

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
جامعة سعد دحلب البليدة
UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA 1



كلية العلوم – دائرة الفيزياء
Faculté des Sciences
Département de Physique

MEMOIRE
POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME DE
MASTER EN PHYSIQUE

Option : Physique Appliquée aux Microsystèmes

THÈME

Etude d'un capteur de microparticules aérosol à masse
résonnante pour l'analyse de la qualité de l'air

Par

BOUGHERIRA Hichem et BELGOTT Mohammed El-Amine

Devant le jury composé de :

A. AMRANE	MAA,	Université Blida1	Président
A. HASSEIN-BEY	MCB,	Université Blida1	Examineur
A. BENHAFFAF	MAA,	Université Blida1	Promoteur
N. BELGROUNE	Université Blida1	Co-Promoteur

Blida, Juin 2016

MA-530-77-1

Remerciements

Nous remercions tous d'abord, Dieu tout puissant de nous avoir donné santé et volonté

Pour réaliser ce mémoire.

Ce travail a été initié, au département de physique faculté de science, université SaadDahleb-Blida.

*En premier lieu, nous tenons à exprimer toute notre reconnaissance et notre gratitude à Monsieur **HASSEIN BEY Abd El Kader** merci d'accepter nos meilleurs sentiments et nos sincères remerciements pour votre contribution et votre aide permanent durant le déroulement de ce travail.*

*Nous tenons à remercier vivement et respectueusement monsieur **M.BENHAFFAF Abderrahmane**, pour sa bienveillance et d'avoir contribué à la réalisation de ce projet en nous encadrant durant les différentes étapes de réalisation de ce projet d'étude.*

Nous tenons à remercier chaleureusement nos parents et tous nos amis pour leurs collaborations

Ainsi qu'à toute personne qui nous a aidé de près ou de loin à réaliser ce modeste travail.

M.BELGOTT

H.BOUGHERIRA

Dédicaces

Nous dédions ce travail:

A nos parents

Les plus chers au monde

A nos frères et sœurs, à nos familles

A tous nos amis et collègues

A tous ceux qui nous ont aidé à finir ce

Mémoire.

H. Bougherira

M. Belgott

Résumé

Ce mémoire concerne l'étude et l'optimisation d'un capteur physique à base de micropoutre pour la détection des particules aérosol et l'analyse de la qualité d'air.

L'objectif de ce travail de master est de comprendre le principe de fonctionnement d'un capteur à masse résonante afin d'essayer de le modéliser analytiquement et le simuler pour optimiser la sensibilité de ce type de capteur.

Tout d'abord, une étude sur la fréquence de résonance de la micropoutre à été effectuée, ceci a permis de déterminer le décalage en fréquence causé par l'ajout des particules aérosol.

Dans une seconde partie, une simulation à été effectuée sur la micropoutre avec des particules aérosol ajoutées et avec l'influence des dimensions et la nature de matériaux constitue la micropoutre sur la sensibilité du capteur.

Abstract

This manuscript talk about mass sensor used a cantilever to detect aerosol particuls and analyzing the air quality.

The objective of this research work is to understand the function of a resonant mass sensor in an attempt to analytically modeled and simulated to optimize the sensitivity of this type of sensor.

First, a study on the resonant frequency of the cantilever has been made, this has help determined the frequency shift caused by the addition of the aerosol particles.

In the second part, a simulation was performed on the cantilever with added aerosol particles and simulates the influence of the size and the nature of materials composed on the sensitivity of the sensor.

ملخص

هذه المذكرة هي دراسة جهاز استشعار القائم على كشف الجسيمات الجوية الأرضية وتحليل نوعية الهواء. الهدف من هذا البحث هو فهم مبدأ عمل جهاز استشعار كتلة الرنانة في محاولة تحليليه ولمحاكاته لتحسين حساسية هذا النوع من أجهزة الاستشعار. في البدء دراسة عن ترددات التجاوب لعارضة صغيرة (مايكرو عارضة) مما يسمح بتحديد التغير الناجم عن إضافة كتلة الجسيمات الجوية الأرضية. في الجزء الثاني، تم إجراء محاكاة على مايكرو عارضة بجزيئات المضافة ودراسة تأثير أبعاد وطبيعة المواد التي تتألف منها العارضة على حساسية جهاز الاستشعار.

Sommaire

Sommaire

Liste des Figure	10
Liste des tableaux	12
Introduction générale	14
CHAPITRE I : La pollution atmosphérique et les microparticules aérosols	15
I.1. La pollution atmosphérique	16
I.1.1. Généralités	16
I.1.2 Pollution d'air.....	16
I.1.3. Principales sources de la pollution	17
I.2. Les microparticules aérosols	19
I.2.1 Généralités sur les microparticules aérosols.....	19
I.2.2.Définition d'un aérosol	20
I.2.3.Composition chimique d'aérosol	21
I.2.4.Conventions granulométriques.....	22
I.2.5.L'impact de particules aérosols sur la santé.....	23
I.3. Conclusion	24
CHAPITRE II : Généralités sur les microcapteurs résonants.....	25
II.1.Les Microsystems	26
II.1.1. Introduction	26
II.1.2. Qu'est-ce qu'un microsystème ?	26
II.1.3. Historique.....	27
II.1.4. Principaux phénomènes physiques exploités dans les MEMS.....	28
II.1.4.1. Propriété piézo-résistive.....	29
II.1.4.2. Propriété piézo-électrique.....	29
II.1.4.4. Propriété thermique	30
II.1.4.5. Propriété optique.....	30
II.1.4.7. Propriété électrostatique.....	31
II.1.5. Synthèse des différentes propriétés.....	32
II.2. Les capteurs résonants	33
II.2.1. Les capteurs	33
II.2.2. Les résonateurs MEMS.....	33
II.2.3. Mise en vibration	35
II.2.3.1. Différentes techniques d'actionnements	35
II.2.3.1.1. Actionnement piézoélectrique	36
II.2.3.1.2. Actionnement électromagnétique.....	36
II.2.3.1.3. Actionnement électrostatique.....	36
II.2.3.1.4. Actionnement thermoélectrique.....	37

Sommaire

II.2.3.2. Différentes techniques de détection	37
II.2.3.2.1. Détection piézorésistive.....	37
II.2.3.2.2. Détection capacitive.....	38
II.2.3.2.3. Détection piézoélectrique	39
II.3. Les capteurs à base de micro-poutres.....	39
II.3.1. Principe de transduction.....	40
II.3.2. Micropoutre fonctionnalisées	40
II.3.2.1. Régime statique.....	40
II.3.2.2. Régime dynamique	41
II.3.2.3. Actionnement de micropoutre	41
II.3.2.4. Principe de détection	42
II.3.2.5. Mesure de la fréquence de résonance	42
II.3.2.5.1. Balayage en fréquence.....	43
II.3.2.5.2. Oscillateur bouclé à micropoutres	43
II.4. Conclusion	44
Chapitre III: Les procédés de microfabrication de MEMS.....	45
III.1. Introduction.....	46
III.2. Les différentes techniques de microfabrication	46
III.2.1. Micro usinage de surface.....	47
III.2.1.1. Photolithographie.....	47
III.2.1.2. Le dépôt des couches.....	49
III.2.1.2.1. Dépôts chimiques en phase vapeur.....	50
III.2.1.2.2. Dépôts physiques en phase vapeur(PVD)	50
III.2.1.3. Gravure.....	51
III.2.1.3.1. Gravure humide.....	51
III.2.1.3.2. Gravure sèche.....	52
III.2.2. Micro usinage de volume.....	53
III.2.2.1. DRIE (Deep Reactive Ion Etching)	53
III.2.2.2. Micromoulage: HEXSIL	53
III.2.3. Procédé de fabrication LIGA.....	53
III.3. Réalisation de MEMS à structure micropoutre.....	54
III.3.1. Fabrication de Micropoutres à base silicium	55
III.3.1.1. Micro-usinage de volume	55
III.3.1.2. Micro-usinage de surface	56
III.3.2. Micropoutre à base de polymères.....	57
III.4. Conclusion	58
CHAPITRE IV : Modélisation physique du capteur.....	59

Sommaire

IV.1. Introduction.....	60
IV.2.1. Fréquence de résonance d'une micropoutre simple.....	60
IV.2.2 Micropoutres idéales.....	60
IV.2.3. Paramètres géométriques	60
IV.2.4. Expression de la fréquence de résonance en flexion : mise en équation	61
IV.2.4.1. Poutre homogène.....	61
IV.2.4.2. Poutre bimorphe	65
IV.2.4.3. Poutre homogène avec masse supplémentaire à l'extrémité libre	66
IV.3. Micropoutre résonante: mesure des propriétés physiques des fluides.....	67
IV.3.2.1.Résonance propre dans le vide.....	67
IV.3.2.2. Résonance forcée dans le fluide	69
IV.3.3.Variation de la fréquence de résonance et du facteur de qualité.....	70
IV.3.3.1.Facteur de qualité.....	70
IV.3.4.Sensibilité.....	72
IV.4.Conclusion	73
CHAPITRE V : Conception par simulation par la méthode des éléments finis du capteur des particules aérosol.....	74
V. Simulation par la méthode des éléments finis (FEM).....	75
V. 1. Principe de la modélisation par la méthode des éléments finis.....	75
V.2. Introduction à la méthode des éléments finis (FEM) sous Comsol Multiphysics.....	75
V.2.1. Définition de l'environnement Comsol Multiphysics	75
V.2.2. les étapes de la simulation par Comsol Multiphysics 5.2.....	76
V.3. Simulation d'un capteur de microparticules aérosol à masse résonnante à base d'une micropoutre.....	76
V.3.1 Simulation d'une micropoutre (encastre-libre) avec COMSOL	76
V.3.1.1.1. Les modes de vibrations simulés de la micropoutre sans microparticules :.....	79
V.3.1.2. Les modes de vibrations simulés de la micropoutre avec microparticules:	81
V.3.1.2.1.Résultats	82
V.3.1.3. Etude des effets géométriques de la micropoutre sur la sensibilité de masse.....	84
V.3.1.3.1. Effet de longueur L	84
V.3.1.3.2. Effet d'épaisseur t	85
V.3.1.3.2. Effet de largeur W	86
V.3.1.4. Etude des différents types de matériaux(E,ρ) sur la sensibilité de masse.....	88
V.3.1.4.1.Effet de module d'Young (E)	88
V.3.1.4.2.Effet de masse volumique (ρ).....	89
V.3.5.Résultats	90
V.4 Conclusion	91
Conclusion générale.....	92

Sommaire

Références	95
------------------	----

Lise des figures et des tableaux

Liste des Figure

Chapitre I:

Figure I.1 : la révolution industrielle.....	16
Figure I.2 : représentation schématique de la pollution de l'air par les dégagements gazeux des véhicules à moteurs à combustion.....	18
Figure I.3 : Classification et taille des particules présentes dans l'atmosphère.....	20
Figure I.4 : Quelques images d'aérosols.....	21
Figure I.5 : Image au microscope électronique d'un aérosol constitué de particules de suie (flèches) dans une particule de sulfate et de nitrate.....	22
Figure I.6 : distribution des fractions de taille des particules dans l'air ambiant.....	23

Chapitre II:

Figure II.1 : La miniaturisation dans les microsystèmes.....	26
Figure II.2 : une plaque de silicium avec des circuits MEMS.....	27
Figure II.3 : Le capteur de pression SA 20 utilisé dans les airbags.....	29
Figure II.4 : Gyroscope vibratoire.....	30
Figure II.5 : Structure à plaques parallèles.....	32
Figure II.6 : Chaîne de mesure et d'information.....	33
Figure II.7 : a) L'analogie mécano-électrique ; b) La réponse électrique d'un résonateur.....	34
Figure II.8 : Les structures résonantes basiques (cantilever, poutre doublement encadrée et diaphragme).....	35
Figure II.9 : Principe de l'actionnement piézoélectrique.....	36
Figure II.10 : Principe de l'actionnement électromagnétique.....	36
Figure II.11 : Principe de l'actionnement électrostatique.....	37
Figure II.12 : actionnement thermique l'effet bilame.....	37
Figure II.13 : Dispositif intégré avec pont de Wheatstone (a) : Image obtenue par MEB, (b): Schéma représentatif du pont.....	38
Figure II.14 : une poutre encadrée-encadrée avec un actionnement électrostatique et une détection capacitive	39
Figure II.15 : une poutre encadrée-libre avec un actionnement piézoélectrique.....	39
Figure II.16 : Mode statique.....	41
Figure II.17 : Synoptique d'un oscillateur.....	44

Chapitre III:

Figure III.1 : Principe de la microfabrication par photolithographie.....	48
Figure III.2 : Les deux types de résine.....	50
Figure III.3 : Fabrication de MEMS par micro-usinage de surface du silicium.....	51
Figure III.4 : Utilisation de la résine formée par lithographie (a) procédé "lift-off", (b) procédé de gravure.....	52

Lise des figures et des tableaux

Figure III.5 : Gravure humide des couches minces (a) isotrope, (b) anisotrope.....	53
Figure III.6 : Procédé LIGA.....	55
Figure III.7 : Procédé de gravure isotrope de silicium.....	57
Figure III.8 : procédé de gravure anisotrope de silicium.....	57
Figure III.9 : Photo d'une structure silicium fabriquée au LAAS.....	57
Figure III.10 : Micro-usinage de surface basé sur les propriétés d'attaque sélective des matériaux (application à la réalisation de poutre silicium).....	58
Figure III.11 : Réalisation d'une structure SU8 partiellement libérée par gravure face-arrière du Silicium.....	59
Chapitre IV:	
Figure IV.1 : Structure des poutres étudiées.....	62
Figure IV.2 : Poutre homogène (vue en coupe).....	62
Figure IV.3 : Mouvements a) en torsion b) en flexion dans le plan c) en flexion hors plan d) en élongation dans le plan.....	63
Figure IV.4 : Premiers modes de vibration de flexion hors-plan (simulation Comsol).....	63
Figure IV.5 : Profils de résonance en flexion.....	64
Figure IV.6 : Poutre bimorphe (vue en coupe)	66
Figure IV.7 : Equivalence entre bimorphe et poutre homogène.....	66
Figure IV.8 : Poutre homogène avec masse ajoutée à l'extrémité libre de la poutre (vue en coupe)....	67
Figure IV.9 : Déflexions d'une micropoutre en fonction de la fréquence de la force d'excitation dans l'air.....	71
Chapitre V:	
Figure V.1 : le maillage d'une structure par l'élément finis.....	76
Figure V.2 : Micropoutre dans une cavité d'air.....	78
Figure V.3 : L'encastrement de la micropoutre.....	79
Figure V.4 :L'actionnement électrostatique de la micropoutre.....	80
Figure V.5 : maillage de la micropoutre avec cavité d'air.....	80
Figure V.6 : Modes de vibration.....	81
Figure V.7 : Profils de résonance en flexion (dans et hors plan).....	82
Figure V.8: les particules aérosol ajoutée sur la face supérieur de la micropoutre.....	83
Figure V.9 : Le décalage en fréquence pour le mode1.....	84
Figure V.10 : Le décalage en fréquence pour tous les modes.....	84
Figure V.11 : Le décalage de fréquence de 1 ^{ere} mode en fonction de L.....	85
Figure V.12 : Décalage de fréquence de tous les modes en fonction de longueur.....	85

Lise des figures et des tableaux

Figure V.13:Variation de la sensibilité en fonction de la longueur pour le sixième mode.....	86
Figure V.14: Changement de fréquences en fonction d'épaisseur.....	86
Figure V.15: Evolution de la sensibilité avec l'épaisseur (mode 6).....	87
Figure V.16: Variation de la fréquence de résonance en fonction de la largeur.....	88
Figure V.17:Variation de la sensibilité a l'effet de masse en fonction de la largeur.....	88
Figure V.18: Changement de fréquences en fonction de module d'Young.....	89
Figure V.19: Evolution de la sensibilité a l'effet de masse en fonction de module d'Young.....	90
Figure V.20 :Variation de la fréquence de résonance en fonction de la densité volumique.....	90
Figure V.21:Variation de la sensibilité relative a masse en fonction de la densité volumique.....	91

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Principales sources primaires de polluants.....	18
Tableau II.1 :Le développement MEMS.....	28
Tableau IV.1 : Valeurs de λ_n pour les premiers modes de résonance en flexion hors plan.....	70
Tableau V.1 : Dimensions de la micropoutre.....	78
Tableau V.2 : Dimensions de la cavité d'air.....	78
Tableau V.3 : Propriétés mécanique de silicium.....	79
Tableau V.4 : Propriétés caractéristique de l'air.....	79
Tableau V.5 : les valeurs des fréquences propres pour chaque mode.....	81
Tableau V.6 : définition de masse dans les paramètres.....	82
Tableau V.7 : changement des fréquences avec la masse.....	83

Introduction générale

La mesure de la concentration et la distribution granulométrique de particules micro/nanométriques atmosphériques est d'un grand intérêt pour les spécialistes de l'environnement. Ceci est principalement dû à la forte influence des particules atmosphériques sur la qualité de l'air et ses effets sur la santé humaine, le bilan radiatif de la terre (changement de climat), et de l'ozone stratosphérique. De plus, le suivi du comptage des particules dans des environnements hautement contrôlés est une condition essentielle pour les salles blanches, bancs propres, filtre installations dans les salles d'opération, de remplissage des installations dans l'industrie pharmaceutique et aérospatiale, instruments de test de l'industrie et efficacité du filtre.

Les capteurs à masse résonante tels que les microbalances à cristal de quartz ou Quartz Crystal Microbalance (QCM) [1], à onde acoustique de surface ou *Surface Acoustic Waves* (SAW) [2-3], et le résonateur à film mince à ondes acoustique de substrat ou *Film Bulk Acoustic Resonator* (FBAR) [4] ont été utilisées comme solutions de rechange aux techniques optiques pour les applications de détection de particules.

Un capteur à masse résonnante MEMS (*Micro Electro Mechanical Systems*) à base d'une micropoutre fonctionnant sur le décalage de la fréquence de résonance causée par la masse des particules aérosol ajoutée. Cette micropoutre devra être fabriquée par les techniques de microfabrication à un coût très faible [1], qui permettra également de mesurer la masse des particules atmosphériques et les distributions donc statistiques de telles particules.

Le présent sujet s'intéresse à l'étude et la modélisation et la simulation d'une micropoutre, la modélisation a été fait pour décrire le mouvement d'une micropoutre et étude leurs fréquences propres pour différent micropoutre (homogène, biomorphe et homogène avec masse supplémentaire a l'extrémité) et la simulation a été démarrer à partir d'un model préexistant de *Arash Hajjam et al*, nous avons simule le comportement d'une micropoutre dans une cavité d'air avec des particules aérosol, pour augmente la sensibilité du capteur pour la détection des particules aérosol nous avons étude l'influence du paramètres géométrique et la nature du matériau du capteur sur sa sensibilité

CHAPITRE I : La pollution atmosphérique et les microparticules aérosols

Chapitre I : La pollution atmosphérique et les microparticules aérosols

I.1. La pollution atmosphérique

I.1.1. Généralités

Depuis ces dernières années, la pollution atmosphérique urbaine et son impact sur la santé humaine sont devenus un sujet de préoccupation pour les pouvoirs publics, les chercheurs et le grand public.

Un intérêt grandissant est porté à la composante particulaire de cette pollution et à son évolution du fait de l'augmentation de la contribution des sources mobiles (véhicules diesel) sur la concentration ambiante en particules fines.

I.1.2 Pollution d'air

La pollution de l'air (ou pollution atmosphérique) est un type de pollution caractérisé par une altération des niveaux de qualité et de pureté de l'air, elle est définie par le Code de l'environnement comme suit « Constitue une pollution atmosphérique au sens du présent titre l'introduction par l'homme, directement ou indirectement ou la présence, dans l'atmosphère et les espaces clos, d'agents chimiques, biologiques ou physiques ayant des conséquences préjudiciables de nature à mettre en danger la santé humaine, à nuire aux ressources biologiques et aux écosystèmes, à influencer sur les changements climatiques, à détériorer les biens matériels, à provoquer des nuisances olfactives excessives. »[5]

La dégradation de l'air résulte généralement de la combinaison d'un cocktail de polluants tels que les matières particulaires, ou autres substances[6] comme les microparticules aérosols (voir la figure I.4), dont les degrés de concentration et les durées de présence sont suffisants pour produire un effet toxique et/ou écotoxique.

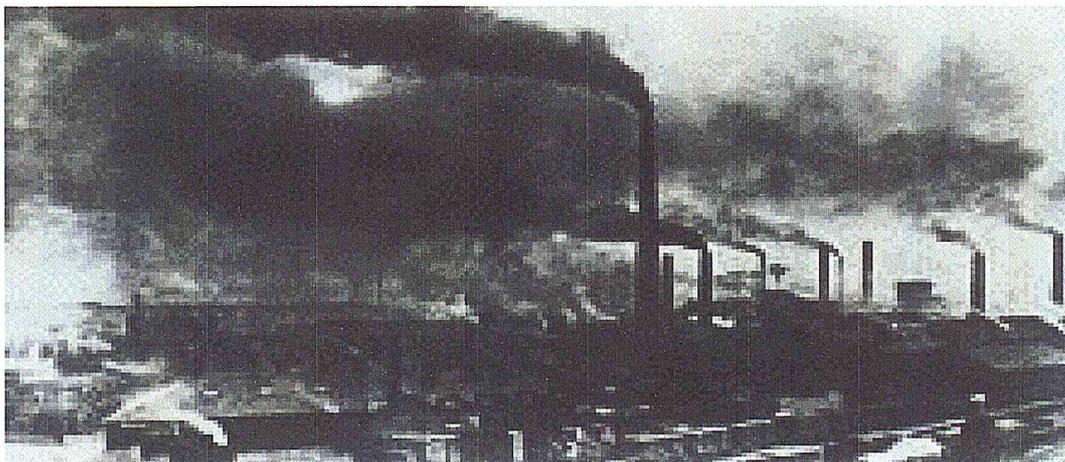


Figure I.1:la révolution industrielle [1].

Chapitre I : La pollution atmosphérique et les microparticules aérosols

L'histoire de la pollution atmosphérique a commencé avec la révolution industrielle.

A cause de cette révolution, la pollution de l'air est devenue plus visible et plus manifeste (Figure I.1)

On compte aujourd'hui des dizaines de milliers de molécules différentes, polluantes avérées ou suspectées qui, pour beaucoup, agissent en synergie entre eux et avec d'autres paramètres (Ultraviolets solaires, hygrométrie, acides, etc.). Les effets de ces synergies sont encore mal connus. Cette pollution atmosphérique (ou intérieure) est un enjeu de santé publique, au niveau mondial comme au niveau individuel [7].

Cette pollution peut revêtir différents types et multiples formes comme :

- Brève ou chronique.
- Visible (fumée) ou invisible (pesticides dans l'air [8]).
- Emise massivement ou en faible dose.
- Emise en quantité dispersée (exemple : pollution émise par les centaines de millions de pots d'échappement).
- Locale et émise par une source fixe (exemple : les usines...), ou émise par des sources mobiles (voitures, épandeurs de pesticides, transport maritime ou aérien[9], etc.), l'ensemble de ces sources contribuent à une pollution globale intérieure ou extérieure (exemple : augmentation de l'effet de serre due au CO₂ ou composés organiques volatils dans l'espace domestique).
- Naturelle (exemple : gaz volcaniques) ou d'origine anthropique.

I.1.3. Principales sources de pollution

On distingue deux types de sources :

- Anthropiques, par exemple : émissions des poêles et chaudières (chauffage domestique, notamment le chauffage au bois, et le chauffage industriel), moteurs (trafic routier, maritime et aérien), usines (industries des produits chimiques et pharmaceutiques, des peintures et des enduits, usines d'incinération...), agriculture, etc.
- Naturelles, par exemple : volcans, érosion éolienne, émissions naturelles de méthane (marécages).

Chapitre I : La pollution atmosphérique et les microparticules aérosols

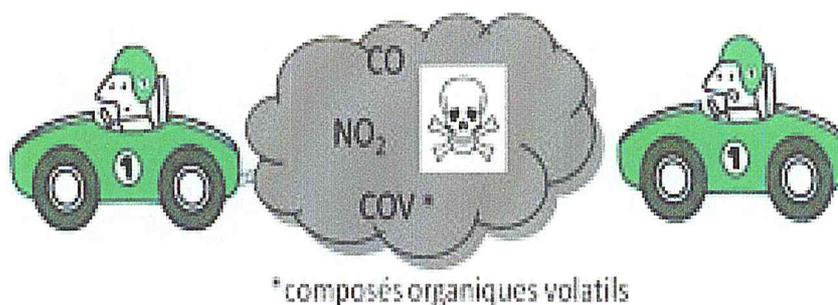


Figure I.2 : représentation schématique de la pollution de l'air par les dégagements gazeux des véhicules à moteurs à combustion [4].

Cette distinction est parfois difficile à établir ; la dégradation anthropique des sols (ex : réchauffement des pergélisol) peut favoriser des émissions de méthane qu'on jugera ou non naturel (figure I.2), de même qu'une aridification anthropique induite par le drainage, le surpâturage, la salinisation et dégradation des sols favorise des envols de poussière qu'il est difficile de différencier des envols naturels à partir des déserts supposés naturels ou originels.

Dans le rapport annuel du gouvernement français sur la qualité de l'air pour 2014 (paru le 30 septembre 2015), les principales pollutions sont caractérisées comme suit :

Tableau I.1 : Principales sources primaires de polluants [10].

Polluant	Principales sources primaires
dioxyde de soufre (SO ₂)	Industrie
oxydes d'azote (NO _x) dont le dioxyde d'azote (NO ₂)	Transport routier
ozone (O ₃)	Pas de sources directes
particules de diamètre inférieur à 10 µm (PM ₁₀)	Résidentiel, industrie, agriculture, transport routier
particules de diamètre inférieur à 2,5 µm (PM _{2,5})	Résidentiel, chauffage au bois en particulier
monoxyde de carbone (CO)	Résidentiel, industrie
benzène (C ₆ H ₆)	Résidentiel, transport

Chapitre I : La pollution atmosphérique et les microparticules aérosols

arsenic (As)	Industrie
cadmium (Cd)	Industrie
nickel (Ni)	Industrie
plomb (Pb)	Transport routier, industrie
hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), principalement le benzo[a]pyrène (B[a]P)	Résidentiel, chauffage au bois principalement

La pollution de l'air résulte donc principalement des installations de chauffage, des centrales thermiques et des installations industrielles, des moyens de transport dont les véhicules à moteur (sauf ceux électrique) et de l'agriculture.

I.2. Les microparticules aérosols

I.2.1 Généralités sur les microparticules aérosols

On commence par décrire ce qu'est une microparticule aérosol atmosphérique, sa composition chimique, sa taille et sa répartition spatiale. On indiquera ensuite quels sont ses impacts sur la santé humaine et aussi ses impacts sur l'environnement.

L'atmosphère est l'enveloppe gazeuse qui entoure la planète terre. Elle est composée d'azote (78%), d'oxygène (20.94%), de vapeur d'eau, de gaz carbonique (CO₂), de gaz rares et de toute une série de composés en faible concentration. Les teneurs en vapeur d'eau, CO₂ et CH₄ (méthane), ont des implications environnementales importantes, ils constituent les principaux gaz à effet de serre. En particulier, les concentrations croissantes de CO₂ et CH₄ au cours de ces dernières années en font des polluants globaux au niveau climatique. A cette composition gazeuse naturelle de l'atmosphère, viennent s'ajouter des polluants plus locaux, émis principalement par l'industrie, le chauffage domestique et le trafic automobile.

Parmi les polluants primaires (directement émis par les sources), le SO₂, les NO_x et les composés organiques volatiles (COV) tiennent une place prépondérante. Dans l'atmosphère, ces polluants primaires réagissent entre eux, avec la vapeur d'eau et le rayonnement solaire, de sorte qu'une production photochimique de polluants secondaires a lieu. Le polluant secondaire le plus important aujourd'hui est l'ozone, dont la concentration peut atteindre 300 mg/m³, créant des épisodes de pollution en milieu urbain en été [11].

La génération d'aérosols peut être de nature primaire (la matière est introduite directement dans l'atmosphère sous forme de particules) ou secondaire (la matière se

Chapitre I : La pollution atmosphérique et les microparticules aérosols

forme dans l'atmosphère par des processus de transformation des gaz en particules). Parmi les aérosols secondaires d'origine anthropique on peut citer les aérosols provenant de l'oxydation des dérivés gazeux de l'azote et du soufre en nitrates et sulfates particuliers et ceux issus de la conversion de composés organiques volatils.

Les particules atmosphériques sont également caractérisées par leur distribution en taille, leur morphologie et leur composition chimique, elle-même variable selon la taille et l'origine des particules. Leur taille peut varier de quelques nanomètres (nm) à plusieurs dizaines de micromètres (μm) (figure I.3). En fait lorsqu'on étudie l'aérosol atmosphérique, on s'aperçoit qu'il y a une dichotomie physique entre les fines particules, dont le diamètre est inférieur à $2 \mu\text{m}$, et les plus grosses [12].

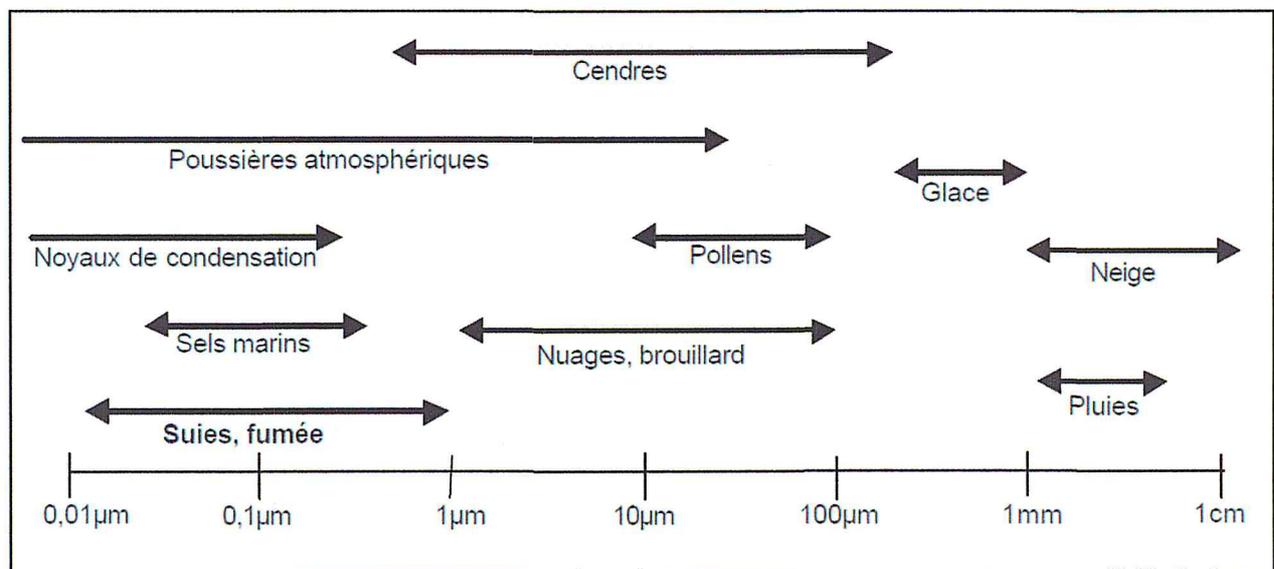


Figure I.3 : Classification et taille des particules présentes dans l'atmosphère [11].

I.2.2. Définition d'un aérosol

Le terme « aérosol » a été inventé par M. SCHMAUSS en 1920. Il désigne la suspension, dans le milieu gazeux, de particules solides ou liquides, ou les deux, présentant une vitesse de chute négligeable.

On appelle aérosol atmosphérique toute particule en suspension dans l'air, c'est-à-dire la phase condensée sous forme liquide et solide par définition, les aérosols sont des fines particules liquides ou solides de taille inférieure à $100 \mu\text{m}$ à l'exception des particules nuageuses (figure I.4), les aérosols interviennent aussi à l'échelle planétaire et locale dans les phénomènes de pollution de l'air et d'allergies. La pluie, le ruissellement et la flore (arbres notamment) nettoient l'atmosphère d'une grande partie des aérosols. Des particules vivantes

Chapitre I : La pollution atmosphérique et les microparticules aérosols

(pollens, spores de champignons, bactéries, microalgues) peuvent composer certains aérosols [11].

On peut utiliser pour la description des aérosols leur origine (naturelle ou anthropique), leur nature (inorganique ou organique), et leur histoire (aérosol primaire ou secondaire), et leur taille (distribution en nombre et en masse).

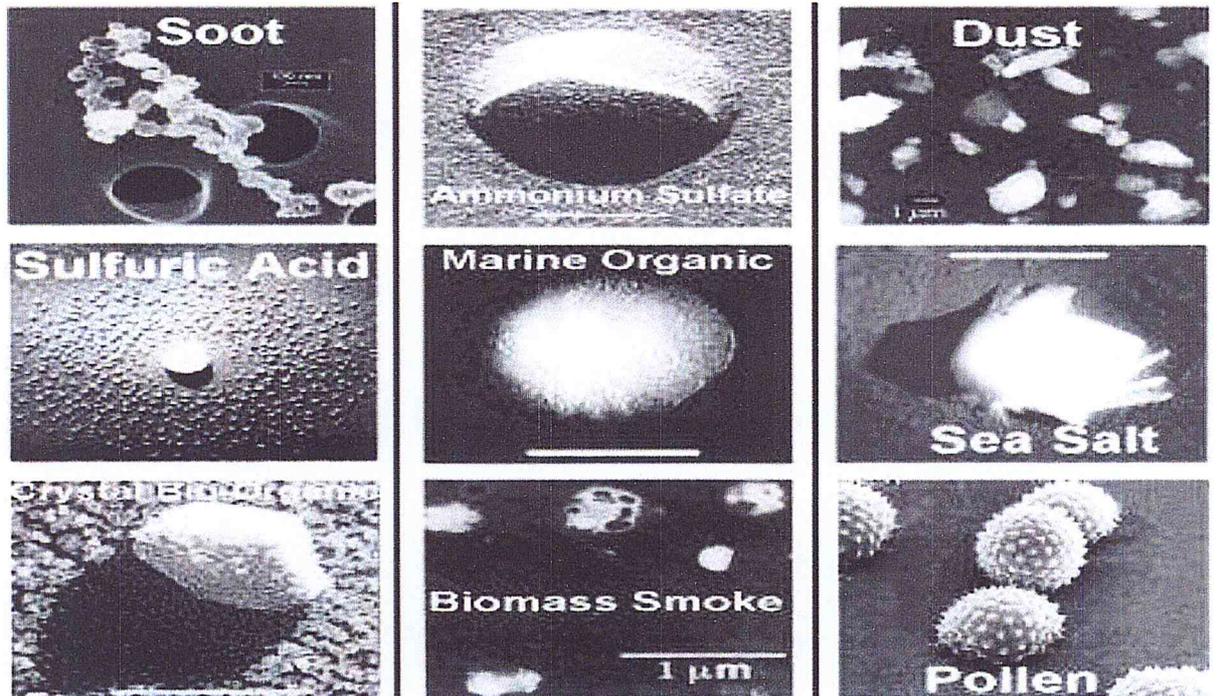


Figure I.4 : Quelques images d'aérosols [11].

I.2.3.Composition chimique d'aérosol

De part leur origine, leur formation et leur évolution dans l'atmosphère, les aérosols sont très différents. La figure I.5 présente un aérosol au microscope électronique, où l'on peut observer de fines particules de suie imbriquées dans une plus grande particule contenant essentiellement du sulfate et du nitrate. Il paraît alors difficile de décrire cet aérosol, d'autant qu'il existe une incertitude quant à sa forme dans l'atmosphère du fait des artefacts.

de mesures : en effet, les aérosols sont instables et asséchés quand on les soumet au microscope électronique, et il est probable que l'aérosol observé n'est pas l'aérosol réel.

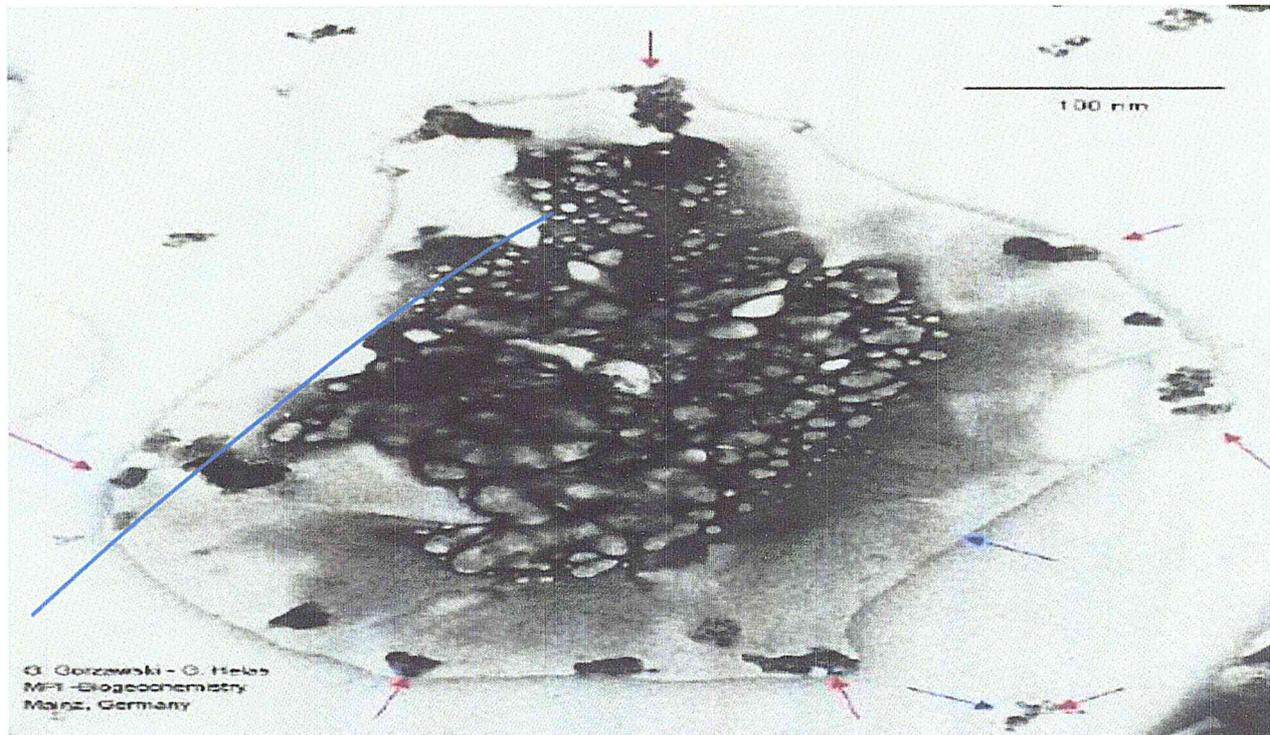


Figure I.5 : Image au microscope électronique d'un aérosol constitué de particules de suie (flèches) dans une particule de sulfate et de nitrate [13].

Deux grandes catégories de particules qui se distinguent par leur mode de formation existent :

- Les aérosols primaires sont émis directement dans l'atmosphère sous forme solide ou liquide. C'est le cas par exemple des aérosols minéraux arrachés des surfaces désertiques par le vent (émission par un processus de type mécanique).
- Les aérosols secondaires sont quant à eux issus de processus de conversion des composés gazeux en particules. C'est le cas par exemple des aérosols de sulfate formés à partir du dioxyde de soufre (SO₂).

I.2.4. Conventions granulométriques

L'ensemble des conventions granulométriques se réfère au diamètre aérodynamique. Il correspond au diamètre d'une particule sphérique de densité égale à 1 g/cm³ ayant la même vitesse de dépôt que la particule mesurée. Le diamètre aérodynamique permet de quantifier la dimension d'une particule aérienne. Ce diamètre est différent du « diamètre réel » de la particule, il en est de même pour d'autres diamètres propres à certaines techniques de mesures (optiques, électriques...).

Chapitre I : La pollution atmosphérique et les microparticules aérosols

En terme de surveillance de la qualité de l'air, la communauté scientifique a adopté des fractions de taille. On distingue principalement les fractions TSP, PM₁₀, PM_{2.5} et PM₁ [14]. Ces fractions couvrent des distributions sensiblement différentes. Toutefois, ce sont ces fractions qui ont été retenues comme spécification cible pour les échantillonneurs (figure I.6).

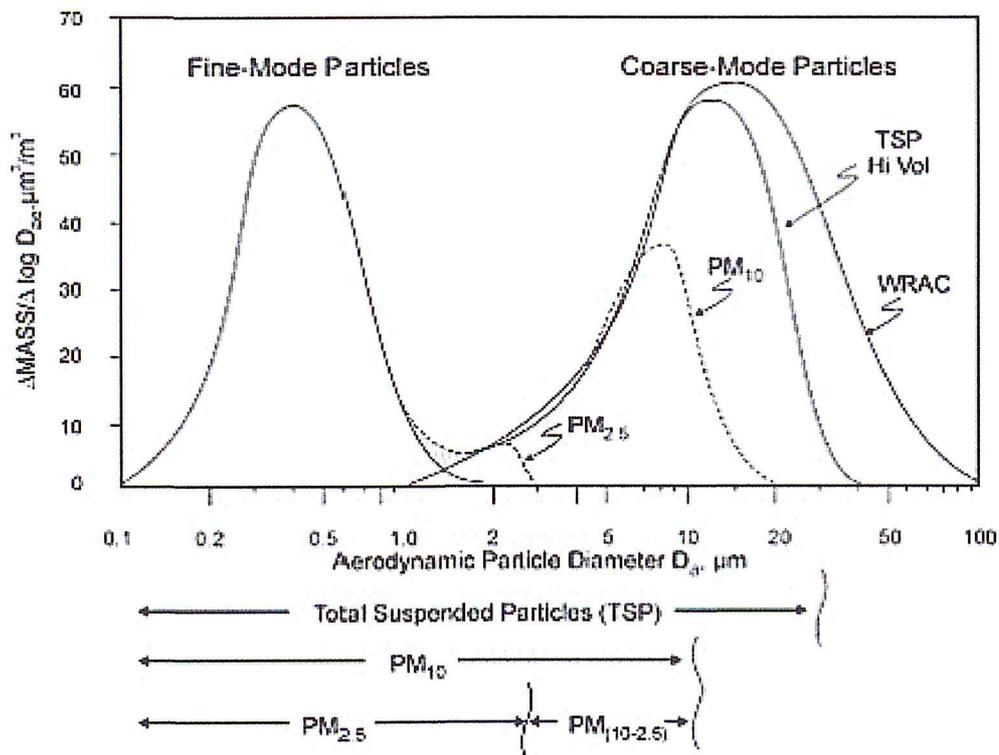


Figure I.6 : distribution des fractions de taille des particules dans l'air ambiant

[14].

I.2.5.L'impact de particules aérosols sur la santé

Les particules fines pénètrent en profondeur dans les poumons. Elles peuvent être à l'origine d'inflammations, et de l'aggravation de l'état de santé des personnes atteintes de maladies cardiaques et pulmonaires. De plus, elles peuvent transporter des composés cancérigènes absorbés sur leur surface jusque dans les poumons. « Actuellement, les particules en suspension (ou matières particulaires) et l'ozone constituent un risque sanitaire grave dans de nombreuses villes des pays développés et en développement. On peut établir une relation quantitative entre le niveau de pollution et certains critères sanitaires (augmentation de la mortalité ou de la morbidité). On obtient ainsi des indications précieuses sur les progrès de la santé auxquels on peut s'attendre si l'on réduit la pollution de l'air.

I.3. Conclusion

Les aérosols constituent un enjeu important pour l'étude de la pollution d'atmosphérique. En effet ceux-ci ont des conséquences sanitaires néfastes, modifient la visibilité et ont sur le bilan radiatif des effets directs (absorption/ réfraction de la lumière), semi directs (modification du profil vertical de température) et indirects (impacts sur la formation des nuages en tant que noyaux de condensation) et aussi les effets sur la santé humaine.

Leur modélisation est particulièrement complexe, aussi bien physiquement que numériquement. Donc la détection et la mesure de ces particules est une obligation pour les spécialités d'environnement.

CHAPITRE II : Généralités sur les microcapteurs résonants.

Chapitre II : Généralités sur les microcapteurs résonants

II.1. Les Microsystemes

II.1.1. Introduction

Ce chapitre a pour objectif de faire une présentation générale sur les MEMS en portant une attention plus particulière aux résonateurs mécaniques. Dans un premier temps, l'historique des microsystèmes sera succinctement retracé suivi d'une présentation des différentes propriétés physiques qui y sont exploitées.

Puis, une étude sur les microstructures mécaniques vibrantes, et leurs différents types d'actionnements et de détections. Enfin une étude sur les capteurs à base de micropoutre et leur fonctionnement en régime statique et dynamique puis les techniques de mesure de la fréquence de résonance.

II.1.2. Qu'est-ce qu'un microsysteme ?

Du point de vue des dimensions, les microsystèmes peuvent être situés entre les machines conventionnelles à l'échelle macroscopique et les nano-mécanismes futuristes [15](figure II.1). Le terme "microsysteme" (*Micro Electro Mechanical System MEMS* – en anglais) désigne l'assemblage, dans un même composant, et quelle que soit la technique employée, d'un actionneur, d'un capteur, et d'une électronique. En fait, on parle encore de microsysteme même si l'assemblage ne comporte qu'un capteur ou un actionneur associé à une électronique. Dans le cas où le composant ne comporte qu'un actionneur contrôlé par une électronique non intégrée, on parle plutôt de micro-actionneur. Ceci est également valable pour les capteurs.

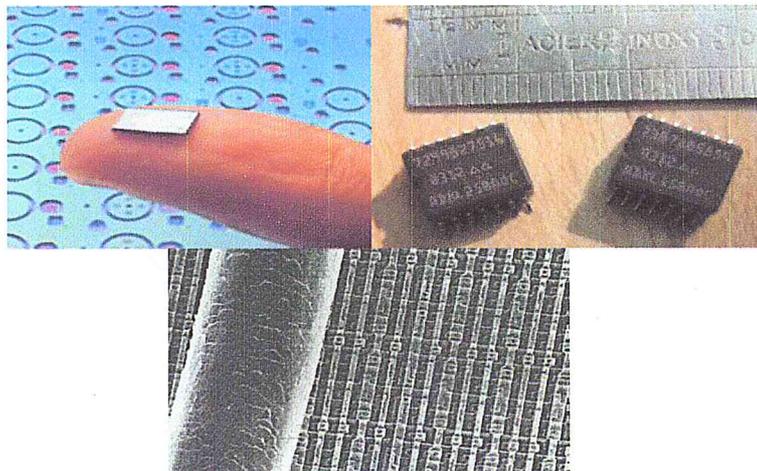


Figure II.1 : La miniaturisation dans les microsystèmes [15].

Les microsystèmes étant fabriqués à partir de techniques de fabrication similaires à celles des circuits intégrés (voir chapitre III), des niveaux de fonctionnalité, de fiabilité et de complexité sans précédent peuvent ainsi être réalisés sur une petite puce de silicium, pour un coût relativement faible.(voir figure II.2).

Chapitre II : Généralités sur les microcapteurs résonants

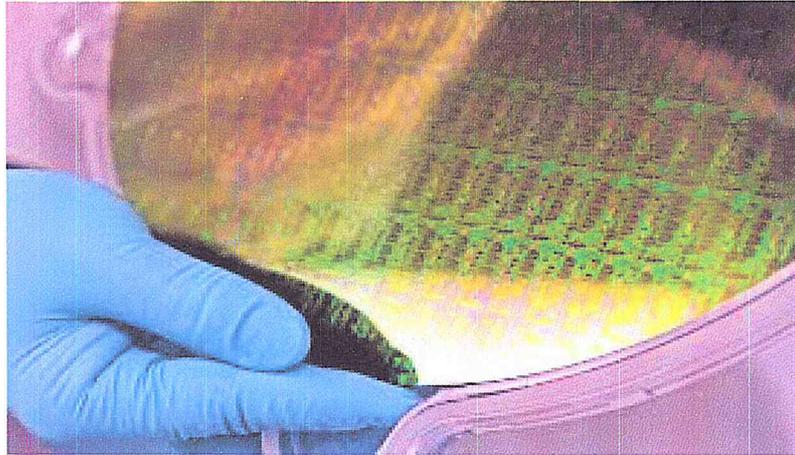


Figure II.2: une plaque de silicium avec des circuits MEMS [15].

II.1.3. Historique

L'origine de la technologie des microsystèmes se trouve clairement dans les développements technologiques durant la Seconde Guerre Mondiale. Le développement des radars a particulièrement stimulé la recherche dans la synthèse des matériaux semi-conducteurs purs.

Ces matériaux, notamment le silicium pur, sont devenus les matériaux de base des circuits intégrés et de la technologie des MEMS [15]. Le précurseur dans ce domaine de recherche est le physicien et prix Nobel de physique (1965) *Richard Feynman* qui, lors de la réunion annuelle de *l'American Physical Society* le 26 décembre 1959, annonça que le monde microscopique serait un formidable champ d'investigation scientifique dès que la technologie en donnerait les moyens [16]. La présentation portant le nom de « *There is plenty room at the bottom* », que l'on peut traduire par « Il y a beaucoup d'espace en bas », avait pour but d'attirer l'attention sur l'intérêt de la miniaturisation, non pas en terme de taille ou de volume, mais sur le fait que la miniaturisation d'un système rend possible la multiplication des fonctions réalisées par celui-ci. En effet, tout en gardant le volume occupé par un système, la miniaturisation permettra de démultiplier les tâches que celui-ci pourra assurer. Feynman est d'ailleurs le premier chercheur à avoir proposé l'utilisation de la technologie de fabrication des circuits intégrés dans le but de réaliser des machines microscopiques. Il est évident que les premiers acteurs du domaine ont été ceux qui, comme Feynman l'avait entrevu, possédaient les moyens technologiques, à savoir les chercheurs issus de la micro-électronique.

Les premiers travaux présentant un MEMS opérationnel, fabriqué en utilisant les mêmes techniques que celles des circuits intégrés [17], ont été publiés seulement 10 ans après l'invention du circuit intégré à base de transistors. Et c'est seulement au début des années 80

Chapitre II : Généralités sur les microcapteurs résonants

que les MEMS parviendront à retenir l'attention, notamment pour la fabrication des capteurs. Le début des années 2000 est marqué par la popularité des MEMS dans des applications comme les têtes d'imprimantes à jet d'encre ou encore des accéléromètres [18] employés pour l'ouverture des airbags de voitures. Actuellement, on rencontre des applications plus complexes utilisant cette technologie, comme les vidéoprojecteurs numériques, dont on détaillera les caractéristiques ultérieurement [19]. Aujourd'hui, les MEMS ont atteint un niveau suffisant de maturité pour l'intégration dans diverses applications industrielles.

Le Tableau I présente un bref historique avec différents repères dans le développement des MEMS.

Tableau II.1 : Le développement MEMS.

1940	La découverte du RADAR entraîne le développement de semi-conducteurs purs.
1959	Presentation de R. Feynman « There's plenty of room at the bottom ».
1967	Fabrication du premier dispositif MEMS par H. C. Nathanson.
1970	Le microprocesseur est inventé, conduisant à une demande de circuits intégrés plus élevée.
1979	Le premier accéléromètre est développé à l'Université de Stanford.
1984	Le micro-usinage de surface est développé à l'Université de Californie, Berkeley. Les microsystèmes et les circuits intégrés peuvent être fabriqués ensemble pour la première fois.
1992	Le procédé de fabrication Multi Users MEMS Process Service (MUMPS) est mis en place.
2000	Les années 2000 sont marquées par une augmentation continue des dispositifs et applications utilisant les MEMS.

II.1.4. Principaux phénomènes physiques exploités dans les MEMS

Selon les tâches qu'ils doivent réaliser, les microsystèmes peuvent être classés en deux groupes : actionneurs et capteurs. Dans ces deux catégories, les propriétés utilisées pour l'actionnement ou pour la détection [20] sont basées sur les mêmes principes physiques. Les plus couramment rencontrés seront énumérés ultérieurement, avec quelques exemples d'applications associées.

II.1.4.1. L'effet piézo-résistive

Quand un matériau piézo-résistif est soumis à une contrainte, il réduit ou augmente sa capacité à transporter le courant, i.e. sa conductivité électrique. Cette propriété peut alors être utilisée pour détecter un déplacement à partir de la mesure du courant entre les deux extrémités d'un matériau piézo-résistif déformé.

En 1954, il a été découvert que l'effet de piézo-résistivité du silicium est beaucoup plus élevé que celui mesuré dans les métaux [21], ce qui rend son utilisation bien adaptée pour les applications de type capteurs MEMS piézo-résistifs. Le premier capteur basé sur l'effet piézo-résistif date de 1962 [22] et consiste en un diaphragme de silicium utilisé pour la mesure de la pression appliquée (capteur de pression) (Figure II.3). Le diaphragme contient des régions piézo-résistives réalisées par des diffusions locales d'impuretés.

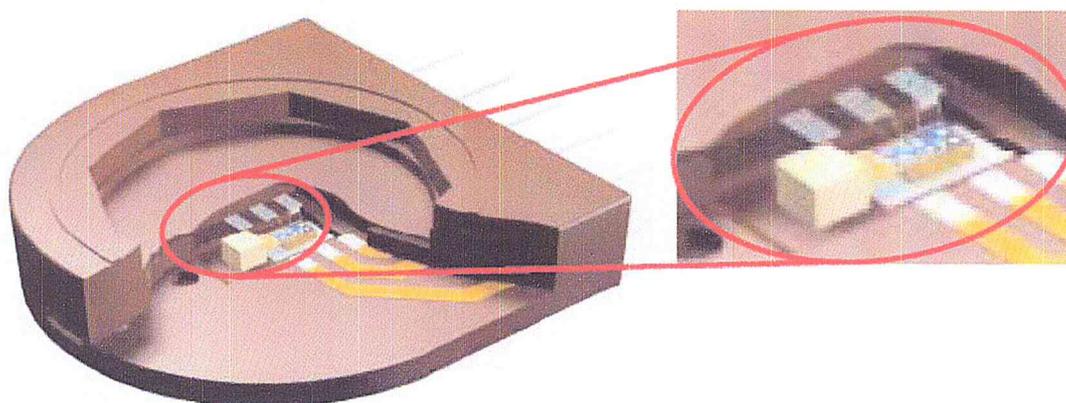


Figure II.3 : Le capteur de pression SA 20 utilisé dans les airbags [23].

II.1.4.2. L'effet d'actionnement piézo-électrique

Les matériaux piézo-électriques présentent des propriétés électromécaniques linéaires et réversibles qui sont également intéressantes pour la réalisation de microsystèmes. En effet, ce type de matériau subit une déformation mécanique sous l'influence d'une différence de potentiel électrique ou, réciproquement, en génère une tension sous l'effet d'une déformation mécanique. Ainsi, des dispositifs à base de matériaux piézo-électriques peuvent être conçus en tant qu'actionneurs s'ils génèrent une déformation ou une contrainte : on parle alors de l'effet piézo-électrique inverse.

Réciproquement, les dispositifs conçus pour réaliser la fonction de *capteurs* vont générer un signal électrique à partir d'une déformation : on parle alors de l'effet piézoélectrique direct comme le gyroscope vibratoire (figure II.4).

Chapitre II : Généralités sur les microcapteurs résonants

Ces capteurs sont également utilisés en tant que vibromètres, accéléromètres ou gyroscopes piézo-électriques. Les accéléromètres mettent à profit le changement de la fréquence de résonance d'un oscillateur en quartz lorsque celui-ci est soumis à un effort mécanique pour mesurer une accélération linéaire [24].

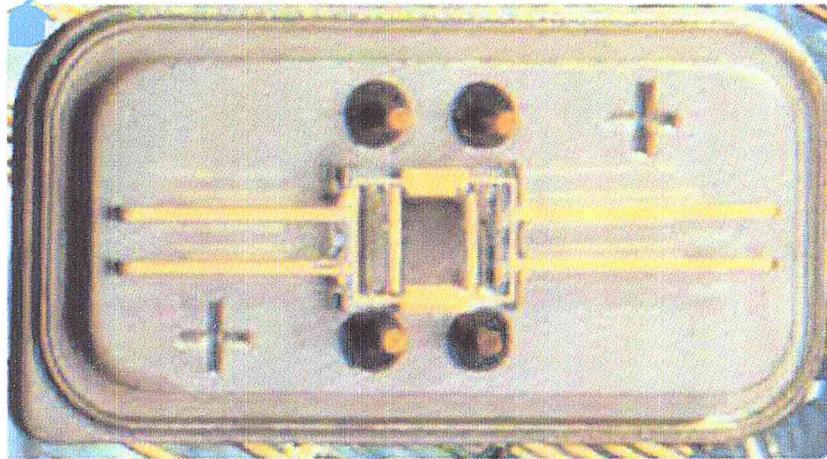


Figure II.4 : Gyroscopie vibratoire [9].

II.1.4.4. L'effet d'actionnement thermique

La déformation d'un matériau « thermo-déformable », de par les contraintes thermiques auxquelles il est soumis, peut être utilisée pour actionner des dispositifs.

Une technique classique permettant la montée en température d'un tel matériau et donc sa déformation, est d'y injecter un courant élevé pour générer un échauffement par effet Joule.

Pour ces MEMS dits « thermiques », on peut trouver des principes de fonctionnement basés sur des propriétés combinées de thermique et de pneumatique, d'alliages à mémoire de forme, de matériaux *bimétal* mais aussi de dilatation thermique [25].

II.1.4.5. L'effet d'actionnement optique

Il est possible d'exploiter la réflectivité et la transparence de certains matériaux pour la réalisation de capteurs et d'actionneurs MEMS. Ce genre de dispositif est souvent composé d'une source et d'un capteur de lumière. La source de lumière peut être une diode électroluminescente (DEL) ou un faisceau lumineux porté par une fibre optique.

Les microsystèmes optiques sont connus sous l'appellation MOEMS (Micro- Opto Electromechanical Systems). Ces dispositifs sont essentiellement présents dans les domaines de la communication optique (interconnexions optiques, commutateurs optiques, routeurs, etc.) et dans la micro-optique adaptative ou l'imagerie (systèmes de projection). Ils sont également utilisés en tant que micro-capteurs pour la mesure de déplacement ou pour des applications de type spectromètres.

Chapitre II : Généralités sur les microcapteurs résonants

Il existe aussi de nombreux microsystemes optiques dont le principe de base n'est pas exclusivement de nature optique mais plutôt la combinaison avec un actionnement d'une autre nature physique pour réaliser des fonctions optiques. On peut citer l'actionnement électrostatique associé au déplacement ou à la déformation d'un support de nature optique.

II.1.4.6. L'effet d'actionnement magnétique

Le champ magnétique créé par un courant circulant dans une spire peut être employé pour manipuler des objets magnétiques. Ce principe est utilisé dans le fonctionnement des micro-actionneurs magnétiques. De manière similaire, le courant induit peut être utilisé pour détecter le mouvement d'un aimant. Ce principe étant à la base du fonctionnement des micro-capteurs magnétiques.

D'un point de vue applicatif, les microsystemes magnétiques sont utilisés avec succès pour le stockage/enregistrement de données, comme par exemple dans les têtes d'enregistrement de disques durs. Ces microsystemes sont également intégrés dans des capteurs de champ magnétique, ou de dispositifs inductifs et dans des micro-relais ou micro-actionneurs. On les retrouve de façon très courante dans le domaine de l'automobile, pour des applications de contrôle de vitesse, de systèmes de freinage (ABS) ou de stabilité électronique (ESP) et même dans des systèmes de navigation [26].

II.1.4.7. L'effet d'actionnement électrostatique

Ce paragraphe décrit, d'une manière relativement simple, l'actionnement électrostatique qui est au cœur du fonctionnement de tout micro-actionneur électrostatique.

La polarisation électrique entre deux plaques génère une force d'attraction coulombienne entre ces deux plaques (figure II.5). Ce phénomène peut-être mis à profit pour réaliser un actionneur. Réciproquement, à tension constante, le mouvement relatif de plaques polarisées génère un courant induit qui est fonction du mouvement. En effet, en faisant varier la surface effective entre deux plaques, la charge électrique créée sur les plaques est modifiée. La variation de charge conduit à la création d'un courant. Ce courant peut alors être mesuré pour remonter à l'information sur le mouvement (déplacement).

De par le principe physique mis en œuvre, l'actionnement électrostatique se prête bien aux dimensions micrométriques. Cela peut s'analyser à partir de la loi de Coulomb :

$$\vec{F}_{q'} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq'}{r^2} \vec{u}_{qq'} \quad (\text{II.1})$$

Cette équation exprime la force exercée par la charge q sur la charge q' . Ces charges sont séparées par une distance r avec ϵ_0 la permittivité du vide et $\vec{u}_{qq'}$ le vecteur unitaire

Chapitre II : Généralités sur les microcapteurs résonants

orienté de q vers q' . Cette équation montre que la force augmente avec l'inverse du carré de la distance ($1/r^2$).

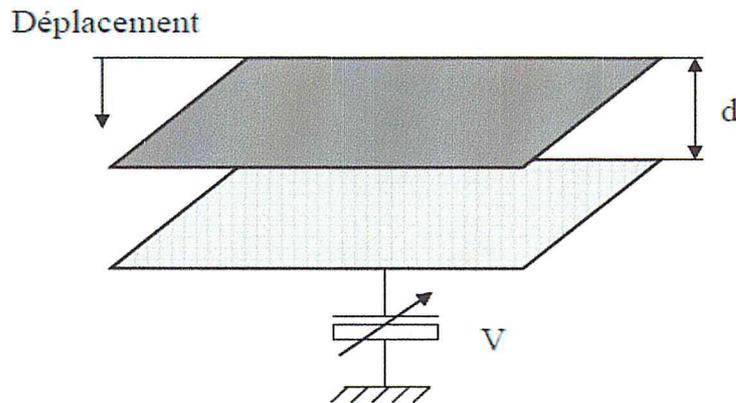


Figure II.5 : Structure à plaques parallèles. V – tension d'alimentation, d - distance inter-électrodes [27].

Cette même force peut-être exprimée en fonction de la tension. La majorité des micro-actionneurs électrostatiques est composée de cellules élémentaires formées par deux plaques conductrices à comportement capacitif (Figure 7). Dans ce genre de dispositifs, les charges électriques, et dans le même temps les forces mises en jeu, varient avec la tension d'alimentation, comme marqué dans l'expression suivante :

$$F_E = \frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 S}{(d-x)^2} V^2 \quad (\text{II.2})$$

Où S est la surface d'une plaque conductrice, d la distance inter plaques, x le déplacement d'une plaque et V la tension d'alimentation. La relation (II.2) montre que les forces engendrées varient directement avec le carré de la tension appliquée, celle-ci allant de quelques volts à plusieurs dizaines de volts dans les applications MEMS. L'amplitude des forces électrostatiques peut donc être contrôlée au travers de la tension d'alimentation.

II.1.5. Synthèse des différents effets d'actionnement

Les principales caractéristiques physiques exploitées dans le domaine des MEMS ont été énumérées, d'une manière non exhaustive. Ces derniers couvrent un large champ d'applications où des propriétés physiques, parfois non exploitables à des tailles 'macroscopiques' deviennent très attractives pour des applications à l'échelle des microsystemes.

Pour exemple, L'effet d'actionnement thermique, souvent synonyme de contrainte dans les machines électriques, est utilisée comme moyen de génération de déplacement dans de micro systemes. D'autres propriétés physiques, comme nous l'avons évoqué dans ce

Chapitre II : Généralités sur les microcapteurs résonants

paragraphe, sont, ou peuvent être, utilisées pour générer des mouvements d'amplitudes plus ou moins élevées.

Toutefois, l'exploitation de la conversion électromécanique sans contact reste prépondérante. Ainsi, les conversions des énergies électrostatique ou électromagnétique en énergie mécanique restent les plus attractives dans les applications MEMS avec, à ce jour, une nette prédominance des MEMS électrostatiques. En effet, la conversion électromagnétique, largement usitée dans les applications macroscopiques, est encore peu présente dans le domaine de l'actionnement de microsystèmes. Ceci est dû à plusieurs facteurs, plus ou moins clairs et bien définis, pour lesquels des avis parfois très divergents se retrouvent dans la littérature [28].

II.2. Les capteurs résonants

II.2.1. Les capteurs

Les capteurs MEMS possèdent une structure dont une partie est mobile en lien avec la grandeur physique à mesurer : le mesurande. Les éléments mécaniques des MEMS (micro-membrane, micro-poutre ou micro-pont) sont réalisés à l'échelle micrométrique sur silicium dont les propriétés électriques (semi-conducteur) mais aussi mécaniques sont alors exploitées. Une variation du mesurande détectée par les parties mobiles engendre une variation d'une grandeur électrique, image du mesurande qui via une chaîne de conditionnement restitue une mesure de tension (figure II.6) [29].



Figure II.6: Chaîne de mesure et d'information [29].

II.2.2. Les résonateurs MEMS

Commençons par définir ce qu'est un résonateur, au sens mécanique du terme. Le résonateur est un corps physique susceptible d'entrer en vibration par effet de résonance. Les résonateurs électromécaniques sont composés de deux ensembles : une partie mécanique et une partie électrique. Ces deux ensembles sont liés par des transductions dites « électromécaniques », qui permettent de passer d'une grandeur électrique à une grandeur mécanique, et inversement. Cela s'avère très utile pour l'actionnement ou la détection des mouvements des résonateurs.

Chapitre II : Généralités sur les microcapteurs résonants

Le premier ensemble concerne la partie mécanique du résonateur, c'est la structure vibrante. Cette structure est dimensionnée et choisie pour ses propriétés mécaniques. Nous trouvons couramment des structures vibrantes dans notre environnement, tels que les poutres bi-encastrées, encastrées-libres, les diapasons et bien d'autres encore. Les paramètres qui nous intéressent sur la structure vibrante sont principalement la fréquence de résonance et le facteur de qualité.

La fréquence de résonance, notée f_r , est définie comme étant la fréquence à laquelle la structure va vibrer : elle correspond au maximum de réponse électrique (maximum de conductance) et doit coïncider avec la résonance mécanique de la structure isolée pour tirer parti de la stabilité intrinsèque de celle-ci.

La fréquence d'antirésonance du système : elle correspond au minimum de l'admittance et coïncide avec le point d'annulation de la susceptibilité (aucune vibration n'est engendrée à cette fréquence) (figure II.7.b).

Il peut y avoir plusieurs fréquences de résonances sur une même structure, dépendant des différents modes qu'il est possible d'exciter. Le facteur de qualité, noté Q , constitue l'un des critères de performance des résonateurs.

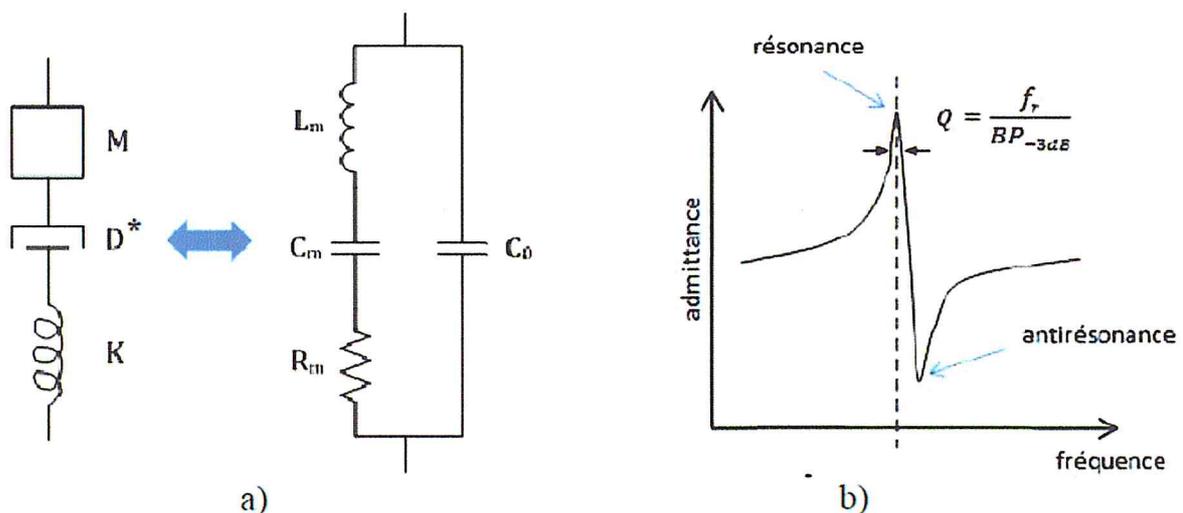


Figure II.7 a) L'analogie mécano-électrique ; b) La réponse électrique d'un résonateur [30].

Ce facteur représente les pertes d'énergie : nous le définissons comme étant le rapport des pertes du système sur l'énergie emmagasinée au cours d'un cycle de vibration. Nous recherchons naturellement à obtenir un composant présentant le plus fort facteur de qualité possible. Afin de pouvoir comparer les performances de différents résonateurs, nous définissons un facteur de mérite très utile comme étant le produit de la fréquence de résonance d'un mode considéré par son facteur de qualité, noté f_0 .

Chapitre II : Généralités sur les microcapteurs résonants

Le second ensemble concerne la partie électrique du dispositif. Pour être fonctionnelles, les structures mécaniques résonantes doivent pouvoir être actionnées, et nous devons aussi pouvoir détecter leur vibration.

Un capteur résonant est un élément vibrant dont la fréquence de résonance est fonction d'un paramètre physique ou chimique que l'on souhaite mesurer. Ainsi, la modification de cette fréquence est induite par le phénomène physique en question qui agit sur le capteur en modifiant ses propriétés comme le module d'Young ou la géométrie du capteur par l'application de contraintes externes. L'utilisation de la fréquence comme paramètre de détection permet alors d'obtenir une qualité de signal élevée et une faible sensibilité aux influences parasites. Il existe généralement 3 structures de base pour réaliser des capteurs résonants : le cantilever (poutre simplement encastrée), la poutre encastrée aux deux extrémités et la membrane (figure II.8).

Chaque structure possède des modes de résonance différents, chaque mode ayant ses propres motifs de déplacement, fréquence de résonance et facteur de qualité.

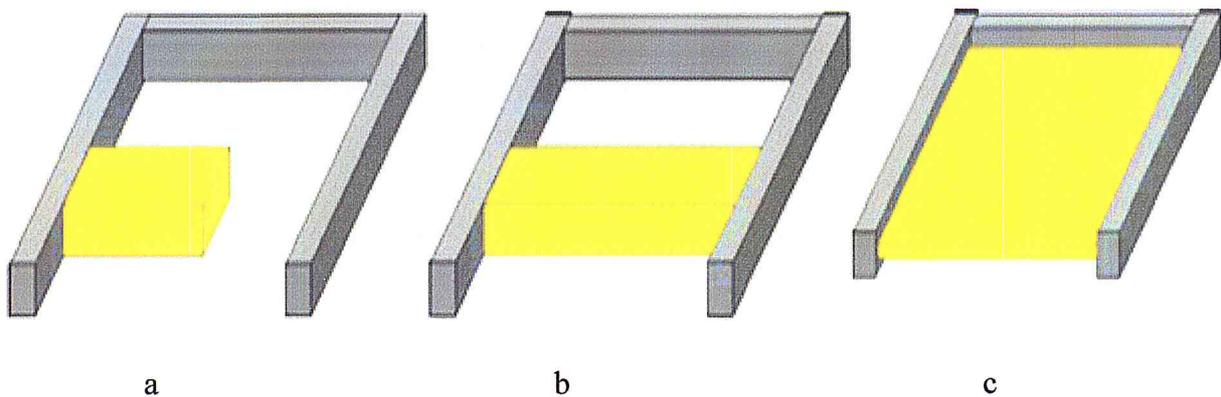


Figure II.8 : Les structures résonantes basiques (a : poutre, b : pont, c : membrane) [28].

II.2.3. Mise en vibration

II.2.3.1. Différentes techniques d'actionnements

La partie active du capteur doit être mise en vibration (excitée) et ensuite, la vibration doit être détectée. Il existe six types de techniques d'excitation, à chacune d'entre elles correspond une méthode de détection :

- excitation électrostatique et détection capacitive.
- excitation et détection diélectriques.
- excitation et détection piézoélectriques.
- excitation thermo résistive et détection piézo-résistive.

Chapitre II : Généralités sur les microcapteurs résonants

- excitation et détection optique.
- excitation et détection magnétique [28].

II.2.3.1.1. Actionnement piézoélectrique

Le principe de l'actionnement piézoélectrique repose sur l'effet « *piézoélectrique inverse* ». Ainsi, lorsqu'un matériau piézoélectrique est soumis à un champ électrique sinusoïdal, le matériau se met à vibrer. L'actionnement piézoélectrique peut-être *intégré*, si le matériau piézoélectrique est partie intégrante de la structure. En appliquant une tension aux bornes d'une couche piézoélectrique par exemple (PZT) déposée à la surface de la poutre, la contraction de la couche induit la flexion de la poutre (Figure II.9) [31], [32].

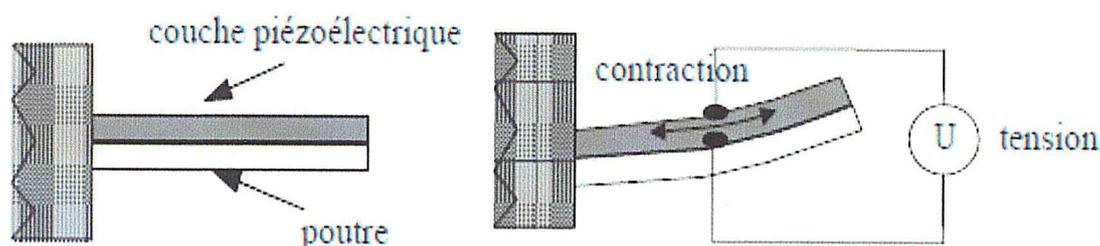


Figure II.9 : Principe de l'actionnement piézoélectrique [33].

II.2.3.1.2. Actionnement électromagnétique

Une des techniques d'actionnement électromagnétique repose sur la génération d'un champ magnétique continu B , créé par un aimant, agissant sur un conducteur parcouru par un courant électrique alternatif. De cette interaction résulte la force de Laplace permettant l'oscillation de la poutre [34-35], (Figure II.10).

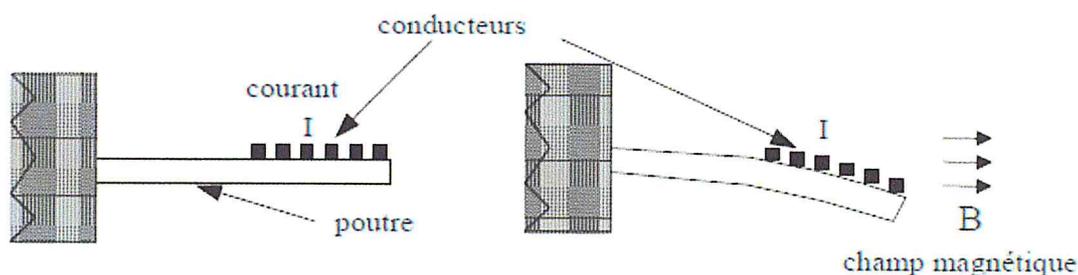


Figure II.10 : Principe de l'actionnement électromagnétique [33].

II.2.3.1.3. Actionnement électrostatique

Pour ce type d'actionnement la micro poutre est excitée sous l'action d'une force électrostatique créée par un champ électrique entre deux électrodes : une des électrodes

Chapitre II : Généralités sur les microcapteurs résonants

constitue la partie mobile alors que l'autre reste fixe (nous avons décrit précédemment) (Figure II.11).

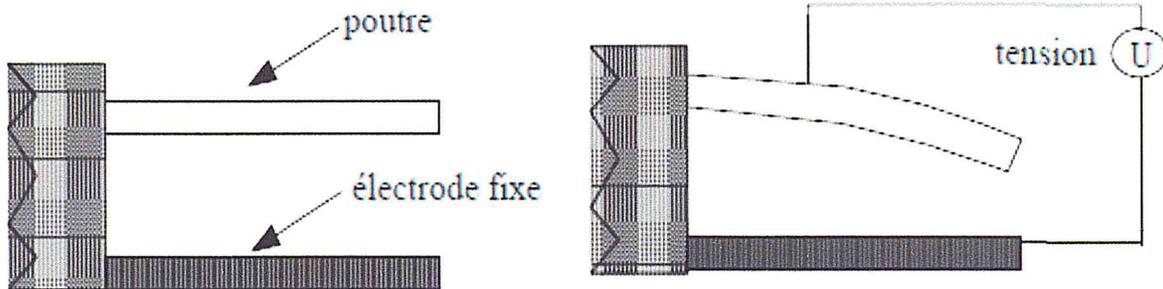


Figure II.11 : Principe de l'actionnement électrostatique [33].

II.2.3.1.4. Actionnement thermoélectrique

Ce mode d'actionnement consiste à faire passer un courant électrique dans une résistance placée à l'encastrement du résonateur: l'échauffement local de la microstructure et donc l'augmentation de la température génère la flexion de la poutre due à la différence des coefficients d'expansion thermique des deux matériaux (effet bilame) (figure II.12), [34].

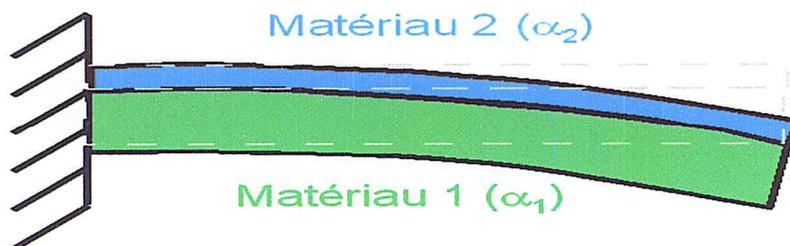


Figure II.12 : actionnement thermique l'effet bilame. [35]

II.2.3.2. Différentes techniques de détection

II.2.3.2.1. Détection piézorésistive

Le principe de la détection piézorésistive consiste à déposer des piézorésistances à la surface de la microstructure afin de transcrire le mouvement de la micropoutre en un signal électrique. Ce système est d'autant plus utilisé qu'il est précis et facile à mettre en œuvre : il s'agit de réaliser une piste piézorésistive à la surface du silicium (par exemple par dopage d'une zone).

Dans le domaine de la microscopie à force atomique, la mesure piézorésistive a été initiée par Tortonese *et Al* [37]. Elle a été depuis adaptée avec succès au domaine des capteurs à structures mobiles notamment en intégrant cette piézorésistance dans un pont de Wheatstone

Chapitre II : Généralités sur les microcapteurs résonants

[29-36]. La figure II.13 montre un exemple de dispositif du pont de Wheatstone où deux piézorésistances sont déposées à la surface des deux micropoutres : l'une pour la mesure et l'autre servant de référence. Ce montage permet de réaliser une mesure différentielle atténuant, par là-même, les phénomènes de dérives [38].

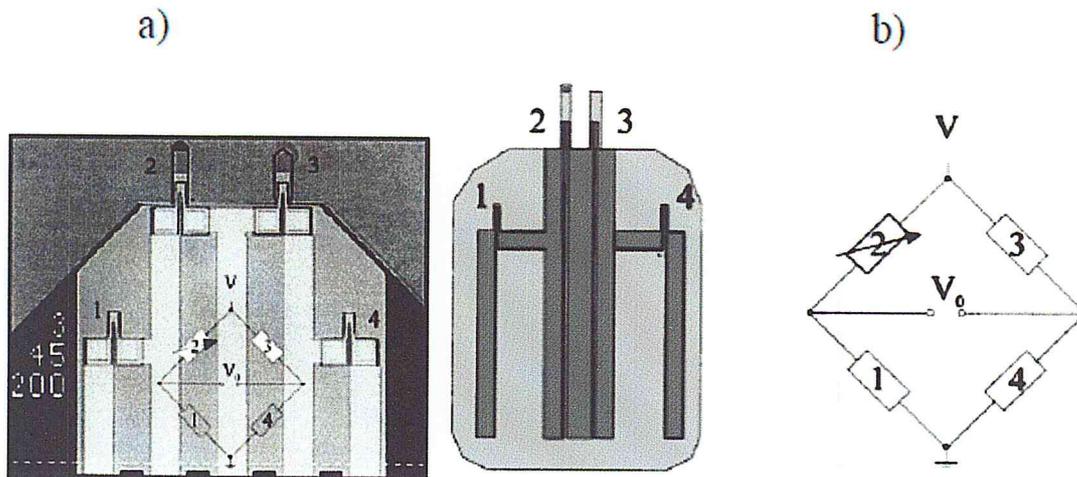


Figure II.13 : Dispositif intégré avec pont de Wheatstone (a) : Image obtenue par MEB, (b) : Schéma représentatif du pont [38]

II.2.3.2.2. Détection capacitive

Pour ce type de détection, le dispositif consiste en la mesure de la capacité entre la poutre constituant l'armature mobile d'un condensateur et une électrode fixe placée en regard de la poutre (figure II.14). Toute vibration de la poutre modifie l'espace inter-électrodes du condensateur et donc implicitement la valeur de la capacité. La mesure de cette capacité présente entre les deux électrodes est alors directement liée à l'amplitude de la flexion [39-40].

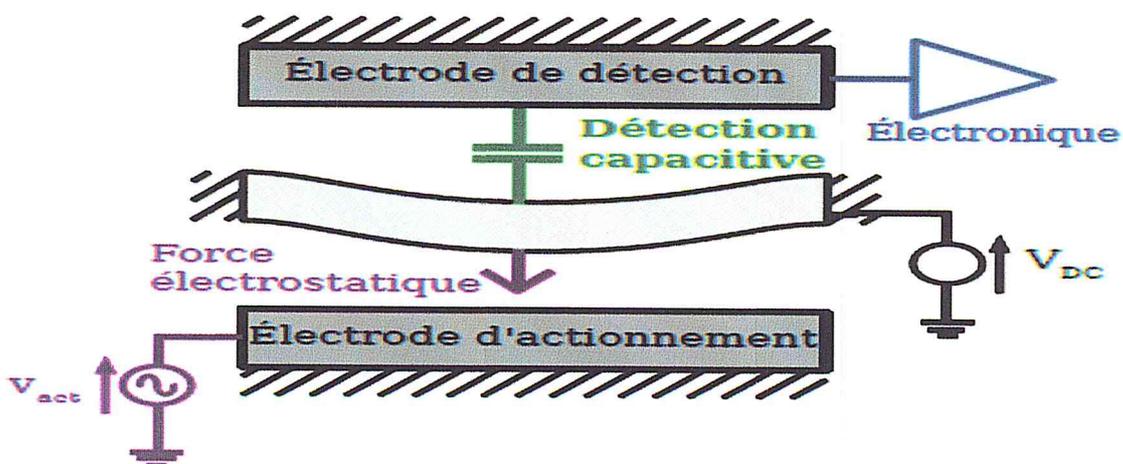


Figure II.14 : une poutre encastree-encastree avec un actionnement electrostatique et une detection capacitive [41].

II.2.3.2.3. Detection piezoélectrique

Pour les capteurs à microstructures mobiles, le phénomène utilisé est l'effet piézoélectrique direct permettant de détecter des déplacements de l'ordre du nanomètre [42], [44-45]. Pour ce type d'application, une couche piézoélectrique (oxyde de zinc ZnO, Titano-Zirconate de Plomb PZT) est déposée en film mince sur la surface de la microstructure (figure II.15). La flexion de la structure mobile va générer une contrainte dans le film piézoélectrique se traduisant par l'apparition de charges. Ce mode de détection est peu utilisé en mode statique à cause des courants de fuite importants mais reste néanmoins bien adapté pour les mesures en mode dynamique.

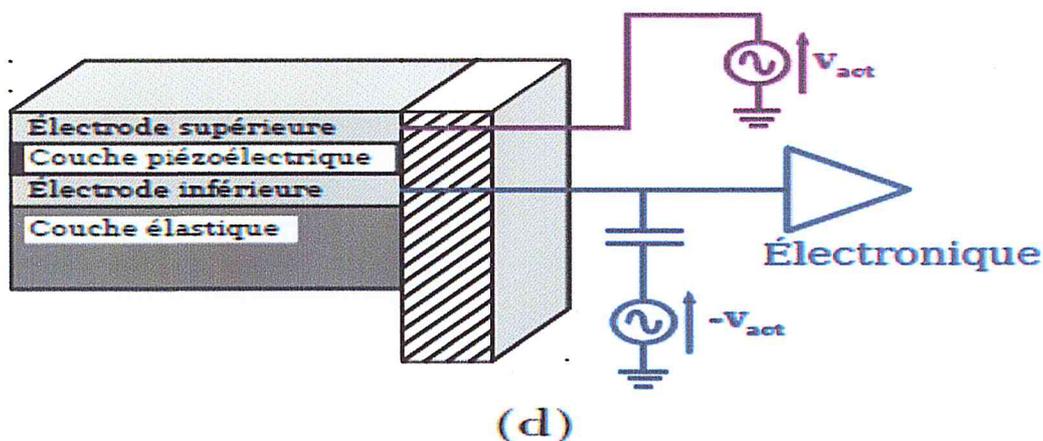


Figure II.15: une poutre encastree-libre avec un actionnement et une detection piézoélectrique [41].

II.3. Les capteurs à base de micro-poutres

Une micropoutre (microlevier) est une structure mécanique de dimensions microscopiques ayant une extrémité encastree sur un support et une extrémité libre. Les micropoutres font partie de la famille des microsystèmes électromécaniques ou MEMS en anglais (MicroElectroMechanical Systems) ayant la particularité d'avoir une partie mécanique mobile et une partie électrique fournissant l'énergie nécessaire au fonctionnement du système et assurant la récupération des informations concernant le mouvement.

Classés dans la catégorie capteurs résonants, les capteurs à base de micro-poutres sont d'une approche relativement nouvelle et présentent un atout certain tel, par exemple, la possibilité d'une miniaturisation du capteur complet grâce à l'utilisation de procédés de fabrication issus de la microélectronique.

Chapitre II : Généralités sur les microcapteurs résonants

Ces techniques de fabrication permettant la miniaturisation complète du capteur, permettent d'intégrer ainsi l'électronique et le capteur dans une seule et même puce. Ces systèmes complets, incluant parfois l'électronique de traitement et plusieurs capteurs.

II.3.1. Principe de transduction

Il existe deux grands principes de transduction dans les capteurs à micropoutres :

- La mesure de la déformation induite par des contraintes.
- La mesure des modifications de propriétés liées aux résonances mécaniques.

La mesure de la déformation induite par des contraintes en surface est très souvent utilisée, mais n'est généralement adaptée qu'à des micropoutres de très faible épaisseur ou composées d'un matériau relativement souple. En effet, les contraintes apparaissant en surface vont plus facilement déformer la micropoutre lorsqu'un matériau souple est utilisé ou lorsque l'épaisseur est faible.

À l'opposé, les micropoutres basées sur des matériaux rigides tels le silicium sont moins déformées par les efforts extérieurs. Il est donc souvent plus judicieux de préférer mesurer les variations de fréquence de résonance dans le cas de matériaux rigides.

Le principe de base des capteurs résonants à micropoutre réside sur la mesure de la perturbation de la fréquence de résonance mécanique. En effet, comme la fréquence de résonance mécanique d'une micropoutre dépend, entre autres, de la masse de la structure, il est possible de détecter et mesurer toute variation de masse de la structure en observant la fréquence de résonance.

II.3.2. Micropoutre fonctionnalisées

Deux modes de fonctionnement peuvent être utilisés :

- Variation de la fréquence de résonance, due essentiellement à la modification de la masse du système (régime dynamique).
- Variation de la courbure, due à la modification des contraintes surfaciques à l'interface micropoutre/ couche sensible (régime statique).

II.3.2.1. Régime statique

Adapté pour les capteurs chimiques à base de micropoutre pour détecter des espèces cibles.

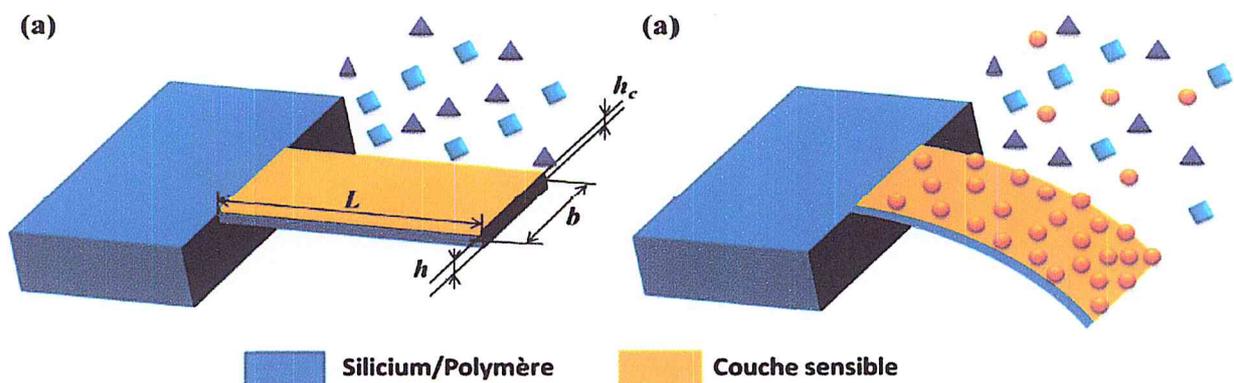
L'effet bilame a longuement été utilisé pour la réalisation de thermomètres depuis son invention par John Harrison au début du 18ème siècle. Cet effet se produit lorsque deux plaques de matériaux différents sont solidaires (bilame) et qu'elles subissent un phénomène physique ou chimique dont l'impact est différent sur chaque matériau. Dans ces conditions,

Chapitre II : Généralités sur les microcapteurs résonants

des contraintes mécaniques sont créées entre les deux plaques induisant la déformation du bilame.

Ce principe est utilisé dans les micropoutres pour suivre leurs déformations causées par une absorption ou une adsorption d'une espèce cible dans ou sur la couche sensible déposée sur la micropoutre. En effet, suite aux phénomènes de sorption, la couche sensible se dilate ou se contracte et génère des contraintes mécaniques surfaciques sur l'interface couche sensible-micropoutre induisant une déflexion statique de la poutre (w), dont l'amplitude dépend de la concentration de l'espèce cible.

Le schéma de principe est représenté sur la figure II.16 :



II.3.2.2. Régime dynamique

Les micropoutres résonantes ou en mode dynamique utilisent justement ce phénomène de résonance dans leur mode de fonctionnement en configuration capteur. En l'absence de pertes, la fréquence de résonance des micropoutres dépend de leur masse et de leur rigidité, tout comme le cas d'école : système masse-ressort. C'est d'ailleurs ce principe qui est utilisé dans les cordes vibrantes utilisées comme capteurs de contraintes mécaniques dans les structures en génie civil (déformations du béton) où la fréquence de résonance de la corde dépend de sa tension.

III.3.2.3. Actionnement de micropoutre

L'actionnement électrostatique repose sur la force d'attraction induite entre la micropoutre et l'électrode rendues conductives, et dépend de la tension qui leur est appliquée, et de la constance diélectrique du milieu. Une tension DC constante influe sur la déflexion statique et par voie de conséquence sur ses caractéristiques dynamiques. Une tension AC alternative force la poutre à vibrer autour de sa déflexion statique.

Chapitre II : Généralités sur les microcapteurs résonants

Dans certains cas, il est pertinent d'augmenter la déflexion au risque de déclencher le collage de la poutre sur l'électrode (pull-in).

L'étude de l'actionnement peut être préalablement menée en faisant les approximations suivantes:

- La résistance du résonateur est négligée, ce qui a pour conséquence de considérer une tension uniforme appliquée le long de la poutre.
- La déflexion de la poutre est supposée constante le long de la partie en regard avec l'électrode (limite des faibles déplacements) [44].

II.3.2.4. Principe de détection

Le principe de détection d'une masse ajoutée est fondé sur le changement de la courbe de réponse de la micro-poutre dû à la masse ajoutée. Deux méthodes de détection sont possibles :

- Décalage en fréquence : dans le cas sans masse ajoutée, on détermine la courbe de réponse amplitude-fréquence. Si une masse ajoutée tombe sur la micro-poutre, la courbe de réponse chute en fréquence. La détection d'une masse ajoutée revient donc à détecter ce décalage en fréquence.
- Décalage en amplitude : la masse ajoutée est très petite, mais il y a aussi un changement de l'amplitude maximale de vibration. Dans la référence [46], les auteurs ont utilisé le changement d'amplitude engendré par la masse ajoutée dans le voisinage du point limite A_{lim} (bifurcation de type nœud-col).

À cette position, la différence des amplitudes est très significative. On utilise donc ce saut d'amplitude pour détecter la présence d'une masse ajoutée.

Ensuite, le saut d'amplitude est considéré avec deux comportements assouplissant et raidissant.

II.3.2.5. Techniques de mesure de la fréquence de résonance

La mesure de la fréquence de résonance consiste à trouver pour quelle fréquence une excitation donnée produit le plus grand mouvement.

Afin d'y parvenir, deux grands principes de mesure de la fréquence de résonance existent: le balayage en fréquence et la réalisation d'un oscillateur ayant comme base la micropoutre.

Dans le premier cas, on doit parcourir une plage de fréquence donnée et déterminer à quelle fréquence le rapport entre mouvement et excitation est le plus grand.

Chapitre II : Généralités sur les microcapteurs résonants

Au contraire, dans le deuxième cas, la réalisation d'un oscillateur électrique va consister à se caler sur un point de fonctionnement particulier qui correspond à la fréquence de résonance de la poutre. On obtient donc une image électrique de la fréquence de résonance [45].

Dans les deux cas, il faut être capable d'exciter la micropoutre et de mesurer son mouvement.

II.3.2.5.1. Balayage en fréquence

Le principe du balayage consiste à parcourir un domaine de fréquence sur lequel on excite la micropoutre et on mesure une grandeur représentative du mouvement. L'étude du rapport entre la mesure et la commande ainsi que du déphasage entre les deux signaux permet de déterminer la fréquence de résonance.

L'avantage principal de cette méthode de mesure est qu'il est possible de mesurer le facteur de qualité de la micropoutre, valeur image des pertes et impactant sur la précision de la mesure. L'inconvénient principal de cette méthode est la lenteur de la mesure car il faut faire des mesures à un grand nombre de fréquence avec une précision importante pour déterminer précisément la fréquence de résonance.

Toutefois, il existe une variante du balayage en fréquence qui consiste à utiliser le mouvement naturel de l'air autour de la micropoutre. En effet, le mouvement de l'air, assimilé à un mouvement aléatoire de type Brownien, excite la micropoutre à toutes les fréquences à la fois. Ainsi, en analysant le bruit du signal de mesure il est possible de déterminer la fréquence de résonance. En revanche, du fait de la faible efficacité d'excitation de la micropoutre par l'air, les mouvements à observer sont très faibles et imposent ainsi le choix d'une méthode de mesure extrêmement précise. L'utilisation d'une méthode optique semble la seule approche réaliste, rendant ainsi la miniaturisation très délicate [46].

Globalement, ces deux méthodes seront donc plutôt à éviter pour les détections de gaz car les phénomènes à observer sont très souvent trop rapides.

II.3.2.5.2. Oscillateur bouclé à micropoutres

Le principe de la mesure via des oscillateurs à micropoutre consiste à prélever le signal de sortie en provenance de la micropoutre, image du mouvement, et à l'amplifier de façon à le réinjecter à l'entrée de la micropoutre pour générer le mouvement. On réalise donc une boucle (voir figure II.17) dans laquelle sont placés un amplificateur et une micropoutre, considérée comme un résonateur.

Chapitre II : Généralités sur les microcapteurs résonants

Le signal électrique ainsi obtenu en sortie de l'amplificateur sera image de la fréquence de résonance mécanique de la micropoutre

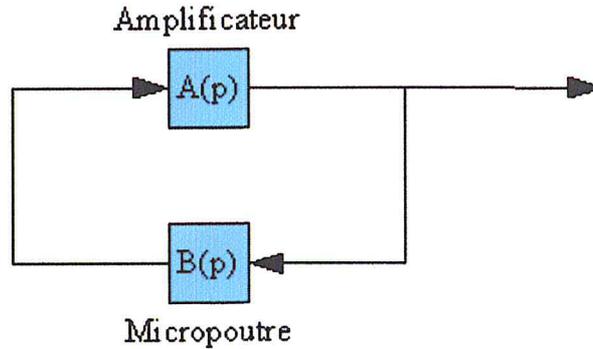


Figure II.17: Synoptique d'un oscillateur [46].

II.4.Conclusion

Dans ce chapitre, on a parlé des phénomènes exploités dans les MEMS, les différentes techniques d'actionnements sont : piézoélectrique, électromagnétique et électrostatique, thermoélectrique et les technique de détections sont : piézorésistive et capacitive, piézoélectrique.

Le principe d'un capteur résonant repose sur le forçage d'un microrésonateur (micropoutre) sollicité sur son mode fondamental, à l'aide d'une électrode qui peut aussi servir un capteur de détection de variation de fréquence.

La détection de masse peut être statique et/ou dynamique. Dans le mode de détection statique, la masse ajoutée est déterminée par la mesure soit optique soit piézoélectrique soit piézorésistive de flexion de microrésonateur en sachant cependant que le système de mesure optique a la meilleure résolution. Le mode de détection dynamique actuelle mesure le décalage en fréquence dû à la particule ajoutée. Cependant, la relation entre la masse détectée et le décalage de fréquence est linéaire.

Deux techniques de mesure de la fréquence de résonance : le balayage en fréquence qui parcourt une plage de fréquence, et la réalisation d'un oscillateur boucle à base de micropoutre qui se caler sur un point de fonctionnement particulier correspond à la fréquence de résonance de la poutre.

Chapitre III: Les procédés de microfabrication de MEMS.

III.1.Introduction

La microfabrication est l'ensemble des techniques de fabrication permettant de produire des dispositifs avec des structure de l'ordre du micromètre et en dessous. En général on distingue les techniques de microélectronique et ses dérivés, utilisés par exemple pour la fabrication des puces électroniques, des microsystèmes et des diodes laser, et les autres techniques dérivant des techniques d'usinage traditionnelles.

Les techniques de microfabrication ont beaucoup évolué depuis l'introduction des techniques de photolithographie pour la réalisation de microstructure mécanique.

Ces technologies étaient auparavant très utilisées dans le domaine de la microélectronique pour réaliser des circuits intégrés : les structures réalisées sont alors des empilements de couches planes extrêmement minces (les épaisseurs restent de l'ordre du micron), déposées sur un substrat plan, et dont le contour extérieur est défini par une série de « masques » conçus par ordinateur.

Ce concept a été transposé massivement depuis une quinzaine d'années à la réalisation d'objets micromécanique que l'on appelle aujourd'hui les " Microsystèmes ". Le principal attrait de ces techniques est la possibilité d'attendre des précisions excellentes et de pouvoir réaliser simultanément, donc à moindre cout, de nombreux exemplaire d'une même structure car il suffit d'en dessiner plusieurs sur un même masque pour fabrique plusieurs exemplaires en même temps.

Le premier MEMS (*Micro Electro Mechanical Systèmes*) fut un résonateur en silicium à actionnement électrostatique fabriqué en 1968 par *Dr. Harvey Nathanson* [48]. Vingt ans plus tard, Howe et Muller développaient l'usinage de surface du silicium, une des principales techniques employées aujourd'hui pour les MEMS commercialisés [49].

Dans une première partie, nous aborderons les techniques de microfabrication les plus connues et utilisées dans l'industrie. La dernière partie de ce chapitre traité les différentes méthodes de fabrication des différentes micropoutres.

III.2. Les différentes techniques de microfabrication

Il existe deux voies de fabrication des MEMS en technologie silicium [50] :

- Le micro-usinage de surface où certaines couches " classiques " du procédé de fabrication des circuits intégrés sont utilisées comme couches sacrificielles.
- L'usinage de volume du silicium.

III.2.1. Micro usinage de surface

C'est la technique de microfabrication la plus directement dérivée de la technologie du circuit intégré. Comme dans cette dernière, il s'agit de superposer des couches dont la géométrie est obtenue par photolithographie. Par rapport aux techniques de fabrication des circuits intégrés, la vraie révolution est l'utilisation de certaines couches.

III.2.1.1. Photolithographie

Le procédé de transfert d'un masque (physique ou logiciel) vers la plaquette s'appelle photolithogravure. Ce mot est construit à partir de lithos (pierre en grec) et, de photographie. Il s'agit d'un procédé photographique qui permet la gravure d'une (ou plusieurs) couche(s) solide(s) telle que nitrure, oxyde, métal, etc..., suivant un motif bien défini. Nous verrons que la lumière utilisée est en général hors du domaine visible, à savoir en ultra-violet.

Les technologies de microfabrication sont essentiellement basées sur la photolithographie, grâce à un masque définissant le contour d'une forme en deux dimensions, elle permet de reproduire la forme géométrique souhaitée par projection photographique des zones transparentes du masque avec une précision de l'ordre du micron. La lumière projetée permet d'impressionner une couche mince de résine photosensible déposée sur le support à structurer. Ce support est généralement appelé le "substrat" ou le "*wafer*" en anglais, ce que l'on peut traduire par la "tranche" en français. Cette exposition à la lumière (insolation) permet soit de durcir soit de fragiliser (suivant le type de résine utilisée) les zones insolées par la lumière. Il est ainsi possible de retirer localement la couche de résine par voie chimique qui va préférentiellement dissoudre les zones les plus fragiles de la couche de résine définies par le masque, de façon à mettre localement le support à nu. Sur l'exemple de la figure III.2.

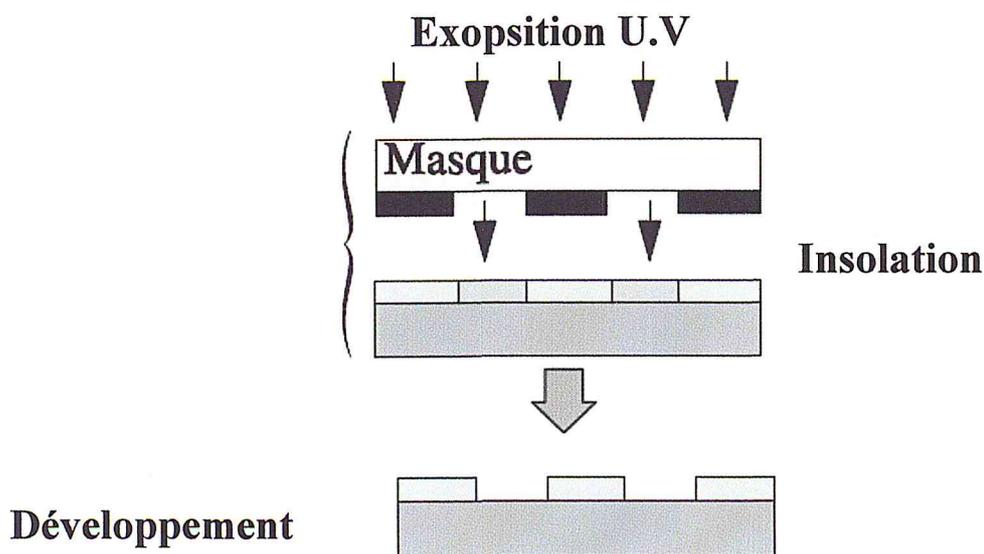


Figure III.1 : Principe de la microfabrication par photolithographie [51].

En général ce procédé permet de sélectionner certaines parties du wafer pour appliquer des opérations additives ou soustractives.

La suite typique des opérations est la suivante :

- Nettoyage de wafer
- Dépôt de la couche barrière
- Dépôt de la résine photorésistant
- Passage au four basse température
- Alignement des masques
- Exposition du motif
- Développement de la résine
- Passage au four haute température pour améliorer l'adhésion
- Gravure
- Enlèvement de la couche photorésistant par bain chimique
- L'étape de gravure ne fait pas réellement partie de la photolithographie et on peut lui substituer un dépôt de couche mince, un dopage ou une épitaxie par exemple. Il existe deux types de résine :
 1. Positive : donne un motif semblable à celui du masque comme l'exemple de figure [III.3]
 2. Négative : donne le motif complémentaire

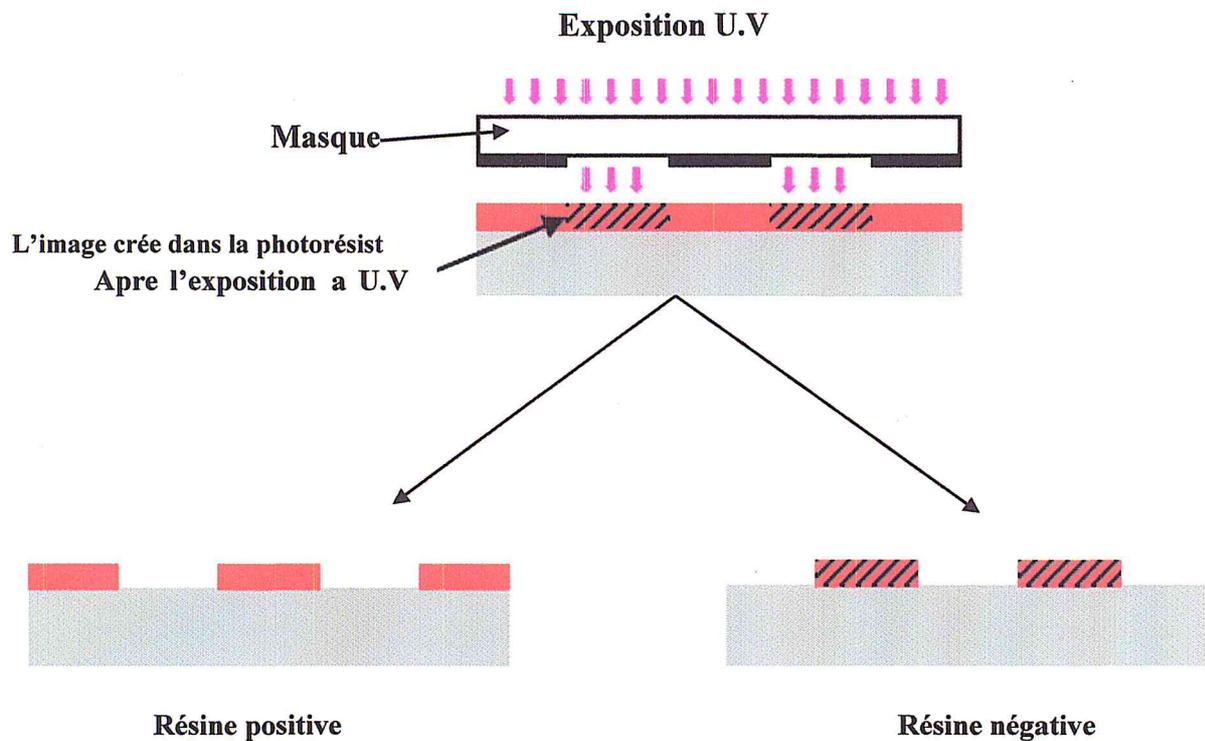


Figure III.3 : Les deux types de résine [51].

Tout ce procédé long et complexe doit être réalisé dans une atmosphère très propre car la moindre particule de poussière peut produire des défauts sur le wafer.

III.2.1.2. Le dépôt des couches

Il fait appel aux techniques classiques de dépôt en couche mince (figure III.4) qui peuvent être regroupées en deux catégories :

- Les dépôts chimiques en phase vapeur (CVD, épitaxie, oxydation thermique...) où le principe est basé sur une réaction chimique.
- Les dépôts physiques en phase vapeur (PVD) dans lesquels aucune réaction chimique n'intervient.

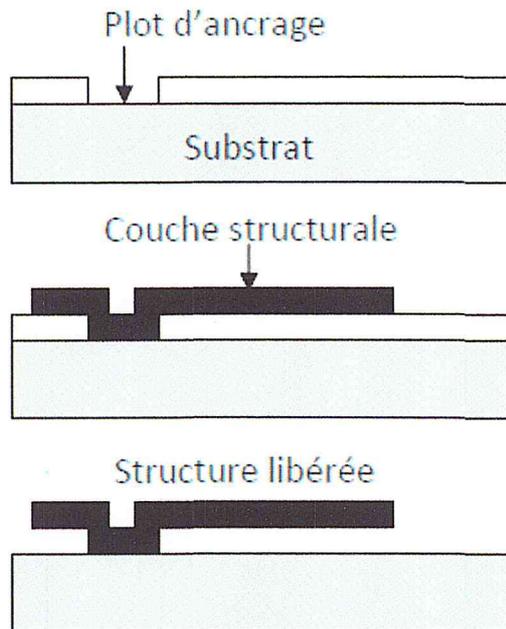


Figure III.4 : Fabrication de MEMS par micro-usinage de surface du silicium [52].

III.2.1.2.1. Dépôts chimiques en phase vapeur

Le substrat est placé dans une enceinte à atmosphère contrôlée dans laquelle on apporte, sous forme gazeuse, des précurseurs du matériau que l'on veut déposer. Le substrat est chauffé et sous l'action de cette chaleur, les précurseurs réagissent entre eux pour former un dépôt solide à la surface du substrat.

Les deux techniques de CVD les plus utilisées dans les technologies MEMS sont :

LPCVD (*Low Pressure Chemical Vapor Deposition*):

Le dépôt est effectué sur un substrat chauffé à $T < 600^{\circ}\text{C}$ dans une enceinte portée à basse pression ($\sim 10^{-3}$ mbar). Par rapport à la technique de CVD classique, l'utilisation de basses pressions pour les gaz précurseurs permet d'obtenir de meilleurs rendements.

PECVD (*Plasma enhanced chemical Vapor Deposition*):

L'utilisation d'un plasma provoque l'apparition d'espèces chimiques très réactives comme des radicaux qui réagissent à de plus faibles températures que les gaz précurseurs utilisés en LPCVD. A titre d'exemple, des dépôts de nitrure de silicium peuvent être obtenus dès 300°C .

III.2.1.2.2. Dépôts physiques en phase vapeur (PVD)

Les deux techniques de PVD les plus utilisées sont l'évaporation et la pulvérisation cathodique.

- Evaporation :

Le principe est basé sur l'évaporation d'un matériau source, placé dans une enceinte sous

vide, sous l'action d'un chauffage qui peut être effectué par effet Joule ou au moyen d'un faisceau d'électrons. Le matériau évaporé se recondense à la surface du substrat sur lequel le dépôt est effectué. Le chauffage par effet Joule est le plus simple à mettre en œuvre mais la pureté des couches n'est pas garantie à cause des interactions avec le substrat sous l'effet de la température. L'utilisation d'un faisceau d'électrons permet de palier à ce problème tout en augmentant la vitesse de dépôt.

- Pulvérisation cathodique:

La pulvérisation cathodique consiste à utiliser des ions présents dans un plasma afin de bombarder une cible. Les atomes éjectés se condensent ensuite sur le substrat où est effectué le dépôt. Cette technique est notamment très utile pour les dépôts de matériaux à haut point de fusion, difficiles à réaliser par évaporation.

III.2.1.3. Gravure

Pour libérer du substrat une microstructure fabriquée en utilisant la technologie silicium, la dernière étape est donc la gravure (figure III.5.b) c'est-à-dire l'attaque par voie humide ou sèche d'une couche déposée (couche sacrificielle) ou du substrat lui-même.

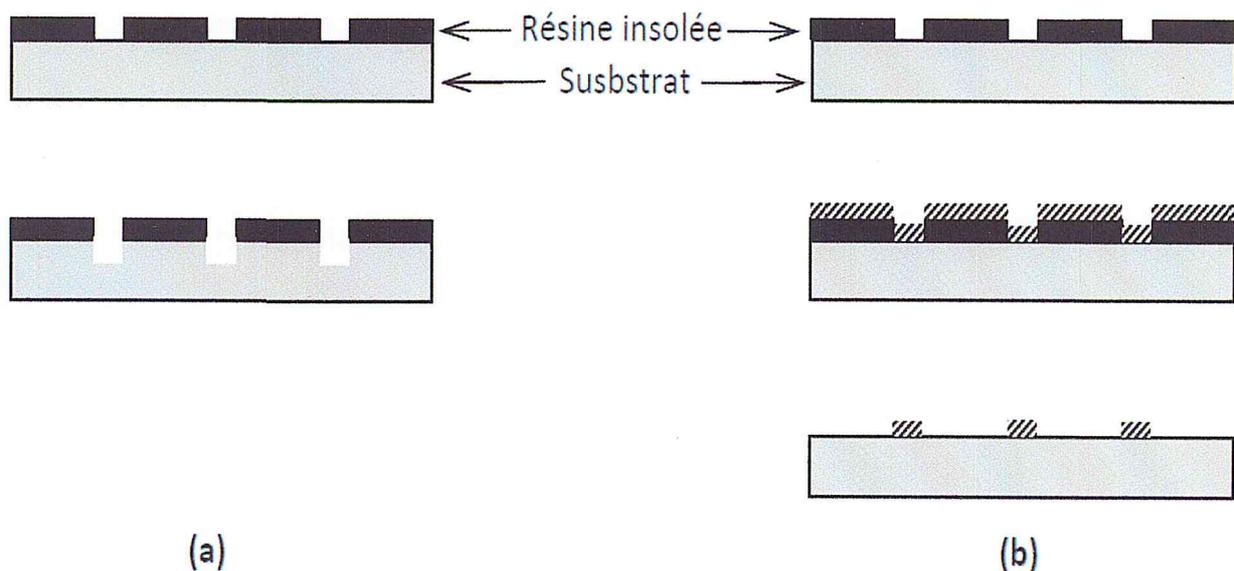


Figure III.5 : Utilisation de la résine formée par lithographie (a) procédé "lift-off", (b) procédé de gravure [52].

III.2.1.3.1. Gravure humide

C'est la technique de gravure la plus simple, elle consiste à immerger le substrat silicium dans une solution où les zones du substrat non masquées sont attaquées. On peut distinguer deux types d'attaque :

- L'attaque isotrope (figure III.6.a) où la vitesse d'attaque ne dépend pas de la direction. Le couple couche sacrificielle/solution d'attaque qui reste le plus utilisé jusqu'à maintenant est le couple silice/acide fluorhydrique (SiO_2/HF). Le problème le plus souvent rencontré est la " sous-gravure " (" underetching " en anglais). Il s'agit de l'attaque isotrope du substrat ou de la couche sacrificielle qui provoque une dégradation non-souhaitée du matériau placé sous la résine insolée sensée le protéger. Ceci explique l'utilisation de plus en plus répandue de la gravure anisotrope.
- L'attaque anisotrope (figure III.6.b) où la vitesse d'attaque dépend de l'orientation cristalline du matériau. Le couple le plus connu est ici le silicium monocristallin attaqué par l'hydroxyde de potassium (KOH). En effet, ce dernier attaque préférentiellement les plans $\langle 100 \rangle$ du silicium par rapport aux plans $\langle 111 \rangle$, un facteur 400 entre les vitesses d'attaque de ces deux familles de plans a pu être mis en évidence [50].

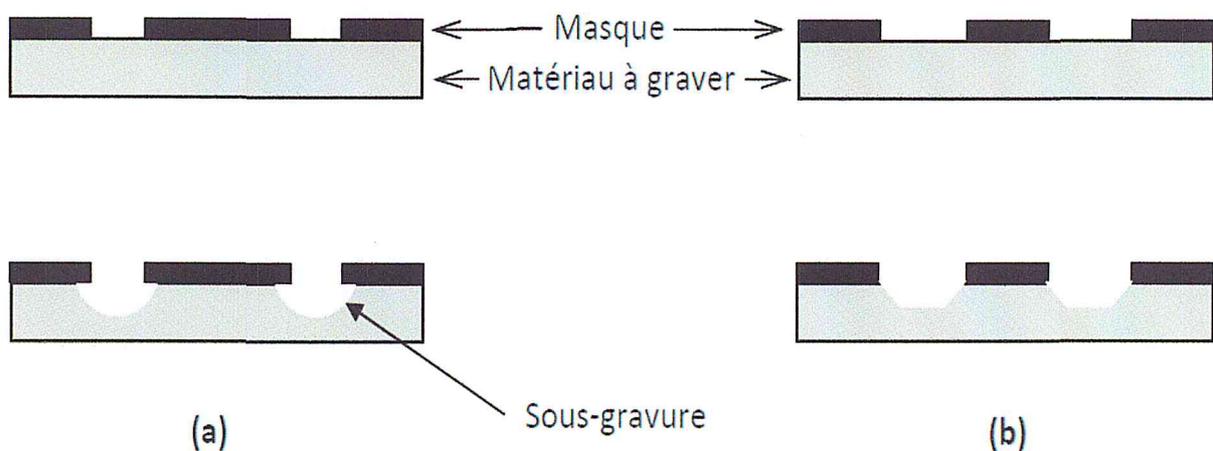


Figure III.6 : Gravure humide des couches minces (a) isotrope, (b) anisotrope [52].

III.2.1.3.2. Gravure sèche

Pour pallier aux problèmes liés à la gravure humide (sous-gravure, compatibilité des couches...) des procédés d'attaque par voie sèche se sont développés depuis quelques années. Ils peuvent être classés en deux catégories :

- la gravure sèche qui n'utilise pas de plasma. Des gaz de type fluorures (XeF_2 , $\text{BrF}_3 + \text{ClF}_3 \dots$) réagissent avec le silicium pour former du tétra fluorure de silicium gazeux. La réaction est contrôlée via la température et les pressions partielles des gaz réactifs.

- les gravures sèches utilisant un plasma. Des plasmas radiofréquences (RF) sont utilisés pour graver des substrats en silicium au moyen d'ions et d'atomes soit réactifs

(gravure chimique) soit non réactifs (gravure physique) soit en combinant les deux comme dans la technique RIE (Reactive Ion Etching).

III.2.2. Micro usinage de volume

Le micro-usinage de volume fait du substrat silicium une partie intégrante du composant final. Cette méthode est notamment utilisée pour fabriquer des microstructures ayant un haut rapport de forme (rapport hauteur/largeur) et pour la fabrication de membranes silicium en effectuant un usinage de volume par la face arrière d'un wafer.

Il y a Deux techniques sont principalement utilisées pour l'usinage en volume du silicium.

III.2.2.1. DRIE (Deep Reactive Ion Etching)

Ce procédé a été mis au point par la société Robert Bosch Corporation en 1995 [53]. Elle prolonge la technique RIE présentée précédemment et permet un usinage en profondeur (plusieurs centaines de microns) du silicium grâce à un faisceau d'ions réactifs. La très bonne anisotropie est obtenue grâce à l'utilisation en alternance d'un plasma C4F8 pour passer les parois de la cavité silicium et celle d'un plasma SF6 pour usiner le fond de la cavité. Ce type d'usinage est indépendant de l'orientation cristalline et il permet d'obtenir de hautes parois verticales.

Depuis son développement en 1995, cette technique a été utilisée pour la fabrication de MEMS dans divers domaines : MOEMS [54,55], composants pour la microfluidique [56], ou encore capteurs [57, 58].

III.2.2.2. Micromoulage: HEXSIL

Ce procédé de micro-moulage couple l'usinage du silicium par DRIE avec des dépôts de couches minces classiques incluant une couche sacrificielle permettant de libérer les microstructures silicium de leur moule en fin de procédé [59,60]. L'originalité est donc l'utilisation d'une microstructure en silicium qui sert de moule pour fabriquer des parties d'un composant MEMS qui sont ensuite reportées sur un autre substrat, le moule en silicium étant ensuite réutilisable pour un autre moulage. Cette technique a été utilisée pour fabriquer des outils de micro positionnement tels que des micropinces [61,62].

III.2.3. Procédé de fabrication LIGA

La technologie LIGA a été développée à la fin des années 70 mais elle n'a commencé à être utilisée qu'au début des années 90 [52]. Par rapport à l'usinage de surface du silicium, elle permet d'aboutir à un rapport de forme (RF= hauteur/largeur) très élevé. Le principe du procédé est décrit dans la Figure III.7. La première étape est le dépôt d'une résine photosensible très épaisse (> 1mm) qui ne peut être insolée qu'au moyen d'un rayonnement X à haute énergie (rayonnement synchrotron). La longueur d'onde du rayonnement, de

quelques dixièmes de nanomètre, permet d'obtenir une très bonne résolution ce qui est le principal atout de cette technologie. La deuxième étape est le développement de la résine insolée (dissolution chimique). L'étape suivante est le dépôt électrolytique d'un métal dans le moule polymère. Ce dépôt métallique peut ensuite lui-même constituer un outil pour fabriquer des microstructures par emboutissage ou injection de polymères ou d'autres métaux.

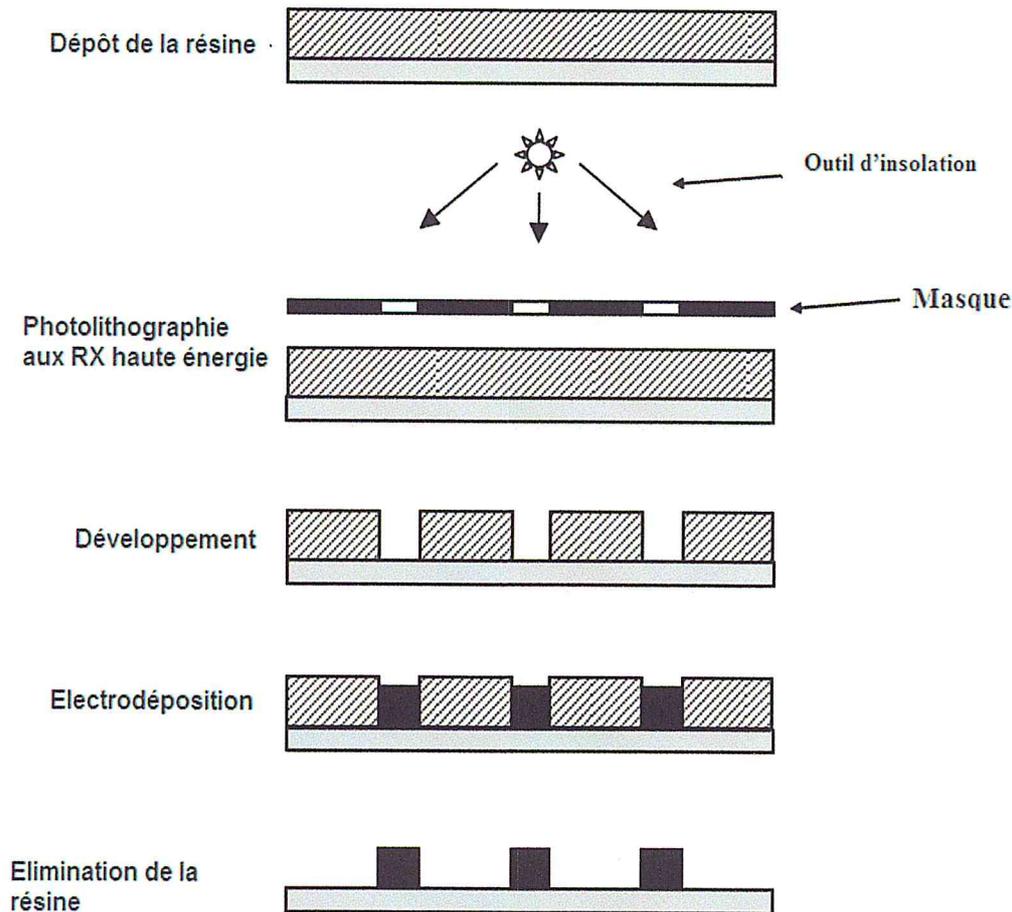


Figure III.7 : Procédé LIGA [52].

III.3. Réalisation de MEMS à structure micropoutre

Le concept de microsystème est né à la fin des années 1980 aux Etats-Unis avec l'intégration sur une puce de silicium de micro-actionneurs et de microcapteurs avec le traitement du signal associé. Ainsi, les MEMS (MicroElectroMechanicalSystems) s'inscrivent dans le prolongement des travaux de développement réalisés en micro-électronique. La caractéristique commune de la plupart des MEMS commercialisés est l'utilisation du silicium comme matériau de base. Celui-ci a été emprunté à la micro-électronique tout comme certaines techniques de fabrication (photolithographie en particulier voir [figure III.2] auxquelles se sont rajoutées de nouvelles opérations de micro-usinage. L'autre raison de cette

popularité provient principalement de ses propriétés électriques, étudiées depuis plusieurs dizaines d'années et particulièrement intéressantes en microélectronique.

III.3.1. Fabrication de Micropoutres à base de silicium

La mise en forme du silicium s'articule autour de 2 méthodes :

- Le micro-usinage de volume où le MEMS est réalisé par gravure directe du silicium. En outre, différentes couches minces de « masquage » permettront des gravures localisées afin de réaliser les formes escomptées.
- Le micro-usinage de surface où le MEMS est réalisé par différentes étapes de dépôts et de gravure de couches. Dans ce cas, le silicium est utilisé uniquement comme substrat, il ne sera pas attaqué ; et les matériaux utilisés pour les couches structurales (présentes en fin de procédé), et sacrificielles (couches de masquage ou servant de support gravées pendant le processus) peuvent être de différentes natures (polymères, métaux, céramiques...).

III.3.1.1. Micro-usinage de volume

Les gravures utilisées pour donner au silicium les formes désirées peuvent être réalisées soit en utilisant des solutions chimiques, gravure dite « humide », soit par le biais d'un plasma d'ions réactifs avec la technique « DRIE » appelée gravure « sèche ». Les 2 types de gravures peuvent avoir un caractère isotrope ou anisotrope, auquel cas, une direction de gravure est privilégiée permettant de réaliser des gravures directionnelles.

Dans le cas d'une gravure humide, un masquage, réalisé par photolithographie grâce à des couches protectrices à base de SiO_2 ou de Si_3N_4 , est formé au préalable sur le silicium.

Après avoir réalisé une ouverture du masque au niveau de l'endroit à attaquer, la gravure du silicium peut commencer. Dans le cas d'une gravure isotrope, le mélange HNO_3/HF est le plus couramment utilisé. Il fonctionne par un mécanisme cyclique d'oxydation et d'attaque de la couche oxydée de silicium formée. Il est utilisé dans le cas de la réalisation des poutres silicium (figure III.8) et (figure III.10). Pour la réalisation d'autres structures, cavités par exemple, une gravure anisotrope peut être préférée grâce à l'attaque du silicium par les radicaux (OH) présents dans certaines solutions connues (KOH, EDP, TMAH...) (figure III.9). Les liaisons Si-Si sont ainsi fragilisées et les directions de plus basse densité sont les plus rapidement affectées. C'est pourquoi, dans la gravure d'un plan $\langle 100 \rangle$ de silicium, les directions $\langle 111 \rangle$, qui seront les plus lentes à être attaquées, détermineront la forme finale de la cavité (figure III.9).

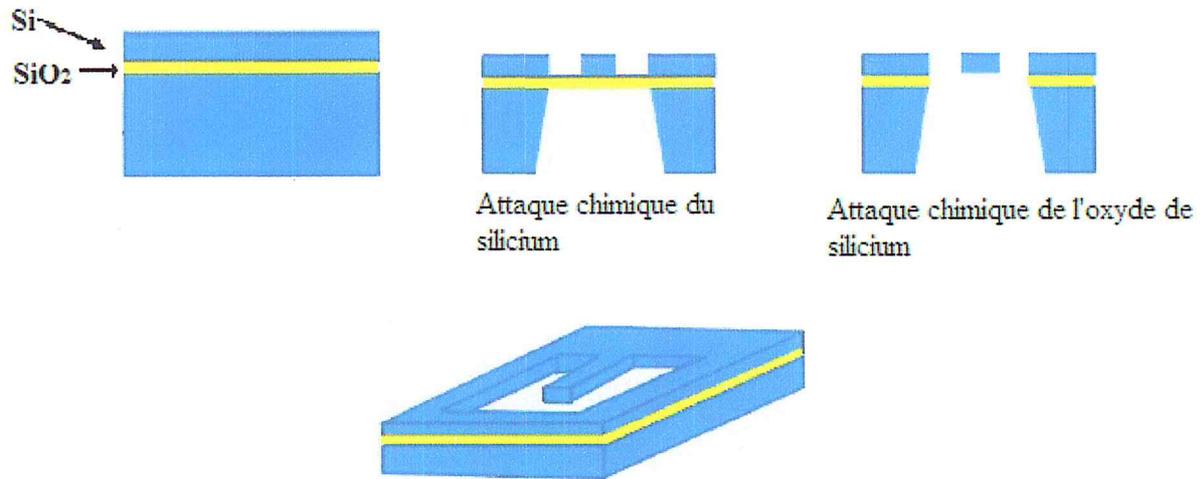


Figure III.8 : Procédé de gravure isotrope de silicium[63].

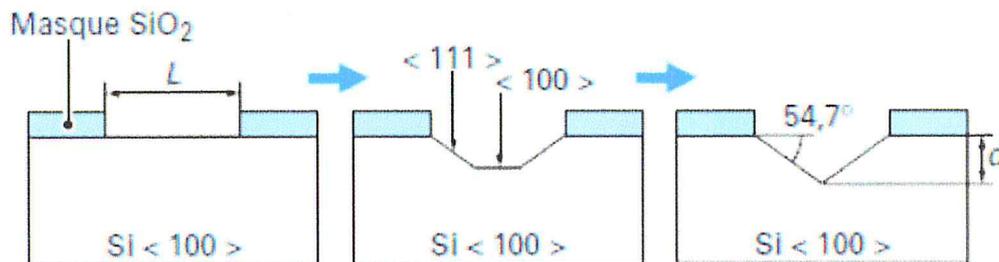


Figure III.9 : procédé de gravure anisotrope de silicium [63].

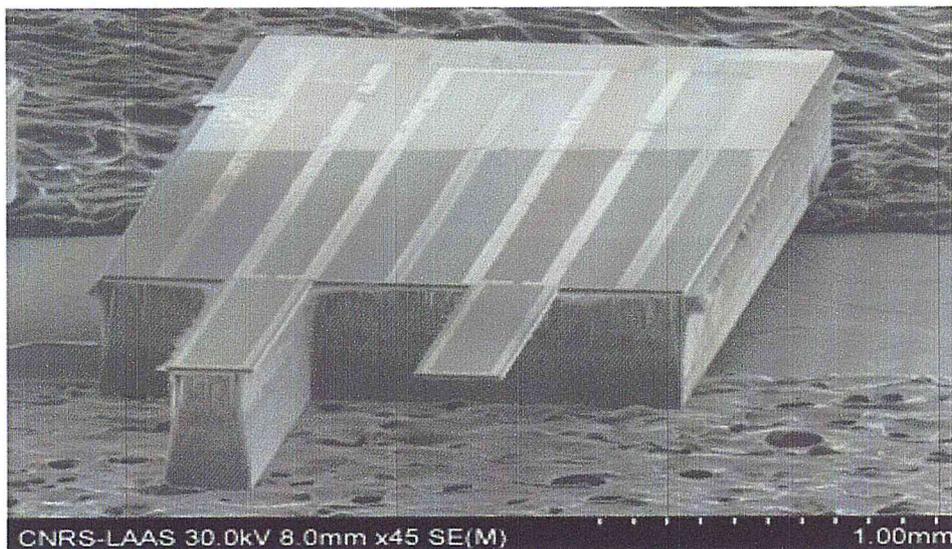


Figure III.10 : Photo d'une structure silicium fabriquée au LAAS [63]

III.3.1.2. Micro-usinage de surface

On cherchera, ici, à réaliser des structures libérées du substrat de silicium par dépôts successifs de couches minces structurales (Si polycristallin ou matériau quelconque) et

sacrificielles (souvent à base de SiO₂) (figure III.11). Les épaisseurs caractéristiques des dépôts sont de l'ordre du micron alors que celles des objets réalisés en micro-usinage de volume sont de l'ordre de la centaine de microns. Ces différentes couches peuvent être déposées par différents biais parmi lesquels le dépôt en phase vapeur tels que les procédés « CVD » (Chemical Vapor Deposition) et « PVD » (Physical Vapor Deposition), le dépôt à la tournette ou « spin coating », par pulvérisation ou « spray coating » et à la goutte ou « dip coating ».

Les couches sacrificielles utilisées sont pour la plupart des résines photosensibles positives ou négatives structurées par photolithographie et qui seront ensuite éliminées, la résine étant éliminée par attaque chimique sélective (figure III.11).

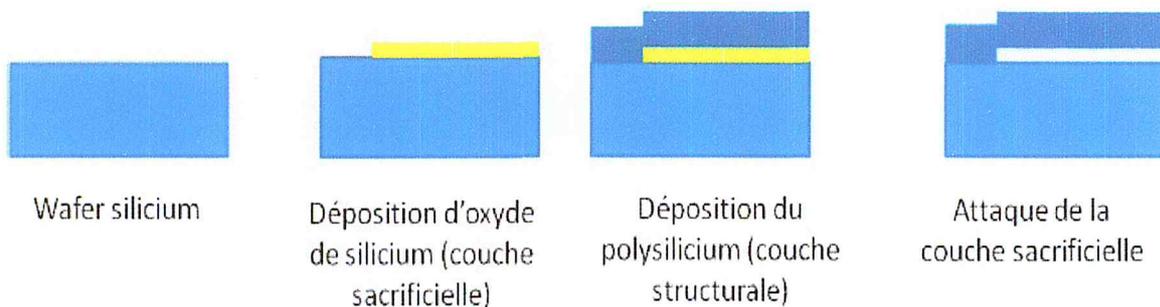


Figure III.11 : Micro-usinage de surface basé sur les propriétés d'attaque sélective des Matériaux (application à la réalisation de poutre silicium) [63].

III.3.2. Micropoutre à base de polymères

Les méthodes de micro-fabrication de polymères occupent aujourd'hui une place importante dans le domaine des technologies basse-couté alternatives aux technologies silicium.

Une des principales raisons du succès des matériaux polymères dans le domaine des MEMS, et plus particulièrement de microsystèmes biologiques, réside dans la large gamme de technologies de fabrication et leur adaptabilité à une production de masse (procédés « roll to roll »). De plus, le panel de matériaux polymères disponibles permet la réalisation de micro objets biocompatibles (pour la plupart) offrant une gamme de propriétés chimiques et physiques étendue. Pour la réalisation de ces structures MEMS polymères, la méthode la plus courante utilise les techniques issues des procédés de la microélectronique en particulier la photolithographie. Cependant, de nouvelles méthodes alternatives voient le jour pour s'affranchir du besoin de photosensibilité de matériaux synthétiques. L'utilisation de moules, dans lesquels le polymère est coulé, est très répandue. D'autres techniques peuvent aussi être

préférées, citons l'ablation laser, l'utilisation de masques mécaniques (stencil), le nano-imprimant et tout récemment même la sérigraphie.

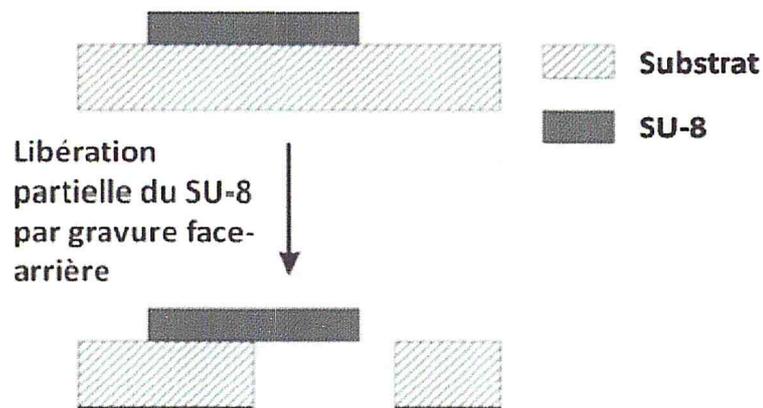


Figure III.12 : Réalisation d'une structure SU8 partiellement libérée par gravure face-arrière du Silicium [63].

La libération partielle ou totale de la couche structurale polymère préalablement structurée par photolithographie pourra s'effectuer par les techniques de gravure en face arrière [63]. On optera, général pour la gravure par DRIE d'un substrat silicium. Ce procédé est utile pour la réalisation de micropoutres hybrides silicium/SU-8 (figure III.12), la résine SU-8 étant une résine photosensible négative.

III.4. Conclusion

Nous avons détaillé les méthodes de la microfabrication et nous avons détaillé aussi le principe de la fabrication de la micropoutre constituées de différents matériaux (silicium et polymères). il y'a aussi d'autres techniques basés sur différents matériaux (exemple :céramique). L'essentiel de ce chapitre est la possibilité de fabriquer une micropoutre biencastée et une micropoutre encastée d'une coté et libre de l'autre avec des différentes longueurs, largeurs, épaisseurs et différents matériaux.

CHAPITRE IV : Modélisation physique du capteur

Chapitre IV : Modélisation physique du capteur

IV.1. Introduction

L'objectif de la modélisation est d'étudier le comportement des micropoutres par la mise en équation mais également d'optimiser les différents paramètres géométriques afin d'augmenter la sensibilité. La première partie introduit la mise en équation générale d'une micropoutre simple en calculant la fréquence de résonance pour différents cas. Pour valider le modèle analytique.

Enfin, l'optimisation du capteur se fera au travers de l'étude de l'influence des paramètres géométriques sur la sensibilité.

IV.2.1. Fréquence de résonance d'une micropoutre simple

La modélisation physique d'un microcapteur à base de micropoutre consiste à déterminer à partir des équations générales de la mécanique l'expression de la fréquence de résonance. Cette première partie va, tout d'abord, définir les paramètres géométriques qui caractérisent une micropoutre, puis au travers de la mise en équation de la fréquence de résonance, la dépendance de cette fréquence en fonction de la masse additionnelle va être calculée pour différents cas.

IV.2.2 Micropoutres idéales

Dans cette partie, nous examinons le cas de micropoutres parfaites Figure IV.1. Une micropoutre est considérée comme parfaite si :

- Elle a une épaisseur et une largeur constante sur toute sa longueur;
- Elle est composée d'un matériau élastique linéaire, homogène et isotrope ;
- Elle est mince (les dimensions de la section de la poutre sont très petites devant sa longueur ou devant la distance entre deux nœuds de vibration) ;
- Seules les déformations normales à l'axe de la poutre non déformée sont considérées, les sections planes restent planes ;
- Aucune charge axiale n'est appliquée à la poutre ;
- Le centre de la torsion de la section de la poutre coïncide avec le centre de masse, de telle façon que la rotation et la translation de la poutre ne soient pas couplées [64].

IV.2.3. Paramètres géométriques

Lorsque nous évoquons depuis le début le terme de "micropoutre", nous considérons en fait une poutre encastree à une extrémité et libre à l'autre, comme illustrée figure IV.1. Les mécaniciens appellent ces types particuliers de poutres les "consoles". Dans toute la suite,

Chapitre IV : Modélisation physique du capteur

nous considérerons que la section de la poutre est rectangulaire et constante. Les paramètres ainsi définis sont : la longueur de la structure notée L , sa largeur b et l'épaisseur h_1 .

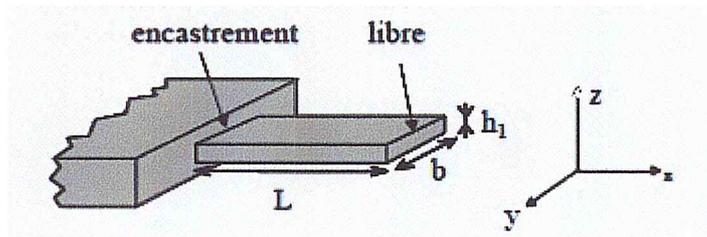


Figure IV.1 : Structure des poutres étudiées [65]

IV.2.4. Expression de la fréquence de résonance en flexion : mise en équation

La fréquence de résonance d'une structure dépend entre autre de sa masse. L'expression de la fréquence de résonance peut alors être calculée dans trois cas différents : « La poutre homogène, la poutre bimorphe et la poutre homogène avec une masse supplémentaire à l'extrémité libre ».

IV.2.4.1. Poutre homogène

Nous allons directement considérer le cas d'une poutre mince dite « homogène » (car constituée d'un seul matériau) de forme parallélépipédique (Figures IV.1 et IV.2), avec $h_1 \ll L$ et $b \ll L$.

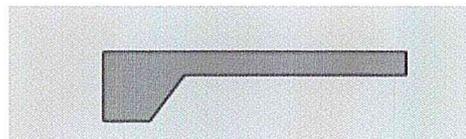


Figure IV.2. Poutre homogène (vue en coupe) [65].

Une micropoutre de géométrie parallélépipédique peut avoir des résonances mécaniques se produisant dans différentes directions. Si l'on considère un plan formé par la face supérieure (plus grande surface) d'une poutre, on peut alors distinguer des mouvements : (a) en torsion, (b) en flexion latérale dans le plan, (c) en flexion transverse hors plan et (d) en élongation dans le plan comme le montre la Figure IV.3.

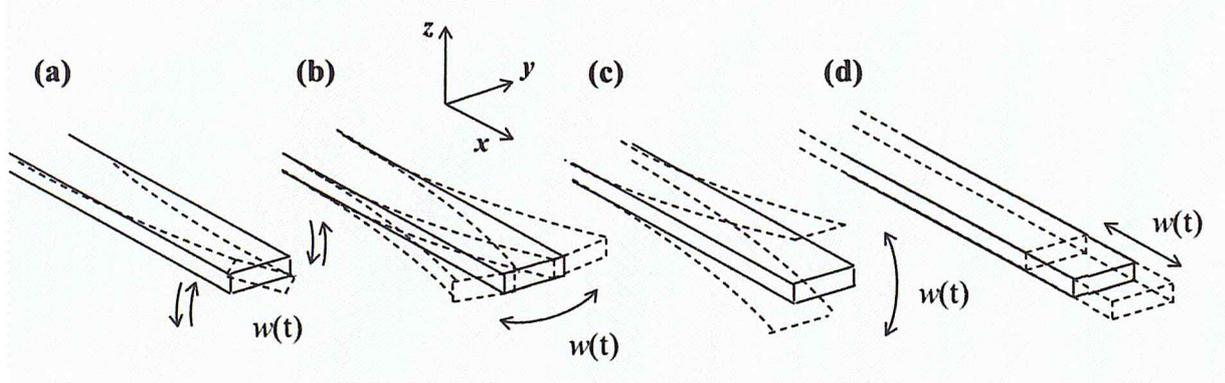


Figure IV.3: Mouvements a) en torsion b) en flexion dans le plan c) en flexion hors plan d) en élongation dans le plan [66].

Pour la flexion hors plan, il existe plusieurs modes qui vont du rang $n = 1$ jusqu'à l'infini. Pour une poutre donnée, la fréquence de résonance du mode ainsi que sa forme de vibration, dépendent de la géométrie et du matériau de la structure. La Figure IV.4 montre les quatre premiers modes de résonance hors plan d'une micropoutre de géométrie parallélépipédique dans le vide et sans pertes. On peut solliciter un mode de résonance en excitant la micropoutre à la fréquence correspondante.

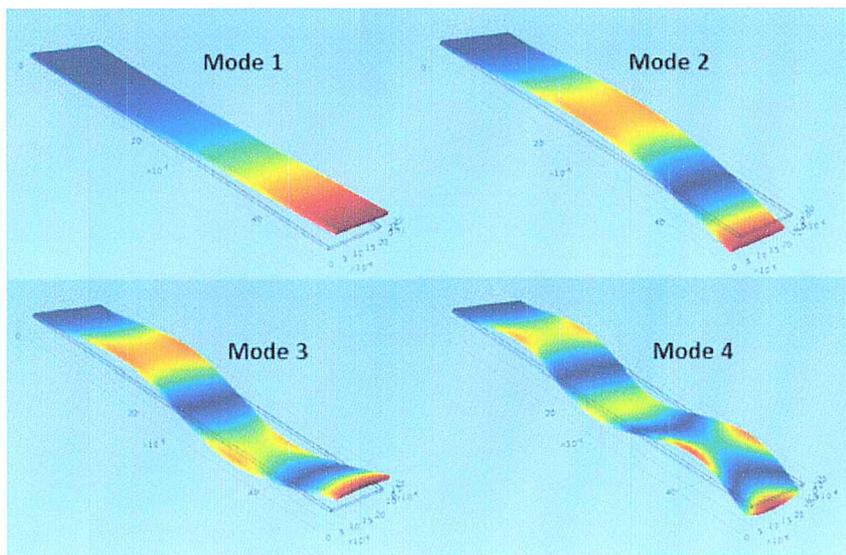


Figure IV.4: Premiers modes de vibration de flexion hors-plan (simulation Comsol).

Les deux théories des poutres les plus populaires utilisées dans la modélisation de micropoutres résonantes sont les modèles d'Euler-Bernoulli et de Timoshenko. Le premier néglige les forces de cisaillement ainsi que l'inertie de rotation tandis que le second les prend

Chapitre IV : Modélisation physique du capteur

en considération [67]. En général, le modèle d'Euler-Bernoulli suffit largement dans la modélisation des poutres résonantes à faibles déplacements, condition pour laquelle les effets de cisaillement ainsi que l'inertie rotationnelle sont négligeables [68,69]. C'est donc ce modèle qui est utilisé dans cette partie.

Avec les conditions précédentes : les fréquences propres de résonance des modes en flexion de la poutre monodimensionnelle encastree - libre de longueur L , et en oscillation libre non amortie s'expriment de la façon suivante [70] :

$$f_n = \frac{\lambda_n^2}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{EIL}{m}} \quad (\text{IV.1})$$

Où :

$I = bh_1^3/12$ est le moment d'aire quadratique par rapport à l'axe y , E est le module d'Young, m est la masse de la poutre, λ_n dépend du mode de résonance considéré : la figure II.3 donne les profils de résonance en flexion de ce type de poutre.

Pour le premier mode $\lambda_1 = 1,875$, et pour les modes suivants : $\lambda_2 = 4,694$, $\lambda_3 = 7,855$.

Enfin, pour $n > 3$, $\lambda_n = (2n-1) \lambda/2$.

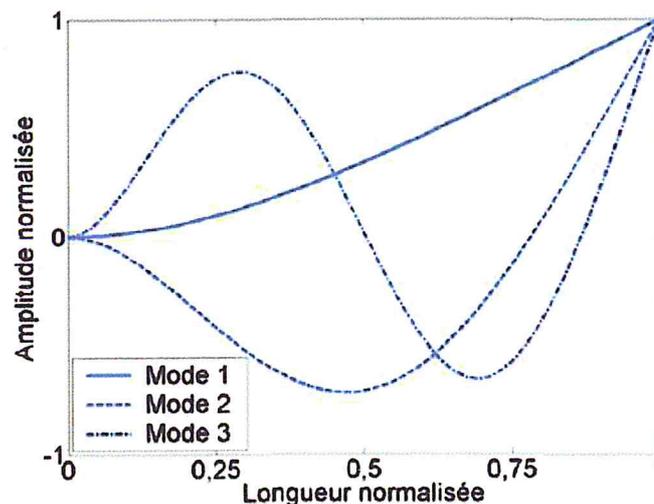


Figure IV.5. Profils de résonance en flexion [65].

Dans le cas des poutres que nous allons considérer ($b < L$), cette formule peut à nouveau être utilisée à condition de modifier l'expression du module d'Young en tenant compte de la déformation suivant la largeur [71].

Chapitre IV : Modélisation physique du capteur

Il convient alors de considérer le module d'Young effectif :

$$\hat{E} = E \left\{ 1 + \gamma \left(\frac{1}{1 - \nu^2} - 1 \right) \right\} \quad (\text{IV.2})$$

Avec :

ν Le coefficient de poisson, et γ une fonction de b/L telle que si $b/L \rightarrow 0$ alors $\gamma \rightarrow 0$ et donc $\hat{E} = E$. Par contre si b/L augmente la valeur de γ se rapproche de 1 et ainsi le module d'Young effectif \hat{E} se rapproche de celui d'une plaque c'est à dire de $E/(1 - \nu^2)$, [8]. Une fonction γ , compatible avec les limites nécessaires pour $b/L \rightarrow 0$ et, $\gamma \rightarrow \infty$ a été obtenue par ajustement avec les résultats des simulations par éléments finis :

$$\lambda = 1 - e^{-1.5 \frac{b}{L}}$$

L'expression (II.1) de la fréquence de résonance peut donc s'écrire :

$$f_n = \frac{\lambda_n^2}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{\hat{E}IL}{m}} \quad (\text{IV.3})$$

Ou de façon équivalente :

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3\hat{E}I}{(3/\lambda_n^4)mL^3}} \quad (\text{IV.4})$$

Ou encore plus généralement connu sous la forme suivante :

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m_{eff\ n}}} \quad (\text{IV.5})$$

Avec : $m_{eff\ n} = (3/\lambda_n^4) m$ (c'est à dire $0.24m$ pour $n = 1$), $K = 3\hat{E}I/L^3$ correspond à la rigidité à l'extrémité de la poutre. En effet, lorsque nous appliquons une force ponctuelle F à l'extrémité de la poutre, la flexion vaut alors dans ce cas $w(x=L) = F/k$.

Pour le premier mode de flexion la fréquence de résonance devient :

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{0.24m}} \quad (\text{IV.6})$$

IV.2.4.2. Poutre bimorphe

Les résultats du paragraphe précédent peuvent être utilisés à condition de remplacer la poutre bimorphe par une poutre équivalente constituée d'un seul matériau [72]. Dans le cas d'une poutre bimorphe, la structure est constituée de deux couches de matériaux différents référencés 1 et 2 (Figure IV.6).

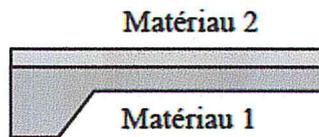


Figure IV.6. Poutre bimorphe (vue en coupe) [65].

La poutre équivalente est constituée d'un seul matériau (le même que le substrat : module d'Young effectif) \hat{E}_1 et n'a pas une section rectangulaire mais en T : la portion inférieure à une largeur b , une épaisseur h_1 et la portion supérieure à une largeur $b' = b \frac{\hat{E}_2}{\hat{E}_1}$ et une épaisseur h_2 (Figure IV.7).

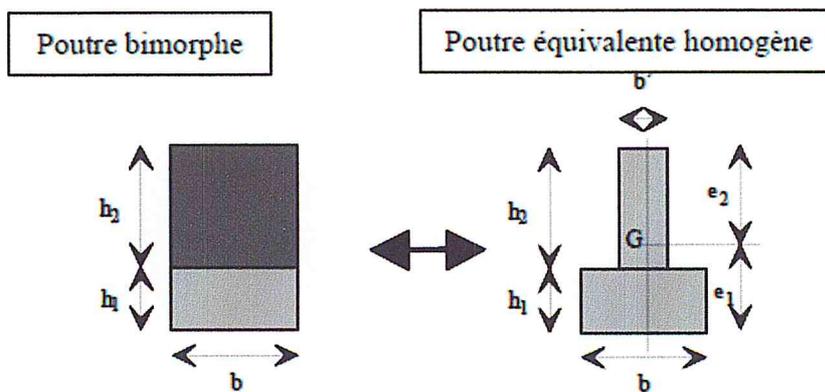


Figure IV.7 : Equivalence entre bimorphe et poutre homogène [65].

L'axe neutre a pour position dans le cas de la [figure IV.7] :

$$e_1 = \frac{bh_1^2 + b'((h_1 + h_2)^2 - h_1^2)}{2(h_1b + h_2b')} \tag{IV.7}$$

$$e_2 = h_1 + h_2 - e_1 \tag{IV.8}$$

Ainsi, l'expression du moment d'inertie de la section par rapport à l'axe neutre s'écrit :

Chapitre IV : Modélisation physique du capteur

$$\begin{aligned}
 I_{eq} &= \frac{b'}{3}(e_2^3 - (h_1 - e_1)^3) + \frac{b}{3}(e_2^3 - (h_1 - e_1)^3) \\
 &= \frac{b h_1^3}{12} + \frac{b' h_2^3}{12} + b h_1 \left(e_1 - \frac{h_1}{2} \right)^2 + b' h_2 \left(e_1 - h_1 - \frac{h_2}{2} \right)^2
 \end{aligned} \tag{IV.9}$$

Compte tenu de l'expression de e et de b' le moment d'inertie de la section par rapport à l'axe neutre est :

$$\begin{aligned}
 I_{eq} &= \frac{b h_1^3}{12} + \frac{b' h_2^3}{12} + \frac{b h_1 b' h_2 (h_1 + h_2)^2}{4(b h_1 + b' h_2)} \\
 &= \frac{b}{12 \hat{E}_1} \frac{h_1^4 \hat{E}_1^2 + h_2^4 \hat{E}_2^2 + 2 h_1 h_2 \hat{E}_1 \hat{E}_2 (2 h_1^2 + 3 h_1 h_2 + 2 h_2^2)}{h_1 \hat{E}_1 + h_2 \hat{E}_2}
 \end{aligned} \tag{IV.10}$$

A condition de considérer le moment d'aire quadratique équivalent I_{eq} , la fréquence de résonance du bimorphe peut se mettre sous la forme suivante :

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3 \hat{E}_1 I_3}{0.24(m_1 + m_2)L^3}} \tag{IV.11}$$

m_1 et m_2 étant les masses des deux matériaux.

D'après l'expression (IV.11), nous pouvons noter que la présence de la couche modifie non seulement la masse mais également la raideur ($3\hat{E}_1 I_{eq}/L^3$). Si $\hat{E}_2 h_2 \ll \hat{E}_1 h_1$ alors la raideur n'est pas modifiée et nous retrouvons bien $3\hat{E}_1 I_1/L^3$ relatif à la partie de la poutre constituée du matériau 1.

IV.2.4.3. Poutre homogène avec masse supplémentaire à l'extrémité libre

Nous allons maintenant considérer qu'une masse supplémentaire m_s est ajoutée seulement à l'extrémité libre de la poutre comme le montre la figure IV.8 :

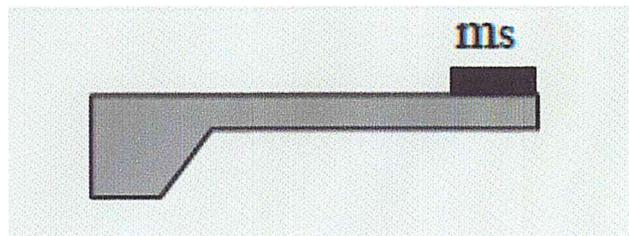


Figure IV.8. Poutre homogène avec masse ajoutée à l'extrémité libre de la poutre (vue en coupe) [65].

L'expression de la fréquence de résonance devient (IV.11) :

Chapitre IV : Modélisation physique du capteur

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{0.24m + m_s}} \quad (\text{IV.12})$$

A partir de cette expression, nous pouvons noter que la fréquence de résonance est beaucoup plus sensible aux variations de masse en bout de poutre plutôt qu'aux variations de masse réparties sur toute la longueur.

Si cette structure est utilisée en tant que capteur chimique un compromis doit être fait : dans le cas où la surface active est localisée à l'extrémité libre de la poutre, la sensibilité à la masse sera élevée mais réside néanmoins le problème inhérent de la petite surface de zone active, ce qui entraîne une faible masse additionnelle due à la sorption.

En contrepartie, déposer la couche sensible sur toute la structure augmente la surface active mais la partie proche de l'encastrement est moins efficace que celle de l'extrémité libre.

Fort de ces remarques, une nouvelle approche est envisagée et propose de modifier la géométrie des structures en élargissant la surface active dans la zone où la sensibilité à la masse est la meilleure (en bout de poutre).

IV.3. Micropoutre résonante: mesure des propriétés physiques des fluides

Le comportement d'une micropoutre résonante dépend des propriétés physiques du fluide (gaz ou liquide) environnant, telles que sa viscosité et sa masse volumique. L'objet de cette partie est de mettre en équation le mouvement d'une micropoutre en mode dynamique, et de faire apparaître les paramètres influant sur sa fréquence propre et sur son facteur de qualité.

IV.3.2.1. Résonance propre dans le vide

Compte tenu des hypothèses avancées sur les conditions de validité du modèle d'Euler-Bernoulli et dans le cas où la section est constante et homogène le long de la micropoutre, l'équation différentielle aux dérivées partielles, régissant le mouvement de flexion de la micropoutre en mode dynamique hors plan dans le vide et sans pertes internes s'écrit :

$$\hat{E}I \frac{\partial^4 w(x,t)}{\partial x^4} + m_L \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial t^2} = 0 \quad (\text{IV.13})$$

Chapitre IV : Modélisation physique du capteur

Où $w(x, t)$ est la déflexion au point x selon l'axe z à l'instant t , I le moment quadratique de la section d'abscisse x par rapport à l'axe y , m_L la masse linéique et \hat{E} le module d'Young effectif.

Cette équation ne peut être appliquée que lorsque la micropoutre respecte les conditions d'Euler-Bernoulli, à savoir :

- une section transversale uniforme et homogène.
- une longueur largement plus grande que la largeur ($L \gg b$).
- une élasticité linéaire et isotrope.
- des amplitudes de vibration très faibles comparées à ses dimensions ($w \ll h \ll b \ll L$).

Une écriture plus judicieuse de cette équation (IV.13) consiste à l'exprimer dans le domaine fréquentiel. Ceci permet de suivre l'évolution de la déflexion en fonction de la fréquence et de déterminer, soit analytiquement, soit numériquement (méthodes de simulations numériques) les fréquences de résonance dans le vide associées à chaque mode de résonance de la micropoutre. En effectuant la transformée de Fourier de l'Equation IV.13 on obtient :

$$\hat{E}I \frac{\partial^4}{\partial x^4} W(x, \omega) - m_L \omega^2 W(x, \omega) = 0 \quad (\text{IV.14})$$

Où $W(x, \omega)$ est la transformée de Fourier de $w(x, t)$ et ω la pulsation. Cette équation IV.14 a pour solution finale [11]:

$$W(x, \omega) = W_0 \left(\frac{\cosh \lambda_n + \cos \lambda_n}{\sinh \lambda_n + \sin \lambda_n} \left(\sinh \frac{\lambda_n x}{L} - \sin \frac{\lambda_n x}{L} \right) + \cos \frac{\lambda_n x}{L} - \cosh \frac{\lambda_n x}{L} \right) \quad (\text{IV.15})$$

Avec

$$1 + \cos \lambda_n \cosh \lambda_n = 0 \quad (\text{IV.16})$$

Tel que W_0 est une amplitude de vibration constante et λ_n est la constante relative au mode de résonance émanant des solutions de l'Equation (IV.14) dont les valeurs des cinq premiers modes sont reportées dans le Tableau IV.1

Chapitre IV : Modélisation physique du capteur

Tableau IV.1 : Valeurs de λ_n pour les premiers modes de résonance en flexion hors plan [66].

N	1	2	3	4	5
λ_n	1.875104	4.694091	7.854757	10.99554	14.92257

IV.3.2.2. Résonance forcée dans le fluide

Lorsqu'une micropoutre est immergée dans un gaz ou un liquide et est soumise à une force d'excitation sinusoïdale à son extrémité libre, l'équation aux dérivées partielles décrite dans l'Equation (IV.14) devient [12] :

$$\hat{E}I \frac{\partial^4}{\partial x^4} W(x, \omega) - m_L \omega^2 W(x, \omega) = F_{exc}(x, \omega) + F_{fluide}(x, \omega) \quad (IV.17)$$

Où $F_{exc}(x, \omega)$ est la force par unité de longueur dans le domaine fréquentiel excitant la micropoutre et $F_{fluide}(x, \omega)$ est la force par unité de longueur dans le domaine fréquentiel exercée par le fluide sur la structure et qui s'oppose à son mouvement.

La force hydrodynamique par unité de longueur qu'exerce le fluide sur la structure peut s'écrire :

$$F_{fluide}(x, \omega) = -g_1(x, \omega)j\omega W(x, \omega) + g_2(x, \omega)\omega^2 W(x, \omega) \quad (IV.18)$$

La force hydrodynamique exprimée dans l'Equation (IV.18) est la résultante des contraintes normales et tangentielles (pressions hydrodynamiques et contraintes visqueuses) sur toutes les surfaces de la micropoutre en contact avec le fluide. Le premier terme, proportionnel à la vitesse et s'opposant à celle-ci, témoigne de la dissipation de l'énergie par frottement visqueux. Le second terme inertiel illustre l'alourdissement de la micropoutre engendré par la couche de fluide qu'elle déplace.

Après plusieurs méthodes d'approximations et calcul; l'équation différentielle (IV.17) devient alors :

$$\frac{\partial^4}{\partial x^4} W(x, \omega) - A^4(\omega)W(x, \omega) = 0 \quad (IV.19)$$

Tel que :

Chapitre IV : Modélisation physique du capteur

$$A(\omega) = \left(\frac{m_L \omega^2}{\hat{E}I} \left(1 + \frac{g_2(\omega) - j \frac{g_1(\omega)}{\omega}}{m_L} \right) \right)^{\frac{1}{4}} \quad (IV.20)$$

La solution de l'équation différentielle Equation (IV.19) qui régit le comportement de la micropoutre en vibration, en tout point le long de l'axe des abscisses (x) et en présence d'un fluide environnant et d'une force d'excitation ponctuelle appliquée en bout de la micropoutre (extrémité libre), est donnée par :

$$W(L, \omega) = \frac{F_{exc}(L, \omega)(\sinh AL \cos AL - \cosh AL \sin AL)}{\hat{E}IA^3(1 + \cos AL \cosh AL)} \quad (IV.21)$$

La Figure IV.9 montre le spectre de résonance faisant apparaître les cinq premiers modes de résonance d'une micropoutre dans l'air, obtenu en utilisant l'Equation (IV.21).

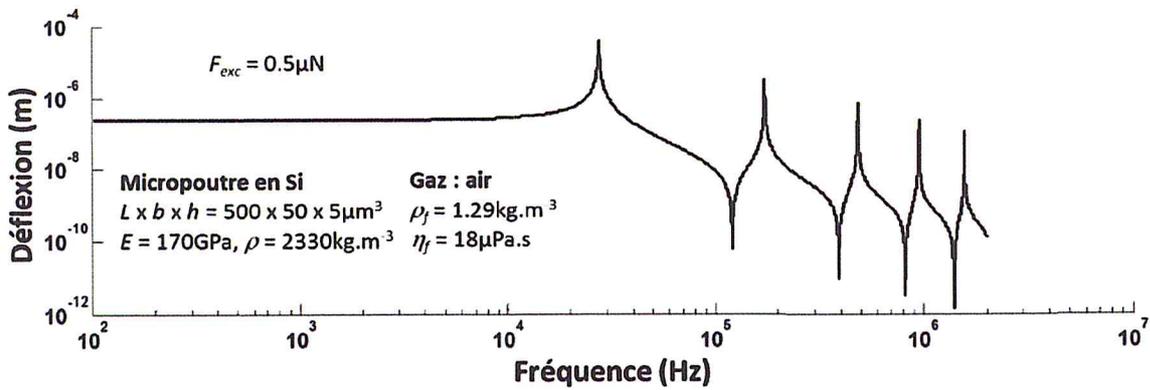


Figure IV.9 : Déflexions d'une micropoutre en fonction de la fréquence de la force d'excitation dans l'air [66].

IV.3.3. Variation de la fréquence de résonance et du facteur de qualité

IV.3.3.1. Facteur de qualité

Le facteur de qualité d'un système forcé est le ratio entre l'énergie totale stockée dans la vibration et la dissipation d'énergie par cycle [73] :

$$Q \approx 2\pi \frac{\text{énergie totale stockée par cycle}}{\text{dissipation d'énergie par cycle}}$$

Chapitre IV : Modélisation physique du capteur

Le facteur de qualité ne peut pas être déterminé directement, mais à partir de la réponse caractéristique du résonateur. Il est le rapport entre la fréquence propre f_0 et la largeur Δf_{-3db} de la largeur de bande du résonateur.

$$Q \approx \frac{f_0}{\Delta f_{-3db}}$$

Plus le facteur de qualité est élevé, plus la largeur de bande est petite, et le pic de résonance étroit. Alors la demande d'énergie pour maintenir la vibration est faible et la sensibilité due à la perturbation mécanique est élevée.

Toujours dans le cas d'une micropoutre résonante dans un milieu fluide (gaz ou liquide) excitée par une force ponctuelle à son extrémité libre, la fonction de transfert du système est le rapport entre la transformée de Fourier de l'amplitude des oscillations en bout de poutre et la transformée de Fourier de la force d'excitation :

$$H(L, \omega) = \frac{W(L, \omega)}{F_0(L, \omega)} \quad (IV.22)$$

Où $W(L, \omega)$ et $F_0(L, \omega)$ sont respectivement la déflexion et la force d'excitation en bout de poutre et $H(L, \omega)$ est la fonction de transfert mécanique au bout de la poutre.

En exploitant les équations présentées précédemment, la fonction de transfert mécanique pour les fréquences basses en régime linéaire (faibles déplacements), ne faisant pas intervenir les modes de vibration d'ordres supérieurs, peut être simplifiée et assimilée au modèle classique d'un système passe-bas du second ordre :

$$H(L, f) \approx \frac{H_0}{1 - \left(\frac{f}{f_0}\right)^2 + j\frac{1}{Q}\frac{f}{f_0}} \quad (IV.23)$$

Où H_0 est le gain statique de la fonction de transfert, Q le facteur de qualité de ce mode dans le fluide et f_0 est la fréquence propre du premier mode de résonance dans le fluide et qui correspond à un déphasage de $-\pi/2$ entre le déplacement et la force d'excitation.

Compte tenu de toutes les hypothèses faites jusqu'ici, la fréquence propre et le facteur de qualité dû aux pertes dans le fluide peuvent alors s'exprimer de la façon suivante :

$$f_0 = \frac{f_{0,vide}}{\sqrt{1 + \frac{g_2(f_0)}{m_L}}} \quad (IV.24)$$

Chapitre IV : Modélisation physique du capteur

$$Q = \frac{2\pi m_L \sqrt{1 + \frac{g_2(f_0)}{m_L}}}{g_1(f_0)} f_0 \quad (\text{IV.25})$$

Où $f_{0,vide}$ est la fréquence propre de la micropoutre dans le vide (absence de fluide) et m_L la masse linéique avec : $\lambda_n = \lambda_1 = 1.875 \ 104$ (Tableau IV.1).

Dans un système passe-bas du second ordre, la fréquence de résonance est définie comme étant la fréquence d'excitation pour laquelle la micropoutre a une amplitude d'oscillation maximale :

$$f_r = f_0 \sqrt{1 - \frac{1}{2Q^2}} \quad (\text{IV.26})$$

On remarque que lorsque Q tend vers l'infini, $f_r \approx f_0$ ce qui est le cas dans le vide en raison de l'absence de pertes ou dans le cas des résonateurs mécaniques à très haut facteur de qualité. Cette relation peut aussi s'écrire :

$$f_r = f_{0,vide} \frac{\sqrt{1 - \frac{1}{2Q^2}}}{\sqrt{1 + \frac{g_2}{m_L}}} \quad (\text{IV.27})$$

IV.3.4.Sensibilité

Le changement de la masse de microcapteur cause le décalage de fréquence. La nouvelle fréquence est déterminée par la forme :

$$f_0 + \delta f \approx cte \times \sqrt{\frac{K_{eff}}{K_{eff} + \delta m}} \quad (\text{IV.28})$$

Le décalage de fréquence δf et le changement de masse δm sont petits. On détermine donc la sensibilité de masse via la forme suivante :

$$S = -\frac{\delta f}{\delta m} = \frac{1}{2M_{eff}} f_0. \quad (\text{IV.29})$$

La sensibilité dépend de la masse et de la fréquence de résonance du microcapteur [74].

La sensibilité à l'effet de masse pour une variation relative de fréquence, S_m^{f/f_0-1} , peut s'écrire en fonction de la sensibilité à l'effet de masse :

$$S_m^{f/f_0-1} = \frac{\Delta f}{f_0 \Delta m} = \frac{S}{f_0} \quad (\text{IV.29})$$

Chapitre IV : Modélisation physique du capteur

Le principe de détection de la plupart des capteurs à micropoutre est basé sur la détermination du décalage de fréquence. Cependant, la relation entre la masse détectée et le décalage de fréquence est linéaire. Plus la masse est petite, plus le décalage est petit, en raison de cela, la détection est difficile pour les petites masses.

IV.4.Conclusion

Ce chapitre nous a permis de développer la résolution analytique des équations générales issues de la mécanique d'une micropoutre mobile, pour la détermination de la fréquence de résonance.

Nous avons mis en avant la dépendance de la fréquence de résonance par rapport la masse en considérant trois cas. La mise en équation de la fréquence de résonance a d'abord été calculée dans le cas d'une poutre simple et homogène avant d'être exprimée pour une poutre bimorphe ou encore dans le cas où nous ajoutons une masse supplémentaire à l'extrémité de la poutre.

Après nous avons étudié le changement de fréquence de résonance avec le fluide qui dépend de facteur de qualité. Pour un facteur de qualité très élevée la fréquence de résonance dans un fluide et presque égale dans le vide. Puis nous avons vus que la masse détectée dépend de décalage en fréquence dans le domaine linéaire.

**CHAPITRE V : Conception par simulation par la
méthode des éléments finis du capteur des particules
aérosol**

V. Simulation par la méthode des éléments finis (FEM)

V. 1. Principe de la modélisation par la méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis est un outil mathématique qui a été développé pour la résolution numérique d'équations différentielles applicable sur une diversité de problèmes physiques.

La méthode des éléments finis est basée sur une idée simple : subdiviser (discrétiser) une forme complexe en un grand nombre de sous-domaines élémentaires de forme géométrique simple (éléments finis) interconnectés en des points appelés nœuds (figure V.1)

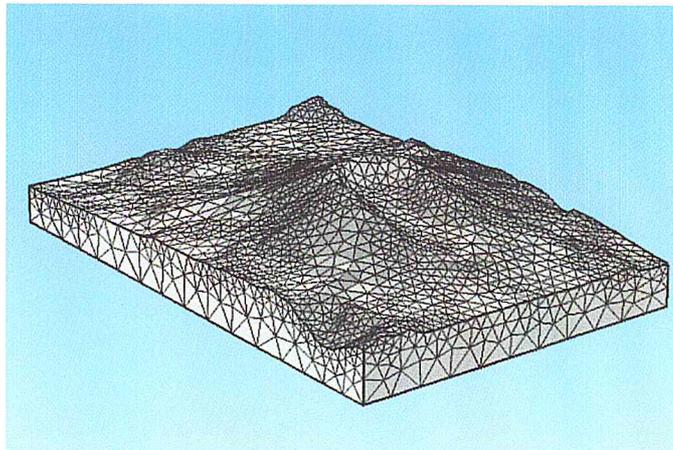


Figure V.1 : le maillage d'une structure par l'élément finis [75].

Ces éléments sont raccordés entre eux par des points appelés "nœuds" ou "points nodaux" afin de former la structure dans son ensemble. Ces éléments finis, ainsi constitués, sont choisis de telle manière qu'ils aient les formes les plus simples possibles afin que l'étude de la structure soit facile à faire. Le problème initial concernant un milieu continu a été transposé en un nombre finis de problèmes discrets avec un certain nombre d'inconnues. Les inconnues, en chacun des nœuds, sont appelées variable nodales ou degrés de liberté [77].

V.2. Introduction à la méthode des éléments finis (FEM) sous Comsol Multiphysics

V.2.1. Définition de l'environnement Comsol Multiphysics

Comsol est un environnement de simulation des applications du monde réel, le but de tous les simulations est de reproduire le plus fidèlement possible les effets observés dans la réalité, que soit dans un contexte scientifique ou d'ingénierie, pour cela la multiphysique est nécessaire.

Chapitre V : Conception par simulation par la méthode des éléments finis du capteur des particules aérosol

Ce logiciel est avant tout un logiciel de résolution de système d'équations différentielles algébriques. Il présente l'avantage d'être un environnement de modélisation intégrée avec une approche semi-analytique : l'utilisation spécifique ses équations ce qui rend son utilisation très flexible. Afin de répondre à des problèmes plus spécifiques, des modèles sont déjà construits pour étudier par exemple la mécanique des structure, la mécanique des fluides, les transferts de chaleur, l'électromagnétisme. La dernière particularité de ce logiciel est de pouvoir coupler des phénomènes physiques entre eux.

Comsol Multiphysics intègre l'ensemble des outils à la réalisation d'une simulation : le prétraitement, la résolution et le post-traitement. Le prétraitement consistera à construire la géométrie du problème considéré, indiquer les matériaux, décrire les équations, imposer les conditions aux limites et mailler le domaine. La résolution est le calcul de la solution avec le solveur intégré. Le post-traitement permet de visualiser les résultats et sauvegarder la solution. Ce logiciel présente un large panel d'applications [78].

V.2.2. les étapes de la simulation par Comsol Multiphysics 5.2

Les étapes de la simulation par Comsol Multiphysics 5.2 version démonstration est :

- Sélectionner la dimension d'espace (1D, 2D, 3D).
- Sélectionner la physique (mécanique du solide ou électrostatique ou.....).
- Sélectionner l'étude par (stationnaire, fréquence propre ou temporal.....).
- Défini la géométrie du modèle.
- Défini les matériaux et leur propriétés.
- Cité les conditions aux limites
- Maillage de la géométrie.

V.3. Simulation d'un capteur de microparticules aérosol à masse résonnante à base d'une micropoutre

V.3.1 Simulation d'une micropoutre (encastre-libre) avec COMSOL

Nous allons simuler le comportement dynamique d'une micropoutre homogène de géométrie parallélépipédique afin d'analyser ses modes propres de vibrations et obtenir leurs fréquences propres correspondants avec et sans masse ajouté dans l'air ambiant. De plus afin d'optimiser les paramètres géométriques des capteurs, nous allons explorer différentes géométries (largeur, longueur, épaisseur) ainsi que différents types de matériaux (module de Young, masse volumique). Ceci va nous permettre d'essayer de proposer un panel de choix matériaux-dimension capable de donner des sensibilités adaptées à chaque choix.

Chapitre V : Conception par simulation par la méthode des éléments finis du capteur des particules aérosol

V.3.1.1 Poutre nu sans particules ajoutées :

Nous avons choisi d'après l'interface graphique du Comsol une dimension d'espace 3D et sélectionner le type de(s) physique(s) : mécanique du solide, électrostatique et une analyse en fréquences propres de vibrations. Les dimensions de la micropoutre et la cavité d'air qui l'entoure sont montrées dans les tableaux suivants :

Tableau V.1 : Dimensions de la micropoutre

Description	Valeur (μm)
longueur	320
largeur	10
épaisseur	2

Tableau V.2 : Dimensions de la cavité d'air

Description	Valeur (μm)
longueur	320
largeur	40
épaisseur	24

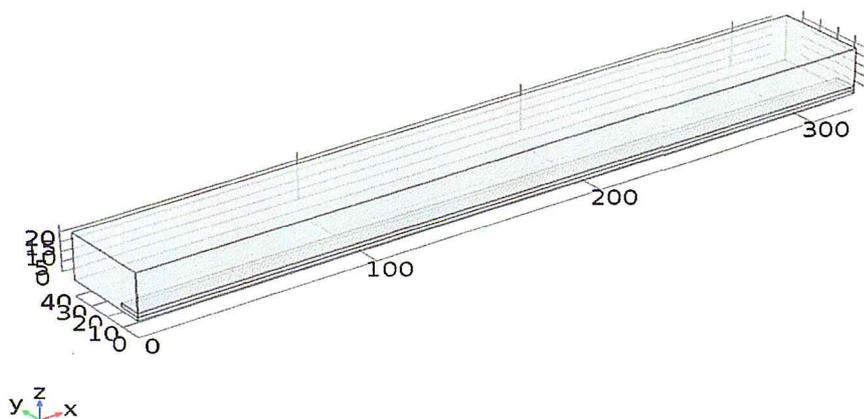


Figure V.2 : Micropoutre dans une cavité d'air.

Pour la micropoutre on a choisi le silicium comme matériau de propriétés suivantes :

Chapitre V : Conception par simulation par la méthode des éléments finis du capteur des particules aérosol

Tableau V.3 : Propriétés mécanique de silicium

Nom	Valeur	Unité
Module de Young	153×10^9	Pa
Coefficient de Poisson	0.23	1
Masse volumique	2330	kg/m^3

La cavité d'air elle a les propriétés suivantes :

Tableau V.4 : Propriétés caractéristique de l'air.

Nom	Valeur	Unité
Permittivité relative	1	1
Viscosité dynamique	18.6×10^{-6}	Pa s
Masse volumique	1.18	kg/m^3

Pour les conditions aux limites dans le solide mécanique physique on prend le domaine élastique linéaire et l'encastrement de la micropoutre sur le côté comme la figure V.3 montre :

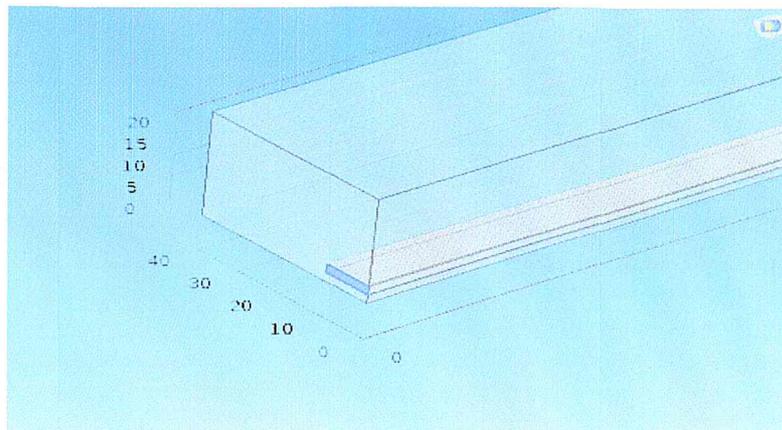


Figure V.3 : L'encastrement de la micropoutre.

Et dans l'Electrostatique on applique une différence de potentiel entre la masse et la micropoutre (figure V.4) égale à 1V (pour mise en vibration).

Chapitre V : Conception par simulation par la méthode des éléments finis du capteur des particules aérosol

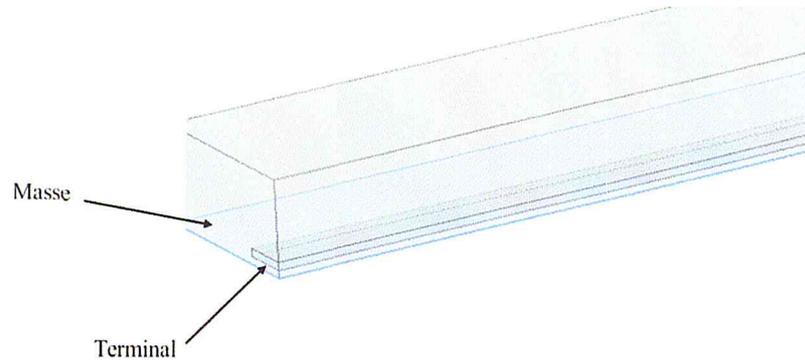


Figure V.4 : L'actionnement électrostatique de la micropoutre

Le maillage utilisé dans cette simulation est contrôlé par la physique avec une taille des éléments normale (figure V.5).

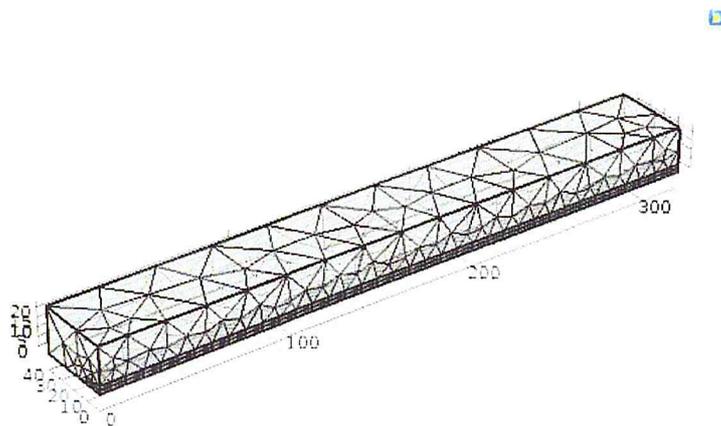


Figure V.5 : maillage de la micropoutre avec cavité d'air.

On lance la simulation pour trouver les fréquences propres de la micropoutre sans masse ajoutée.

V.3.1.1.1. Les modes de vibrations simulés de la micropoutre sans microparticules :

Les figures V.6 et V.7 montrent les six premiers modes de vibration :

Chapitre V : Conception par simulation par la méthode des éléments finis du capteur des particules aérosol

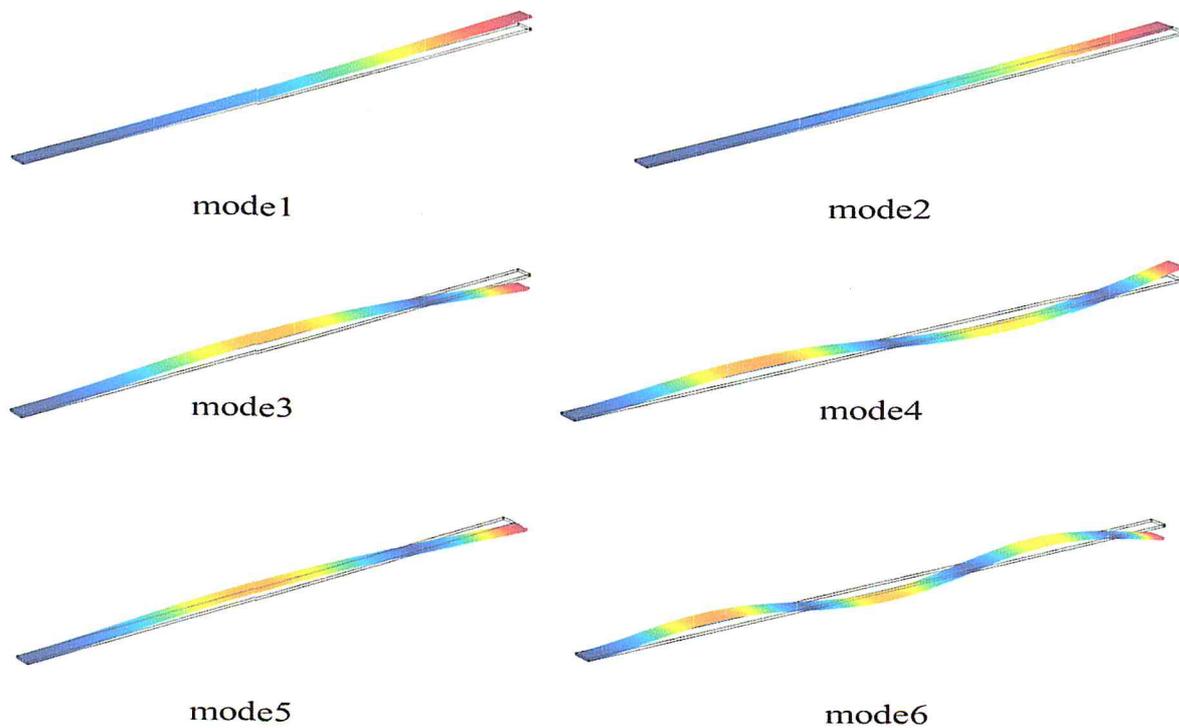


Figure V.6 : Modes de vibration.

Chaque mode ayant une fréquence propre bien précise comme le tableau V.5 montre :

Tableau V.5 : les valeurs des fréquences propres pour chaque mode.

Le mode de vibration	Fréquence propre [Hz]
Mode1	25626
Mode2	1.2787e5
Mode3	1.6074e5
Mode4	4.5081e5
Mode5	7.9795e5
Mode6	8.8552e5

Chapitre V : Conception par simulation par la méthode des éléments finis du capteur des particules aérosol

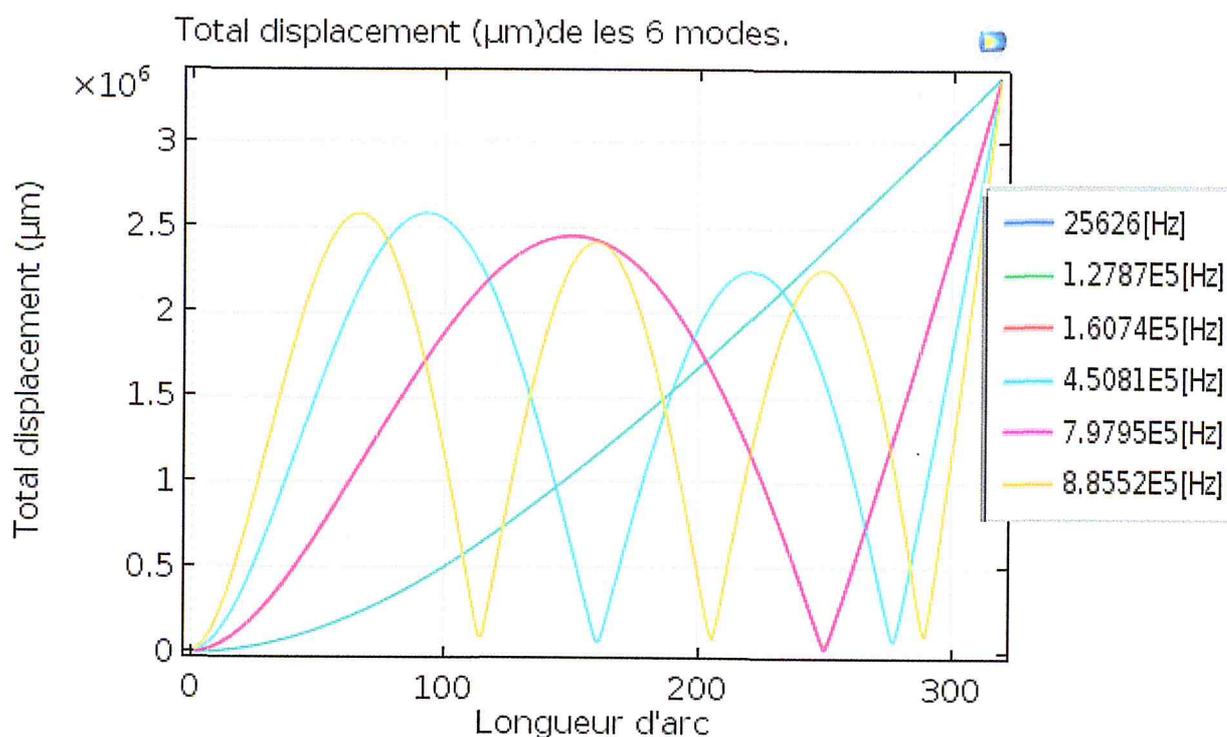


Figure V.7 : Profils de résonance en flexion (dans et hors plan).

V.3.1.2. Les modes de vibrations simulés de la micropoutre avec microparticules:

Dans cette étape, on incorpore des microparticules uniformément répartie sur la surface supérieure de la micropoutre. Ceci transparait à travers une masse répartie sur cette face supérieure à partir du modèle physique sous Comsol *solid mechanics*.

Cette approche est confirmé dans la littérature dans les travaux Arash Hajjam et al [79] qui a travaillé sur les capteurs de masse résonants pour la détection des particules aérosols.

Tableau V.6 : définition de masse dans les paramètres.

Nom	Expression	Valeur	Description
$m_{\text{aérosols}}$	10[ng]	1E-11 kg	La masse des particules aérosols.

Afin de faire une étude paramétrée par la quantité de particules aérosols fixée sur la face supérieure de la micropoutre (figure V.8), nous avons utilisé l'interface d'analyse paramétrée sous Comsol suivie d'une analyse dans le domaine de fréquences propres.

Chapitre V : Conception par simulation par la méthode des éléments finis du capteur des particules aérosol

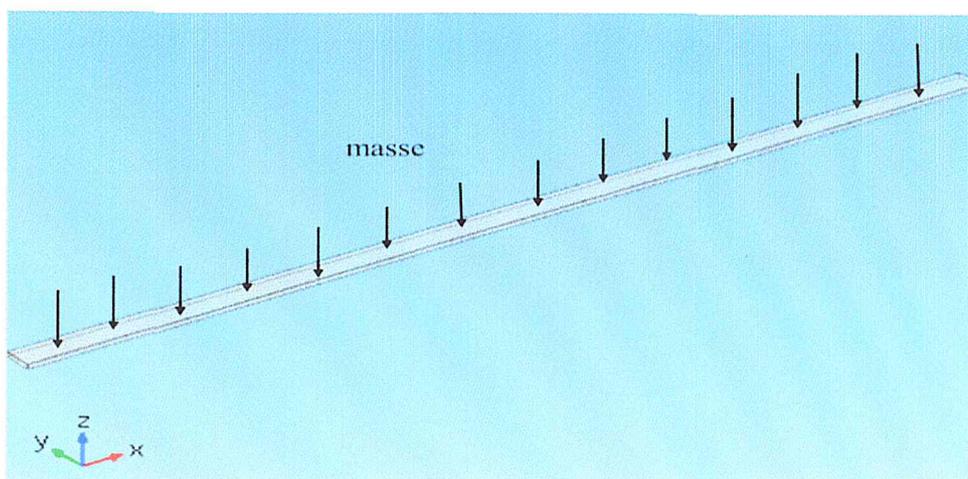


Figure V.8: les particules aérosol ajoutée sur la face supérieure de la micropoutre.

V.3.1.2.1. Résultats

Voici le tableau V.7 montre les fréquences propres et la masse ajoutée correspondent :

Tableau V.6 changement des fréquences avec la masse.

Les modes	Les fréquences propres [kHz] avec la masse ajoutée [ng]							
	2	6	10	16	24	30	38	50
Mode1	24.063	21.639	19.826	17.798	15.863	14.766	13.604	12.282
Mode2	120.07	107.97	98.924	88.802	79.146	73.668	67.869	61.273
Mode3	150.94	135.74	124.36	111.64	99.503	92.618	85.329	77.039
Mode4	423.31	380.66	348.76	313.08	279.04	259.73	239.29	216.04
Mode5	749.24	673.64	617.05	553.76	493.40	459.17	422.95	381.77
Mode6	831.48	747.69	685.01	614.92	548.05	510.12	469.97	424.3

Il est clair que les fréquences propres de résonance ont tendance à glisser relativement vers les basses fréquences. Ceci peut s'expliquer par l'effet d'inertie due à la quantité de microparticules aérosol sur la face de la micropoutre. Les résultats de simulations montrant ce décalage en fréquence sous l'effet de la masse des microparticules aérosols est clairement montré dans les figures V.9 et V.10.

Chapitre V : Conception par simulation par la méthode des éléments finis du capteur des particules aérosol

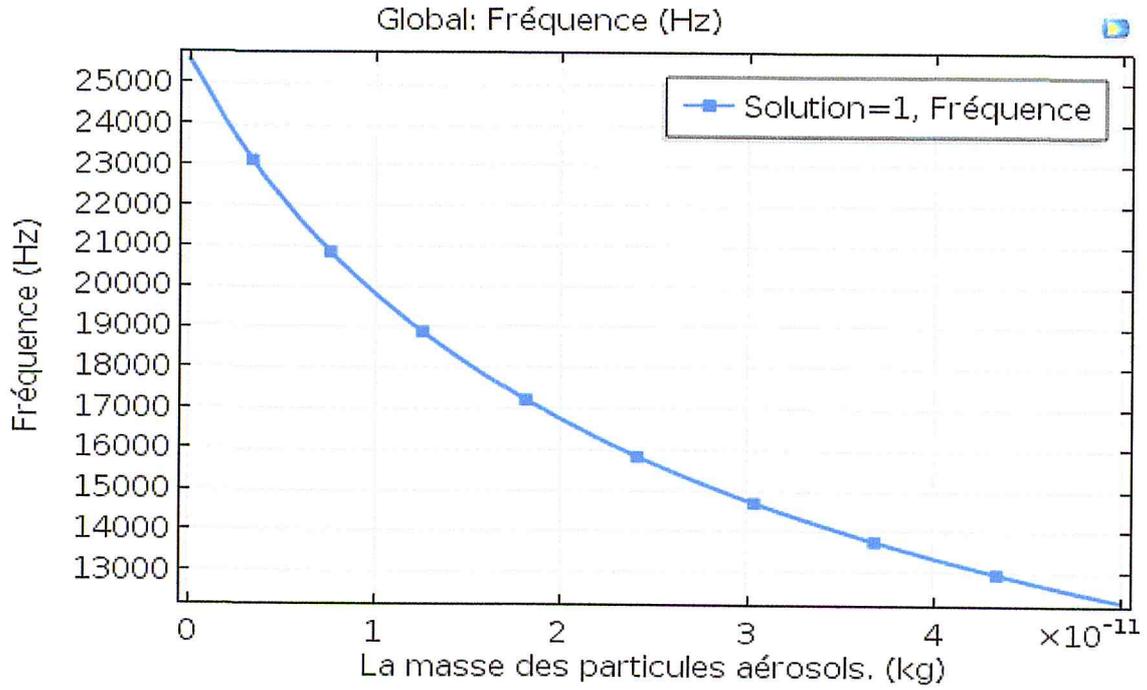


Figure V.9 : Le décalage en fréquence pour le model.

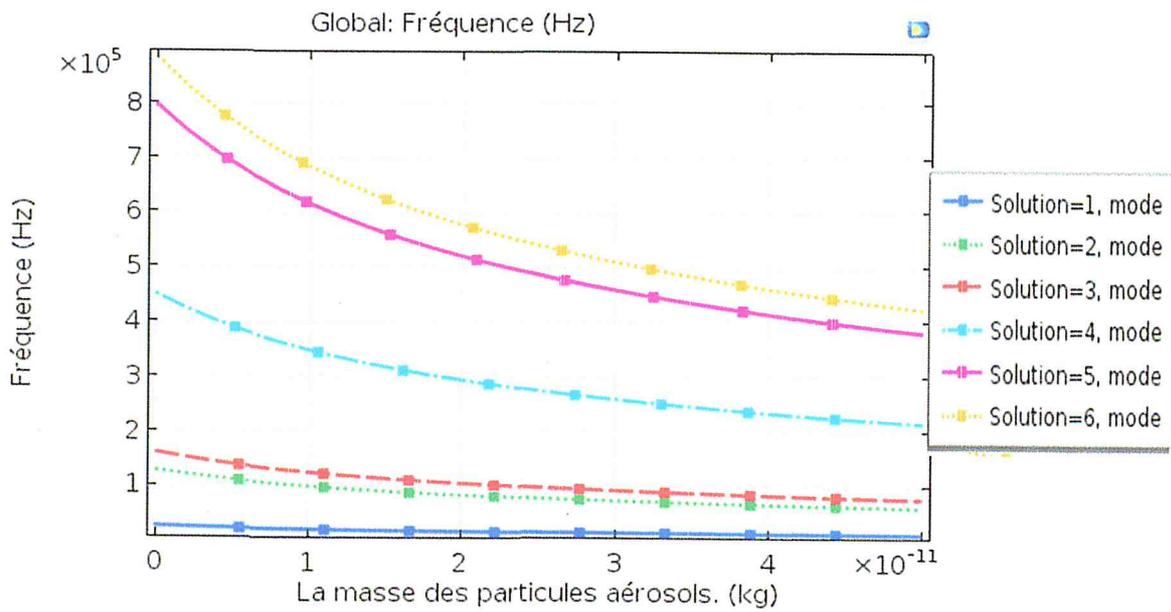


Figure V.10 : Le décalage en fréquence pour tous les modes.

Chapitre V : Conception par simulation par la méthode des éléments finis du capteur des particules aérosol

V.3.1.3. Etude des effets géométriques de la micropoutre sur la sensibilité de masse

V.3.1.3.1. Effet de longueur L

Pour cette analyse, on fait varier la longueur de micropoutre pour chaque simulation numérique dans un intervalle allant de 100 μm à 500 μm . Ces résultats sont résumés dans la figure ci-dessous V.11 pour le mode fondamental et V.12 pour les six premiers modes.

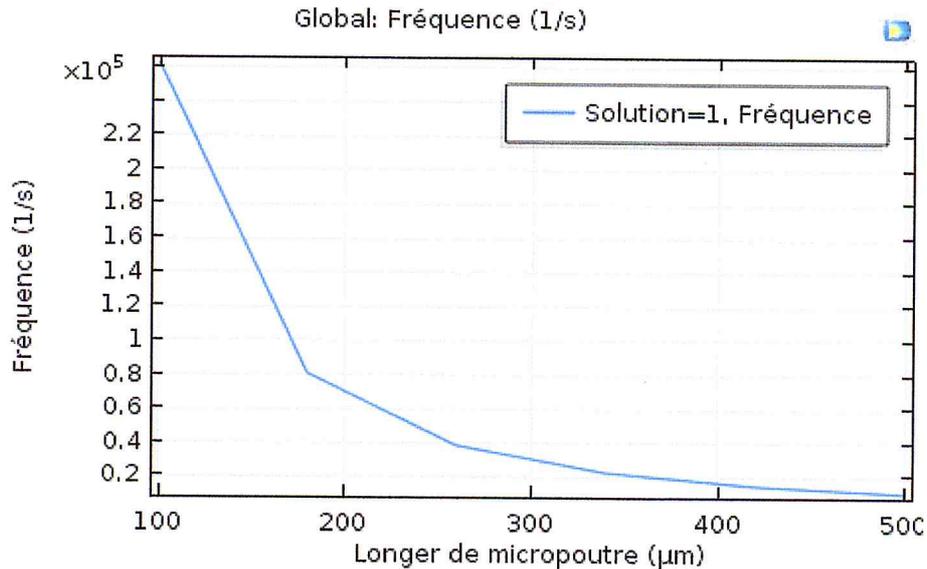


Figure V.11 : Le décalage de fréquence de 1^{ère} mode en fonction de L.

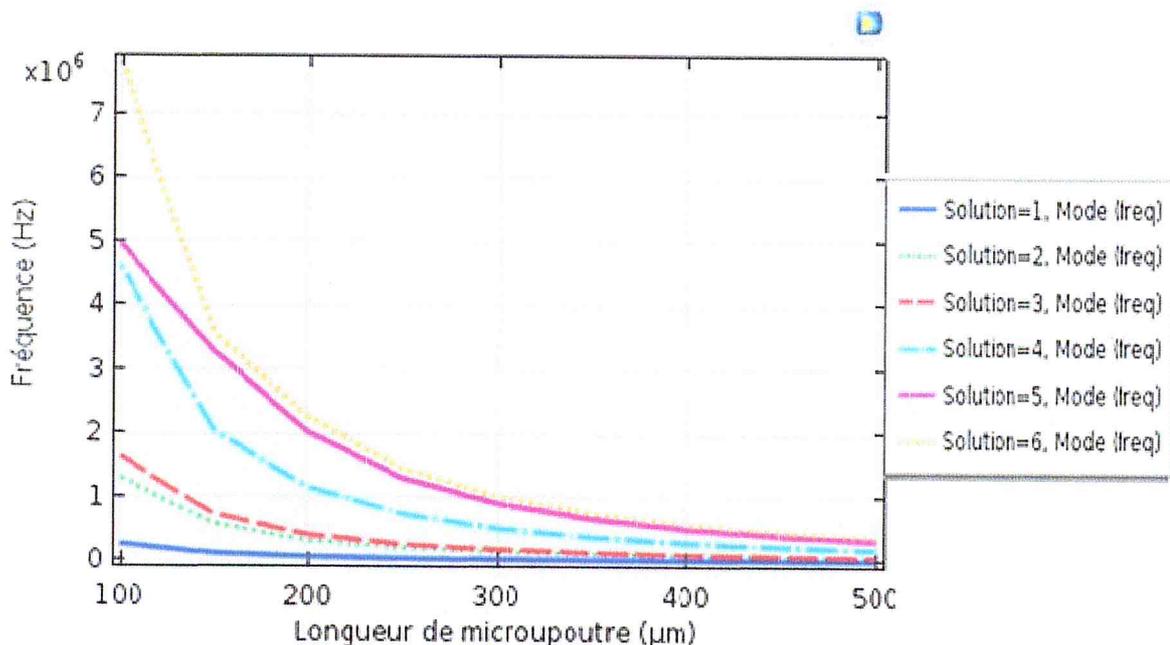


Figure V.12 : Décalage de fréquence de tous les modes en fonction de longueur.

Il est clair que les fréquences de résonance diminuent rapidement avec l'augmentation de la longueur de la micropoutre.

La sensibilité à l'effet de masse est représentée dans la figure V.13

Chapitre V : Conception par simulation par la méthode des éléments finis du capteur des particules aérosol

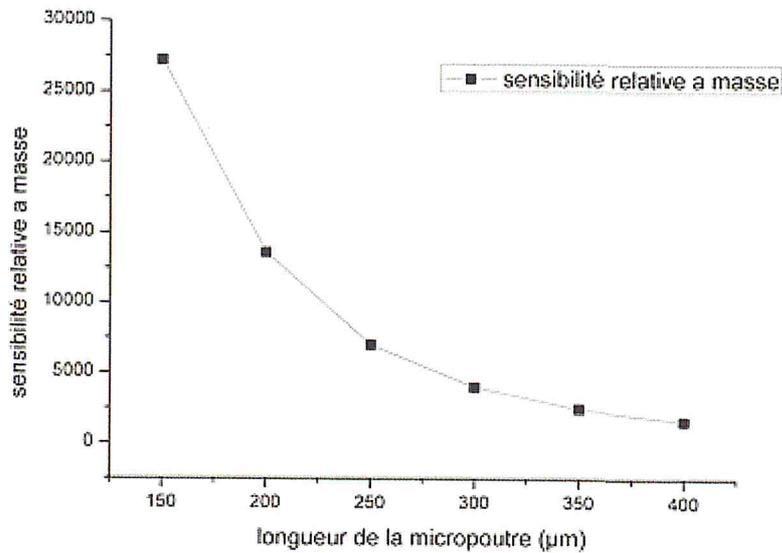


Figure V.13: Variation de la sensibilité en fonction de la longueur pour le sixième mode.

La sensibilité relative à masse diminue rapidement avec la longueur de la micropoutre. Donc pour une meilleure sensibilité il faut travailler par des petites longueurs de la structure.

V.3.1.3.2. Effet d'épaisseur t

Pour cette analyse, on fait varier l'épaisseur de la micropoutre pour chaque simulation numérique dans un intervalle allant de $1\mu\text{m}$ à $10\mu\text{m}$. Ces résultats sont résumés dans la figure ci-dessous V.14 pour les six premiers modes.

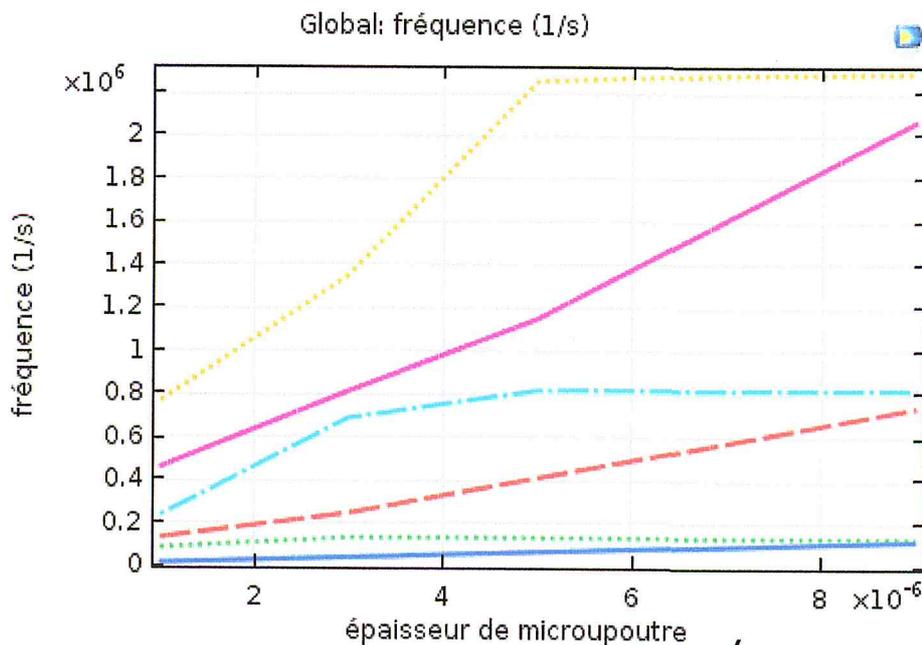


Figure V.14: Changement de fréquences en fonction d'épaisseur.

Chapitre V : Conception par simulation par la méthode des éléments finis du capteur des particules aérosol

On remarque que les fréquences de résonance augmentent avec l'augmentation d'épaisseur de la micropoutre, pour le quatrième et le sixième mode après certain valeurs la fréquence de résonance se stabilise.

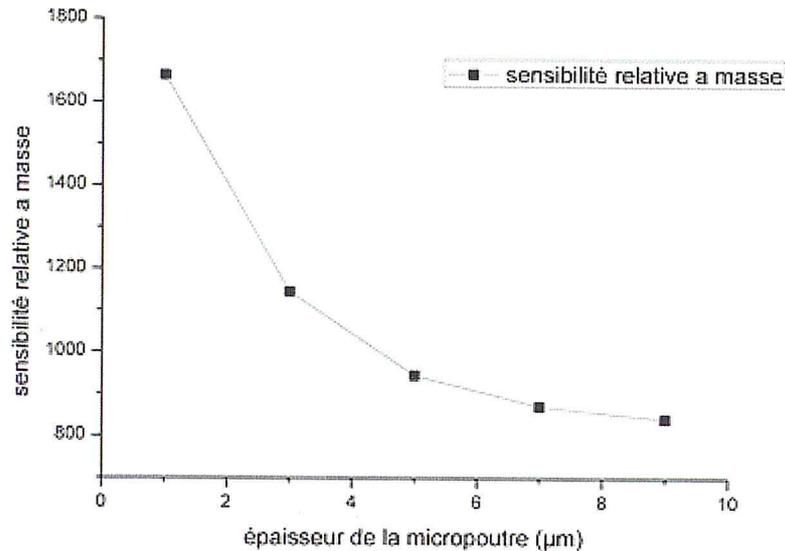


Figure V.15: Evolution de la sensibilité avec l'épaisseur (mode 6).

Pour une épaisseur située dans l'intervalle $[1\mu\text{m}, 3\mu\text{m}]$ la sensibilité relative à la masse est très élevée. La sensibilité à l'effet de masse est très faible à partir de $4\mu\text{m}$ jusqu'à $10\mu\text{m}$, par contre est très élevée pour les micropoutres minces à partir de figure V.15.

V.3.1.3.2. Effet de largeur W

Pour cette analyse, on fait varier la largeur de la micropoutre pour chaque simulation numérique dans un intervalle allant de $1\mu\text{m}$ à $10\mu\text{m}$. Ces résultats sont résumés dans la figure ci-dessous V.16.

Chapitre V : Conception par simulation par la méthode des éléments finis du capteur des particules aérosol

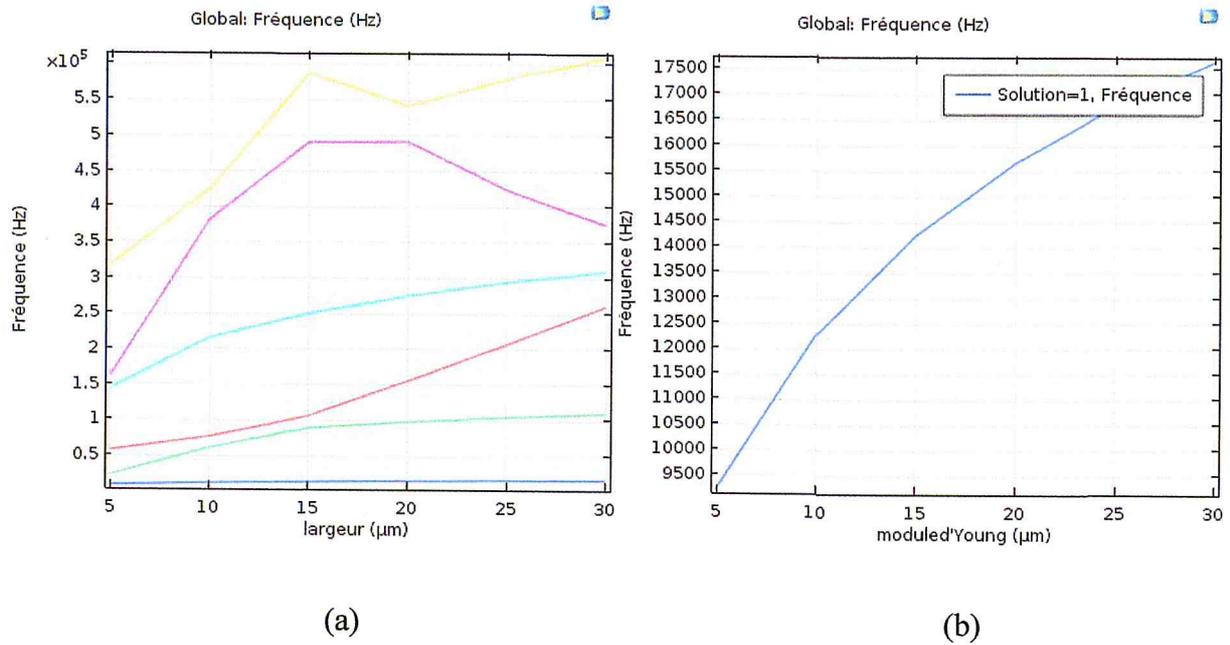


Figure V.16: Variation de la fréquence de résonance en fonction de la largeur
(a): pour tous les modes; (b): pour le premier mode.

La variation de la sensibilité à l'effet de masse est montrée dans la figure V.17:

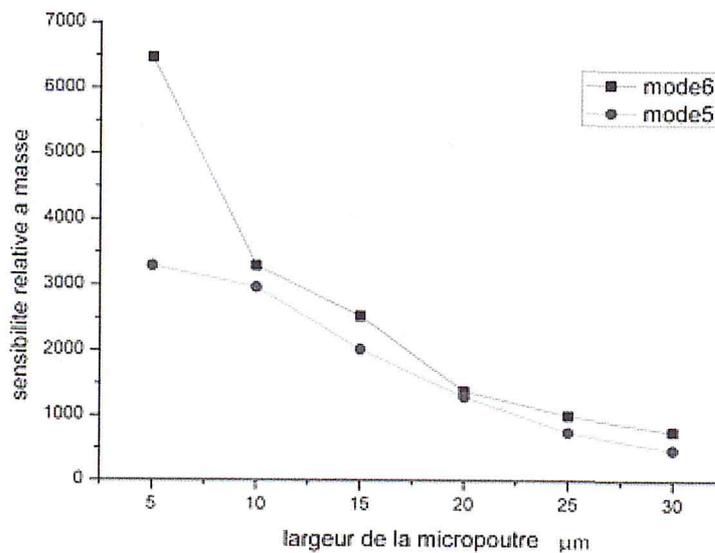


Figure V.17: Variation de la sensibilité à l'effet de masse en fonction de la largeur.

La sensibilité à l'effet de masse diminue avec l'augmentation de la largeur de la micropoutre.

Chapitre V : Conception par simulation par la méthode des éléments finis du capteur des particules aérosol

V.3.1.4. Etude des différents types de matériaux (E, ρ) sur la sensibilité de masse

V.3.1.4.1. Effet de module d'Young (E)

Dans cette étape, on fait varier le module d'Young de matériaux de la micropoutre pour chaque simulation numérique dans un intervalle allant de 100 GPa à 250 GPa. Ces résultats sont résumés dans la figure ci-dessous V.18 pour tous les modes.

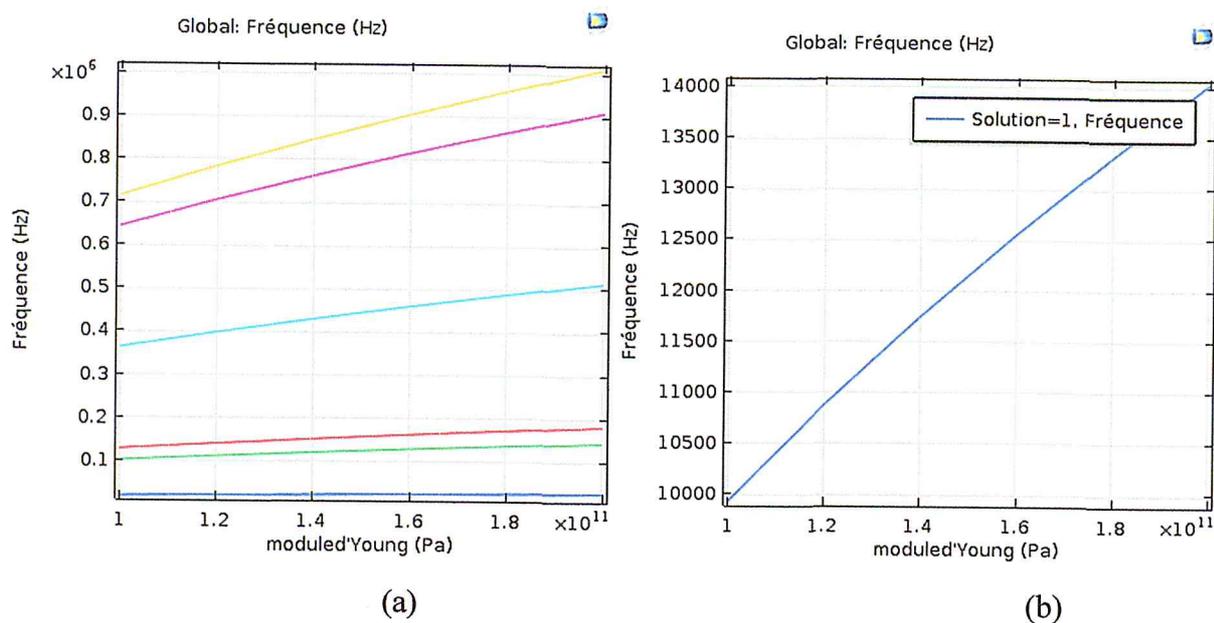


Figure V.18: Changement de fréquences en fonction de module d'Young
(a): tous les modes; (b): premier mode.

La fréquence de résonance augmente avec le module d'Young qui confirme l'équation (IV.1) qui montre la relation linéaire entre ces deux paramètres.

La figure V.19 représente l'effet de module d'Young sur la sensibilité relative à masse.

Chapitre V : Conception par simulation par la méthode des éléments finis du capteur des particules aérosol

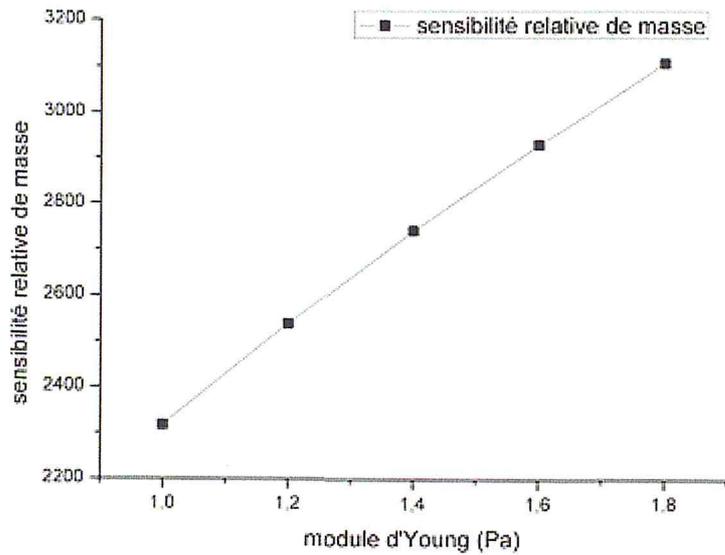


Figure V.19: Evolution de la sensibilité à l'effet de masse en fonction de module d'Young.

Le module d'Young est un paramètre très important pour améliorer la sensibilité de la micropoutre, car la sensibilité à l'effet de masse augmente rapidement de façon linéaire avec le module d'Young.

V.3.1.4.2. Effet de masse volumique (ρ)

Pour cette étape, on fait varier la masse volumique de matériaux de la micropoutre pour chaque simulation numérique dans un intervalle allant de 1000 kg/m³ à 3000 kg/m³. Ces résultats sont résumés dans la figure V.20 ci-dessous.

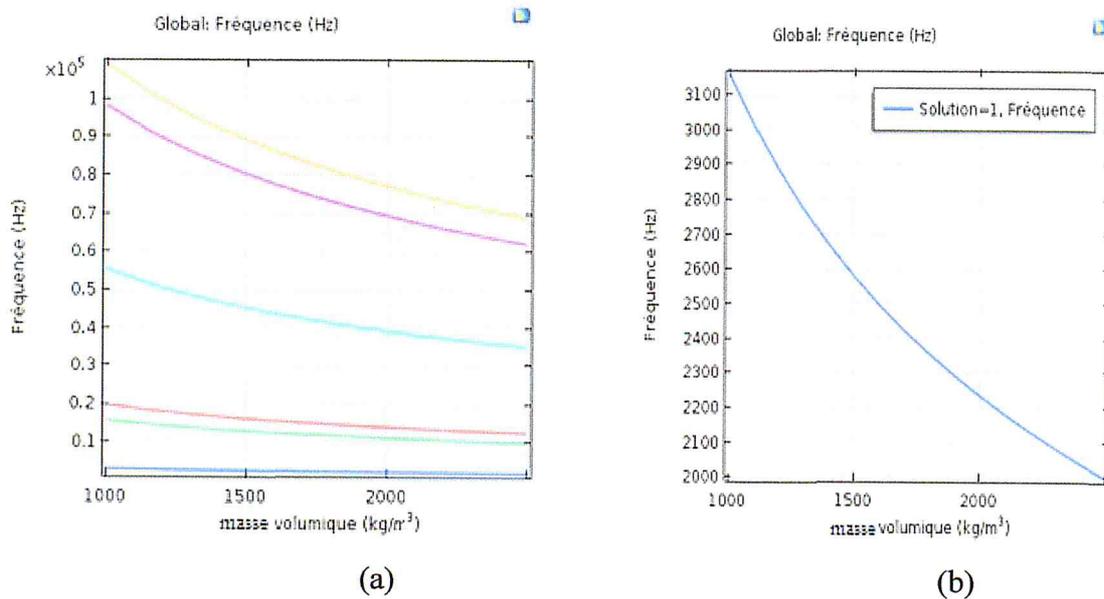


Figure V.20 : Variation de la fréquence de résonance en fonction de la masse volumique (a): pour tous les modes ;(b): pour le premier mode.

Chapitre V : Conception par simulation par la méthode des éléments finis du capteur des particules aérosol

La masse volumique augmente la masse de la micropoutre ce qui diminue la fréquence de résonance. La figure V.21 représente l'évolution de la sensibilité à l'effet de masse par rapport la masse volumique:

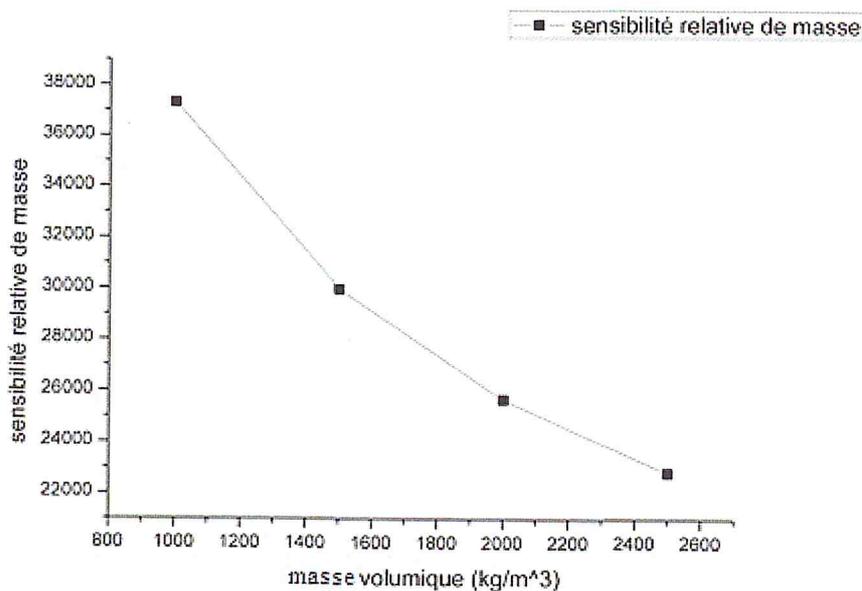


Figure V.21: Variation de la sensibilité relative à la masse en fonction de la masse volumique.

La sensibilité relative à la masse diminue avec l'augmentation de la masse volumique, donc les matériaux de faible masse volumique sont plus adaptés pour la fabrication de ce genre de micropoutre.

V.3.5. Résultats

Les résultats obtenus vont nous permettre à présent d'optimiser les paramètres "taille et nature du matériau" de la micropoutre.

L'exploitation des courbes relatives à la sensibilité à l'effet de masse montre que pour maximiser cette dernière, il est préférable d'avoir :

- un matériau de faible masse volumique et de module d'Young élevé : le silicium paraît beaucoup plus adapté que le nitrure de silicium ou encore l'aluminium,
- de petites structures : la longueur, la largeur et l'épaisseur doivent être petites car la sensibilité diminue rapidement lorsque ces paramètres augmentent.

Chapitre V : Conception par simulation par la méthode des éléments finis du capteur des particules aérosol

V.4 Conclusion

La détection des particules aérosol est basée sur le décalage en fréquence de résonance de la micropoutre, ce décalage apparaît dans certains modes plus que d'autres pour cela nous veulents optimiser ce décalage pour augmenter la sensibilité de la micropoutre à des particules aérosol.

Cette dernière dépend de deux paramètres important c'est les dimensions de la micropoutre et les matériaux composé.

Pour ce but là nous avons changé ces paramètres dans un intervalle bien défini. Les résultats de simulation obtenus montre que les petites dimensions et les matériaux de faible masse volumique et de module d'Young élevé de la micropoutre maximisent la sensibilité relative aux particules aérosol.

Conclusion générale

Conclusion générale

Une des applications importantes des capteurs résonants de types MEMS est la mesure de petites masses à l'ordre de nano à attogramme. Ces capteurs sont largement utilisés dans plusieurs domaines, nous avons étudié ces capteurs pour la détection des particules aérosol et l'analyse de la qualité d'air.

Les capteurs à masse résonante MEMS exploite le phénomène de résonance d'une microstructure, qui est défini par une fréquence noté f_r . Nous avons choisi comme structure une micropoutre laquelle peut être actionnée par différent types d'actionnements. La détection des particules aérosol est basée sur le décalage en fréquence de résonance de la micropoutre causé par leurs masses, ou bien sur le décalage en amplitude induit par la masse ajoutée, il y'a plusieurs types de détection basés sur différents phénomènes physiques. Nous avons choisi l'actionnement et la détection électrostatique pour sa simplicité.

Pour les techniques de mesure de la fréquence de résonance il existe deux grands principes : le balayage en fréquence basé sur le parcourt d'une plage de fréquences, et l'oscillateur bouclé à base d'une micropoutre.

La fabrication de la micropoutre est basée sur différents techniques et différents matériaux pour des différents géométries et des différents dimensions, cette variété nous servira à utiliser la micropoutre en tant qu'e capteur dans plusieurs domaines (chimique, physique, biologique,...).

Nous avons mis en avant la dépendance de la fréquence de résonance par rapport à la masse d'une poutre simple considérée comme idéale. Le changement de fréquence de résonance dépend de plusieurs paramètres : module d'Young, la masse de la micropoutre, le moment d'aire quadratique, sa longueur, et le mode de résonance. Puis nous avons étudié la fréquence de résonance d'une micropoutre biomorphe (une couche ajoutée sur la face supérieure de la poutre).La présence de cette couche modifié la masse et la raideur de la micropoutre .pour une micropoutre homogène avec une masse à l'extrémité libre nous pouvons noter que la fréquence de résonance est plus sensible aux variations de la masse en bout de la poutre plutôt qu'aux variations de masse réparties sur toute la longueur. Puis nous avons vu que la masse détectée dépend du décalage en fréquence dans le domaine linéaire.

La simulation a montré que le décalage en fréquences causé par la masse des particules aérosol change avec le mode de résonance de la micropoutre. Pour le sixième mode la variation relative de fréquence est plus grande que les autres modes. Nous avons changé les dimensions de la micropoutre et les propriétés des matériaux composés pour avoir l'influence de ces paramètres sur la sensibilité à l'effet de masse. Nous avons conclu que cette sensibilité

Conclusion générale

diminue rapidement avec la longueur, la largeur, la masse volumique et l'épaisseur, mais contrairement augmente de façon linéaire avec le module d'Young.

Références

Références

- [1]-J. P. Black, A. Elium, R. M. White, M. G. Apte, L. A. Gundel, and R. Cambie, "MEMS-enabled miniaturized particulate matter monitor employing 1.6 GHz aluminum nitride thin-film bulk acoustic wave resonator (FBAR) and thermophoretic precipitator," in *Proc. IEEE Ultrasonics Symp.*, 2007, pp. 476–480
- [2]-D. Liang, W. P. Shih, C. S. Chen, and C. Dai, "A miniature system for separating aerosol particles and measuring mass concentrations," *J. Sensor*, vol. 10, pp. 3641–3654, Apr. 2010.
- [3]-S. M. Stanley, G. McHale, M. Newton, C. J. Percival, and R. Evans, "An EP-SAW for measurements of particle matter in ambient air," *J. Nondestructive Testing and Evaluation*, vol. 20, no. 1, pp. 3–7, 2005.
- [4]-P. A. Baron and K. Willeke, *Aerosol Measurement, Principles, Techniques and Applications*, 2nd ed. New York: Wiley.
- [5]-Article L220-2 du Code de l'environnement.
- [6]-a,b,c 7 millions de décès prématurés sont liés à la pollution de l'air chaque année [archive], sur le site de l'OMS, 25 mars 2014
- [7]-Pollution intérieure, UFC-Que Choisir dénonce la passivité des pouvoirs publics [archive], RECYCONSULT, par Pierre Melquiot, publié le 27 août 2009.
- [8]-Pollution intérieure, UFC-Que Choisir dénonce la passivité des pouvoirs publics [archive], RECYCONSULT, par Pierre Melquiot, publié le 27 août 2009-
- [9]-La pollution du trafic aérien [archive] selon l'Union francilienne contre les nuisances aériennes.
- [10]-b Rapport du gouvernement français sur la qualité de l'air pour 2014 [archive], tableau récapitulatif p. 9 et commentaires par polluant.
- [11]-Thèse de doctorat de l'Université du Littoral. Présentée par : Houdayahi(Méthodologie de prévision de la pollution atmosphérique particulaire :Vers une télédétection satellitaire).
- [12]-Madeleine 1980.
- [13]-G.Gorzawski et G.Helas (Max Planck Institute).
- [14]-epa.
- [15]-J.A. Pelesko and D. H. Bernstein, "Modeling MEMS and NEMS",Chapman & Hall/CRC, 2003, p. 3.
- [16]-Feynman R. P." There's plenty of room at the bottom", *Journal ofMicroelectromechanical Systems*, 1(1):60-66, 1992.
- [17]-H. Nathanson et al., « The Resonant Gate Transistor », Mar. 1967,Transactions on Electron Devices, vol. ED-14 No. 3, IEEE, pp. 117-133.
- [18]-<http://www.analog.com/en/mems/products/index.html>
- [19]-<http://www.dlp.com>

Références

- [20]-O. Cugat, "Micro-actionneurs électromagnétiques, MAGMAS", LAVOISIER, 2002.
- [21]-C.S. Smith, "Piezoresistance effect in germanium and silicon", Physical Review, 94:42-49, 1954.
- [22]-O.N. Tufte and P.W. Chapman, "Silicon diffused-element-piezoresistive diaphragms", Journal of Applied Physics, 33, 1962.
- [23]-J. Willis and B.D. Jimerson, "A piezoelectric accelerometer", Proc.IEEE, 52, pp.871-2, 1964.
- [24]-D. Yan, "Mechanical design and modelling of MEMS thermal actuators for RF applications", Master Thesis, University of Waterloo, Ontario, 2002.
- [25]-P.A. Grunberg, "Exchange anisotropy, interlayer exchange coupling in research and applications", Sens. Actuators A Phys. 91, pp. 153-160, 2001.
- [26]-Groupe Microtechnologies – Opération Capteurs Microsystèmes.
- [27]-Francisc BÖLÖNI : Contribution à la modélisation déterministe et stochastique du phénomène de pull-in dans les MEMS à actionnement électrostatique, 2010, p. 18-29.
- [28]-Olivier FRANÇAIS - Hélène HORSIN MOLINARO « Capteurs résonants en technologie MEMS : principes et procédés de réalisation » 2015, p : 1
- [29]-Michaela Ivan Résonateurs à haute fréquence a ondes de volume en réalisation MEMS sur tranche silicium, 2013, p : 11.
- [30]-J.W. Yi, W.Y. Shih, Effect of length, width, and mode on the mass detection sensitivity of piezoelectric unimorph cantilevers, Journal of Applied Physics, 91, pp. 1680-1686, (2002).
- [31]-J. Zhou, P. Li, S. Zhang, Y. Huang, P. Yang, M. Bao, G. Ruan, Self-excited piezoelectric microcantilever for gas detection, Microelectronic Engineering, 69, pp. 37-46, (2003).
- [32]-I. Dufour, O. Français, Microsystèmes utilisant des fluides, chapitre 8 du tome microfluidique du traité "Electronique, Génie Electrique et Microsystèmes" des éditions Hermès, pp. 305-343, (2004)
- [33]-C. Hagleitner, A. Hierlemann, D. Lange, A. Kummer, N. Kerness, O. Brand, H. Baltes, Smart single-chip gas sensor microsystem, Nature, vol. 414, pp. 293-296, (2001).
- [34]-C. Vancura, M. Rüegg, Y. Li, D. Lange, C. Hagleitner, O. Brand, A. Hierlemann, H. Baltes, Magnetically actuated CMOS resonant cantilever gas sensor for volatile organic compounds, Transducers'03, the 12th International Conference on Solid-State Sensors,
- [35]-Gatien Fleury Etude, conception et réalisation en technologie MEMS d'un commutateur mécaniquement bistable, p : 17, 2010.
- [36]-B. Rogers, L. Manning, M. Jones, T. Sulchek, K. Murray, B. Beneschott, J. D. Adams, Z. Hu, T. Thundat, H. Cavazos, S.C. Minne, Mercury vapor detection with a self-sensing, resonating piezoelectric cantilever, Review of Scientific Instruments, Volume 74, Issue 11, pp. 4899-4901, (2003).
- [37]-M. Tortonese, H. Yamada, R.C. Barrett, C.F. Quate, Atomic force microscopy using a piezoresistive cantilever, Proceedings of Transducers 91, IEEE International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, Piscataway, NJ, USA, pp. 448-451, (1991).

Références

- [38]-J. Thaysen, A. Boisen, O. Hansen, S. Bouwstra, Atomic force microscopy probe with piezoresistive read-out and a highly symmetrical Wheatstone bridge arrangement, *Sensors and Actuators A*, 83, pp. 47-53, (2000).
- [39]-S. Chatzandroulis, A. Tserepi, D. Goustouridis, P. Normand, D. Tsoukalas, Fabrication of single crystal Si cantilevers using a dry release process and application in a capacitive-type humidity sensor, *Microelectronic Engineering*, 61-62, pp. 955-96, (2002).
- [40]-J Davis, G Abadal, O Kuhn, O Hansen, F Grey, A Boisen, "Fabrication and characterization of nanoresonating devices for mass detection", *Journal of vacuum science and technology*, B, 18, n°2, pp. 612-616, (2000).
- [41]-Grégory ARNDT System Architecture and Circuit Design for Micro and Nanoresonators-Based Mass Sensing Arrays, p: 13, 2013.
- [42]-Vincent Cuisset »Utilisation de micropoutres sans couche sensible en vibration pour la détection d'espèces gazeuses Réalisation d'un réseau gaz pilotable ».p :13-14,2010.
- [43]-Mohand-TayebBoudjiet, Microsystème durables de mesures de concentration d'hydrogène utilisant des micro-poutres sans couche sensible : 39, 2015.
- [44] Sébastien Labarthe CONCEPTION ET MODELISATION D'UN NANOCAPTEUR DE MASSE PAR DETECTION PIEZORESISTIVE, p : 47, 2010.
- [45]-V. Kumar, Y. Yang, J.W. Boley, G.T.-C. Chiu & J.F. Rhoads. Modeling, Analysis, and Experimental Validation of a Bifurcation-Based Microsensor. *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 21, no. 3, pages 549 –558, 2012.
- [46]-Frédéric Lochon : Développement de microcapteurs chimiques à base de micropoutres dédiés au contrôle de la qualité de l'air: détection temps réel de Composés Organiques Volatils (COV), p32, 2009.
- [47]-Campbell, S.A., *The Science and Engineering of Microelectronic Fabrication*, Oxford Series in Electrical Engineering, Oxford University Press, 1996.
- [48]-M. DE LABACHELERIE, "Techniques de fabrication des microsystèmes 1", traité EGEM, Ed. Lavoisier, 2004.
- [49]-J. K. BHARDWAJ et H ASHRAF, "Advanced silicon etching using high-density plasmas", *Proc. SPIE*, vol. 2639, pp. 224-233, 1995.
- [50]-J. LI, Q. X. ZHANG et A. Q. LIU, "Advanced fiber optical switches using deep RIE (DRIE) fabrication", *Sensors and Actuators A : Physical*, vol. 102 (3), pp. 286-295, 2003.
- [51]-R.B Darling/ EE _527: Microfabrication-Photolithography.
- [52]-Thèse par ParickGinet_IMS :Conception et élaboration de microstructures en technologie hybride couche épaisse pour des applications MEMS.
- [53]-G. PERREGAUX, S. GONSETH, P. DEBERGH, J.P. THIEBAUD et H. VUILLIOMENET, "Arrays of addressable high-speed optical microshutters", *Proc. MEMS 2001*, pp. 232-235, 2001.

Références

- [54]-H. ANDERSSON, W. VAN DER WIJNGAART, P. GRISS, F. NIKLAUS et G. STEMME, "Hydrophobic valves of plasma deposited octafluorocyclobutane in DRIE channels", *Sensors and Actuators B : Chemical*, vol. 75 (1-2), pp. 136-141, 2001.
- [55]-J. AEBERSOLD, K. WALSH, M. CRAIN, M. VOOR, M. MARTIN, W. HNAT, J. LIN, D. JACKSON et J. NABER, "Design, modeling, fabrication and testing of a MEMS capacitive bending strain sensor", *J. Phys. : Conf. Ser.*, vol. 34, pp. 124-129, 2006.
- [56]-J. JANG et S. T. WERELEY, "Gaseous slip flow analysis of a micromachined flow sensor for ultra small flow applications", *J. Micromech. Microeng.*, vol.17 (2), pp. 229-237, 2007.
- [57]-C. KELLER et M. FERRARI, "Milli-scale polysilicon structures", *Solid-State Sensor and Actuator Workshop Technical Digest, Hilton Head Island, USA*, pp. 132-137, 1994.
- [58]-E. H. KLAASSEN, K. PETERSEN, J. M. NOWOROLSKI, J. LOGAN, N. I. MALUF, J. BROWN, C. STORMENT, W. MCCULLEY et G. T. A. KOVACS, "Silicon fusion bonding and deep reactive ion etching; a new technology for microstructures", *Proc. Int. Solid-State Sensors and Actuators Conf.*, Stockholm, pp. 556-559, 1995.
- [59]-C.G. KELLER, "Microfabricated silicon high aspect ratio flexures for in-plane motion", Ph.D. Thesis, Dept. of Materials Science and Mineral Engineering, Univ. of Calif. at Berkeley, 1998.
- [60]-C.G. KELLER et R.T. HOWE, "Hexsil tweezers for teleoperated micro-assembly", *Proceedings IEEE Tenth Annual International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems*, pp. 72-77, 1997.
- [61]-P. BLEY, W. BACHER, W. MENZ et J. MOHR, "Description of microstructures in LIGATEchnology", *Microelectronic Engineering*, vol. 13 (1-4), pp. 509-512, 1991.
- [62]-D. Bachmann, B. Schoberle, S. Kuhne, Y. Leiner, and C. Hierold. Fabrication and characterization of folded su-8 suspensions for mems applications. *Sensors and ActuatorsA*, 130-131:379-386, 2006.
- [63]-Thèse _R_LAKHMI-HAL ID: td-00671386
- [64] Réda YAHIAOUI Etude par microvibrrométrie de films minces et de dispositifs micromécaniques, p22, 2002.
- [65] Ludivine Fadel CONTRIBUTION À L'UTILISATION DE MICROCAPTEURS CHIMIQUES À BASE DE MICROPOUTRES RÉSONANTES POUR LA DÉTECTION D'ESPÈCES CHIMIQUES EN MILIEU GAZEUX ; p 56 ; 2004.
- [66] Mohand-Tayeb Boudjiet Microsystems durables de mesures de concentration d'hydrogène utilisant des micropoutres sans couche sensible ; p 40 ; 2015.
- [67] C. Wang, L. Yin, L. Zhang, D. Xiang and R. Gao, Metal oxide gas sensors: Sensitivity and influencing factors, *Sensors*, 10 (2010), pp 2088–2106.
- [68] J. L. King, The free transverse vibrations of anisotropic beam', *Journal of Sound and Vibration*, 98 (1985), pp 575-585.
- [69] L. A. Beardslee, K. S. Demirci, Y. Luzinova, B. Mizaikoff, S. M. Heinrich, F. Josse, and O. Brand, Liquid-phase chemical sensing using lateral mode resonant cantilevers, *Analytical Chemistry*, 82(2010), pp 7542–7549.

Références

- [70] R.D. Blevins, Formulas for natural frequency and mode shape, Van Nostrand Reinhold Company, pp. 108, (1978).
- [71] R. Yahiaoui, A. Bosseboeuf, Improved modelling of the dynamical behaviour of cantilever microbeams, MME 2001, Cork, Ireland, pp. 281-284, (2001).
- [72] S.P. Timoshenko, Résistance des matériaux, Tome 1, Dunod Technique, pp. 208, (1968).
- [73] S. Beeby, Ensell G., Kraft M. & N. White. Mems mechanical sensors. Artech House MEMS Library. ARTECH HOUSE Incorporated, 2004.
- [74] R.D Blevins, Formulas for natural frequency and mode shape, Van Nostrand Reinhold Company, pp.159, (1978).
- [75] Van-Nghi Nguyen Principes alternatifs pour la détection de masse ultime via la dynamique non linéaire de capteurs résonants M/NEMS, 2015,p 11.
- [76] <https://www.comsol.com/support/knowledgebase/838/>
- [77] P. W. Bridgman, The effect of homogeneous mechanical stress on the electrical resistance of crystals, Physics Review 42 (1932) 858-863.
- [78] COMSOL Multiphysics 3.3, Modeling Guide, copyright. 1994-2006, COMSOL LAB.
- [79] Arash Hajjam, James C. Wilson, and Siavash Pourkamali: Individual Air-Borne Particle Mass Measurement Using High-Frequency Micromechanical Resonators .IEEE SENSORS JOURNAL, VOL. 11, NO. 11, NOVEMBER 2011