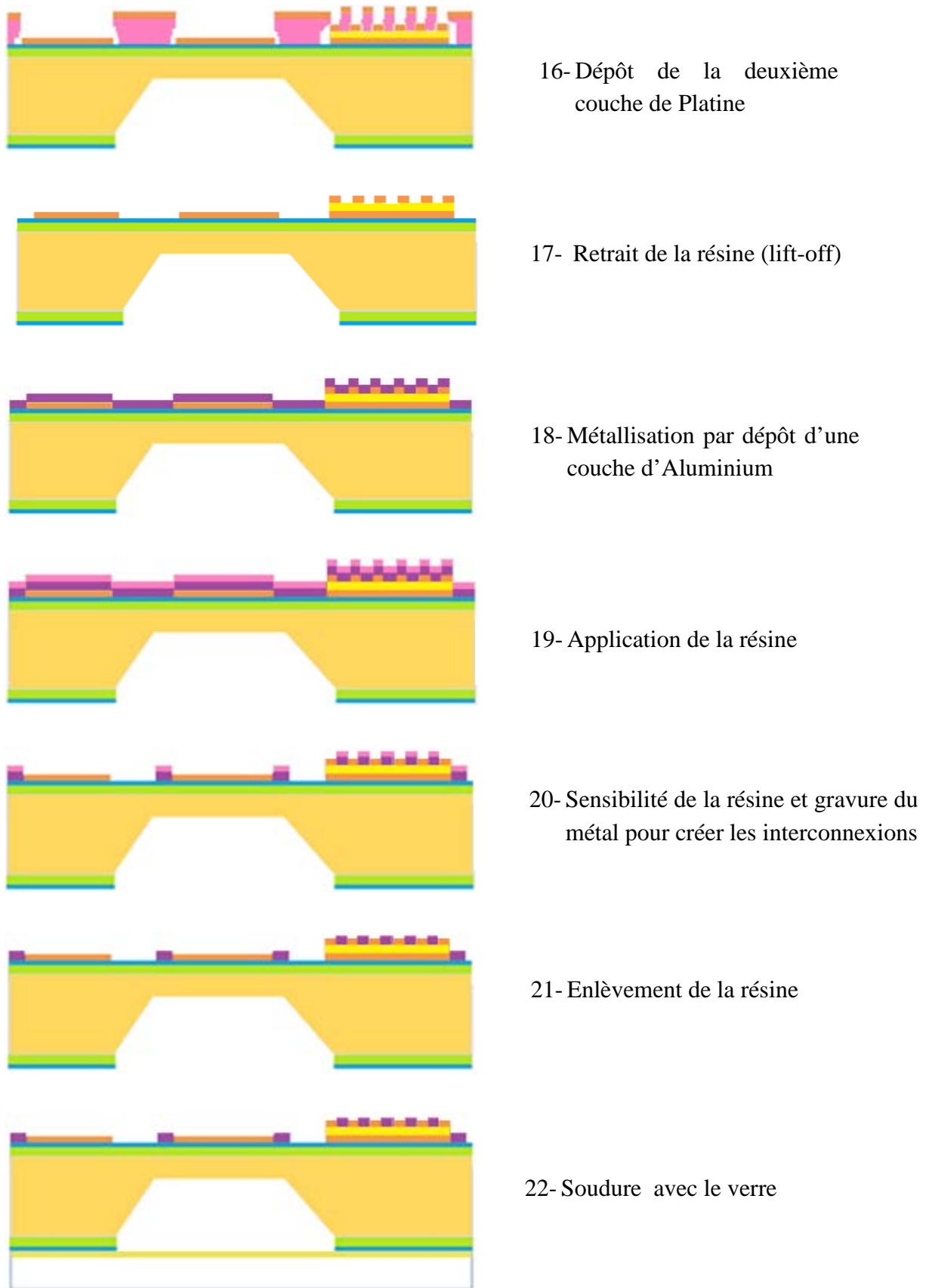


Figure V.8: Vue en coupe des principales opérations technologiques dédiées à la réalisation du multicapteur.

V.3. Conception du multicapteur – utilisation du logiciel SILVACO:

V. 3.1. Présentation du logiciel SILVACO :

Les simulateurs de composants ont pour fonction de reproduire mathématiquement le fonctionnement d'objets ou de systèmes. Leurs intérêts résident essentiellement dans le gain de temps et les économies qu'ils permettent lors de la mise au point d'un produit. Actuellement, dans le but de réduire les coûts engendrés par une suite d'essais expérimentaux, les fabricants de circuits micro-électroniques (ou fondeurs) simulent les procédés de fabrication, les composants et les circuits avant de passer à la phase de fabrication elle-même dont le coût est relativement élevé. Ces types de simulateurs sont aussi des outils d'investigation scientifique puisqu'ils permettent d'observer des grandeurs physiques non accessibles à l'expérience.

Le logiciel SILVACO (SiliconValley Corporation) est un logiciel de simulation permettant la conception et l'analyse de la plupart des dispositifs semi-conducteurs. Il est très utile dans le développement de beaucoup de projets de recherche. Les modules du logiciel TCAD-SILVACO peuvent être utilisés pour [122]:

- La simulation des étapes de fabrication technologique tels que, ATHENA, SSupreme4, etc.
- La simulation électrique des dispositifs tels que, les Diodes, les MOSFET, les transistors bipolaires ..., réalisée par le module ATLAS.

Dans cette étude, les simulations sont effectuées en utilisant le module ATHENA

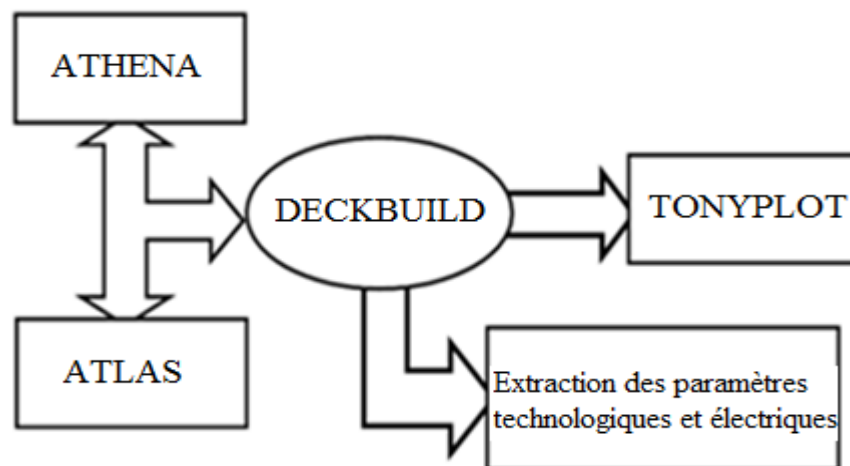


Figure V.9: Schéma synoptique des modules utilisés dans la simulation par le logiciel TCAD-SILVACO.

V. 3.1.1. ATHENA :

Le module de simulation ATHENA du logiciel TCAD-SILVACO fournit des possibilités générales pour la simulation des processus utilisés dans l'industrie des semi-conducteurs : diffusion, oxydation, implantation ionique, gravure, lithographie, procédés de dépôt. Il permet des simulations rapides et précises de toutes les étapes de fabrication utilisées dans la technologie CMOS, bipolaire, SOI, optoélectronique, MEMS et les composants de puissances [123]. Là aussi, le logiciel permet de fournir des informations importantes pour la conception et l'optimisation des procédés technologiques telles que les concentrations des porteurs, les profondeurs de jonctions, etc. Le programme de simulation des différentes étapes technologiques et les phénomènes physiques, s'établi avec le module DECKBUILD du logiciel TCAD-SILVACO, puis la visualisation de la structure de sortie s'effectue avec le module TONYPLOT.

V. 3.1.2. DECKBUILD :

Le DECKBUILD est l'environnement où est défini le programme de simulation à travers des commandes spécifiques. De multiples simulateurs considérés comme des entrées peuvent être utilisés avec le DECKBUILD : ATHENA, ATLAS, SSUPREME4, etc. L'affichage des résultats de simulation tels que les paramètres technologiques (profondeur de jonction, concentration des porteurs) et même les paramètres électriques (tension de seuil, courant, etc.) est effectué à l'aide d'une fenêtre d'information (Output window).

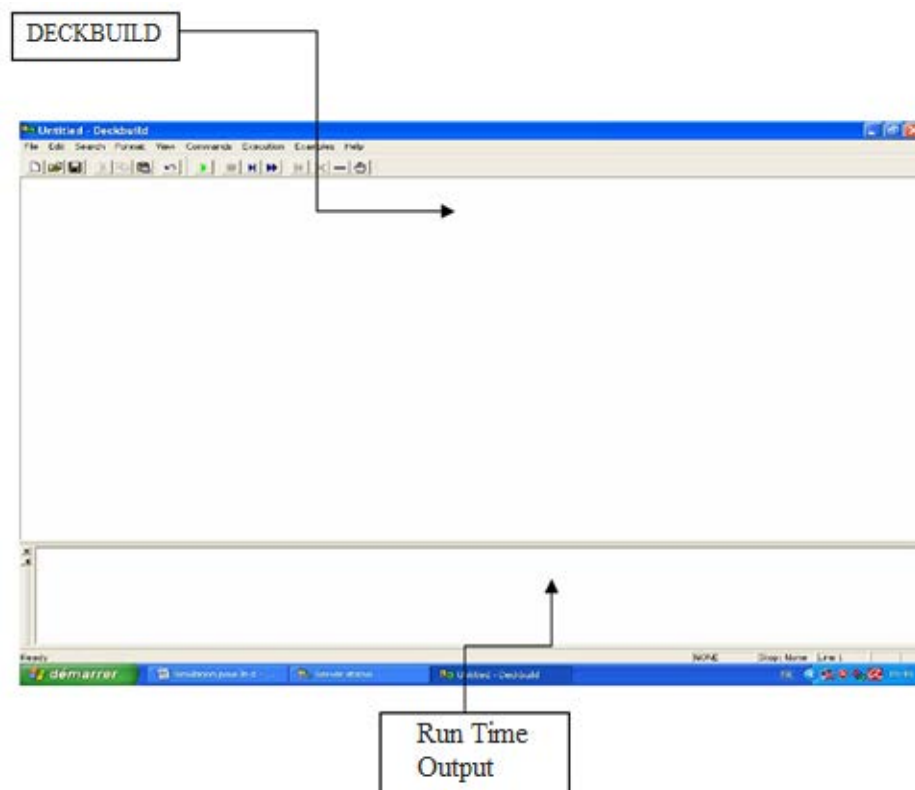


Figure V.10: L'outil DeckBuild.

Run-Time Output : une fenêtre où on voit les erreurs de programmation et les avertissements après la compilation.

V. 3.1.3. TONYPLOT :

TONYPLOT est l'environnement où sont visualisés les résultats des simulations. Il donne des possibilités complètes pour la visualisation et l'analyse des caractéristiques de sortie (structure du composant électronique, profil de dopage, et caractéristiques électriques). Selon le programme de simulation, TONYPLOT peut donner des caractéristiques de sortie à une dimension, deux dimensions ou trois dimensions.

V. 3.2. Simulation en 2D de dispositifs sous ATHENA :

L'objectif de ce travail est de faire une conception par simulation, sous ATHENA, des microcapteurs constituant la microsonde météorologique. Pour définir les paramètres technologiques nécessaires à la simulation, tels que les épaisseurs des différentes couches, la profondeur des gravures, ainsi que certains paramètres électriques, nous nous sommes basés sur des valeurs trouvées dans la littérature.

V. 3.2.1. Maillage du dispositif :

Une étape très importante et indispensable qui doit être effectuée avant d'entamer la simulation du procédé technologique est le maillage du dispositif.

Le maillage joue un rôle important pour l'obtention de bonnes simulations. Celui-ci doit être fait avec la plus grande attention pour garantir la fiabilité des résultats. La méthode numérique utilisée pour résoudre les équations est la méthode des éléments finis. Les éléments qui définissent la maille élémentaire utilisée par le simulateur sont des prismes. Le choix de maillage doit être fait de façon à avoir un compromis entre la vitesse d'exécution et l'exactitude des résultats. Tel qu'un maillage épais produit une rapide simulation, mais les résultats sont moins précis. Tandis qu'un maillage fin produit un ralentissement de la simulation, mais des résultats plus précis. Donc le maillage fin est plus intéressant du point de vue résultat dans la simulation [124]. Dans notre cas, la structure le maillage adopté pour la simulation est celui de **la figure V.11**.

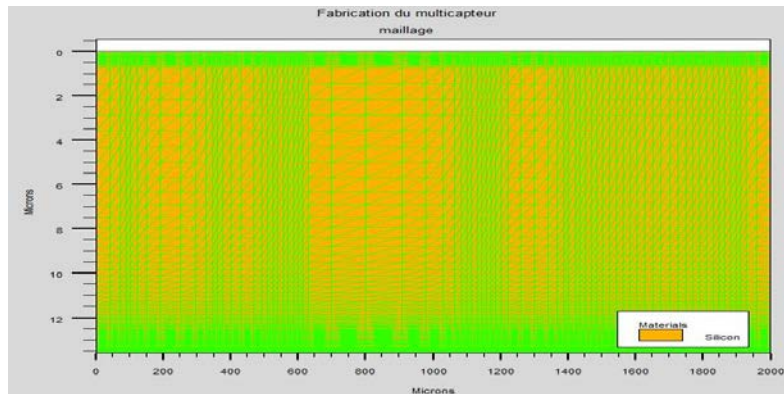


Figure V.11: Choix du maillage.

On y remarque une forte concentration de nœuds (maillage très fin) là où on a fait des gravures et aussi au niveau des zones qui se situent près de la face avant et près de la face arrière. Le maillage est moins serré pour les autres régions. Afin d’obtenir un résultat correct, il convient de faire tourner le simulateur avec un maillage correct.

V. 3.2.2. Choix du substrat :

Avant de réaliser tout composant microélectronique, il faut définir le substrat de départ, Autrement dit le support sur lequel sera réalisé le dispositif. Dans notre cas, le choix est porté sur un substrat de silicium d’orientation (100) et de type p (dopé Bore) avec une concentration de 10^{15} atom/cm³.

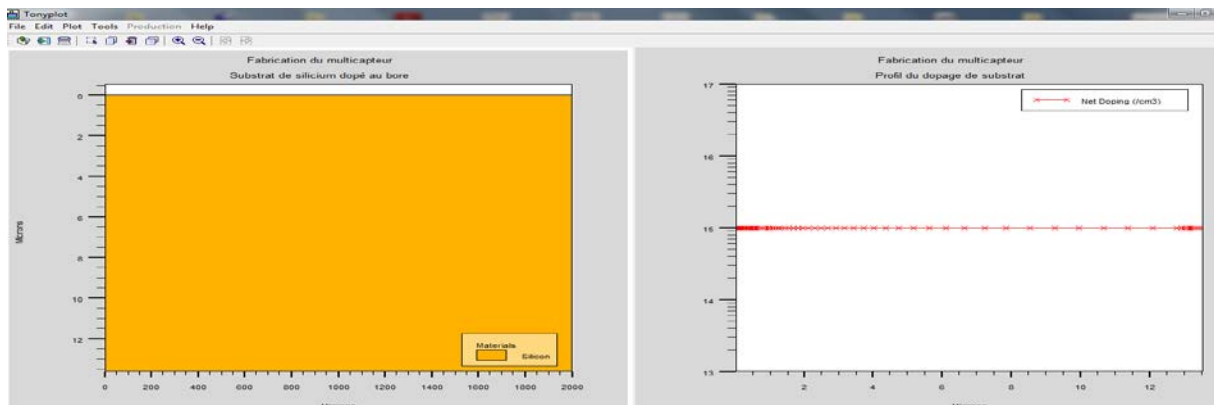


Figure V.12: Substrat de silicium dopé au bore.

V. 3.2.3. Oxydation thermique :

Nous simulons l’oxydation thermique en entrant au niveau du programme de simulation les durées, les températures et le type d’oxydation. Nous utilisons une oxydation sèche à une température de 1100°C. L’oxydation thermique se fait dans un premier temps au

niveau de la face avant du substrat ensuite au niveau de la face arrière en inversant le substrat par rapport à y.

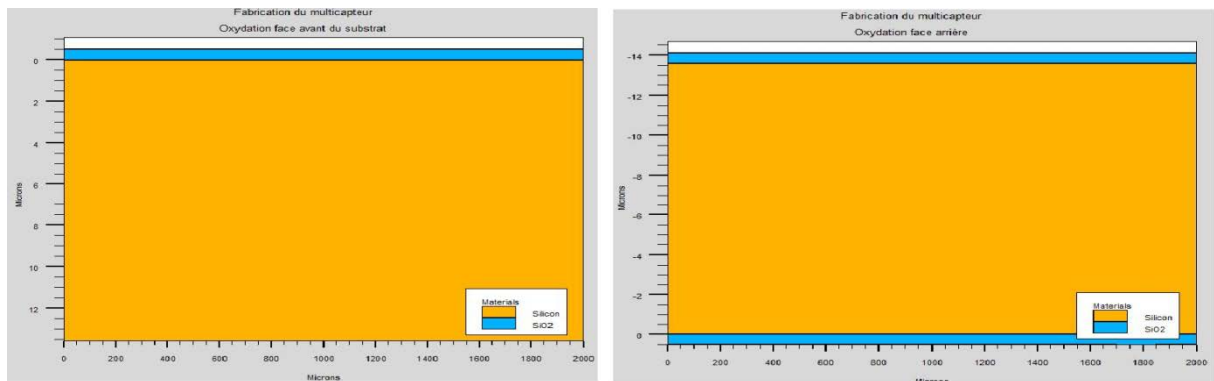


Figure V.13: Oxydation thermique double face.

V. 3.2.4. Dépôt de nitrure de silicium :

L'étape suivante est le dépôt du nitrure de silicium Si_3N_4 sur la face arrière de la structure.

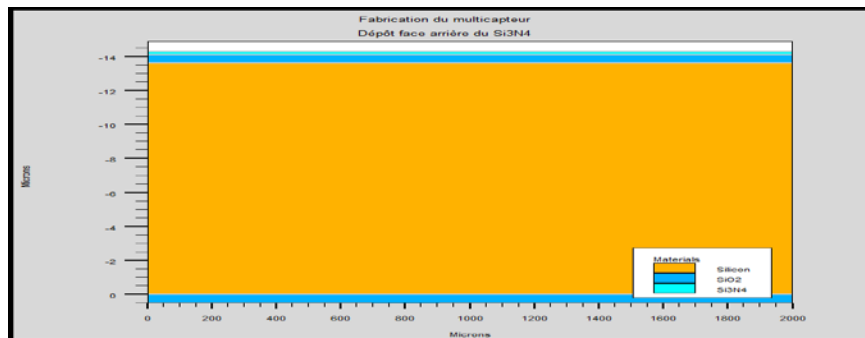


Figure V.14: Dépôt face arrière du nitrure de silicium.

V. 3.2.5. Formation de la membrane :

La membrane est obtenue par micro-usinage anisotropique face arrière du silicium. Avant de passer à cette étape, une étape de gravure de la couche $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ est nécessaire.

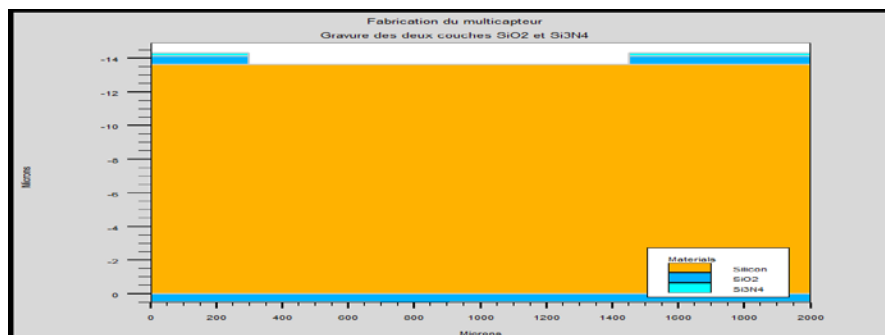


Figure V.15: Ouverture face arrière du film diélectrique (SiO_2 et Si_3N_4).

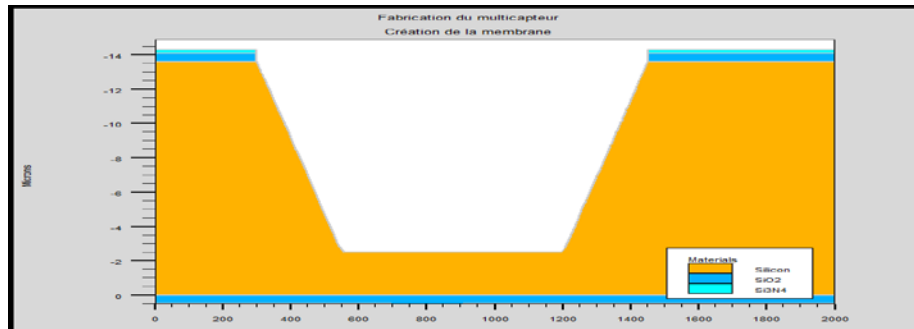


Figure V.16: Création de la membrane.

La figure ci-dessous est obtenue en inversant la structure pour réaliser les trois capteurs constituant la sonde météorologique. Un dépôt face avant de Si_3N_4 est nécessaire :

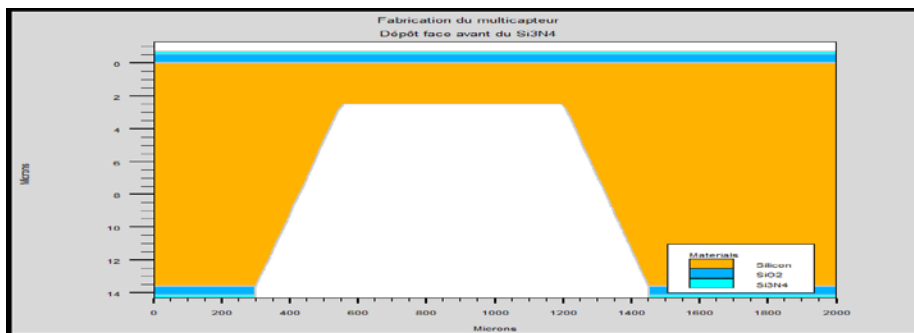


Figure V.17: Inversion de la membrane suivit d'un dépôt de nitrure de silicium.

V. 3.2.6. Dépôt du platine suivit d'une photolithographie:

L'étape qui suit est le dépôt de la première couche de Platine pour réaliser l'électrode inférieure du capteur d'humidité. La gravure du Platine nécessite une opération de photolithographie en utilisant une résine photosensible.

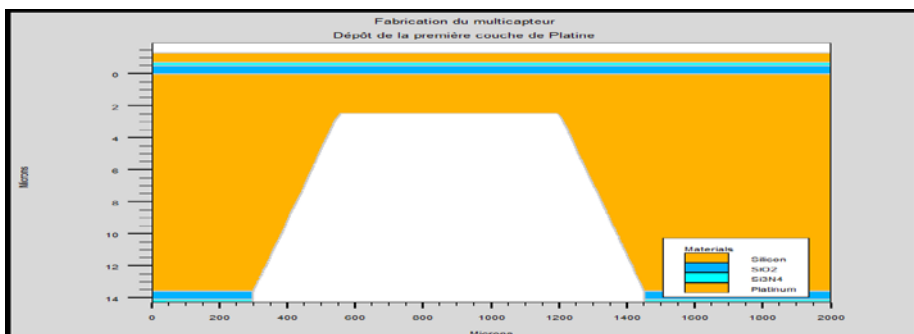


Figure V.18: Dépôt du platine.

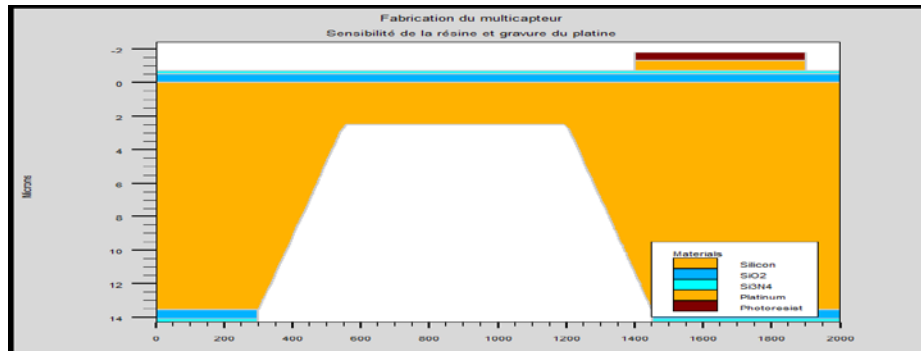


Figure V.19 : Gravure du platine avec une étape de photolithographie.

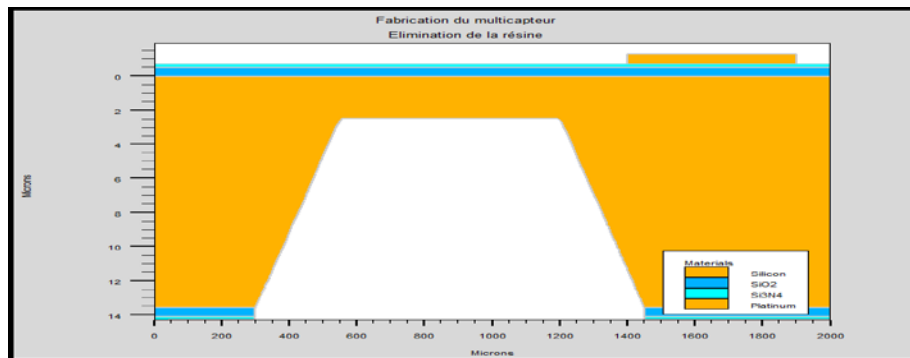


Figure V.20 : Elimination de la résine.

V. 3.2.7. Dépôt et gravure du polyimide :

L'étape suivante est le dépôt d'une couche de polyimide, matériau diélectrique sensible à l'humidité. Suit d'une étape de photolithographie et une étape de gravure du polyimide :

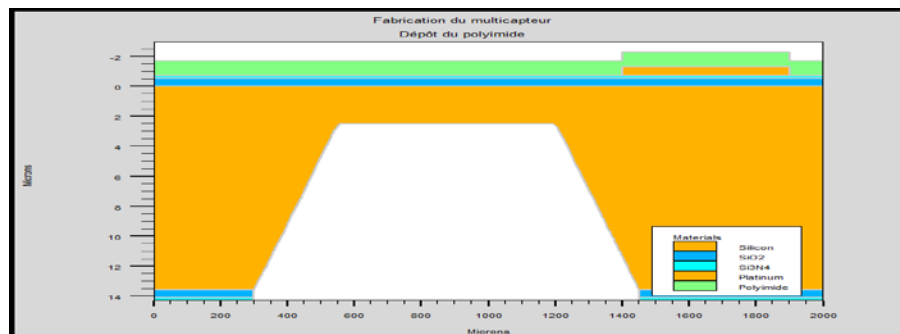


Figure V.21 : Dépôt du polyimide.

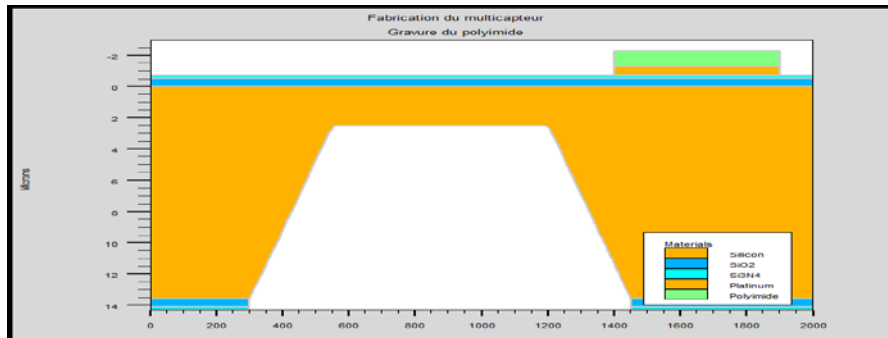


Figure V.22 : Gravure du polyimide.

V. 3.2.8. Dépôt de la deuxième couche de platine :

L'étape qui suit est le dépôt de la deuxième couche de Platine. Cette dernière permet la réalisation de la résistance métallique pour le capteur de température, les jauges pour le capteur de pression et l'électrode inférieure du capteur d'humidité. La gravure du Platine nécessite une opération de photolithographie en utilisant une résine photosensible.

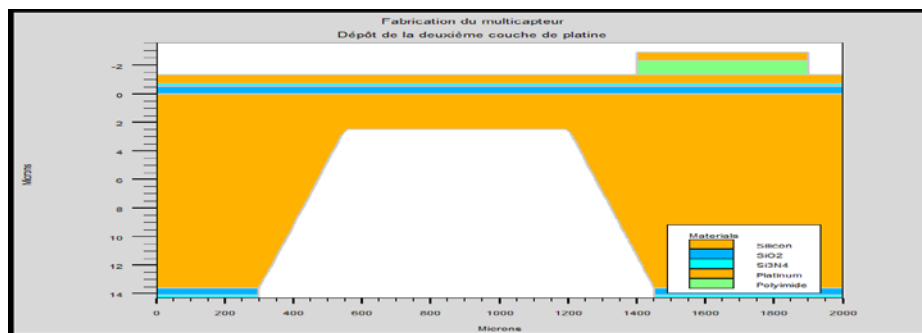


Figure V.23 : Dépôt de Platine.

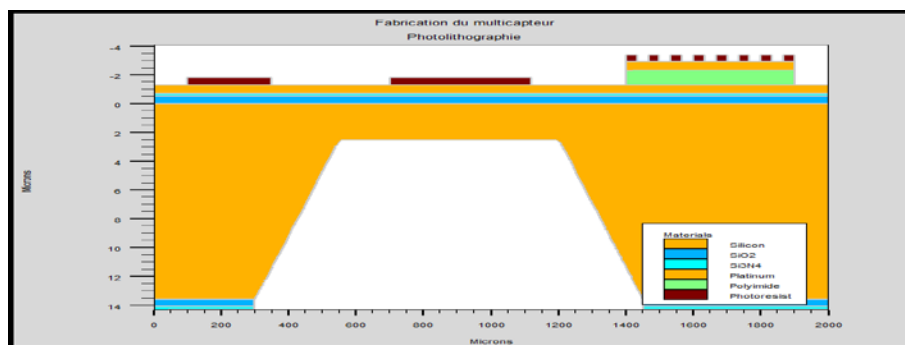


Figure V.24 : Etape de photolithographie.

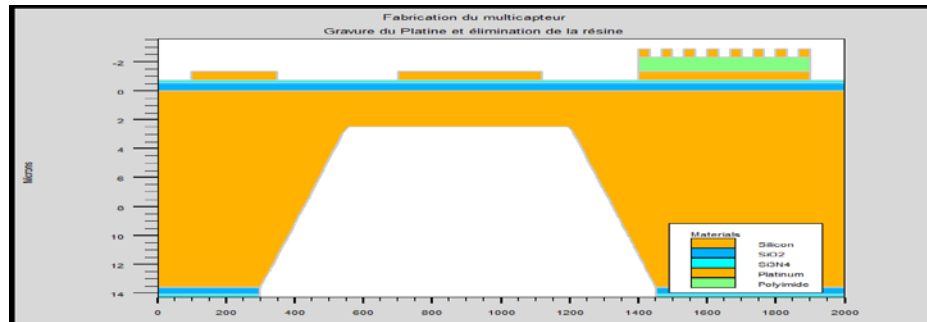


Figure V.25 : Libération des capteurs de température, de pression et d'humidité.

V. 4. Chaîne de mesure des paramètres de l'atmosphère (P, T, H et V):

Pour mesurer les paramètres de l'atmosphère, une technique de radiosondage est utilisée. Cette technique consiste à lâcher dans l'atmosphère un ballon gonflé par un gaz plus léger que l'air (l'hélium par exemple). Sous le ballon est fixée une sonde constituée de capteurs de pression (P), de température (T) et d'humidité (H). Les valeurs mesurées à la sortie des capteurs sont transmises au sol par modulation d'une onde électromagnétique porteuse du domaine radio (vers 400 MHz), d'où le nom de radiosonde.

Dans notre cas, les mesures P, T et H s'effectuent respectivement au moyen des capteurs de type piézorésistif, résistif et capacitif. Les mesures sont ensuite traitées par un convertisseur capacité-fréquence (CFC : Capacity to Frequency Converter) pour le signal issu du capteur d'humidité et un convertisseur tension-fréquence (VCO : Voltage Controlled Oscillator) pour les signaux issus des capteurs de température et de pression.

La détermination du vent horizontal (en vitesse et en direction) est un élément important du radiosondage, qui s'effectue au moyen de localisations successives du ballon, en faisant l'hypothèse que le ballon se déplace à la vitesse du vent.

Au sol, le matériel de radiosondage est constitué d'un récepteur avec une antenne à 400 MHz et d'un convertisseur fréquence-code machine. Ce dernier est réalisé à l'aide d'un DSP (Digital Signal Processor, D'ASIC(Application Specific Integrated Circuit) ou FPGA (Field-Programmable Gate Array) afin d'obtenir la suite de valeurs binaires correspondant à l'information transmise par l'émetteur [125]. Les messages codés sont envoyés par Internet en utilisant un micro-ordinateur à la Direction de la production, qui les diffuse sur le Système mondial de télécommunications météorologiques (SMT).

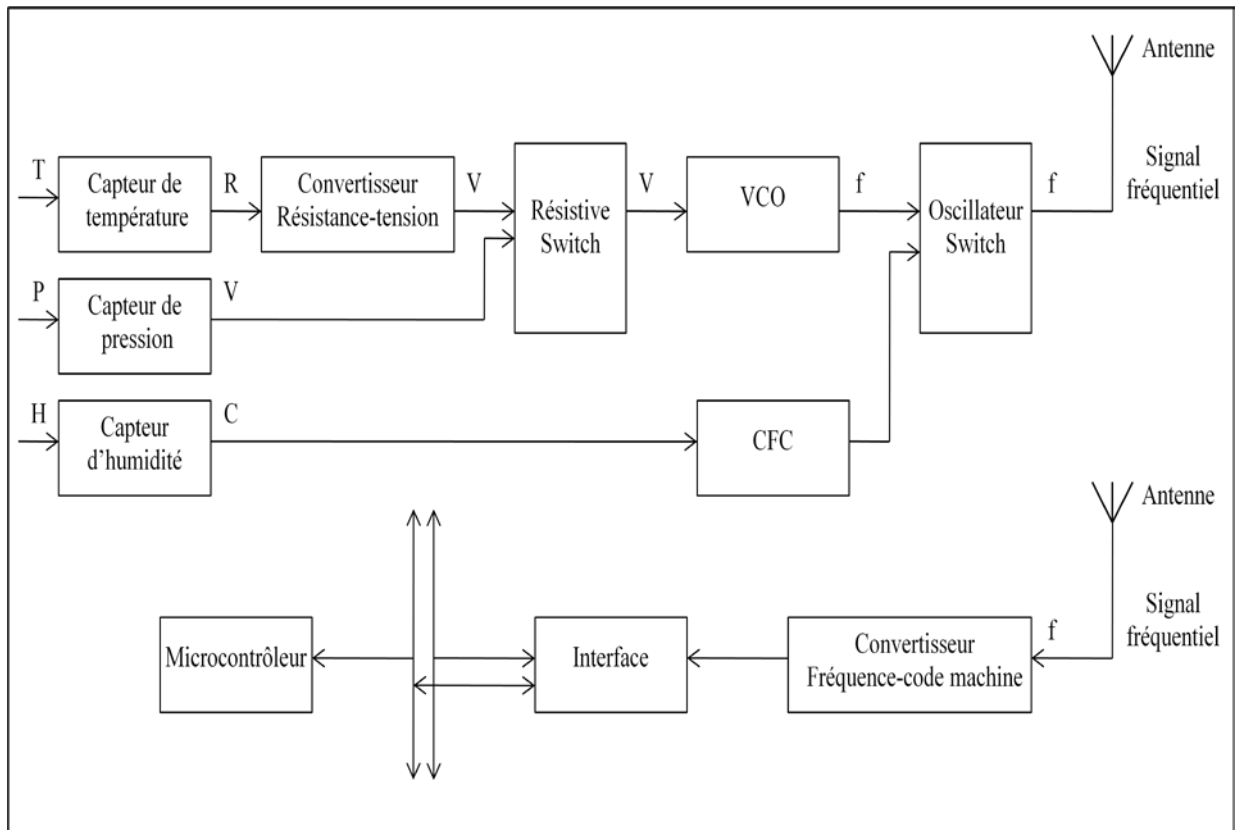


Figure IV.2 : Principales blocs d'une chaîne de mesure des paramètres météorologiques

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons décrit les principales étapes de fabrication des capteurs constituant la sonde météorologique. Nous avons exposé quelques techniques nécessaires à la fabrication des microsystèmes. Ces techniques sont généralement issues des techniques classiques de la microélectronique et de certaines techniques spécifiques telles que la gravure du silicium en vue de la réalisation de microstructures et l'alignement double face afin de pouvoir aligner les motifs d'une face par rapport à ceux de l'autre. Nous avons simulé le processus technologique sous le logiciel SILVACO.

***CONCLUSION GENERALE
ET PERSPECTIVES***

Conclusion Générale et Perspectives

Le développement des nouvelles techniques d'instrumentation dédiées à la caractérisation physique à l'échelle du nanomètre et à la fabrication de microstructures est actuellement un enjeu important qui suscite des recherches intenses.

Les techniques et technologies issues de la microélectronique sur silicium ont ouvert un champ très important d'investigation sur les microsystèmes et ont révolutionné les techniques instrumentales et apporté de nouvelles solutions. Elles permettent de fabriquer collectivement un grand nombre d'instruments parfaitement adaptés à la caractérisation de nanostructures. Elles permettent d'intégrer sur ces instruments des fonctions de détection et d'actionnement.

Dans le cadre de cette thèse, nous avons modélisé et conçu les différents capteurs constituant la sonde météorologique en technologie microsystème.

Dans le premier chapitre, nous avons rappelé quelques notions de base sur les phénomènes météorologiques dans l'atmosphère. En effet, notre atmosphère est divisée en plusieurs couches caractérisées entre autre par leur profil vertical de température. Ainsi, le domaine de la basse atmosphère s'identifie à la troposphère, au sein de laquelle la température décroît dans l'ensemble assez régulièrement avec l'altitude. C'est dans cette couche que se produisent les phénomènes météorologiques. La température diminue avec l'altitude pour descendre jusqu'à -50 à -60° C. Au cours de ce chapitre nous avons parlé des différents paramètres météorologiques et ses variations dans l'atmosphère. A savoir la pression atmosphérique. Sa valeur moyenne au niveau de la mer est de 1013 hPa. Cette valeur diminue lorsque l'on gagne de l'altitude. Le deuxième paramètre est la température en degré Celsius ou en Kelvin. Ses variations saisonnières et locales influent beaucoup sur les phénomènes météorologiques. Le troisième paramètre est l'humidité relative de l'air mesurée en pourcentage. La quantité de vapeur d'eau qui peut être contenue dans l'air dépend des conditions de température et de pression de ce dernier. Plus la température de l'air est élevée et plus la quantité d'eau qui peut être dissoute est importante. Le dernier paramètre est le vent déterminé en vitesse et direction. Le vent naît de la différence de pression. Il se déplace des hautes pressions vers les basses pressions. Nous avons parlé à la fin de ce chapitre de la technique de radiosondage. Cette technique permet des mesures en altitude des différents paramètres météorologiques.

Le deuxième chapitre a été consacré à l'étude théorique des différents capteurs : de pression, de température et d'humidité suivant leurs types de détection.

Pour le capteur de pression, nous avons exposé deux types. Le premier à détection capacitive et le deuxième à détection piézorésistive. La majeure partie des nouvelles cellules

sensibles disponibles sur le marché pour la détection de la pression est basée sur le principe de détection de type piézorésistif vu la compatibilité de cette structure avec la technologie silicium.

En ce qui concerne le capteur de température, nous avons des détecteurs de type résistif, les thermocouples et les capteurs à jonction semi-conductrice. La technologie de type résistance est la plus communément utilisée du fait de sa facilité de fabrication et de l'évolution linéaire de ses résistances avec la température.

Suivant le procédé de détection, les capteurs d'humidité sont de type capacitif, résistif, hygrométrique, gravimétrique et optique. La plupart des capteurs d'humidité existants sont de types capacitifs à cause de sa simplicité de fabrication. Ils sont basés sur la variation de la capacité d'une couche diélectrique exposée à un changement du taux d'humidité. Les autres types sont plus lourds à mettre en œuvre et donc plus coûteux.

Le troisième chapitre a été dédié à la modélisation des capteurs que nous avons choisis pour notre étude. A savoir le capteur de pression à détection piézorésistif, le capteur de température à détection résistif et le capteur d'humidité à détection capacitive. Cette modélisation a été subdivisée en trois grandes parties :

La première partie concerne la modélisation mécanique et électrique du capteur de pression piézorésistif. Dans l'étude mécanique, nous avons établi dans le cas des faibles déflexions, les équations des contraintes à la surface de la membrane à partir de la théorie des plaques minces. En traçant la distribution de ces contraintes, nous avons déduit que les maximums de ces dernières sont situés sur les bords de la membrane parfaitement encastree. Ceci nous donne déjà une idée précise sur l'emplacement des jauges sur la membrane afin de maximiser leurs sensibilités à la pression. Dans l'étude de la réponse électrique, Nous avons étudié une configuration à quatre jauges montées en pont de Wheatstone. Cette configuration présente une grande sensibilité et une bonne linéarité.

La deuxième partie concerne la modélisation du capteur de température résistif. Ce dernier est constitué d'une résistance électrique en Platine qui varie en fonction de la température. Le Platine est connu pour son comportement stable en température, ce qui le rend particulièrement intéressant pour la réalisation de résistances chauffantes et pour la mesure de température. Nous avons montré que pour une gamme de température allant de -90°C à 50°C , la réponse du capteur est linéaire.

La troisième partie a été consacrée à la modélisation du capteur d'humidité capacitif. Ce dernier est constitué de deux électrodes en métal séparées par un diélectrique. L'électrode inférieure est une plaque pleine, l'électrode supérieure est une grille qui permet à la vapeur de pénétrer dans la couche sensible. Les molécules d'eau sont ensuite absorbées et diffusent dans le diélectrique induisant une variation de sa permittivité. La variation de la permittivité

provoque une variation de la capacitance. Nous avons montré que la variation de la capacité en fonction de l'humidité est linéaire.

Dans le quatrième chapitre, la simulation par éléments finis nous a aidé à mieux comprendre le comportement des trois types de capteurs. Pour le capteur de pression piézorésistif, nous avons simulé la déflexion et la répartition des contraintes et déduire ses valeurs maximales. En faisant varier la pression appliquée et l'épaisseur de la membrane, nous avons remarqué que les résultats obtenus de la déflexion maximale se rapprochent des résultats trouvés dans la littérature. L'analyse des résultats obtenus montre que l'emplacement idéal des jauges piézorésistifs est sur les parties encastrées de la membrane pour avoir le maximum de sensibilité. Nous avons utilisé le platine en tant que matériau des jauges pour rester compatible avec le processus de fabrication de la sonde.

En ce qui concerne le capteur de température, notre choix est basé sur un capteur de forme méandre. Le capteur de température optimisé à des profils de distribution de température uniforme. La valeur maximale de la température est de 654K.

Le troisième capteur constituant la sonde météorologique est le capteur d'humidité à détection capacitive. Un modèle simple a été conçu pour la simulation et l'optimisation de capteur d'humidité capacitif. Ce modèle est constitué de deux électrodes en platine séparés par un diélectrique : le polyimide. Le principe de ce capteur est basé sur la variation de la capacité de cette couche diélectrique exposée à un changement du taux d'humidité.

Finalement, dans le cinquième chapitre, les principales étapes de fabrication technologique menant à la réalisation des différents capteurs constituant la sonde météorologique sont dans un premier temps analysées et décrites. Nous avons ensuite simulé ces étapes à l'aide du logiciel SILVACO. Cette simulation, nous a donné un aperçu sur la fabrication de notre structure ainsi que la technologie microélectronique.

Les perspectives des travaux présentés dans ce mémoire suivent différents axes de réflexion et se situent dans les différents contextes de recherche.

A court terme, nous espérons dans un prochain avenir développé le présent travail par une étude plus avancée en utilisant la méthode des éléments finis en jouant sur les paramètres géométriques des différents composants. Par exemple, l'effet des dimensions : des jauges, de la résistance métallique, des électrodes et du diélectrique.

A moyen terme, nous nous intéresserons à l'électronique de commande. Celle-ci permet de contrôler les microsystèmes et de traiter les signaux recueillis. Une étude détaillée permet de déterminer les différents paramètres à la réception. En plus, nous n'avons pas parlé de la source d'énergie pour alimenter la sonde météorologique. Une étude sur les piles utilisées et sa durée de vie est nécessaire.

ANNEXES

Annexe A :

Cosinus directeurs de la transformation d'axes

On définit initialement un repère orthonormé (Oxyz) dont les axes sont liés aux directions [100] du cristal de silicium. Pour pouvoir se placer dans n'importe quel plan et direction cristallographique, on fait subir à notre repère une série de rotations autour de ses axes (les angles d'EULER).

La série de rotations est définie comme suit :

1. Une rotation d'un angle θ autour de l'axe (Oy) dont la matrice de rotation est donnée comme suite.

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ 0 & -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{pmatrix} \quad (\text{A.1})$$

2. Une rotation d'un angle φ autour de l'axe (Oz) dont la matrice de rotation est donnée comme suite.

$$\begin{pmatrix} \cos(\varphi) & \sin(\varphi) & 0 \\ -\sin(\varphi) & \cos(\varphi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{A.2})$$

3. Une deuxième rotation d'un angle ψ autour de l'axe (Oz) qui permet de se placer dans la direction cristallographique souhaitée. Les deux premières rotations nous permettent de se trouver le plan souhaité.

La matrice de transformation globale est une superposition (multiplication) des trois matrices de rotation :

$$\begin{pmatrix} c(\varphi)c(\theta)c(\psi) - s(\varphi)s(\psi) & s(\varphi)c(\theta)c(\psi) + c(\varphi)s(\psi) & -c(\psi)s(\theta) \\ c(\varphi)c(\theta)s(\psi) - s(\varphi)c(\psi) & c(\varphi)c(\psi) - s(\varphi)c(\theta)s(\psi) & +s(\psi)s(\theta) \\ c(\varphi)s(\theta) & s(\varphi)s(\theta) & c(\theta) \end{pmatrix} \quad (\text{A.3})$$

Les coordonnées du point dans le nouveau repère (Ox'y'z') s'obtiennent par la relation matricielle suivante :

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{21} & a_{31} \\ a_{12} & a_{22} & a_{32} \\ a_{13} & a_{23} & a_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (\text{A.4})$$

Où

$$a_{11} = l_1 = c(\varphi)c(\theta)c(\psi) - s(\varphi)s(\psi)$$

$$a_{12} = l_2 = c(\varphi)c(\theta)s(\psi) - s(\varphi)c(\psi)$$

$$a_{13} = l_3 = c(\varphi)s(\theta)$$

$$a_{21} = m_1 = s(\varphi)c(\theta)c(\psi) + c(\varphi)s(\psi)$$

$$a_{22} = m_2 = c(\varphi)c(\psi) - s(\varphi)c(\theta)s(\psi)$$

$$a_{23} = m_3 = s(\varphi)s(\theta)$$

$$a_{31} = n_1 = -c(\psi)s(\theta)$$

$$a_{32} = n_2 = +s(\psi)s(\theta)$$

$$a_{33} = n_3 = c(\theta)$$

Où $c(\)$ désigne la fonction Cosinus

Et $s(\)$ désigne la fonction Sinus.

Annexe B :

Calcul des constantes mécaniques du Silicium

Sachant que les modules d'Young, de Coulomb et le coefficient de Poisson se définissent respectivement, à partir des valeurs des coefficients du tenseur d'élasticité, par les relations suivantes :

$$E = \frac{1}{S'_{11}} \quad (\text{B.1})$$

$$G = -\frac{1}{S'_{44}} \quad (\text{B.2})$$

$$\nu = -\frac{S'_{12}}{S'_{11}} \quad (\text{B.3})$$

Les expressions des coefficients d'élasticité S'_{11} , S'_{12} et S'_{44} pour n'importe quel plan et direction cristallographiques s'obtiennent par l'application de la règle de transformation tensorielle suivante :

$$S'_{ijkl} = a_{im} a_{jn} a_{ko} a_{lp} S_{mnop} \quad (\text{B.4})$$

Où S_{mnop} est le tenseur des coefficients d'élasticité exprimé dans le repère (Oxyz). Du fait de la symétrie cubique du Silicium, les composantes non nulles de ce tenseur se réduisent en trois termes seulement S_{11} , S_{12} et S_{44} .

$$S'_{11} = S_{11} - 2 \left(S_{11} - S_{12} - \frac{S_{44}}{2} \right) (l_1^2 m_1^2 + m_1^2 n_1^2 + l_1^2 n_1^2) \quad (\text{B.5})$$

$$S'_{12} = S_{12} + \left(S_{11} - S_{12} - \frac{S_{44}}{2} \right) (l_1^2 l_2^2 + m_1^2 m_2^2 + n_1^2 n_2^2) \quad (\text{B.6})$$

$$S'_{44} = 2 \left(S_{11} - S_{12} - \frac{S_{44}}{2} \right) (l_3^2 l_2^2 + m_3^2 m_2^2 + n_3^2 n_2^2) \quad (\text{B.7})$$

On peut ainsi calculer les paramètres mécaniques du Si pour n'importe quelle direction et plan cristallographique.

Annexe C :

Programme Matlab pour le calcul des coefficients k_{ij}

```

%CALCUL DES VALEURS DES Kij
%Calcul de la valeur du coefficient d'anisotropie "ALPHA"
%Coefficient de Poisson
V=0.0642;

%Module de Young
Y=169.8e9;
%Module de Coulomb
G=50.92e9;

alpha=V+((2*G*(1-V^2))/Y);

A11=2+(4*alpha/7);
A12=(1/7)+(1/(11));
A13=(1/(7))+1/11);
A14=(1/77)+(1/(77));
A21=1+(7/(11));
A22=(3)+(4*alpha/11)+(21/(143));
A23=(1/11)+(1/(11));
A24=(3/11)+(3/(143));
A31=1+((7)/11);
A32=(1/11)+(1/(11));
A33=3+(4*alpha/11)+(21/(143));
A34=(3/11)+(3/(143));
A41=((7)/11)+(7/(11));
A42=((21)/11)+(21/(143));
A43=(21/(11))+((21)/143);
A44=((63)/143)+(28*alpha/121)+(63/(143));
A=[A11 A12 A13 A14;A21 A22 A23 A24;A31 A32 A33 A34;A41 A42 A43 A44];

B=[7/128;7/128;7/128;7/128];

K=A\B;
K00=K(1)
K02=K(2)
K20=K(3)
K22=K(4)

```

Annexe D :

Théorie de la piézorésistivité

Introduction :

Découvert en 1856 par Lord Kelvin, l'effet piézorésistif est un principe de détection largement utilisé. Notamment pour la détection de déformations et également de charges (Force, pression...) par l'intermédiaire de corps d'épreuve pour lesquels on pourra relier la charge exercée sur le corps à la déformation subie par celui-ci. Le principe de base est simple, un corps piézorésistif subissant une déformation, consécutive à l'application d'une contrainte sur ce dernier, verra sa résistance modifiée. Il est, aujourd'hui, largement utilisé dans le domaine des MEMS pour diverses applications liées à la détection (accéléromètre, gyromètres, capteurs de pression ou de force, capteur de débits ou encore capteurs chimiques ou biologiques [126-127-128]).

Nous allons présenter dans cette annexe la piézorésistivité dans le cas du métal, matériau qui forme les jauges de contrainte des capteurs élaborés durant cette thèse.

1. Définition de la piézorésistivité:

La piézorésistivité est la variation de la résistivité électrique d'un matériau sous l'effet de sollicitation mécanique.

La résistance d'un corps parallélépipédique de section S et de longueur L et de résistivité ρ peut se définir de la façon suivante:

$$R = \rho \cdot \frac{L}{S} = \rho \cdot \frac{L}{l \cdot e} \quad (C.1)$$

Où :

- l et e sont respectivement la largeur et l'épaisseur

La piézorésistivité est caractérisée par des coefficients piézorésistifs π , des facteurs de jauge G et par la contrainte σ d'où:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \pi \cdot \sigma \quad (C.2)$$

Et:

$$\frac{\Delta R}{R} = G \frac{\Delta L}{L} \quad (C.3)$$

1.1. Facteur de Jauge Longitudinal G_l :

C'est le cas d'une contrainte σ_l uniaxiale c'est-à-dire selon l'axe de la longueur du barreau semiconductor comme indiqué sur la figure ci-dessous :

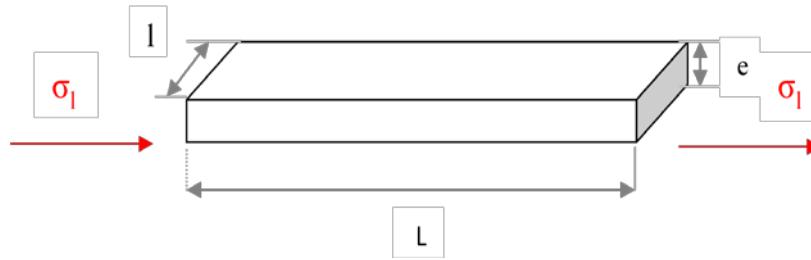


Figure D.1: barreau semiconductor soumis à une contrainte longitudinale.

La dérivation de (C.1) donne:

$$\left(\frac{dR}{R}\right)_l = \left(\frac{d\rho}{\rho}\right)_l + \frac{dL}{L} - \frac{dl}{l} - \frac{de}{de} \quad (C.4)$$

Où on définit:

$dL = \Delta L$, $dl = \Delta l$ et $de = \Delta e$, on trouve que:

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_l = \left(\frac{\Delta \rho}{\rho}\right)_l + \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta e}{de} \quad (C.5)$$

En faisant l'hypothèse que les variations relatives de la largeur et de l'épaisseur sont égaux, on aura:

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{\Delta e}{e} = -\nu \frac{\Delta L}{L} \quad (C.6)$$

Avec ν représente le coefficient de Poisson du matériau

Smith à remarquer que la variation de résistivité n'est plus uniquement égale aux variation des dimensions. Ses travaux sur des échantillons d'orientations cristallographiques différents ont montrés que la variation de la résistivité était proportionnelle à la contrainte appliquée. Il a ainsi établi la relation qui les lie dans le cas d'une contrainte σ_l , s'écrit:

$$\left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)_1 = \pi_1 \cdot \sigma_1 \quad (C.7)$$

Dans le domaine élastique, la loi de Hooke montre qu'il y a une proportionnalité entre la contrainte et la déformation qui en résulte; donc on peut écrire:

$$\sigma_1 = E \cdot \frac{\Delta L}{L} \quad (C.8)$$

Où E représente le module d'Young.

Remplaçant l'équation (C.8) dans l'équation (C.7), nous obtenons:

$$\left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)_1 = \pi_1 \cdot E \cdot \varepsilon_1 \quad (C.9)$$

Avec:

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta L}{L}$$

En insérant les équations (C.6) et (C.9) dans l'équation (C.5), nous obtenons :

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_1 = [\pi_1 \cdot E + (1 + 2\nu)] \cdot \varepsilon_1 \quad (C.10)$$

D'après l'équation (C.3) nous avons:

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_1 = G_1 \varepsilon_1 \quad (C.11)$$

Donc:

$$G_1 = [\pi_1 \cdot E + (1 + 2\nu)] \quad (C.12)$$

G_1 : Facteur de jauge longitudinal.

Comme le module d'Young et le coefficient de la piézorésistivité dépendent de l'orientation cristallographique, il est évident que le facteur de Jauge en dépendra également.

Remarque:

Le coefficient de Poisson du matériau prend, avec le module d'Young une valeur constante dans le cas où le matériau a des propriétés mécaniques isotropes

1.2.Facteur de Jauge Transversal G_t :

C'est le cas d'une contrainte σ_t uniaxiale c-à-d perpendiculaire à l'axe de la longueur du barreau semiconducteur comme indiqué sur la figure ci-dessous:

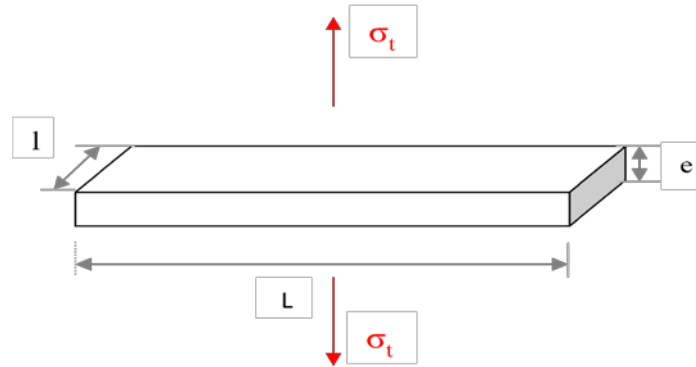


Figure D.2: barreau semiconducteur soumis à une contrainte transversale.

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_t = \left(\frac{\Delta \rho}{\rho}\right)_t + \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta e}{de} \quad (\text{C.13})$$

En faisant l'hypothèse que les variations relatives de la longueur et de l'épaisseur sont égaux, on aura:

$$\frac{dL}{L} = \frac{\Delta e}{e} = -\nu \frac{\Delta l}{l} \quad (\text{C.14})$$

$$\left(\frac{\Delta \rho}{\rho}\right)_t = \pi_t \cdot \sigma_t \quad (\text{C.15})$$

$$\sigma_t = E \cdot \frac{\Delta l}{l} \quad (\text{C.16})$$

Nous obtenons :

$$\left(\frac{\Delta \rho}{\rho}\right)_t = \pi_t \cdot E \cdot \frac{\Delta l}{l} \quad (\text{C.17})$$

En insérant les équations (C.6) et (C.9) dans l'équation (C.5); nous obtenons:

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_t = [\pi_t \cdot E - 1] \frac{\Delta l}{l} \quad (\text{C.18})$$

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_t = G_t \frac{\Delta l}{l} \quad (\text{C.19})$$

Donc:

$$G_t = (\pi_t \cdot E - 1) \quad (\text{C.20})$$

G_t : Facteur de jauge transversal.

La variation relative de la résistance électrique peut être décomposée en la somme de deux termes, l'un associé aux contraintes longitudinales et l'autre aux contraintes transversales :

$$\frac{\Delta R}{R} = \left(\frac{\Delta R}{R}\right)_l + \left(\frac{\Delta R}{R}\right)_t = G_l \varepsilon_l + G_t \frac{\Delta l}{l} \quad (\text{C.21})$$

S'ajoutant au facteur de jauge G_l et G_t caractérisant les jauges piézorésistives, le Coefficient de Température de la Résistance CTR et le Coefficient de Température du Facteur de Jauge CTFG sont des caractéristiques importantes de la jauge que l'on cherche à minimiser. Le CTR est défini (sous déformation ε nulle), par [129] :

$$CTR = \frac{R(T) - R(T_0)}{\Delta T \cdot R(T_0)} \quad (\text{C.22})$$

Où T_0 est la température initiale de la résistance et $\Delta T = T - T_0$.

De la même façon, le CTFG est défini comme le changement avec la température de la sensibilité de la jauge vis-à-vis de la déformation et il sera exprimé par :

$$CTFG = \frac{G_F(T) - G_F(T_0)}{\Delta T \cdot G_F(T_0)} \quad (\text{C.23})$$

Une compensation des effets de la température sur la résistance de la jauge et son facteur de jauge est classiquement effectuée en utilisant un pont de Wheatstone (**Figure D.3**) dans lequel sont intégrées les jauges. Grâce à ce type de montage la variation relative de résistance est transformée en une tension proportionnelle à cette dernière.

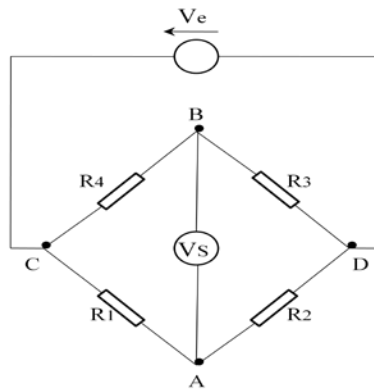


Figure D.3: Schéma de principe d'un pont de Wheatstone

2. Les jauges métalliques:

La résistivité de la plupart des métaux décroît quand la pression à laquelle ils sont soumis augmente. En fait, c'est la diminution du volume et donc des distances interatomiques, entraînée par la pression qui est à l'origine de la décroissance de ρ . En effet, la résistivité du métal est due, en particulier, à la diffusion des électrons libres par les atomes du réseau. La probabilité de diffusion est d'autant plus élevée que l'amplitude des oscillations des atomes est grande. Une réduction de la maille du réseau cristallin, en rapprochant les atomes, entraîne un accroissement de leurs forces de liaison et par conséquent une diminution de l'amplitude de leurs oscillations ; la probabilité de diffusion des électrons libres diminuant, il en est de même de la résistivité [130].

Le facteur de jauge G_f varie autour 2 pour les métaux « ordinaires » (métaux purs ou alliages). Quelques exceptions peuvent cependant être rencontrées, pour le platine ($G_f=4,8$) et les métaux ferromagnétiques ($G_f=-12$) qui présentent aussi une grande sensibilité à la température. Des exemples de facteurs de jauge obtenus pour différents alliages sont donnés tableau D.1.

Alliage	Composition	Facteur de jauge
Constantan	45% Ni, 55% Cu	2,1
Isoélastique	52% Fe, 36% Ni, 8% Cr, 4% (Mn, Mo)	3,5
Karma	74% Ni, 20% Cr, 3% Cu, 3% Fe	2,1
Nichrome V	80% Ni, 20% Cr	2,5
Platine - Tungstène	92% Pt, 8% W	4,1

Tableau D.1: Caractéristiques d'alliage pour jauges métalliques [5]

Dans le cas des capteurs micro-usinés ou issus des procédés de fabrication de microsystèmes, la taille des systèmes ne permet pas le report de jauge par collage ou toute autre méthode d'assemblage. Les jauges de déformation sont alors fabriquées directement sur des structures mécaniques telles que des membranes ou des micropoutres. Les piézorésistances métalliques, par exemple, sont déposées par évaporation ou pulvérisation puis structurées par photolithographie.

- [1] **J.L. Gaumet, F. Joyet**, « L'observation in situ en altitude », La météorologie, Vol. n° 39, p. 57-p.64, novembre 2002.
- [2] **D.Garin, Q.Goujon , F. Joyet, M. Errami**, « Mini station météorologique et étude des facteurs prévisionnels », Bulletin de l'Union des physiciens, France, ISSN 0366-3876, N° 887, p.1231- p. 1242, 2006..
- [3] **L. Souteyrat, S. Esnault et J.P. Joli**, « d'Initiation Aéronautique », Cours du Brevet, 2013
- [4] **Vincent Luyet**, « Station météo », livre, Février 2010.
- [5] www.meteole.net.
- [6] www.globe-swiss.ch
- [7] Olivier Traullé, « 3 Météos à DDU », Météo France, 08/02/2914.
- [8] <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Ballon-sonde&oldid=100393788>,
- [9] **Rochas M. et M. Lagadec**, « La radiosonde a 65 ans », La Météorologie 8e série , vol. n° 6, p.68-p.74, 1994.
- [10] Organisation météorologique mondiale, « Ballon météorologique, Sondage par ballon captif, Ballon cerf-volant, Ballon tétraédrique », sur Eumetcal , 2013
- [11] **Angell, D. H. Pack**, « Analysis of low-level Constant Volume Ballon (Tetroon) Flights from Wallops Island », Journal of Atmospheric Sciences, AMS, ISSN 1520-0469, vol. 19, n° 1, janvier 1962.
- [12]**W.F. Dabberdt, R. Shellhorn, H. Cole, A. Paukkunen, J. Horhammer and Antikainen**, « Radiosondes », Elsevier, p.1900-P.1913, 2003.
- [13] **S. Annane**, « Conception d'un microcapteur de pression, humidité et temperature en technologie MEMS », thèse de doctorat, Université de Tizi-Ouzou, 2011.
- [14] **Samaun, K. D. Wise et J.B. Angell**, « An IC piezoresistive pressure sensor for biomedical instrumentation », IEEE transactions on biomedical engineering, 2009.
- [15] **W.D. Frobenus, A.C. Sanderson et H. C. Nathanson**, «A microminiature solid-state capacitive blood pressure transducer with improved sensivity», IEEE transactions on biomecial engineering, Vol. BME-20, n °7, p. 312, 1973.
- [16] **N. Benmoussa**, « Conception, modélisation et réalisation d'un capteur de pression Capacitif microélectronique » Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse, Juillet 1985.
- [17] **S.K. Clark, K.D. Wise**, « Pressure sensivity in anisotropically etched diaphragm pressure sensors », IEEE transactions on electron devices, vol. n° 12, p. 1887, 1979.
- [18] **KI. Won Lee et Kensall D. Wise Sensim**, « A simulation program for solid-state pressure sensors », IEEE transactions on electron devices, vol n° 1, p. 34, 1982.

[19] **Young, S. Les et Kensall D. Wise**, « A batch-fabrication silicon capacitive pressure transducer with low temperature sensivity », IEEE transactions on electron devices, vol n° 1, p. 42, 1982.

[20] **Martin Viens**, « Performances des capteurs & Mesure de température », cours n° 2, MEC-743, Département de génie mécanique, 1999.

[21] **Maurice. R.**, « Contribution à la méthodologie de conception système : Application à la réalisation d'un microsysteme multicapteur communicant pour le génie civil », thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Toulouse, 2005.

[22] **Benoit C.**, « Modélisation de fautes et conception en vue de test structurel des micros systèmes », thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Grenoble, 2001.

[23] **Patrick Abgrall**, « Microtechnologies polymères pour les laboratoires sur puces. Micro and nanotechnologies/Microelectronics », Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2006.

[24] **Manfred Klonz and Thomes Weimann**, « Accurate Thin Film Multijunction Thermal Converter on a Silicon Chip », IEEE Transaction on instrumentation and measurement , vol 38, N°2, April 1989.

[25] **J.W Gardner and al.** , « Integrated array sensor for detecting organic solvent », Sensor and actuators B 26-27, p.135-139, 1995.

[26] **Yan Weiping and al.**, « EPMA and XRD study on nickel metal thin film for temperature sensor», Sensors and Actuators A , 2006.

[27] **Hamoi. R.**, «Contribution à une plate-forme d'aide à la conception de micro système», thèse de doctorat, Institut national de science appliquées de Lyon, 2009.

[28] **L. Schöler and al.**, «Monolithically integrated micro flow sensor for lab-on-chip applications », Microelectronic Engineering, p.164–p.170, 2005.

[29] **J. Courbat and al.**, « Reliability improvement of suspended platinum-based micro-heating elements », Sensors and Actuators A 142, p.284–p. 291, 2008.

[30] **R.M. Tiggelaar and al**, « Fabrication of a high-temperature microreactor with integrated heater and sensor patterns on an ultrathin silicon membrane », Sensors and Actuators A 119 ,p.196–p.205, 2005.

[31] **Ph. Menini and al.**, « High performances of new microhotplate for gas sensors », Eurosensors, 2008.

[32] **Stephanie Bell**,« A beginner's guide to humidity measurement », NPL(National Physical Laboratory) Management Ltd-Internal, October 2011.

[33] **S. Kouda**, « Conception D'un Capteur D'Humidité Intelligent ». Magister en Microélectronique à L'Université de Batna, 2009.

[34] www.MESURES.COM

[35] **Z. Zhao, M. Knight, S. Kumar, E. T. Eisenbraun, M.A. Carpenter**, « Humidity effects on Pd/Au-based all-optical hydrogen sensors ». *Sensors and Actuators B*, Vol. 129, Iss. 2, p.726-p.733, 2008.

[36] **J.M. Corres, F.J. Arregui, I.R. Matías**, « Sensitivity optimization of tapered optical fiber humidity sensors by means of tuning the thickness of nanostructured sensitive coatings ». *Sensors and Actuators B*, Vol. 122, Iss. 2, p. 442 - p.449, 2007.

[37] **R. Forke, D. Scheibner, K. Hiller, T. Gessner, W. Dötzel, J. Mehner**, « Fabrication and characterization of a force coupled sensor–actuator system for adjustable resonant low frequency vibration detection ». *Sensors and Actuators A*, Vol. 25, p.145-p.146, 2008.

[38] **L.M. Goncalves, J.G. Rocha, C. Couto, P. Alpuim, J.H. Correia**. « On-chip array of thermoelectric Peltier microcoolers ». *Sensors and Actuators A*, Vol. 75, 2008.

[39] **F. Pascal-Delannoy, B. Sorli, A. Boyer**. « Quartz crystal microbalance (QCM) used as humidity sensor ». *Sensors and Actuators A*, Vol. 84, Iss. 3, p.285-p.291, 2000.

[40] **N.T. Ha, D.K. An, P.V. Phong, P.T.M. Hoa, L.H. Mai**. « Study and performance of humidity sensor based on the mechanical-optoelectronic principle for the measurement and control of humidity in storehouses », *Sensors and actuators B*, Vol. 66, Iss. 1-3, p.200-p.202, 2000.

[41] **Ludurczak Willy**, « Capteur d'humidité en Si poreux pour la fiabilité des système in package », thèse de doctorat, Université de Bordeaux, Ecole doctorale des sciences physiques de l'ingénieur, 2008.

[42] **Pi Guey. S et al.**, « A micromachined resistive type humidity sensor with a composite materials as sensitive film », *Sensors and Actuators B* 113, p.837p.842, 2006.

[43] **Z. Rittersma et al.**, « Anovel surface micromachined capacitive porous silicon humidity sensor », *Sensors and Actuators, B* 68, p.210-p.217, 2000.

[44] **Y. Ming et al.**, « Cobalt oxide nanosheet humidity sensor integrated with circuit on chip », *Microelectronic Engineering*, 2011.

[45] **Z.M. Rittersma, A. Splinter, A. Bödecker, W. Benecke**, « A novel surface micro-machined capacitive porous silicon humidity sensor ». *Sensors and Actuators B*, Vol. 68, Iss. 1-3, p.210-p.217, 2000.

[46] **R. Igreja, C.J. Dias**, « Analytical evaluation of the interdigital electrodes capacitance for a multi-layered structure », *Sensors and Actuators A*, Vol. 112, p.291-p.301, 2004.

- [47] **Nouredine Zouzoy**, « Etude de la mobilité moléculaire du PEN destiné à la fabrication des condensateurs : influence de la microstructure », thèse de doctorat, l'université Paul Sabatier, 2002.
- [48] **Mouatsi Abdelmalek**, « Etude de l'effet de l'humidité sur les propriétés électriques de la surface d'un polymère », mémoire de Magister, université Mentouri de Constantine, 2011 ;
- [49] **Benoît Torbiero**, « Développement de microcapteurs électrochimiques pour l'analyse en phase liquide », thèse de Doctorat de l'institut national des sciences appliquées de Toulouse, 2006.
- [50] **H. Ben Romdhane**, Cours optionnel pour les étudiants de deuxième année de maîtrise de département de chimie faculté des sciences de Tunis.
- [51] « Eau » Un article de Wikipédia, l'encyclopédie libre, 2007. De la licence de documentation libre GNU (GFDL). Récupérée de http://fr.wikipedia.org/wiki/Matière_plastique.
- [52] **M. Grégory**, « Absorption de l'eau par les polymères », thèse de doctorat de l'université de Savoie, Avril 2009
- [53] **M. Grégory**, « Absorption de l'eau par les polymères », thèse de doctorat, université de Savoie, 2009.
- [54] **P. Sung et al.**, « CMOS Humidity Sensor System Using Carbon Nitride Film as sensing Materials », *Sensors and Actuators*, Vol. 8, p.2662-p.2672, 2008.
- [55] **D. Soren**, « MemS multi sensor for use in green house », mémoire de magister, MIC – Department of Micro and Nanotechnology DTU- Technical University of Denmark, 2006.
- [56] **Samir Zemat**, « Etude des propriétés électriques d'un matériau polyimide à haute température : application à la carbure de silicium », thèse de doctorat, université de Toulouse III-Paul Sabatier, 2006
- [57] « principales caractéristiques KAPTON Du Pont de Nemours pour son film polyimide », de l'OSHA (Occupational Safety and Health), 29 CFR 1910-1000 ; Imprimer en Suisse H-38492-1
- [58] **Benoît DIDIER**, « Synthèse d'un matériau hybride polyimide /Silice : Etude structure propriétés », thèse de doctorat, CNRS Université de Savoie, 2005
- [59] **A. Bellel**, « traitement de surface de polymères par décharge couronne et plasma », thèse de doctorat, université Mentouri, Constantine, 2004.
- [60] « Polyimides (PI) ». Information sur matériaux de : <http://www.Goodfellow.com>.
- [61] **H. Johari**, « Development of MEMS Sensors for Measurements of Pressure, Relative Humidity, and Temperature », Thesis of Worcester Polytechnic Institute in partial fulfillment of requirements for the Degree of Master of Science in Mechanical Engineering, April 2003
- [62] **Randy Frank**, « Understanding Smart Sensors ». Livre, 2nd ed. Artech House Boston, London, 2000.

- [63] **H. Chalabi**, « Conception et réalisation d'une plate-forme multi capteur de gaz conductimétriques vers le nez électronique intégré », thèse de doctorat, université de Paul Cézanne-Aix-Marseille III, 2007.
- [64] **S. Timoshenko & J.N. Goodier**, « Theory of elasticity », Second edition, Mc Graw Hill, 1951.
- [65] **S. P. Timoshenko & S. Woinowsky-Krieger**, « Theory of plates and shells, Mc Graw Hill », 1982.
- [66] **C. S. Sander, J.W. Knutti and J.D. Meindel**, « A monolithic capacitive pressure sensor with pulse –period out put », IEEE transaction on electron devices; ED 27 (5): 927,1980.
- [67] **J.J. Wortmans, R.A. Evans**, « Young's modulus, Shear modulus and Poisson's ratio in Silicon and Germanium ». Journal of Applied Physics, Vol 36, n° 1, p.153, 1996.
- [68] **A. Boukabache**, « Conception, Modélisation Et Réalisation d'un Capteur de Pression Piézorésistif à faible dérive thermique », Thèse de doctorat, Laboratoire d'analyse et d'architecture des systèmes du CNRS, 1993.
- [69] **J.F. NYE**, « Propriétés physiques des cristaux », Dunod, Paris, 1961.
- [70] **S. Hunter Christie**, «The Bakerian Lecture: Experimental Determination of the Laws of Magneto-electric Induction in different masses of the same metal, and its intensity in different metals. », Philosophical Transactions of the Royal Society of London, vol. 123, 2002.
- [71] **C. Wheatstone**, « The Bakerian Lecture: An Account of Several New Instruments and Processes for Determining the Constants of a Voltaic Circuit », Philosophical Transactions of the Royal Society of London, vol. 133, 1843, pp. 303-327, 1999.
- [72] **E. Simmons**, « A. Ruge, Electrical weighing » , Proceedings of the Institute of Electrical Engineers 97, part 1, pp. 88-111, 1950 .
- [73] **P. Cheng et al.**, « An Advantageous Fabrication Technology to Integrate Pressure Sensor into multi Sensor for micro weather station », Proceedings of the 2009 4th IEEE international conference on nano micro engineered and molecular systems January 5-8 Shenzhen, china, 2009.
- [74] **N. Yoboue**, « Etude technologique pour l'amélioration des performances d'un capteur de gaz à oxyde métallique : Développement d'une plateforme chauffante haute température et intégration de couche sensible nanostructurée », Thèse de doctorat, Université de Toulouse III- Paul Sabatier, 2010.
- [75] **J. L. Gaumet**, « L'observation in situ en altitude, les activités opérationnelles de Météo-France », La météorologie – n° 39, pp.57-64, novembre 2002.

- [76] **A.WEXLER**, « Vapor pressure formulation for water in range 0 to 100° C », Journal of Research of the National Bureau of Standards A., Physics and Chemistry. Vol. 80 A, no 5 et 6, p. 775 à 785, sept., décembre 1976.
- [77] **D. SONNTAG**, « Vapor pressure Formulations based on the ITS-90 and psychrometer formulate – Important new values of the physical constants of 1986 », Z Meteorologie 70, p.340-p.344, 1990.
- [78] **R.Karthick, Dr.SP.K.Babu, AR.Abirami, S.Kalainila**, « Design of High Sensitivity and Fast Response MEMS Capacitive Humidity Sensor using COMSOL Multiphysics », Excerpt from the proceedings of the 2011 COMSOL Conference in Bangalore, 2011
- [79] **A. Tetelin, C. Pellet, M. de Matos, and V. Conedera**, « Computer-aided response time optimization of capacitive humidity sensor », in Proc. 3rd IEEE Sensor Conf., Vienna, Austria, pp. 111-114, Oct. 24-27, 2004.
- [80] **W. R. Vieth**, « Diffusion in and through polymers », Munich, Germany: Carl Hanser, 1991.
- [81] **D. D. Denton, J. B. Camou and S. D. Senturia**, « Effects of the moisture uptake on the dielectric permittivity of polyimide films », Proc. 4th Int. Conf. Solid-State Sensors and Actuators. Philadelphia, PA, Juin 1985.
- [82] **J. Fraden**, « Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications », Advanced Monitors Corporation, San Diego, California, 92121 3rd ed, 2004.
- [83] **I. Milpitasws**, « Conditioner Circuit, Appl. Handbook, Linear Technology », 1990.
- [84] **L. Anders, N. Johan**, « Fabrication and Characterization of a Humidity and Temperature Multi Sensor », mémoire de Magister, MIC- Departement of Micro and Nanotechnology DTU – Technical University of Denmark, 2007.
- [85] **L. Scholer et al.** « Monolithically integrated micro flow sensor for lab-on-chip applications Microelectronic », Microelectronic Engineering 78-79, p.164-p.170, 2005.
- [86] **M. Bertrand**, « Conception, réalisation et mise en oeuvre d'une plateforme d'instrumentation thermique pour des applications microfluidiques », thèse de Doctorat, Université de Paul Sabatier de Toulouse, 2009.
- [87] **Q. Wenmin**, « A thin-film sensing element for ozone, humidity and temperature », Sensors and Actuators, B-64-42-48, 2000
- [88] **Paolo Martins**, « Caractérisation mécanique des matériaux pour les micro/nanosystèmes Procédés applicables aux épaisseurs submicroniques », thèse de doctorat de l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Janvier 2009.
- [89] **J.F. Imbert**, « Analyse des structures par éléments finis », Toulouse : Cépaduès, 1991

- [90] **M. Lemaire, J. M. Reynouard, J. Kestens, G. Warzee et I. Cormeau**, « Introduction à la méthode des éléments finis », Notes de cours rédigées en collaboration entre l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon et l'Université Libre de Bruxelles à l'initiative des communautés Européennes, 2007
- [91] Comsol Multiphysics User's guide Version 3.5a, Novembre 2008.
- [92] **N. Saad**, « Caractérisation des ondes acoustiques des surfaces fonctionnalisées », Thèse de doctorat de l'université de Valenciennes et du Hainaut- Cambresis, Septembre 2012.
- [93] **H.Bensaidane**, « Modélisation de systèmes micro-électromécaniques (mems) en régime dynamique par la méthode des éléments finis », thèse de Master, Université Mouloud Mammeri, 2006.
- [94] **Shuang Chen , Ming-quan Zhu, Bing-he Ma, Wei-zheng Yuan**, « **Design and Optimization of a Micro Piezoresistive Pressure Sensor** », Proceedings of the 3rd IEEE Int. Conf. on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems, p.6-p.9, China, Janvier 2008,
- [95] **C.Malhaire**, « Caractérisation et modélisation de microtransducteurs de pression à haute performances intégrés sur Silicium », thèse de doctorat, INSA de Lyon, 1998.
- [96] **M.L. Roukes**, « Nanoelectromechanical Systems, presented at solid state », published in « Technical Digest of the 2000 Solid State Sensor and Actuator Workshop, Hilton Head Island, South Carolina, USA, 2000.
- [97] **T. Pancewicz, R. Jachowicz' , Z.Gniazdowski, Z.Azgin, P. Kowalski**, « The empirical verification of the FEM model of semiconductor pressure sensor », Sensors and Actuators A: Physical, V 76, Issues 1–3, P 260–265, Aout 1999.
- [98] **G. Adolfo, A. Rodriguez**, « Conception, simulation et réalisation d'un micro-actionneur à base de matériau énergétique pour l'actionnement microfluidique », thèse de doctorat, Université de Toulouse III-Paul Sabatier, Janvier 2008.
- [99] **M. Baroncini, P. Placidi, G.C. Cardinali et A. Scorzoni**, « Thermal Characterization of a microheater for micromachined gaz sensors », www.sciencedirect.com, Septembre 2004.
- [100] **David Jugieu**, « Conception et réalisation d'une matrice de microéjecteur thermique adressable individuellement pour la fonctionnalisation de biopuce », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique, Toulouse, mars 2005.
- [101] **S. Sinha, S. Roy et C.K. Sarkar**, « Design & Electro-Thermal Analysis of Microheater for Low Temperature MEMS based Gas Sensor », Proceedings published by International Journal of Computer Applications (IJCA), International Symposium on Devices MEMS, Intelligent Systems & Communication (ISDMISC) ,2011

- [102] **R.Karthick, .S.Babu, A.Abirami, S.Kalainila**, « Design of High Sensitivity and Fast Response MEMS Capacitive Humidity Sensor using COMSOL Multiphysics », Proceeding of the COMSOL Conference in Bangalore, 2011.
- [103] **Benoit. C**, « Modélisation de fautes et conception en vue de test structurel des microsystèmes », thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Grenoble, 2001.
- [104] **M.Saadaoui**, « Optimisation des circuits passifs micro-ondes suspendus sur membrane diélectrique », Université Paul Sabatier de Toulouse, 2005.
- [105] **H. Anne**, « Modélisation à l'échelle atomique des premiers stades de l'oxydation du silicium : Théorie de Fonctionnelle de la Densité et Monte Carlo Cinétique », thèse de doctorat, Université de Toulouse III-Paul Sabatier, 2008.
- [106] <http://microelectronique.univ-rennes1.fr>.
- [107] **X. Jingbo et al.**, « A monolithic silicon multi-sensor for measuring three-axis acceleration, pressure and temperature », Journal of Mechanical Science and Technology, V 22, p.731-p.739, 2008.
- [108] **F. Tounsi**, « Microphone électrodynamique MEMS en technologie CMOS : étude, modélisation et réalisation », thèse de doctorat, Institut Polytechnique de Grenoble, 2010.
- [109] **P. Temple**, « Développement des matériaux dans le cadre des microtechnologies », thèse de doctorat, Architecture des systèmes du C.N.R.S, 2004.
- [110] <http://microelectronique.univ-rennes.fr>.
- [111] **C. Tahanout**, « Etude et Simulation électrothermique d'un micro capteur de gaz à base d'oxyde semi-conducteur », thèse de magister, Université M'Hamed Bougara-Boumerdes, 2010.
- [112] **Y.H. Lee & M.R. Polcari**, « Etching rates of chemically etched Silicon », EMIS Data reviews series, n°4, London & New York INSPEC, p.857, 1988.
- [113] **H. Seidel, L. Csepregi, A. Heuberger & H. Baumgartel**, « Anisotropic etching of crystalline Silicon in alkaline solutions », Journal of the Electromechanical Society, Vol.137, n°11, p.3612, 1990.
- [114] **K. Bean**, « Anisotropic etching of Silicon », IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 25, n°10, p.1185, 1978.
- [115] **R. Otmani**, « Etude et conception d'un micro capteur de pression piézorésistif à base de silicium monocristallin », mémoire de Magister, Université de Tlemcen, janvier 2009.

- [116] **C. Plantie**, « Etude de faisabilité de capteurs de pression piézorésistifs à jauges en Silicium polycristallin », Thèse de doctorat, Laboratoire d'automatique et d'analyse des systèmes du CNRS, 1992.
- [117] **S. Bouguima**, « Etude et conception d'un micro capteur de pression capacitif », Mémoire de magistère, Université de Tlemcen, 2006.
- [118] **C. Henri**, « Contribution à la conception et la réalisation de microsystèmes électrostatistiques », Habilitation à diriger des recherches, LAAS/CNRS de Toulouse, 2005.
- [119] **H. Hallil**, « Conception et réalisation d'un nouveau capteur de gaz passif communicant à transduction RF », thèse de Doctorat, Université de Toulouse, 2010.
- [120] **F. Mailly**, « Anemometer with hot platinum thin film », Sensors and Actuators, A-94, p32-38, 2001.
- [121] **Q. Wenmin**, « Thin-film sensing element for ozone, humidity and temperature », Sensors and Actuators, B-64, p 42-p.48, 2000.
- [122] **B. Kaghouché**, « Etude par TCAD-SILVACO d'une structure MOS pour la réalisation de capteur ISFET : Paramètres technologique et électriques », mémoire de Magister en électronique, Université Mentouri – Constantine, Mai 2010.
- [123] **W. Grabinski et al.**, « Transistor level modeling for analog/RF IC design », Springer, p.38-p.49, 2006
- [124] **H. Michael**, « Modeling of Operating temperature performance of triple junction solar cells using Silvaco's ATLAS », Naval School California, 2007.
- [125] **I. Burciu**, « Architecture de récepteurs radiofréquences dédiés au traitement bande simultanée », Thèse de doctorat de l'Ecole Doctorale Electronique, Electrotechnique, Automatique, Mai 2010
- [126] **F. Gretillat, M.A. Gretillat, and N.F. de Rooij**, « Improved design of a silicon micromachined gyroscope with piezoresistive detection and electromagnetic excitation », Journal of Microelectromechanical Systems, 8:p.243–p.250, 1999.
- [127] **S. Sugiyama, M. Takigawa, and I. Igarashi**, « Integrated piezoresistive pressure sensor with both voltage and frequency output », Sensors and Actuators A, 4,p.113–p.120, 1983.
- [128] **B.J. Kane, M.R. Cutkosky, and T.A. Kovacs**, « A traction stress sensor array for use in high-resolution robotic tactile imaging », Journal of Microelectromechanical Systems, p.425–p.434, 2000.

[129] **R. Lakhmi**, « Etude de micropoutres sérigraphiées pour des applications capteurs », thèse de doctorat en électronique de l'université de Bordeaux I, Ecole doctorale de science physique et de l'ingénieur, Février 2012.

[130] **G. Asch**, « Les capteurs en instrumentation industrielle » DUNOD, p.395–p.426 ; ed n°8,1999.

Résumé :

La microsonde météorologique est un dispositif, emporté par un ballon qui mesure le profil vertical des variables météorologiques et transmet les données à un récepteur au sol et une station de traitement. Ces profils sont généralement obtenus deux fois par jour et sont le noyau du système d'observation météorologique mondial qui fournit des intrants aux modèles de prévision numérique. Les capteurs constituant la microsonde mesurent systématiquement la variation avec l'altitude de la température, de l'humidité et de la pression lorsque le ballon monte de la surface de la terre ou de l'océan à des hauteurs jusqu'à environ 30km. L'objectif de cette thèse est la conception et la modélisation d'une microsonde météorologiques en utilisant la technologie MEMS. Après un état de l'art sur les paramètres météorologiques et différents types de détecteurs MEMS utilisés pour la mesure de la pression, la température et l'humidité, nous avons retenu des techniques compatibles avec la simplicité du processus de fabrication. Ces techniques sont les suivantes: la détection piézorésistive pour le capteur de pression, la détection résistive pour le capteur de température et la détection capacitive pour le capteur d'humidité. Le chapitre suivant est consacré à la modélisation des trois capteurs constituant la sonde météorologique. Dans le quatrième chapitre, nous avons utilisé une analyse par éléments finis sous le logiciel COMSOL. L'aspect le plus important de cette analyse est d'obtenir la réponse des trois capteurs de la sonde. Enfin, le cinquième chapitre décrit les principales étapes technologiques à la fabrication de la structure contenant les trois capteurs.

Mots clés : Microsonde météorologique, atmosphère, Capteur, Pression, température, humidité, MEMS

Abstract:

The meteorological microsonde is a device carried away by a balloon which measures the vertical profile of meteorological variables and transmits the data to a groundbased receiving and processing station. These profiles are typically obtained twice each day and are the core of the global weather observing system that provides inputs to numerical forecast models. The microsonde sensors routinely measures the variation with altitude of temperature, humidity, and pressure as the balloon ascends from the land or ocean surface to heights up to about 30km. The objective of this thesis is the design and modeling of meteorological microsonde using the MEMS technology. After the art's state on the meteorological parameters and various types of MEMS transductions used for the measurement of pressure, temperature and humidity, we retained compatible techniques to simplify the whole process. These techniques are: the piezoresistive transduction for pressure sensor, the resistive transduction for temperature sensor and capacitive transduction for humidity sensor. The next chapter is devoted to the modeling of the three sensors of meteorological probe. In the fourth chapter, we use a finite element analysis with software COMSOL. The most important aspect of this analysis is to get a response of the three probesensors. Lastly, the fifth chapter describes the essentials technological steps with the manufacture of the structure containing the three sensors.

Key words: meteorological microsonde, atmosphere, Sensor, Pressure, Temperature, humidity, MEMS

الملخص :

جهاز مسبار الأرصاد الجوية هو جهاز يحمله البالون الذي يقيس بيانات متغيرات الطقس وتنقل البيانات إلى جهاز استقبال أرضي ومحطة للمعالجة. ويتم الحصول على هذه البيانات عموماً مرتين يومياً وهي أساس نظام الرصد الجوي العالمي التي توفر مدخلات لنماذج التنبؤ الرقمي بالطقس. تقيس أجهزة الاستشعار للمسبار بانتظام تغير درجة الحرارة الرطوبة والضغط مع الارتفاع عندما يصعد البالون من سطح الأرض أو في المحيطات على ارتفاعات تصل إلى حوالي 30 كم. في هذا السياق الهدف من هذه الأطروحة هو تصميم ووضع نموذج استشعار الأرصاد الجوية باستخدام تكنولوجيا ميمز (MEMS). بعد بحث أحدث مراجع على ثوابت الأرصاد الجوية ومختلف أنواع الميمز (MEMS) وتطبيقاتها المستعملة لقياس الضغط ودرجة الحرارة والرطوبة، قد اخترنا تقنيات متوافقة مع تبسيط عملية الصناعة. هذه التقنيات هي كالاتي: التقنية البيوزيريزيستيفية لاستشعار الضغط، التقنية المقاومة لاستشعار درجة الحرارة و التقنية السعوية لاستشعار الرطوبة. الفصل الموالي يختص بدراسة أجهزة الاستشعار الثلاثة المكونة للمسبار. في الفصل الرابع، استخدمنا التحليل للعناصر المحدودة مع برنامج Comsol. الجانب الأكثر أهمية من هذا التحليل هو الحصول على استجابة الأجهزة الثلاثة للاستشعار للمسبار. وأخيراً، يصف الفصل الخامس المراحل التكنولوجية المهمة لتصنيع الهيكل الذي يحتوي على أجهزة استشعار الثلاثة.

الكلمات المفتاحية : مسبار الأرصاد الجوية، الغلاف الجوي، جهاز الاستشعار، الضغط، درجة الحرارة، الرطوبة، الميمز

Publications :

- 1- N.MEDJAHD, N.BENMOUSSA, «3D Design and Simulation using Comsol of Platinum Piezoresistive Pressure Sensor ».European Journal of Science Research (EJSR). ISSN 1450-216X/1450-202X Vol. 131 N° 2. April 2015, pp. 163-169.
- 2- N.MEDJAHD, N.BENMOUSSA, « Modeling and Simulation of the Mechanical and Electrical Response of the Piezoresistive Force Sensor ».International Journal on Information Technology (IREIT). ISSN 2281-2911 Vol. 1 N° 4. July 2013, pp. 252-256.
- 3- N.MEDJAHD, N.BENMOUSSA, B.NENYOUCEF « Modeling, Simulation and Optimization of the Mechanical Response of a micromechanical Silicon Cantilever : Application to Piezoresistive Force Sensor ». ScienceDirect. Physics Procedia 55. 2014, pp. 348-355. Elsevier
- 4- N.MEDJAHD, N.BENMOUSSA, « Modeling and Simulation Using Finite Element Method of MEMS Based Micro Pressure Sensor ».IEEE. 978-1-4799-6503, 2014.
- 5- A.BENICHOU, N.MEDJAHD, N.BENMOUSSA, «A Monolithic Triaxial Piezoresistive Accelerometer with Uniform Axial Sensivities IEEE. 978-1-4799-6503, 2014.
- 6- N.BENMOUSSA, A.BENICHOU, N.MEDJAHD, K.RAHMOUN, «Modeling and Optimization of a Capacitive Humidity Sensor Response in MEMS Technology». IEEE. 978-1-4799-6503, 2014.

Communications :

- 1- N.MEDJAHD, N.BENMOUSSA, B.NENYOUCEF « Modeling, Simulation and Optimization of the Mechanical Response of a micromechanical Silicon Cantilever : Application to Piezoresistive Force Sensor ». 8^{ème} Conférence Internationale sur les Sciences de la Matière (CSM8-IMS5). Beyrouth-Liban du 28 au 30 Mai 2012.
- 2- N.MEDJAHD, N.BENMOUSSA, « Modeling of the Mechanical Response of Cantilever Beams ». Congrès International Conception et Modélisation des Systèmes Mécaniques (CMSM). Djerba - Tunisie du 25 au 27 Mars 2013. Djerba - Tunisie du 25 au 27 Mars 2013.
- 3- N.MEDJAHD, N.BENMOUSSA, B.BENYOUCEF « Dynamic and Vibration of Cantilever Beam Structure ». Congrès International Conception et Modélisation des Systèmes Mécaniques (CMSM). Djerba - Tunisie du 25 au 27 Mars 2013. Djerba - Tunisie du 25 au 27 Mars 2013.
- 4- N.MEDJAHD, N.BENMOUSSA, « Modeling and Simulation Using Finite Element Method of MEMS Based Micro Pressure Sensor ». Firth North African Workshop on Dielectrique Materials for Photovoltaic Systems. Tlemcen, Algeria, 26-27 October 2014.
- 5- A.BENICHOU, N.MEDJAHD, N.BENMOUSSA, «A Monolithic Triaxial Piezoresistive Accelerometer with Uniform Axial Sensivities». Firth North African Workshop on Dielectrique Materials for Photovoltaic Systems. Tlemcen, Algeria, 26-27 October 2014.

-
- 6- N.BENMOUSSA, A.BENICHOU, N.MEDJAHD, K.RAHMOUN, «Modeling and Optimization of a Capacitive Humidity Sensor Response in MEMS Technology». Firth North African Workshop on Dielectrique Materials for Photovoltaic Systems. Tlemcen, Algeria, 26-27 October 2014.

Stage :

Au sein du laboratoire de l'école de Génie à l'Université Autonome de Barcelone (UAB).