

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DES SCIENCES
DEPARTEMENT : Physique
N° : Ph / MAT/ 27/2019



DOMAINE : Sciences de la matière
FILIERE : Physique
OPTION : Physique Des Matériaux

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Par: REGUIG Rima

Intitulé

Propriétés physiques des couches
minces en présence des défauts de
gravure isotrope

Soutenu le 28 /09/2020 devant le jury composé de:

IBRIR Miloud	Université de M'Sila	Président
BOUROUINA Hicham	l'E.N.S.Bousaada	Rapporteur
BOUSSENDEL Abdelmadjid	Université de M'Sila	Co-Rapporteur
ASSOUS Boubaker	Université de M'Sila	Examineur

Année universitaire : 2019/2020

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



Dédicaces

Je Dédie ce modeste travail à :

- ✓ Mes chers parents, pour leur endurance et leurs sacrifices sans limites.
- ✓ À mon cher mari Omar.
- ✓ Mes frères et sœurs, en reconnaissance de leur affection toujours constante.
- ✓ Tous mes proches.
- ✓ Mes amis.
- ✓ Mes camarades de promotion.
- ✓ Tous mes enseignants.
- ✓ Tous ceux qui m'ont aidé dans la réalisation de ce mémoire.



REGUIG Rima



REMERCIEMENTS

Je remercie Dieu Tout-Puissant qui m'a donné santé, courage, patience et volonté, ce qui m'a permis de terminer ce travail en cours.

Ce travail a été encadré par M. Hicham BOUROUINA, maître de conférences habilité à l'ENSB de M'sila, conjointement avec M. Abdelmadjid BOUSSENDEL, maître de conférences habilité à l'UMB de M'sila. Je vous remercie pour avoir accepté de diriger ce travail avec une rigueur intellectuelle et une efficacité exceptionnelle.

Je remercie les membres de mon jury, M. Boubaker ASSOUS, maître assistant à l'UMB de M'sila, pour avoir examiné mon travail, et M. Miloud IBRIR, professeur à l'UMB de M'sila, pour avoir accepté de présider ma thèse.

Je remercie mes collègues des directeurs d'école élémentaire de m'avoir encouragé, en particulier l'inspecteur administratif de la circonscription (03), M. Hocine HACHROUF.

Mes plus vifs remerciements à tous mes professeurs pour leurs Enseignements.

Je remercie également, toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.



REGUIG Rima



Sommaire

Dédicaces

Remerciements

Liste des Figures

Liste des Tableaux

Introduction générale.....1

Références. 4

CHAPITRE I : NOTIONS ET CONCEPTS SUR LES MICROPOUTRES INTÉGRÉES

I.1. Introduction. 6

I.2. Généralités sur les micropoutres. 6

I.2.1. Fonctions de base des micropoutres. 8

I.2.2. Intégration des micropoutres et domaines d'utilisation. 9

I.2.3. Les Enjeux scientifiques des micropoutres. 9

I.3. Matériaux d'élaboration des couches minces. 10

I.3.1. Matériaux amorphes. 11

I.3.2. Matériaux cristallins. 12

I.4. Techniques de mesure sans contact. 13

I.4.1. Technique de mesure ponctuelle. 13

I.4.2. Technique de mesure plein champ... 15

I.5. Modes d'actionnement et de détection	17
I.5.1. Mode d'actionnement.	17
I.5.2. Mode de détection.....	19
I.6. Technique de mesure de fréquence.	19
I.6.1. Principe de mesure.	21
I.6.2. Techniques appliquées pour la mesure.	21
I.6.3. Choix de la technique de mesure.	22
I.7. Caractérisation du comportement des microstructures.	22
I.7.1. Microvibrométrie interférométrique optique.	22
I.7.2. Interférométrie de Speckle Electronique.	23
I.7.3. Microscopie à Force Atomique.	24
I.8. Conclusion.....	25
Références.	26

CHAPITRE II :
MODELISATION DE COMPORTEMENT DYNAMIQUE DES
MICROPOUTRES INTÉGRÉES

II.1. Introduction.	34
II.2. Méthodes de modélisation de comportement dynamique.	35
II.2.1. La modélisation : principe et intérêt.	35
II.2.2. Principaux méthodes de modélisation.	35
II.2.2.1. Méthode de modélisation analytique.	35

II.2.2.2. Méthode de modélisation numérique	36
II.3. Comportement dynamique des micropoutres.....	36
II.3.1. Hypothèses et approximations de base.	36
II.3.2. Équation dynamique du mouvement	37
II.3.3. Modes et fréquences de vibration	39
II.4. Modélisation de largeur de la micropoutre.....	40
II.4.1. Modèle de l'effet de largeur	40
II.4.2. Correction de modèle analytique.	41
II.5. Étude de la sous-gravure à l'encastrement.	41
II.5.1 Forme de La sous-gravure de la micropoutre.....	41
II.5.2. Modèle de l'effet de la sous-gravure.	42
II.5.3. Correction de modèle de la micropoutre.	43
II.6. Étude de la section droite de la micropoutre.	44
II.6.1. Forme non-rectangulaire de la section droite.	44
II.6.2. Modèle de l'effet de la section droite.	45
II.6.3. Correction de modèle de la micropoutre.	47
II.7. Conclusion	48
Références.	49

CHAPITRE III:
SIMULATION NUMÉRIQUE ET INTER PRÉPATION DE
RÉSULTATS

III.1. Introduction.	52
III.2. Méthode des éléments finis.	52
III.2.1. Principe de base de la méthode.	52
III.2.2. Optimisation de maillage et convergence du calcul.	53
III.2.3. Mise en œuvre des simulations.	53
III.3. Calcul des facteurs corrections.	54
III.3.1. Facteur correctif de largeur.	54
III.3.2. Facteur correctif de sous-gravure.	58
III.3.3. Facteur correctif de la section droite.	61
III.4. Application à l'extraction de module élasticité.	62
III.4.1. Méthode de calcul de module élasticité.	62
III.4.2. Extraction de module élasticité.	63
III.4.2.1. Cas d'une micropoutre en Aluminium ($100 \times 9 \times 0.6 \mu\text{m}^3$).	63
III.4.2.2. Cas d'une micropoutre en Chrome ($80 \times 2 \times 0.95 \mu\text{m}^3$).	66
III.5. Conclusion.	68
Références.	69
Conclusion générale	70
Résumé	
Abstract	
ملخص	

Liste des Figures

N°	Liste des figures	Page
CHAPITRE I : NOTIONS ET CONCEPTS SUR LES MICROPOUTRES INTÉGRÉES		
Figure I. 1	Micropoutre en carbone de silicium [3].	7
Figure I. 2	Micropoutre d'un microscope à force atomique [4].	7
Figure I. 3	Schéma des fonctions micropoutre intégrées	8
Figure I. 4	Structures ordonnée et non ordonnée de la matière à l'état solide : (a) Structure non ordonnée, (b) Structure ordonnée.	11
Figure I. 5	Structure d'un matériau amorphe [45].	11
Figure I. 6	Structure d'un matériau à réseau cristallin [47].	12
Figure I. 7	Structure de silicium polycristallin.	13
Figure I. 8	Système d'acquisition des mesures ponctuelles de spectres de vibration [48].	14
Figure I. 9	Schéma de l'électronique de commande et de détection pour les mesures de vibrométrie stroboscopique en lumière monochrome ou blanche [48].	16
Figure I. 10	Schémas simplifiés des principaux types d'objectifs interférométriques	16
Figure I. 11	Principe de l'actionnement piézoélectrique.	17
Figure I. 12	Principe de l'actionnement électromagnétique.	18
Figure I. 13	Principe de l'actionnement électrostatique.	18

Figure I. 14	Dispositif intégré avec pont de Wheatstone (a) : Image obtenue par MEB, (b) : Schéma représentatif du pont [60].	19
Figure I. 15	Schéma expérimental de l'interférométrie holographie	23
CHAPITRE II : MODELISATION DE COMPORTEMENT DYNAMIQUE DES MICROPOUTRES INTÉGRÉES		
Figure II. 1	Schéma d'une micropoutre idéale encastree à l'une de ses extrémités d'une longueur L , d'une largeur b et d'une épaisseur h .	37
Figure II. 2	Image de microscopie électronique d'une poutre en couche d'Aluminium [25].	42
Figure II. 3	Configurations de la géométrie de poutre : (a) poutre équivalente sans sous-gravure (b) poutre avec sous-gravure à d'encastrement.	43
Figure II. 4	Profil de la section droite d'une poutre obtenue par gravure anisotrope : la section est trapézoïdale avec des flancs inclinés symétriques.	44
Figure II. 5	Profil de la section d'une poutre obtenue par gravure isotrope : les flancs de la section droite sont des arcs de cercles	44
Figure II. 6	Section avec des flancs de forme polynomiale.	45
Figure II. 7	Image MEB de la section droite non rectangulaire d'une poutre en Aluminium [24].	45
CHAPITRE III: SIMULATION NUMÉRIQUE ET INTER PRÉPATION DE RÉSULTATS		

Figure III. 1	Variation du coefficient α_1 (mode 1) en fonction de b/L pour différentes épaisseur de la poutre ($h=10\mu m$ et $h=20\mu m$) et le coefficient de Poisson ($\nu=0.35$ et $\nu=0.2$) pour une longueur L de la poutre égale à $1000\mu m$.	54
Figure III. 2	Variation du coefficient α_1 (mode 1) en fonction de b/L pour différentes épaisseur de la poutre ($h=10\mu m$ et $h=20\mu m$) et le module d'Young ($E=70GPa$ et $E=80GPa$) pour une longueur L de la poutre égale à $1000\mu m$.	55
Figure III. 3	Evolution de la correction α_1 en fonction de b/L pour différentes valeur du coefficient de Poisson ν . Dimensions de la poutre : $L=1000\mu m$, $h=50\mu m$.	56
Figure III. 4	Variation du coefficient α_n en fonction de b/L pour les trois premiers modes d'une poutre $h=50\mu m$, $L=1000\mu m$	57
Figure III. 5	Variation de $\Delta L/L$ avec la largeur b_{sg} de la sous gravure pour différentes valeurs de $L_{sg}=4\mu m$, $6\mu m$, et $8\mu m$. $L=200\mu m$, $b=8\mu m$, $h=2\mu m$, premier mode, encastrement simple	58
Figure III. 6	Variation de $\Delta L/L$ avec la largeur b_{sg} de la sous-gravure pour différentes valeurs de $L_{sg}=4\mu m$, $6\mu m$, et $8\mu m$. $L=200\mu m$, $b=8\mu m$, $h=2\mu m$, premier mode, encastrement simple.	59
Figure III. 7	Variation de $\Delta L/L$ avec la largeur b_{sg} de la sous-gravure: $L_{sg}=800\mu m$, $L=1000\mu m$, $b=50\mu m$, $h=10\mu m$, premier mode de vibration (mode1), ES : encastrement simple et EC : encastrement complet.	59
Figure III. 8	Variation de $\Delta L/L$ avec la largeur b_{sg} de la sous-gravure : $L_{sg}=800\mu m$, $L=1000\mu m$, $b=50\mu m$, $h=10\mu m$, deuxième mode de vibration (mode2), ES : encastrement simple et EC : encastrement complet.	60

Figure III. 9	Facteur correcteur β en fonction du rapport d'aspect de la poutre pour une section trapézoïdale avec différents angles θ et pour une section avec des flancs en arcs de cercle	61
Figure III. 10	Spectres de vibration d'une micropoutre en Aluminium de dimension $100\mu m \times 9\mu m \times 0.6\mu m$ [2] : (a) mode 1 : $f_1 = 49.5kHz$ excitation PZT 1Vpp ; (b) mode 2 : $f_2 = 296.1kHz$ excitation PZT 1Vpp ; (c) mode 3 : $f_3 = 816kHz$ excitation PZT 10Vpp.	63
Figure III. 11	Courbes de $Y_n^e = f(a_n^{e^4})$ (modèle EBM sans correction) et $Y_{nc}^e = f(a_n^{e^4})$ (modèle EBM avec correction) pour le cas de la poutre en Aluminium.	65
Figure III. 12	Spectres de vibration d'une micropoutre au Chrome de dimension $80\mu m \times 2\mu m \times 0.95\mu m$; excitation PZT 2Volts [2].	66
Figure III. 13	Courbes de $Y_n^e = f(a_n^{e^4})$ (modèle EBM sans correction) et $Y_{nc}^e = f(a_n^{e^4})$ (modèle EBM avec correction) pour le cas de la poutre en couche de Chrome.	67

Liste des Tableaux

N°	Liste des Tableaux	Page
CHAPITRE II : MODELISATION DE COMPORTEMENT DYNAMIQUE DES MICROPOUTRES INTÉGRÉES		
Tableau II. 1	Constantes utiles pour le calcul des fréquences de vibration et des modes de vibrations des poutres non contraintes.	39
CHAPITRE III: SIMULATION NUMÉRIQUE ET INTER PRÉPATION DE RÉSULTATS		
Tableau III. 1	Valeurs du module d'Young E , du coefficient de Poisson ν et de la densité ρ utilisées pour les simulations.	53
Tableau III. 2	Valeurs du module d'Young Y non corrigé calculées à partir des fréquences mesurées pour une poutre en Aluminium.	64
Tableau III. 3	La valeur sans correction et avec correction du module d'Young pour le cas de la poutre en Aluminium.	65
Tableau III. 4	Valeurs du module d'Young Y non corrigé calculées à partir des fréquences mesurées (poutre en Cr).	66
Tableau III. 5	La valeur sans correction et avec correction du module d'Young pour le cas de la poutre en Chrome.	67

Introduction générale

Introduction générale

L'évolution rapide de la physique des matériaux et des méthodes numériques de modélisation, le développement remarquable dans les instruments de mesure d'autre part, ont conduit à l'élaboration des dispositifs électromécaniques rassemblent des fonctions électroniques et mécaniques à l'échelle micrométrique. Ces microsystemes sont communément appelés les MEMS (Micro-Electro-Mechanical-Systems).

Un MEMS est un microsysteme qui se compose non seulement des éléments électroniques mais aussi des éléments mécaniques destinés à assurer des fonctions de détection et/ou d'actionnement. Les MEMS (aussi appelés des Microsystemes en Europe ou Micromachines au Japon) réunissent un ensemble de composants réalisés le plus souvent sur substrat de silicium à l'aide de la microtechnologie [1-2] en utilisant des méthodes microélectroniques pour réaliser des microcapteurs et microactionneurs électromécanique.

La partie microélectronique est réalisée en utilisant les procédés technologiques utilisés pour la réalisation des circuits intégrés, tandis que les parties mécaniques, elles sont fabriquées à l'aide de procédés qui éliminent certaines parties du wafer ou déposer des couches structurales pour former le microdispositif mécanique [3-4]. Le concept "micromechanics" fait référence à l'utilisation du silicium comme matériau mécanique et à l'application de la technologie avancée des circuits intégrés pour fabriquer des structures mécaniques des volumes extrêmement petite.

L'association de l'électronique sur silicium avec la technologie de microusinage a rendu possible la réalisation de systèmes complets sur puce. La microtechnologie permet de développer les composants intelligents et de rajouter à la capacité du calcul de l'électronique, l'aptitude de percevoir et de contrôler les capteurs et les actionneurs.

Une bonne partie des dispositifs MEMS est réalisée à base des structures souvent des poutres. Ces structures sont intégrées dans les dispositifs comme des composants micromécaniques pour faire des opérations de détection ou d'actionnement [5-6]. La modélisation des poutres repose sur la compréhension des phénomènes physiques

pour l'extraction des propriétés mécaniques des couches minces constituant ses microstructures de base à savoir le module d'Young et le coefficient de Poisson.

La modélisation du comportement d'une poutre est faite généralement par d'équations différentielles aux dérivées partielles. La solution de ce système d'équations demande des méthodes de résolution numérique. La théorie des poutres est initialement attribuée à Galilée [7] mais Leonhard Euler et Jacques Bernoulli sont eux qui ont entamé la première théorie utile, alors que c'est Daniel Bernoulli, qui écrivit pour l'analyse vibrationnel.

Toutefois, il est rare que le moment de flexion soit seul car il est associé avec une rotation de la section de la structure vibrante [8-9]. Dans ce cas, la déformation de cette dernière dépend non seulement de la forme de la géométrie et ses dimensions, mais des caractéristiques mécaniques en plus. La modélisation de la vibration d'une poutre est faite par un système d'équations différentielles aux dérivées partielles mais les poutres réalisées montrent en réalité plusieurs différences par rapport aux poutres idéales considérées dans les études analytiques. Elles montrent une sous-gravure au voisinage de la zone de l'encastrement de son extrémité fixe et une non uniformité de section de la structure [10-11].

De nombreuses méthodes ont été utilisées pour l'étude du comportement mécanique afin d'extraire les paramètres mécaniques. On peut citer la mesure de la déformation déduite par des contraintes mécaniques [12-13] et la mesure des modifications des propriétés liées aux vibrations mécaniques. Pour cette dernière, les fréquences de mesurées sont très sensibles à la géométrie de la structure vibrante, et le modèle analytique atteint vite sa limitation en modifiant la largeur de la poutre, l'état de l'encastrement de l'extrémité et la non uniformité de la section de la couche mince par le procédé de la gravure. Ainsi, l'approche numérique se révèle alors un choix sage pour rendre compte de cette complexité où la méthode des éléments finis couramment utilisée pour la modélisation des systèmes macroscopique sera aussi appliquée pour la modélisation des systèmes microscopiques.

L'objectif de ce mémoire est d'étudier les propriétés physiques des couches minces en présence de défauts technologiques de la gravure isotrope du matériau.

L'étude est basée sur la modélisation du comportement vibratoire des couches minces et la correction des défauts technologique afin d'améliorer l'extraction des propriétés physiques des couches minces qui composent les poutres.

Ainsi, le premier chapitre présente brièvement l'état de l'art des poutres intégrées dans les dispositifs MEMS, et également le principe d'intégration de la poutre dans les systèmes, ses enjeux scientifiques et stratégiques et les méthodes de mesure adaptées pour la caractérisation des poutres, en particulier la technique de microvibrométrie interférométrique optique couramment utilisée pour la caractérisation mécanique des couches minces.

Le deuxième chapitre est dédié à la modélisation du comportement vibratoire des poutres où un modèle analytique est recensé, corrigé puis analysé en utilisant la méthode des éléments finis (MEF) afin de déterminer leur validité et les facteurs correctifs à considérer pour corriger l'effet de largeur sur la valeur de la fréquence de la poutre vibrante.

Le troisième chapitre présente les résultats numériques obtenus et l'extraction des paramètres à l'aide du modèle développé, la correction de l'effet de la largeur de la poutre, l'effet de procédé d'élaboration par graveur, et l'effet du non uniformité de la section de la structure vibrante.

Enfin, nous terminerons notre mémoire par un sommaire qui résume l'influence des défauts engendrés par le procédé de la gravure, l'importance de la correction de ces défauts, et les perspectives prévues dans le futur.

Références

- [1] McDonald, J.A., "What's all this talk about 'MEMS'? ", III-Vs Review, 10 (1997) 26-29.
- [2] Elders, J., Spiering, V., Walsh, S., " Microsystems Technology (MST) and MEMS applications: an overview ", MRS Bulletin, 26 (04) (2001) 312-315.
- [3] Spearing, S.M., "Materials issues in microelectromechanical systems (MEMS) ". Acta Materialia, 48 (2000) 179-196.
- [4] Kruit, P., "The role of MEMS in maskless lithography ", Microelectronic engineering, 84 (2007) 1027-1032.
- [5] Kim, Y.S., Nam, H.J., Cho, S.M., Hong, J.W., Kim, D.C., Bu, J.U., " PZT cantilever array integrated with piezoresistor sensor for high speed parallel operation of AFM ", Sensors and Actuators A: Physical, 103(1) (2003) 122-129.
- [6] Dong, W., Lu, X., Cui, Y., Wang, J., Liu, M., "Fabrication and characterization of microcantilever integrated with PZT thin film sensor and actuator ", Thin Solid Films, 515 (2007) 8544-8548.
- [7] Fantner, G.E., Schumann, W., Barbero, R.J., Deutschinger, A., Todorov, V., Gray, D.S., Youcef-Toumi, K., " Use of self-actuating and self-sensing cantilevers for imaging biological samples in fluid ", Nanotechnology, 20 (2009) 434003.
- [8] Han, S.M., Benaroya, H., Wei, T., "Dynamics of transversely vibrating beams using four engineering theories. Journal of Sound and Vibration ", 225 (1999) 935-98.
- [9] Yoo, H., Cho, J. E., Chung, J., " Modal analysis and shape optimization of rotating cantilever beams ", Journal of Sound and vibration, 290 (2006) 223-241.

- [10]** Bhat, S., Bhattacharya, E., "Electrical measurement of undercut in surface micromachined structures ", IEEE Physics of Semiconductor Devices, IWPSD. International Workshop, (December 2007) 702-705).
- [11]** Bourouina, H., Yahiaoui, R., Elmar Yusifli, A., Benamar, M. E. A., Sahar, A., " Analytical modeling of mechanical behavior of structures: comparative analysis, experimental: validation and numerical correction with FEM of material defects generated by anisotropic etching ", Matec Web of conference, 272 (2014) 758-760.
- [12]** Calleja, M., Nordstrom, M., lvarez, M., Tamayo, J., Lechuga, L. M., & Boisen, A., "Highly sensitive polymer-based cantilever-sensors for DNA detection ", Ultramicroscopy, 105 (2005) 215-222.
- [13]** McShane, G. J., Boutchich, M., Phani, A. S., Moore, D. F., & Lu, T. J., "Young's modulus measurement of thin-film materials using micro-cantilevers ", Journal of Micromechanics and Microengineering, 16 (2006) 1926.

CHAPITRE I :

NOTIONS ET CONCEPTS SUR LES MICROPOUTRES INTÉGRÉES

I.1. Introduction

Les systèmes microelectromechaniques (en anglais MicroElectroMechanical Systems) (MEMS) sont issus de la microtechnologie avec un champ d'application plus vaste comme la biologie, la chimie, la microfluidique, etc. Les dispositifs intègrent ou combinent d'une manière générale des éléments mécaniques et électroniques sur le même substrat avec des dimensions micrométriques. Les composants des MEMS sont des constituants à l'échelle de micron réalisés par des procédés d'élaboration en salle blanche où un bon nombre de ces constituants est très accessibles sur le plan technologique en raison de leurs dimensions [1]. Les techniques et technologies dérivées de la microélectronique au Silicium ont ouvert un champ d'investigation très important sur cette génération de systèmes et ont révolutionné les techniques instrumentales et apporté de nouvelles solutions au niveau pratique. Ils permettent de réaliser un grand nombre d'instruments parfaitement adaptés à la caractérisation des structures d'une manière collective. La modélisation des structures de base repose sur l'identification et la compréhension des phénomènes physiques pour l'extraction des paramètres mécaniques des couches minces élaborées [2].

I.2. Généralités sur les micropoutres

Le terme « micropoutre » a apparue, Grâce aux procédés microélectroniques liés à la miniaturisation des appareils électroniques. La structure de base d'une poutre consiste en un parallélépipède de dimensions micrométriques. Les méthodes microtechniques couramment utilisées pour réaliser les poutres sont :

L'usinage de surface est basé sur la fonction de couches sacrificielles. Ces couches sont entièrement gravées à la fin de la production par une étape de gravure sélective. Lors de la fabrication, les couches déposées sont une succession de couches sacrificielles (dioxyde de silicium par exemple) et de couches structurales (comme le polysilicium ou un métal) qui sont gravées au fur et à mesure de leur empilement.

L'usinage volumique est une méthode pour obtenir des structures suspendues en gravant le substrat. Est utilisée la gravure forme une cavité dans le volume du substrat sous

les couches déposées. Les figures suivantes montrent quelques changements de géométrie de poutres rencontrées :

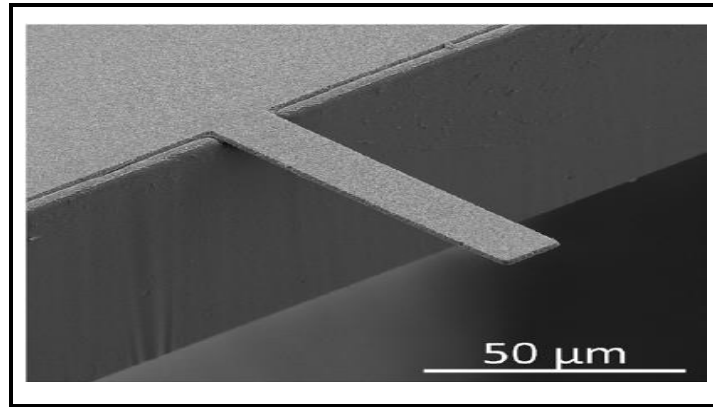


Figure I. 1 : Micropoutre en carbone de silicium [3].

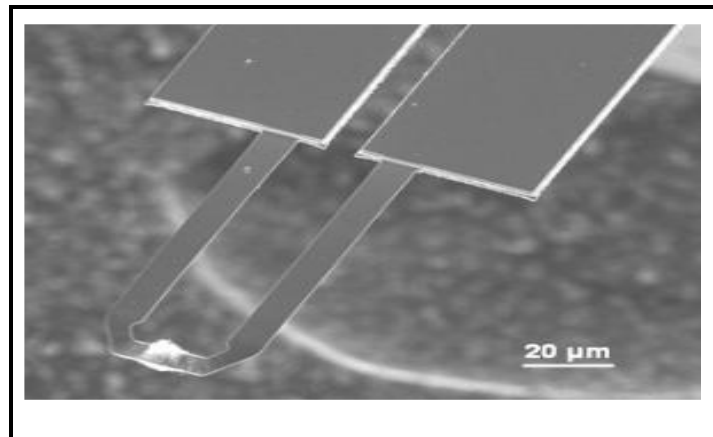


Figure I. 2 : Micropoutre d'un microscope à force atomique [4].

Les poutres ont généralement une sous gravure à proximité du luminaire et n'ont pas toujours une section rectangulaire [5-6]. Malgré cela, il est possible de fonder de modèle analytique qui tien compte de propriété réelle de poutre avec des formulations analytiques. La modélisation par la technique des éléments finis (MEF) permet alors de prendre en compte les phénomènes indiqués de déterminer le comportement réel des poutres réalisées. Dans la pratique, les poutres à configuration libre intégrée produites en couches minces ou multicouches présentent une contrainte résiduelle étendue ou compressive [7-8]. D'un point de vue technologique, ces structures de base présentent toujours des

imperfections, et la transition entre le régime de préflambement et le régime de postflambement est plus graduel que prévue par la théorie du flambement [9]. Ceci peut être modélisé en appliquant une faible force de flexion au centre de la poutre [10]. Les poutres ont été utilisées pour sonder très précisément la surface des matériaux et peuvent également être utilisés pour sonder les propriétés viscoélastiques des fluides [11-12]. La recherche a principalement porté sur l'étude des micropoutres en mode mécanique dont les modes de vibration sont généralement étudiés comme les modes de vibration en flexion de la microstructure dont le comportement est relativement bien connu [13-14].

I.2.1. Fonctions de base des micropoutres

Les microsystèmes diffèrent de l'électronique par l'intégration de fonctions mécaniques [1]. Ils représentent un groupement, dans le même petit composant, d'un ou de nombreux capteurs et/ou actionneurs et de l'électronique associée au traitement de l'information [2]. En résumé, une poutre intégrée est capable d'exécuter quatre fonctions (figure I. 3).

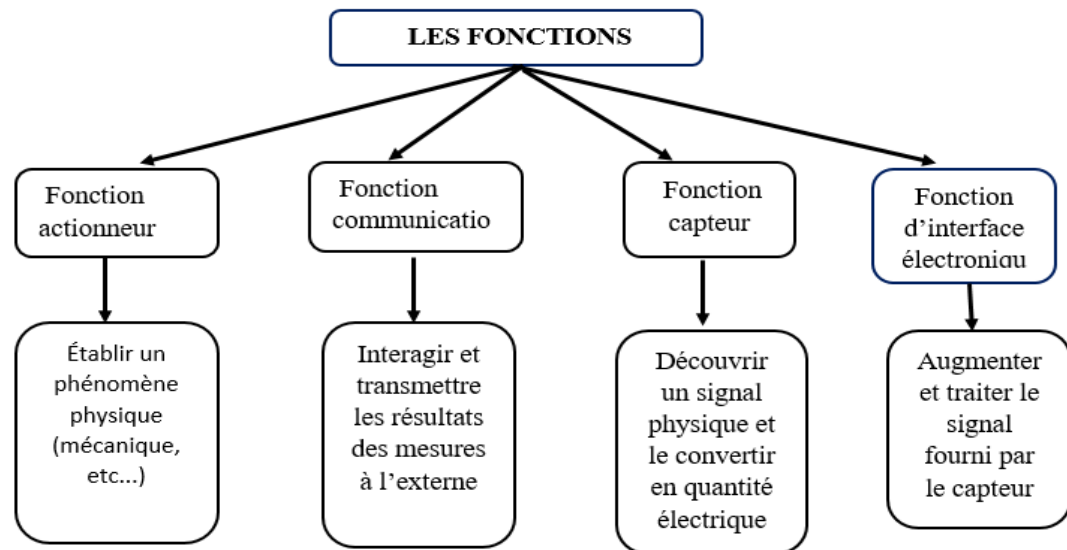


Figure I. 3: Schéma des fonctions micropoutre intégrées.

Les premières poutres intégrées dans les dispositifs MEMS étaient les actionneurs électrostatiques [15]. L'apparition de nombreuses technologies de systèmes a conduit à de

nombreuses applications industrielles, particulièrement les têtes de disque dur magnétiques [16].

I.2.2. Intégration des micropoutres et domaines d'utilisation

On trouve des systèmes à base de poutre dans presque tous les domaines qui exigent des diminutions importantes des coûts, des dimensions, du poids et une performance accrues:

Domaine Automobile : c'est actuellement le domaine industriel pour lequel les systèmes ont le plus de débouchés. Les applications concernent en priorité des capteurs de pression [15-17], de gaz [18-19] et de température [20].

Domaine Aérospatiale : les principaux systèmes utilisés dans l'aérospatiale sont les systèmes de positionnement au sol et les gyroscopes [21-22].

Domaine de Télécoms : Actuellement, MEMS RF cible l'intégration de composants discrets tels que les oscillateurs, les filtres, les inductances ou les relais [23-24].

Domaine Biomédicale : les systèmes confirment ses grandes utilités. En effet, en raison de la biocompatibilité du silicium et de la taille des systèmes, il est possible de créer des microsystèmes de capteurs et d'actionneurs qui seraient implantés à l'intérieur du corps et éventuellement interrogés à distance (distributeurs de médicaments, sonde gastrique, capteur de flux sanguin [25-26],...).

I.2.3. Les Enjeux scientifiques des micropoutres

L'intérêt suscité par les systèmes depuis les années 80 [27-28] est basé sur leurs caractéristiques résultant de la réduction en masse et en volume des dispositifs. D'un point de vue stratégique, cette réduction permet de limiter la congestion, d'augmenter le temps de réponse [29].

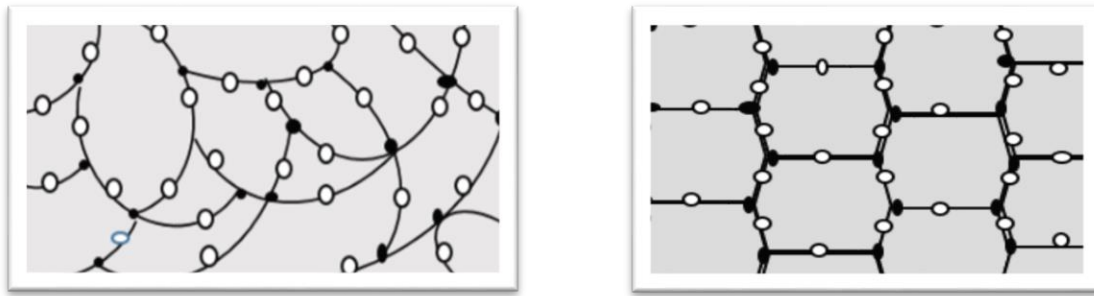
Issu de la technologie microélectronique, les systèmes utilisent des microtechnologies pour leur fabrication, qui permettent de réaliser des produits à grande échelle. Les micropoutres inclus dans les systèmes sont le plus souvent réalisés à partir

de la technologie du silicium [30-31], mais d'autres matériaux peuvent être utilisés en fonction de la conformité de leurs propriétés physiques pour certaines applications, par exemple: les métaux [32-33], divers polymères [34-35], les céramiques [36-37] etc. dernièrement, le domaine des microsystèmes s'est élargi en ajoutant des fonctions optiques (Microsystèmes optoélectromécaniques MOEMS) [38-39] et des fonctions radiofréquences (MEMS RF) [40-41]. Parmi les MOEMS les plus étudiés, on peut mentionner les matrices de microinterrupteurs [23], et les filtres conciliables pour les télécommunications [24], ainsi que les matrices de micromiroirs [42]. Les MEMS RF étudiés actuellement contiennent les filtres électromécaniques, les matrices de microinterrupteurs et les composants passifs réglables [43]. Ces dernières années, les systèmes ont encore élargi leur champ d'application en abordant les domaines de la chimie, de la microfluidique (micropompes) et de la biologie (BioMEMS) [44-45].

I.3. Matériaux d'élaboration des couches minces

Les applications systèmes, et plus particulièrement les structures de base telles que les poutres, sont réalisées à par de Silicium à l'état monocristallin sous forme de substrats massifs par les méthodes standard de chzochralski ou de la zone flottante. Les dépôts monocristallins de Silicium sont obtenus par épitaxie en phase vapeur ou liquide. Les matériaux utilisés pour la production de couches minces peuvent exister dans deux états différents:

- l'état désordonné caractérisé par une structure non ordonnée (**figure I.4.a**), c'est le cas des systèmes amorphes, tel que les verres;
- l'état ordonné caractérisé par une structure ordonnée correspond aux réseaux cristallins (**figure 1.4.b**).



(a) Structure non ordonnée

(b) Structure ordonnée

Figure I. 4 : Structures ordonnée et non ordonnée de la matière à l'état solide :

(a) Structure non ordonnée, (b) Structure ordonnée.

I.3.1. Matériaux amorphes

Les matériaux amorphes (**figure I. 5**) considérés comme des liquides à viscosité élevée [46]. Les atomes sont fixés les uns par rapport aux autres, mais ne sont pas placés de manière ordonnée (**figure I. 4.a**). Il y a donc seulement un ordre local. L'absence d'ordre à longue distance implique que le solide est isotrope. Dans le silicium amorphe, les premiers voisins d'un atome de silicium seront aux sommets d'un tétraèdre, mais il y aura une distorsion des angles de liaison en atteignant les deuxième et troisième voisins. Par conséquent, connaître la structure d'un endroit donné nous ne permet pas de prédire l'arrangement des atomes à un autre endroit.

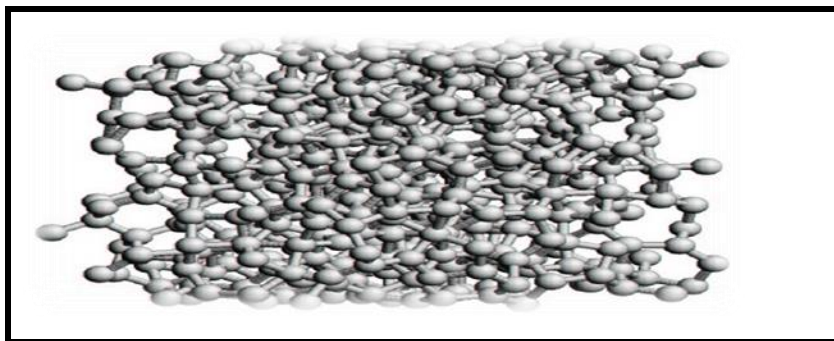


Figure I. 5: Structure d'un matériau amorphe [46].

I.3.2. Matériaux cristallins

Les atomes sont disposés les uns par rapport aux autres régulièrement sur de grandes portions d'espace (**figure I.6**), de quelques micromètres à quelques dizaines de centimètres (cristaux géants, en particulier quartz). Le solide est alors un corps anisotrope, avec des propriétés qui peuvent être différentes dans deux directions de l'espace. Les matériaux cristallisés sont obtenus par le refroidissement lent et régulier d'un liquide, au cours duquel les atomes ont le temps de se réarranger. On peut modéliser le solide cristallin par un arrangement périodique d'atomes dans les trois directions de l'espace [47].

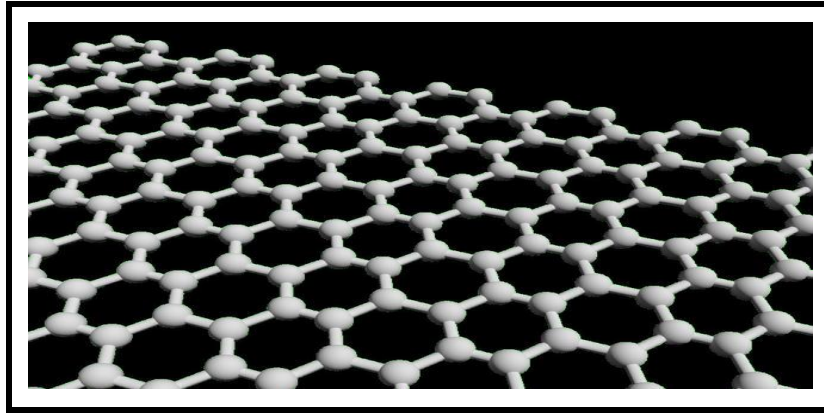


Figure I. 6: Structure d'un matériau à réseau cristallin [48].

Structure monocristalline : Une structure avec des réseaux monocristallins est définie comme étant un arrangement ordonné et périodique d'atomes au sein d'un réseau cristallographique dont l'élément élémentaire répété est appelée maille. Le silicium monocristallin est dans une structure cubique à faces centrées (CFC), dont la distance interatomique (paramètre de maille) est de $2.35\text{\AA}$, et les angles de liaison sont bien définis. Les liaisons chimiques dans le silicium sont de type covalent. La réalisation de nombreuses structures de base telle que les micropoutres commence par la production des couches minces élaborées à base des matériaux à microstructure monocristalline.

Structure polycristalline : Une microstructure à réseau polycristallin est considérée comme un mélange de deux phases, l'état cristallin et l'être amorphe. Que nous pouvons

assimiler au silicium amorphe et que nous appelons joints de grains. Dans les couches minces réalisées à base de solides polycristallins, le lingot obtenu est formé de plusieurs gros cristaux, séparés par des joints de grain. Ce matériau, moins similaire que dans le cas monocristallin.

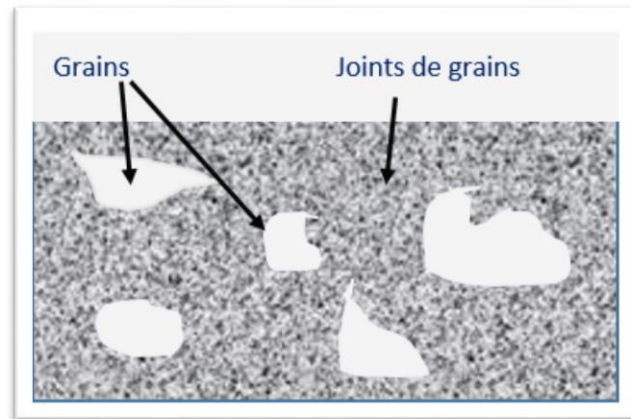


Figure I. 7 : Structure de silicium polycristallin.

I.4. Techniques de mesure sans contact

Les mesures interférométriques sont appuyées sur l'analyse des franges d'interférence. En théorie, une source de lumière cohérente est utilisée pour éclairer la surface étudiée, et les déplacements ou déformations sont obtenues en mesurant la différence de phase des franges d'interférence entre les ondes lumineuses correspondantes à un état initial et à un état déformé [49].

I.4.1. Technique de mesure ponctuelle

La technique appropriée pour ce type de caractérisation est de mesurer la déflexion d'un faisceau optique concentré sur la structure. Le microsystème est équipé d'un microscope optique pour visualiser le point de mesure. Selon les appareils, le système de détection est un simple photomultiplicateur (PM). Dans le cas de mesures ponctuelles du spectre de vibration avec le photomultiplicateur, la technique de double détection synchrone (DDS) est nécessaire pour ce type de caractérisation.

L'ensemble du système de mesure est contrôlé avec un PC qui a été programmé par exemple dans l'environnement de programmation graphique Labview de la société National Instruments [49]. La chaîne d'acquisition permettant la mesure par DDS et l'asservissement de la différence de chemin optique est schématisée (**figure I. 8**).

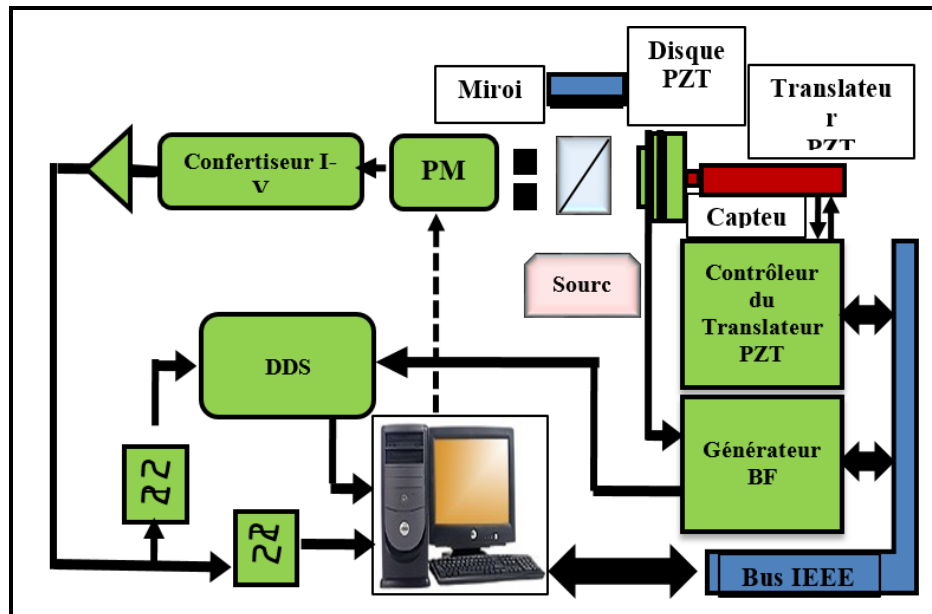


Figure I. 8 : Système d'acquisition des mesures ponctuelles de spectres de vibration [49].

Le signal lumineux du système interférométrique est converti en courant par le photomultiplicateur (PM). Le gain de MP est réglé par une tension provenant d'une carte numérique analogique installée sur l'ordinateur contrôlant le système [49-50]. Le courant est ensuite converti en tension et amplifié à l'aide d'un préamplificateur à faible bruit. La sortie de l'amplificateur est également divisée en 2 canaux:

Un canal 1 donnant l'intensité moyenne du signal par des passages à faible filtrage.

Un canal 2 pour éliminer la modulation à 100Hz et ses harmoniques.

Le canal 2 est envoyé à l'entrée du signal DDS et l'entrée de référence DDS est connectée à la sortie du générateur BF. Il est équipé d'un contrôle de gain automatique qui permet de sauvegarder à la fin un gain total constant. Dans le cas du générateur BF à

deux canaux, son second canal est utilisé pour permettre la sélection indépendamment du signal d'excitation, de l'amplitude et de la fréquence du signal de référence [49].

Le signal de référence peut être synchronisé à la même fréquence ou à un multiple entier avec le signal d'excitation, ce qui permet une analyse harmonique à chaque point de mesure. Le DDS extrait du signal de mesure d'entrée, le composant à la fréquence du signal de référence dans une bande étroite avec un gain de différence de phase indépendant entre le signal de mesure et le signal de référence. En balayant la fréquence du signal de référence tout en maintenant la fréquence d'excitation fixe, on obtient le spectre de fréquence du signal de mesure [49].

I.4.2. Technique de mesure plein champ

Interférométrie dans sa version microscopique plein champ est couramment utilisé pour obtenir une cartographie des modes de vibration de la poutre non seulement sa faiblesse, mais aussi la qualité des profils 3D sur tous les points de l'échantillon.

Les techniques holographiques et de speckle sont des techniques bien établies de caractérisation sur le terrain pour la caractérisation des vibrations d'objets macroscopiques, mais elles n'ont été appliquées que récemment à la caractérisation des vibrations de structure. La vibrométrie interférométrique homodyne peut être utilisée pour caractériser la contrainte et les vibrations sur tout le champ des dispositifs [49].

Le microsystème de caractérisation utilise un support de table ou un microscope avec un ou plusieurs objectifs interférométriques, une caméra CCD pour obtenir des images interférométriques et un système de translation d'échantillons nanométriques (**figure I.9**).

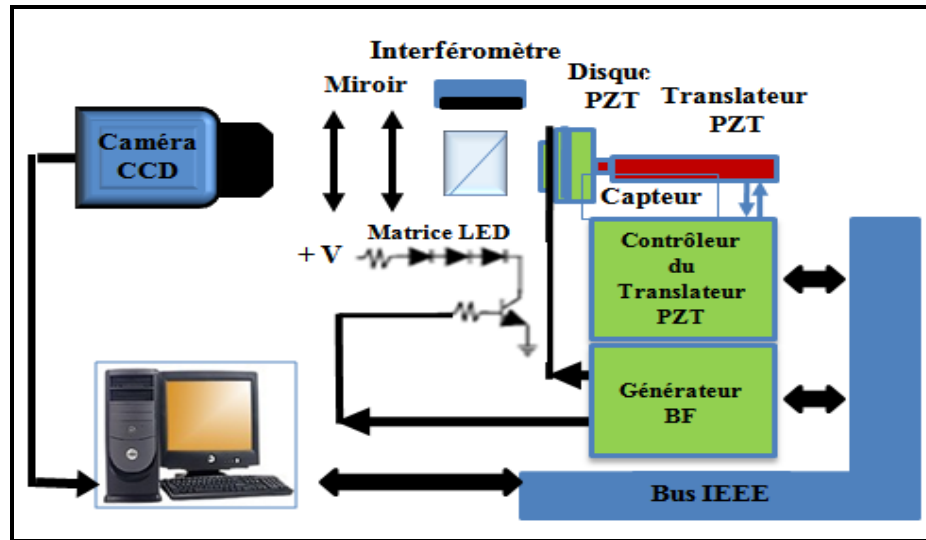


Figure I. 9: Schéma de l'électronique de commande et de détection pour les mesures de vibrométrie stroboscopique en lumière monochrome ou blanche [49].

Les lentilles interférométriques utilisées dans ces microsystèmes sont formées d'une lentille classique et d'un interféromètre miniaturisé du type Michelson, Mirau ou Linnik pour faire fonction d'agrandissement de la lentille (**Figure I. 10**).

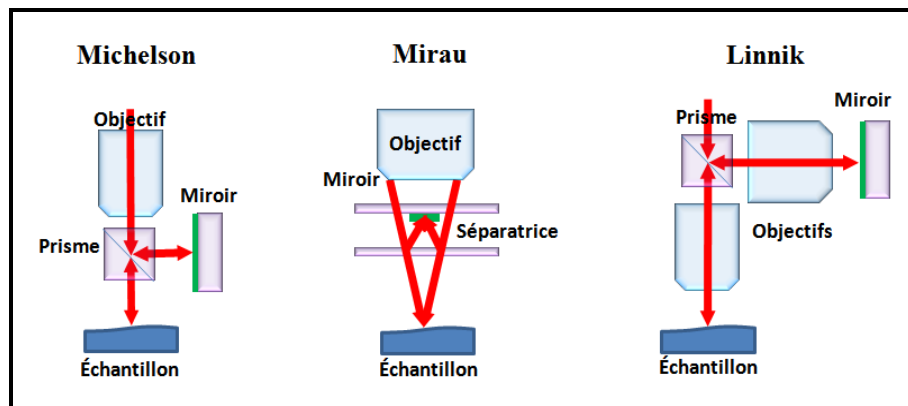


Figure I. 10 : Schémas simplifiés des principaux types d'objectifs interférométriques.

En statique, on observe des franges correspondant à des lignes de niveaux distants à peu près $\lambda/2$ où λ est la longueur d'onde moyenne de la source. Une analyse plus fine montre que l'espacement des franges se change avec l'ouverture numérique de la lentille.

Pour fonder une cartographie des modes de vibration de la poutre, on utilise une source stroboscopique monochrome et un système piézoélectrique de translation d'échantillons. La phase interférogaphique est déterminée par la technique du déphasage [51].

I.5. Modes d'actionnement et de détection

De nombreuses études scientifiques ont prouvé que ces structures mobiles peuvent être utilisées dans des environnements liquides et gazeux et permettre la détection et la quantification d'espèces dans un mélange. Dans les environnements gazeux, ces systèmes sont des capteurs de gaz ou d'humidité, mais dans les environnements liquides, ils sont principalement utilisés pour la détection de molécules biologiques spécifiques [52-53].

I.5.1. Mode d'actionnement

Les poutres sont animées par des vibrations naturelles qui incitent un mouvement oscillant de la structure géométrique, l'oscillation nécessite un microactionneur dont l'excitation des poutres peut être de natures différentes: piézoélectrique [54-55], électromagnétique [56], électrostatique [57] ou thermoélectrique [58].

Actionnement piézoélectrique : Le principe de l'actionnement piézoélectrique est basé sur l'effet « piézoélectrique inverse » Ainsi, lorsqu'un matériau piézoélectrique est soumis à un champ électrique sinusoïdal, le matériau commence à vibrer. L'actionnement piézoélectrique peut être intégré lorsque le matériau piézoélectrique fait partie intégrante de la microstructure [59] (**figure I. 11**).

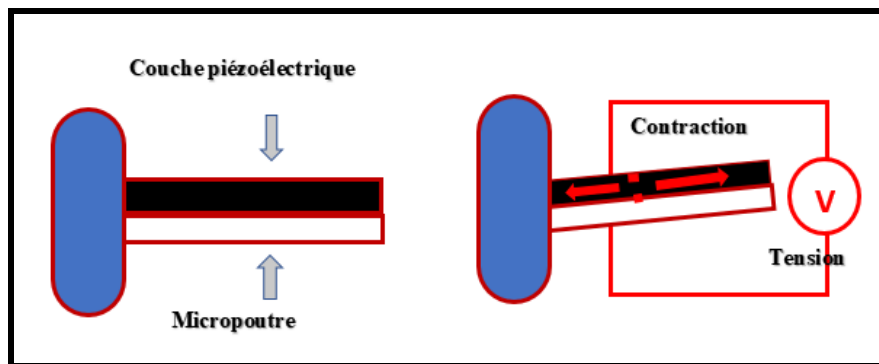


Figure I. 11 : Principe de l'actionnement piézoélectrique.

Actionnement électromagnétique : Cette technique d'actionnement est basée sur la génération d'un champ magnétique continu, créé par un aimant, agissant sur un conducteur traversé par un courant électrique alternatif. Cette interaction se traduit par la force Laplace permettant de la poutre d'osciller [57-59] (**figure I. 12**).

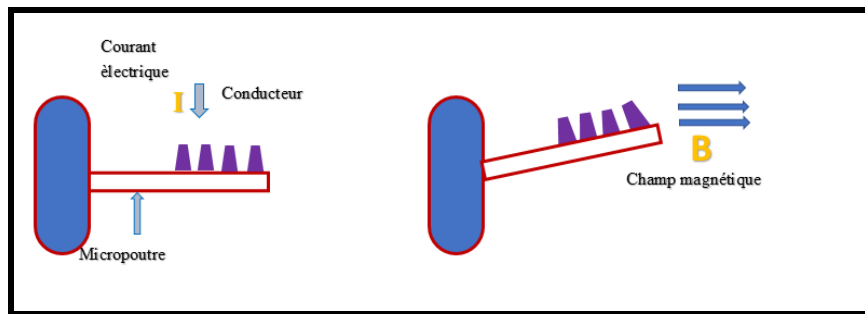


Figure I. 12: Principe de l'actionnement électromagnétique.

Actionnement électrostatique : Dans l'actionnement électrostatique, la poutre est excitée sous l'action d'une force électrostatique établie par un champ électrique appliqué entre deux électrodes : une des électrodes forme la partie mobile tandis que l'autre reste fixe (**figure I. 13**).

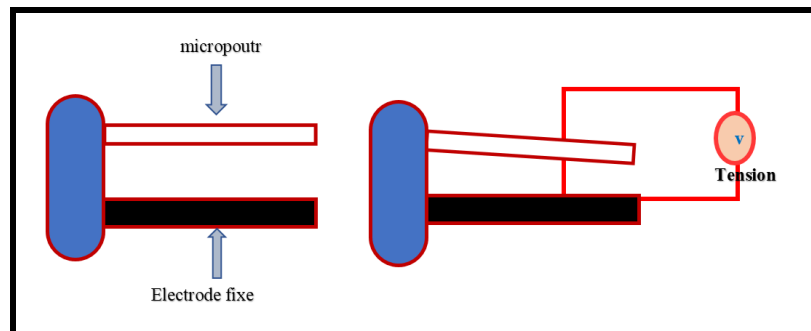


Figure I. 13 : Principe de l'actionnement électrostatique.

Actionnement thermoélectrique : Ce mode d'actionnement consiste à faire passer un courant électrique à travers une résistance placée à l'encastrement de la poutre [59]: le chauffage local de la structure et donc l'augmentation de la température produit la flexion de la micropoutre due à la différence des coefficients de dilatation thermique des deux matériaux.

I.5.2. Modes de détection

La technologie peut être utilisée pour obtenir une poutre intégrée à détection en combinant les procédés de fabrication de la technologie CMOS aux poutres vibrantes. La détection intégrées, la détection piézorésistive, la détection capacitive et la détection piézoélectrique.

Détection piézorésistive : Cette détection consiste à déposer des piezoresistances sur la surface de la structure afin de transcrire le mouvement de la poutre en une quantité électrique. Ce principe est d'autant utilisé qu'il est précis et facile. Dans le domaine de la microscopie de force, la mesure piézorésistive a été initiée par Tortonese [60]. Elle a été depuis adaptée avec succès au domaine des capteurs à structures mobiles notamment en intégrant cette piézorésistance dans un pont de Wheatstone [15-58].

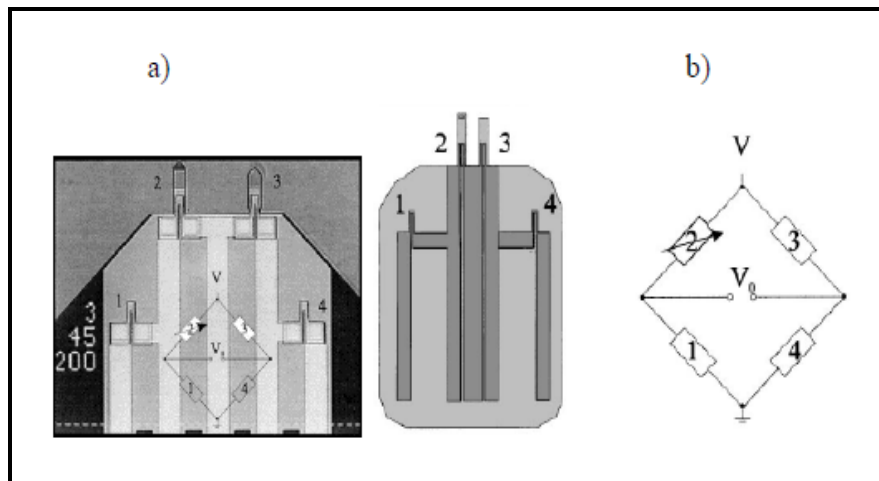


Figure I. 14: Dispositif intégré avec pont de Wheatstone

(a) : Image obtenue par MEB,

(b) : Schéma représentatif du pont [61].

La **figure I. 14** montre un exemple d'un pont de Wheatstone où deux piézorésistances sont placées à la surface des deux poutres dont l'une est utilisée pour la mesure et l'autre est servie comme une référence. Ce montage permet de réaliser une mesure différentielle atténuant les phénomènes de dérives.

Détection capacitive : Pour ce type de détection, le microdispositif consiste à mesurer la capacité entre la poutre constituant l'armature mobile d'un condensateur et une électrode fixe placée en face de la poutre. Toute vibration de la poutre change l'espace inter-électrodes du condensateur et donc tacitement la valeur de la capacité. La mesure de cette capacité entre les deux électrodes est alors directement liée à l'amplitude de la flexion [62-63].

Détection piézoélectrique : Ce mode de détection est rarement utilisé en mode statique en raison des courants de fuite importants mais reste bien adapté aux mesures en mode mécanique. Pour la détection piézoélectrique, le phénomène utilisé est l'effet piézoélectrique direct pour détecter les mouvements dans la plage nanométrique [59-64]. Une couche piézoélectrique (oxyde de zinc ZnO, Titano-Zirconate de Plomb PZT ou d'autres) est déposée en couche mince sur la surface de la structure. La déflexion de la microstructure mobile en flexion va provoquer une contrainte dans la couche piézoélectrique se traduisant par l'apparition des charges électriques.

I.6. Techniques de mesure de fréquence

De nombreuses Techniques de mesure de fréquence mécanique des structures ont été développées afin d'extraire les caractéristiques mécaniques des couches minces qui les composent. Les microdispositifs et microstructures mécaniques utilisés dans les systèmes électromécaniques (MEMS) ou les systèmes optoélectroniques (MOEMS) sont caractérisés par des dimensions dans la gamme (sub) micronique, des amplitudes de vibrations dans la gamme de la fraction de nanomètre à quelques micromètres et des fréquences de vibrations fondamentales élevées.

I.6.1. Principes de mesure

Deux principes fondamentaux de mesure peuvent être utilisés pour déterminer la valeur des fréquences de vibrations : le balayage de fréquence et la réalisation d'un oscillateur basé sur la micropoutre.

Le premier principe de mesure est de parcourir un domaine de fréquence sur lequel la poutre est excitée et de mesurer une quantité représentative du mouvement. La détermination de la valeur de fréquence de vibration est possible en calculant la valeur du rapport entre le signal d'image de mouvement et le signal d'excitation appliqué et la différence de phase entre ces deux signaux [49]. L'avantage remarquable de ce principe de mesure est la possibilité de mesurer le facteur de qualité de la poutre, la valeur des pertes.

Le deuxième principe de mesure à prélever le signal de sortie en provenance de la poutre et à l'amplifier en suite de façon à le réinjecter l'entrée de la poutre pour générer le mouvement [49]. On réalise alors une boucle électrique dans laquelle un amplificateur est placé avec une micropoutre utilisée comme un résonateur.

I.6.2. Techniques appliquées pour la mesure

Il existe de nombreuses méthodes pour faire vibrer une micropoutre afin de mesurer les fréquences de résonance. Comme premier exemple, la mesure par application de la force de Laplace appliquée à une micropoutre inondée dans un champ magnétique à la surface de laquelle une piste est déposée parcourue par un courant électrique [65-66].

Une autre méthode de mesure consiste à utiliser les contraintes mécaniques induites par un chauffage localisé et contrôlé électriquement pour provoquer une déformation de l'image de l'effet bilatéral. Nous citons entre autres la mesure par couche piézoélectrique, où un effet bilame est généré par la couche piézoélectrique déposée sur la surface de la poutre [67-68].

I.6.3. Choix de la technique de mesure

Les contraintes de surface peuvent facilement déformer la microstructure. Pour les poutres en matériaux rigides (moins flexibles), il est plus intéressant d'utiliser la mesure des fréquences de vibrations pour sonder un puits de milieu ou détecter un stimulus en ajoutant l'influence d'un facteur externe tel que la masse, la pression, la température, etc., sur la vibrations mécanique du poutre. Il est donc possible de mesurer la variation de masse de la structure en observant la variation de sa fréquence de vibrations [69].

Le choix du matériau de la couche sensible à déposer, ses dimensions ou la surface dans laquelle la couche est déposée reste en fonction du type d'excitation choisi et des conditions appliquées dans la mesure.

I.7. Caractérisation du comportement des microstructures

Pour perfectionner la qualité des systèmes réalisés, il est nécessaire de bien les caractériser, où la nécessité d'utiliser des méthodes de caractérisation. Les techniques de caractérisation les plus appropriées fonctionnent avec des systèmes d'acquisition et de traitement de haute qualité. Voici quelques techniques de caractérisation microscopique les plus couramment utilisées.

I.7.1. Microvibrométrie interférométrique optique

Les techniques de caractérisation microvibrométriques interférométriques (techniques sans contact) sont couramment utilisées pour déterminer le comportement mécanique des micropoutres vibrations intégrées dans les systèmes. D'autre part, les virtualités de la microvibrométrie ne sont pleinement exploitées dans ce cas que si une cartographie rapide des amplitudes vibratoires sur l'ensemble de la poutre (caractérisation de plein champ) est réalisée.

I.7.2. Interférométrie de Speckle Electronique

Les techniques holographiques ont prouvé depuis longtemps leurs capacités extraordinaires dans le domaine de la caractérisation des microstructures et elles sont capables d'assurer, avec une très grande précision, des mesures sans contact dans le domaine de la mécanique et des études de vibrations.

L'holographie interférométrique est l'une des premières techniques de mesure qui a été développée pour la caractérisation complète des vibrations. Il combine les performances de l'holographie avec la possibilité de mesures de déformation ou de vibrations en temps réel [49] (**figure I. 15**).

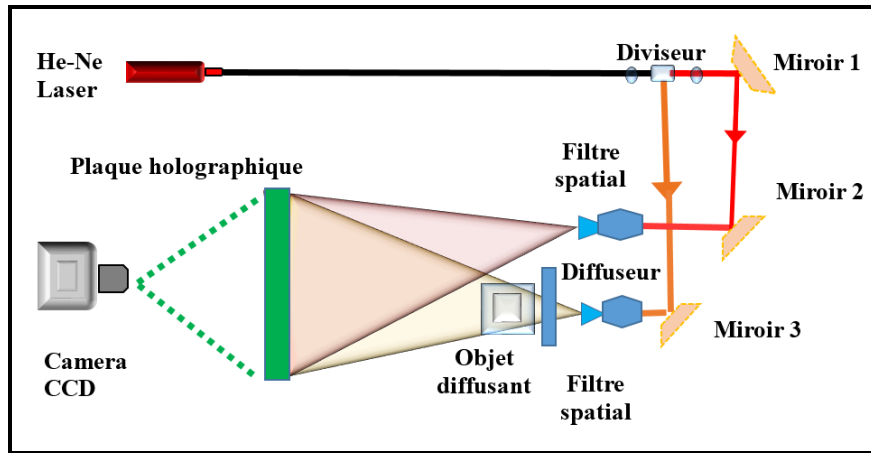


Figure I. 15 : Schéma expérimental de l'interférométrie holographie

Le support d'enregistrement est une plaque photographique à haute résolution (plusieurs milliers de lignes/mm) pour résoudre les franges d'interférence. Le résultat est alors visualisé en éclairant l'hologramme par le faisceau de référence dans les mêmes conditions (phase de reconstruction). Aumoment où l'amplitude est élevée, des franges secondaires sont observées correspondant aux zéros de la fonction Bessel dont le contraste diminue avec l'amplitude de vibration.

L'holographie interférométrique a fait l'objet de développements et d'améliorations considérables. La variante rapportée de cette technique est l'holographie numérique où l'enregistrement des hologrammes est effectué par le réglage par une caméra [49-70].

I.7.3. Microscopie à Force Atomique

Le principe de caractérisation dans cette technique consiste à mesurer la force d'interaction entre l'atome à l'extrémité de la pointe et les atomes sur la surface. En mesurant la déflexion du bras de levier, on obtient une mesure directe de la force pointe-substrat selon la loi de Hooke [71]. Avec sa résolution nanométrique axiale, le champ d'application du microscope à force atomique continue de s'agrandir. Il est beaucoup utilisé pour caractériser les structures étudiées en physique et biologie. Dans ce dernier cas, des objets biologiques relativement grands, de l'ordre du micromètre [72].

I.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons d'abord présenté un aperçu sur les micropoutres utilisées comme des éléments de base dans les microsystemes et nous avons présenté le principe de la mesure expérimentale des fréquences de vibration pour la caractérisation mécanique ces poutres. Nous avons également présenté le principe de base de la mesure de la fréquence de vibration, les méthodes utilisées pour la mesure et les critères du choix de la méthode de mesure. Nous avons ensuite cité les techniques les très utilisées pour la caractérisation des poutres en particulier la technique de microvibrométrie optique interférométrique bien adaptée à la caractérisation mécanique des structures vibrantes.

Références

- [1] Lin, R.M., Wang, W.J., " Structural dynamics of Microsystems: current state of research and future directions ", Mechanical Systems and Signal Processing, 20 (2006) 1015-1043.
- [2] Ke, L. L., Wang, Y. S., "Size effect on dynamic stability of functionally graded microbeams based on a modified couple stress theory", Composite Structures, 93 (2011) 342-350.
- [3] Suter, M., et al. "Superparamagnetic photocurable nanocomposite for the fabrication of microcantilevers." *Journal of Micromechanics and Microengineering* 21.2 (2011): 025023.
- [4] <http://www.physorg.com/news68736004.html>
- [5] Bhat, S., Bhattacharya, E., "Electrical measurement of undercut in surface micromachined structures ", IEEE Physics of Semiconductor Devices, IWPSD. International Workshop, (December 2007) 702-705).
- [6] Bourouina, H., Yahiaoui, R., Elmar Yusifli, A., Benamar, M. E. A., Sahar, A., " Analytical modeling of mechanical behavior of structures: comparative analysis, experimental: validation and numerical correction with FEM of material defects generated by anisotropic etching ", Matec Web of conference, 272 (2014) 758-760.
- [7] Wen, Q. J., "Long-term effect analysis of prestressed concrete box-girder bridge widening", Construction and Building Materials, 25 (2011) 1580-1586.
- [8] Kawashima, K., Zafra, R., Sasaki, T., Kajiwara, K., & Nakayama, M., " Effect of polypropylene fiber reinforced cement composite and steel fiber reinforced concrete for enhancing the seismic performance of bridge columns ", Journal of Earthquake Engineering, 15 (2011) 1194-1211.
- [9] Boutry M., " Etude de micro-dispositifs de test pour la caractérisation de propriétés mécaniques de films minces métalliques ", Thèse de Doctorat, IEF, Université Paris XI, (Avril 1997).

- [10] Fang, W., J Wickert, A., "Post buckling of micromachined beams ", J. Micromech. Microeng. 4 (1994)116–122.
- [11] Zhu, Y., Xu, F., Qin, Q., Fung, W. Y., & Lu, W., "Mechanical Properties of Vapor Liquids Solid Synthesized Silicon Nanowires ", Nano letters, 9 (2009) 3934-3939.
- [12] Fantner, G. E., Barbero, R. J., Gray, D. S., & Belcher, A. M., " Kinetics of antimicrobial peptide activity measured on individual bacterial cells using high-speed atomic force microscopy ", Nature nanotechnology, 5 (2010) 280-285.
- [13] Ganji, B. A., & Majlis, B. Y., "Design and fabrication of a new MEMS capacitive microphone using a perforated aluminum diaphragm", Sensors and Actuators A: Physical, 149 (2009) 29-37.
- [14] Peng, P., Sezen, A. S., Rajamani, R., & Erdman, A. G., "Novel MEMS stiffness sensor for force and elasticity measurements ", Sensors and Actuators A, 158 (2010) 10-17.
- [15] Jensenius, H., Thaysen, J., Rasmussen, A.A., Veje, L.H., Hansen, O., Boisen, A., "A microcantilever-based alcohol vapor sensor-application and response model ", Applied Physics Letters, 76 (2000) 2615-2617.
- [16] Gibbs, M. R. J., Hill, E. W., & Wright, P. J., "Magnetic materials for MEMS applications", Journal of Physics D, 37 (2004) R237.
- [17] Takahashi, H., Dung, N. M., Matsumoto, K., & Shimoyama, I., " Differential pressure sensor using a piezoresistive cantilever ", Journal of Micromechanics and Microengineering, 22 (2012) 055015.
- [18] Urbiztondo, M. A., Peralta, A., Pellejero, I., Sesé, J., Pina, M. P., Dufour, I., & Santamara, J., " Detection of organic vapours with Si cantilevers coated with inorganic (zeolites) or organic (polymer) layers ", Sensors and Actuators B, 171 (2012) 822-831.
- [19] Lee, H. J., Park, K. K., Kupnik, M., Melosh, N. A., & Khuri-Yakub, B. T., "Mesoporous thin-film on highly-sensitive resonant chemical sensor for relative humidity and CO₂ detection ", Analytical chemistry, 84 (2012) 3063-3066.

- [20] Li, Y., Feng, Y., Peng, X., & Zhang, H., " Simultaneous measurement of the temperature and force using a steel cantilever soldered with a partially nickel coated in-fibre Bragg grating ", *Optics Communications*, 285 (2012) 4275-4279.
- [21] Effa, D., Abdel-Rahman, E., & Yavuz, M., "Cantilever beam microgyroscope based on Frequency modulation ", *International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, IEEE/ASME*, (July 2013) 844-849.
- [22] Mojahedi, M., Ahmadian, M. T., & Firoozbakhsh, K., "The influence of the intermolecular surface forces on the static deflection and pull-in instability of the micro/nano cantilever gyroscopes ", *Composites Part B*, 56 (2014) 336-343.
- [23] Persano, A., Tazzoli, A., Cola, A., Siciliano, P., Meneghesso, G., & Quaranta, F., "Reliability enhancement by suitable actuation waveforms for capacitive RF MEMS switches in III-V technology ", *Journal of Microelectromechanical Systems*, 21 (2012) 414-419.
- [24] Shim, Y., Wu, Z., & Rais-Zadeh, M., "A high-performance continuously tunable MEMS bandpass filter at 1 GHz ", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 60 (2012) 2439-2447.
- [25] Zhang, S., Lou, L., & Lee, C., "Piezoresistive silicon nanowire based nanoelectromechanical system cantilever air flow sensor", *Applied Physics Letters*, 100 (2012) 023111.
- [26] Rijal, K., & Mutharasan, R., " A method for DNA-based detection of E. coli O157: H7 in a proteinous background using piezoelectric-excited cantilever sensors ", *Analyst*, 138 (2013) 2943-2950.
- [27] Chang, S. C. S., "MEMS in Automobiles", *Microsystems and Nanotechnology*, Springer Berlin Heidelberg, (2012) 721-757.
- [28] Tai, Y. C., "Introduction to MEMS ", *Microsystems and Nanotechnology*, Springer Berlin Heidelberg, (2012) 187-206.
- [29] Pandya, H. J., Chandra, S., & Vyas, A. L., "Integration of ZnO nanostructures with MEMS for ethanol sensor ", *Sensors and Actuators B*, 161 (2012) 923-928.

- [30] Bassu, M., Surdo, S., Strambini, L. M., & Barillaro, G., "Electrochemical micromachining as an enabling technology for advanced silicon microstructuring ", *Advanced Functional Materials*, 22 (2012) 1222-1228.
- [31] Shahosseini, I., Lefeuvre, E., Moulin, J., Martincic, E., Woytasik, M., Bélier, B., & Lemarquand, G., "Silicon-based MEMS microspeaker with large stroke electromagnetic actuation ", *Symposium on Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS*, (April 2012) 8-12).
- [32] Long, Z., Hill, K., & Sepaniak, M. J., "Aluminum oxide nanostructured microcantilever arrays for nanomechanical-based sensing ", *Analytical chemistry*, 82 (2010) 4114-4121.
- [33] Bergers, L. I. J. C., Hoefnagels, J. P. M., & Geers, M. G. D., " Creep measurements in free-standing thin metal film micro-cantilever bending ", *MEMS and Nanotechnology*, Springer New York, 4 (2011) 167-171.
- [34] Suter, M., Ergeneman, O., Zürcher, J., Schmid, S., Camenzind, A., Nelson, B. J., & Hierold, C., "Superparamagnetic photocurable nanocomposite for the fabrication of microcantilevers", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 21 (2011) 025023.
- [35] Seena, V., Nigam, A., Pant, P., Mukherji, S., & Rao, V. R., " Organic CantiFET: A Nanomechanical Polymer Cantilever Sensor With Integrated OFET", *Journal of Microelectromechanical Systems*, 21 (2012) 294-301.
- [36] Okada, H., Nogami, H., Kobayashi, T., Masuda, T., & Itoh, T., "Development of ultra-low power wireless sensor node with piezoelectric accelerometer for health monitoring ", *17th IEEE International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems* (June 2013) 26-29.
- [37] Lakhmi, R., Lucat, C., Dufour, I., & Debéda, H., " Unusual behavior of uncoated thick-film PZT cantilevers towards fluid phases sensing ", *Application to water and ethanol detection. 17th IEEE International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems* (June 2013) 1142-1145.

- [38] Tortschanoff, A., Baumgart, M., Holzmann, D., Lenzhofer, M., Sandner, T., & Kenda, A., " Compact optical position feedback scheme for MOEMS mirrors ", *Microsystem Technologies*, 5 (2013) 1-7.
- [39] Hegde, G. M., Singh, V. R., & Asundi, A., "Digital Holographic Microscopy for MEMS/MOEMS Device Inspection and Complete Characterization ", *Journal of the Indian Institute of Science*, 93 (2013) 85-104.
- [40] Das, S., Mathur, S. R., & Murthy, J. Y., "Finite-volume method for structural analysis of RF MEMS devices using the theory of plates ", *Numerical Heat Transfer B*, 61 (2012) 1-21.
- [41] Mansour, R. R., " RF MEMS-CMOS device integration: An overview of the potential for RF researchers ", *IEEE Microwave Magazine*, 14 (2013) 39-56.
- [42] Murnbeck L. J., " 128x128 deformable mirror devise ", *IEEE Trans. ED*, 30 (1983) 539-545.
- [43] Kaiser, A., "The Potential of MEMS Components in RF Transceivers for Mobile Communications ", *Proc. Micromechanics Europe MME'01*, Cork Ireland, 1-6.
- [44] Sharma, S., & Madou, M., "Micro and nano patterning of carbon electrodes for bioMEMS ", *Bioinspired Biomimetic Nanobiomaterials*, 1 (2012) 252-65.
- [45] Nuxoll, E., "BioMEMS in drug delivery", *Advanced drug delivery reviews*, 65 (2013) 1611-1625.
- [46] Benabdallah, N. B., " Propriétés physiques des semi-conducteurs (Si monocristallin et Ge) et Simulation des cellules solaires à base de Si et SiGe ", *These de Magister*, Université Abou Bekr Belkaid-Tlemcen, (2006).
- [47] Lévy, F., " Traité des matériaux, Physique et technologie des semi-conducteurs ", Vol.18, p.271, Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, (1995).
- [48] <https://lejournel.cnrs.fr/articles/les-nouveaux-materiaux-inspires-du-graphene>
Consulté le 12/07/2020.

- [49] Yahiaoui, R., "Etude par microvibrométrie de films minces et de dispositifs micromécaniques", Thèse, IEF, Université Paris Sud, Mars 2002.
- [50] Bosseboeuf A., Gilles, J.P., Danaie, K., Yahiaoui, R., Dupeux, M., Puissant, J-P., A. Chabrier, Fort, F., Coste, P., " A versatile microscopic profilometer-vibrometer for static and dynamic characterization of micromechanical devices ", Microsystems: metrology and Inspection, SPIE Proc., (1999) 123-133.
- [51] Petitgrand, S., Yahiaoui, R., Danaie, K., Bosseboeuf, A., Gilles, J.P., "3D measurement of micromechanical devices vibration mode shapes by stroboscopic microscopic interferometry ", Optics and Lasers in Engineering, 36 (2001) 77-101.
- [52] Grogan, C., Raiteri, R., Oconnor, G.M., Glynn T.J., Cunningham, V., Kane, M., M. Charlton, and Leech, D., "Characterisation of an antibody coated microcantilever as a potential immuno-based biosensor ", Biosensors and Bioelectronics, 17 (2002) 201-207.
- [53] Alvarez, M., Calle, A., Tamayo, J., Lechuga, L.M., Abad, A., Montoya, A., "Development of nanomechanical biosensors for detection of the pesticide DDT ", Biosensors and Bioelectronics, 18 (2003) 649-653.
- [54] Koch, M., Harris, N., Evans, A.G.R., White, N.M., Brunnschweiler, A., "A novel micromachined pump based on thick-film piezoelectric actuation ", Sensors and Actuators A, 70 (1998) 98-106.
- [55] Zhou, J., Li, P., Zhang, S., Huang, Y., Yang, P., Bao, M., Ruan, G., "Self-excited piezoelectric microcantilever for gas detection ", Microelectronic Engineering, 69 (2003) 37-46.
- [56] Vancura, C., Rüegg, M., Li, Y., Lange, D., Hagleitner, C., Brand, O., Hierlemann, A., Baltes, H., " Magnetically actuated CMOS resonant cantilever gas sensor for volatile organic compounds ", 12th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, USA, (2003) 1355-1358.

- [57] Kim, B.H., Kern, D.P., Raible, S., Weimar, U., "Fabrication of micromechanical mass-sensitive resonators with increased mass resolution using SOI substrate ", *Microelectronic Engineering*, 61 (2002) 947-953.
- [58] Hagleitner, C., Hierlemann, A., Lange, D., Kummer, A., Kerness, N., Brand, O., Baltes, H., "Smart single-chip gas sensor microsystem ", *Nature*, 414 (2001) 293-296.
- [59] Yi, J.W., Shih, W.Y., "Effect of length, width, and mode on the mass detection sensitivity of piezoelectric unimorph cantilevers ", *Journal of Applied Physics*, 91 (2002) 1680-1686.
- [60] Tortonese M., Yamada, H., Barrett, R.C., Quate, C.F., " Atomic force microscopy using a piezoresistive cantilever ", *IEEE International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, USA*, (1991) 448-451.
- [61] Thaysen, J., Boisen, A., Hansen, O., Bouwstra, S., "Atomic force microscopy probe with piezoresistive read-out and a highly symmetrical Wheatstone bridge arrangement ", *Sensors and Actuators A*, 83 (2000) 47-53.
- [62] Davis, Z.J, Abadal, G., Kuhn, O., Hansen, O., Grey, F., Boisen, A., "Fabrication and characterization of nanoresonating devices for mass detection", *Journal of vacuum science and technology, B*, 18 (2000) 612-616.
- [63] Chatzandroulis, S., Tserepi, A., Goustouridis, D., Normand, P., Tsoukalas, D., "Fabrication of single crystal Si cantilevers using a dry release process and application in a capacitive-type humidity sensor ", *Microelectronic Engineering*, 61 (2002) 955-96.
- [64] Rogers, B., Manning, L., Jones, M., Sulchek, T., Murray, K., Beneschott, B., Adams, J. D., Hu, Z., Thundat, T., Cavazos, H., Minne, S.C., Mercury vapor detection with a self-sensing, resonating piezoelectric cantilever ", *Review of Scientific Instruments*, 74 (2003) 4899-4901.

- [65] Golebiowski, J., "Microelectromechanical transducer with optical readout for magnetic flux density measurements", *Przegled Elektrotechniczny*, 88 (2012) 22-25.
- [66] Stifter, M., Steiner, H., Kainz, A., Keplinger, F., Hortschitz, W., & Sauter, T., "A Lorentz force actuated magnetic field sensor with capacitive read-out ", *SPIE Microtechnologies Conf.*, (May 2013) 87632E-87632E.
- [67] Pozzi, M., "Analytical Modelling of a Plucked Piezoelectric Bimorph for Energy Harvesting ", *arXiv preprint arXiv*, (2012) 1204.0070.
- [68] Yuan, Y., Du, H., Wang, P., Chow, K. S., Zhang, M., Yu, S., & Liu, B., " A ZnO microcantilever for high-frequency nanopositioning: Modeling, fabrication and characterization ", *Sensors and Actuators A*, 194 (2013) 75-83.
- [69] Datar, R., Kim S., Jeon S., Hesketh P., Manalis S., Boisen A., Thundat T., " Cantilever Sensors: Nanomechanical Tools for Diagnostics ", *MRS Bulletin*, 34 (2009) 449-454.
- [70] Anh, T. T., " Corrélation entre les charges d'espace accumulées et les déformations mécaniques induites dans des isolants organiques solides soumis à un champ électrique ", *Thèse de Doctorat, Université De Toulouse*, (Novembre 2011).
- [71] Benatmane, A., "Développement de la microscopie interférométrique pour une meilleure analyse morphologique des couches minces et épaisses des matériaux semiconducteurs et optiques ", *Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur de Strasbourg I*, (Décembre 2002).
- [72] Nezhad, F. M., Saidi, A. R., Rad, S. Z., " Influence of the tip mass and position on the AFM cantilever dynamics: Coupling between bending, torsion and flexural modes ", *Ultramicroscopy*, 109 (2009) 1193-1202.

CHAPITRE II :
MODELISATION DE COMPORTEMENT DYNAMIQUE DES
MICROPOUTRES INTÉGRÉES

II.1. Introduction

Les poutres sont considérées des éléments basiques dans le domaine des microsystèmes et très utilisées à cause de leur simplicité géométrique dans l'étape de modélisation et leur facilité d'obtention à l'étape d'élaboration. Cette dernière suit précisément les mêmes procédés technologiques utilisés en microtechnologie électronique. Des parties du silicium sont retirées sélectivement et/ou des couches supplémentaires [1] sont retirées pour réaliser des composants physiques électromécaniques à l'échelle micrométrique [2-3]. Les vibrations mécaniques d'un microdispositif mécanique sont caractérisées par sa rigidité, sa masse et son mode de vibration. La rigidité du microdispositif dépend de sa géométrie, des propriétés élastiques de son matériau.

L'étape de modélisation des poutres est basée sur l'identification et la compréhension des phénomènes physiques pour l'extraction des paramètres géométriques et mécaniques des structures de base, à savoir le module de Young, le coefficient de Poisson et les contraintes mécaniques [4-5]. La modélisation analytique du comportement d'une poutre est effectuée par un système d'équations aux dérivées partielles.

De nombreuses méthodes de mesure des modes et des fréquences de vibrations ont été développées pour extraire les propriétés mécaniques de la couche mince de la micropoutre, l'objectif imposé est donc de modéliser les poutres en tenant compte de la géométrie réelle qui présente une section droite non rectangulaire et une sous-gravure à l'encastrement. L'approche numérique se montre alors un choix judicieux où la méthode des éléments finis (MEF), couramment utilisée pour la modélisation de la dynamique structurelle, sera favorisée.

Dans ce chapitre nous présenterons le modèle classique d'Euler-Bernoulli d'une poutre et nous allons faire une modélisation de comportement vibratoire des poutres parfaits. Pour ce faire, nous analyserons dans un premier temps le comportement vibratoire des poutres et la modélisation de largeur de la structure et ensuite, la modélisation des défauts technologiques engendrés par le procédé de la gravure, au fur et à mesure l'étude de la sous-gravure à l'encastrement ainsi que la section non rectangulaire de la poutre.

II.2. Méthodes de modélisation de comportement dynamique

II.2.1. La modélisation : principe et intérêt

L'étape de modélisation a pour objectif d'obtenir un modèle acceptable du problème physique étudié sous la forme d'un système d'équations décrivant le comportement mécanique de la structure. Dans la plupart des cas, proposé n'est pas obtenu en une seule étape mais après plusieurs étapes alternatives et nécessaires, la première étape donne une vision fondamentale et permet d'avancer dans la compréhension du problème physique le modèle.

Dans la pratique, il suffit souvent de connaître les premières fréquences appropriées de vibration de la poutre. La connaissance de la forme exacte des modes de vibration associés est nécessaire pour identifier les fréquences mesurées afin de déterminer les propriétés mécaniques des couches.

II.2.2. Principaux méthodes de modélisation

Dans la littérature, deux méthodes principales sont utilisées pour modéliser les vibrations mécaniques des structures :

- La Méthode de modélisation analytique ;
- La Méthode de modélisation numérique.

II.2.2.1. Méthode de modélisation analytique

Cette méthode permet de déterminer les fréquences de vibration et les modes de vibration d'une structure en résolvant l'équation partielle différentielle du mouvement qui répond aux conditions limites. Les solutions analytiques sont principalement basées sur:

- La méthode de séparation de variables [6-7-8] ;
- La méthode des séries exponentielles, la méthode d'intégral [9-10] ;
- Les méthodes de transformation demeurent limitées pour les géométries complexes [11-12].

Par conséquent, pour une analyse fine, le modèle analytique à par de simulations d'éléments finis. Étant donné que la complexité des équations aux dérivées partielles, la

solution analytique est souvent difficile à trouver. Alors, l'objectif est de trouver des méthodes propices permettant de déterminer le comportement du microsystème.

II.2.2.2. Méthode de modélisation numérique

L'utilisation de méthode de discrétisation numérique consiste à réduire la résolution de l'équation en dérivés partiels après avoir rétabli un système d'équations algébriques dont la solution conduit à la distribution dans le domaine d'étude, ceci, en tenant compte les conditions limites. C'est une procédure qui permet de trouver à la fois des approximations pour les propres fréquences de vibration et pour les modes de vibration associés, en divisant la poutre étudiée en un nombre fini de sous-domaines dont le comportement mécanique est connu à partir d'un nombre fini de paramètres [13]. La solution complète du microsystème mécanique consiste à l'assemblage de ses éléments et suit exactement les mêmes règles que celles appliquées aux problèmes discrets standards.

Les méthodes numériques les plus utilisées dans le domaine de l'étude mécanique des micropoutres sont:

- La méthode des différences finis [14-15] ;
- la méthode des éléments finis [16-17] ;
- la méthode des volumes finis [18-19].

Nous nous intéresserons dans ce qui suit à la méthode des éléments finis, en s'appuyant sur les logiciels *COMSOL Multiphysics*.

II.3. Comportement dynamique des micropoutres

II.3.1. Hypothèses et approximations de base

Grâce au modèle classique d'Euler-Bernoulli EBM (Euler-Bernoulli Beam Model), nous allons examiner le cas de poutre parfaite [20-21], en prenant en compte ces paramètres:

- L'épaisseur h et la largeur b de la poutre sont considérées constantes sur toute sa longueur L (figure II. 1);

- La poutre est élastique et composée d'un matériau LHI (linéaire, homogène et isotrope ;
- La section droite de la poutre est très petite devant la distance entre deux nœuds de vibration ;
- La poutre est mince : la section droite **A** de la poutre est très petite devant sa longueur **L** ;
- Seules les déformations normales à l'axe de la poutre non déformée sont considérées, les sections planes restent planes ;
- Le centre du cisaillement de la section de la poutre coïncide avec le centre des masses, de telle façon que la rotation et la translation de la poutre ne sont pas couplées.
- Aucune charge axiale n'est appliquée à la poutre.

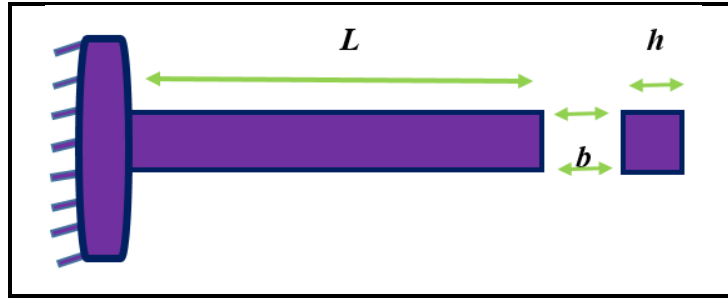


Figure II. 1 : Schéma d'une micropoutre idéale encastree à l'une de ses extremités d'une longueur **L**, d'une largeur **b** et d'une épaisseur **h**.

II.3.2. Équation dynamique du mouvement

Dans la théorie classique d'Euler-Bernoulli, l'équation du mouvement est obtenue en utilisant le principe de Hamilton. L'énergie **PE** potentielle d'une poutre uniforme est donnée par l'expression suivante :

$$PE = \frac{1}{2} \int_0^L YI \left(\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} \right)^2 dx \quad (\text{II.1})$$

I : est le moment d'inertie de la section droite autour de l'axe neutre de la poutre.

Y : le module de Young.

CHAPITRE II: MODELISATION DE COMPORTEMENT DYNAMIQUE DES MICROPOUTRES INTÉGRÉES

$U(x, t)$: la déflexion dynamique transversale à la position x, t .

L : sont respectivement le temps, la longueur de la poutre.

L'expression de l'énergie cinétique **KE** d'une poutre uniforme est donnée par la relation suivante:

$$KE = \frac{1}{2} \int_0^L \rho A \left(\frac{\partial u(x, t)}{\partial t} \right)^2 dx \quad (\text{II.2})$$

Où A : la section transversale

ρ : La densité du matériau.

En utilisant le principe du lagrangien défini par **KE-PE** :

$$KE - PE = \frac{1}{2} \int_0^L \left[\rho A \left(\frac{\partial u(x, t)}{\partial t} \right)^2 - YI \left(\frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial x^2} \right)^2 \right] dx \quad (\text{II.3})$$

En utilisant *le principe de Hamilton* étendu, l'équation différentielle décrivant régissant les vibrations libres transversales de la poutre est donnée par l'équation suivante:

$$\rho A \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial t^2} + YI \frac{\partial^4 u(x, t)}{\partial x^4} = 0 \quad (\text{II.4})$$

Afin d'accomplir l'équation **(II.4)**, quatre combinaisons de l'état d'extrémité seront possibles dont les deux conditions suivantes qui correspondent respectivement aux cas d'extrémité fixe et libre.

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 0, \quad u = 0 \quad (\text{II.5}) \text{ pour une extrémité fixe.}$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0, \quad \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} = 0 \quad (\text{II.6}) \text{ pour une extrémité libre.}$$

II.3.3. Modes et fréquences de vibration

La résolution analytique de l'équation (II.4) avec les conditions aux limites correspondant à un encastrement parfait (la déflexion et la dérivée de la déflexion sont nulles en $x=0$) conduit à l'expression suivante pour la fréquence de vibration d'ordre n :

$$f_n^e = \frac{a_n^{e^2}}{2\pi\sqrt{12}} \frac{h}{L^2} \sqrt{\frac{Y}{\rho}} \quad (\text{II.7})$$

Le module d'Young Y est pris égal au module d'Young uniaxial $Y=E$ [22] alors que le second module d'Young biaxial est : $Y= E/(1-\nu^2)$ [23].

Le paramètre a_n^e , dépend du nombre de mode de vibration et forme une série infinie, on l'en déduit d'une solution de cette l'équation séculaire :

$$\cos a_n^e \cosh a_n^e + 1 = 0 \quad (\text{II.8})$$

	Nombre de mode n		
	Mode 1	Mode 2	Mode 3
a_n^e	1.87510407	4.69409113	7.85475744
$a_n^{e^2}/2\pi$	0.55959123	3.50689864	9.81941605
$a_n^{e^2}/(2\pi\sqrt{12})$	0.16154006	1.01235437	2.83462143

Tableau II.1 : Constantes utiles pour le calcul des fréquences de vibration et des modes de vibrations des poutres non contraintes.

La formule (II.7) montre que dans le cas d'une poutre idéale avec des paramètres géométriques et mécaniques connus, la mesure des fréquences de vibration permet de calculer le module Young du matériau qui le constitue. Dans la pratique, les fréquences de vibration fondamentales f_0 de poutre de différentes longueurs sont généralement

mesurées, et le module Young Y est déterminé à partir de la pente de la ligne $1/f_1$ en fonction de L . Une méthode successive, a priori plus précise car moins dépendante des variations technologiques, consiste à mesurer plusieurs fréquences de vibration de la même poutre [24].

II.4. Modélisation de largeur de la micropoutre

II.4.1. Modèle de l'effet de largeur

Nous remarquons que les formules classiques de fréquences de vibration développées à partir du modèle EBM indiquent que la valeur de fréquence de vibration est indépendante de la largeur b de la poutre et du coefficient de Poisson ν . En effet, Le module Young Y pris en considération varie entre le module uniaxial Young E et le module biaxial $E/(1-\nu^2)$ selon le rapport b/L de la section. Ceci se traduit à l'aide d'un microdispositif de type poutre à un microdispositif de type plaque dans le sens mécanique. Cette variation du module Young Y est seulement considérée comme binaire dans la littérature.

D'obtenir des mesures précises des fréquences de vibration et d'améliorer l'extraction des paramètres mécaniques des matériaux, nous avons considéré que le module d'Young pouvait s'écrire sous la forme suivante:

$$Y = E \left[1 + \alpha_n \left(\frac{\nu^2}{1 - \nu^2} \right) \right] \quad (\text{II.9})$$

Où α_n est un facteur correctif ($0 \leq \alpha_n \leq 1$) dépendant de l'ordre n du mode de vibration, et qui est dépendu du rapport largeur/longueur de la poutre.

$$Y=E \quad \text{si} \quad \alpha_n=0 \quad \text{et} \quad Y= E/(1-\nu^2) \quad \text{si} \quad \alpha_n=1$$

Le module Young Y est déterminé à partir des fréquences de vibration dérivées de la simulation des vibrations mécanique à l'aide de la formule de fréquence de vibration classique développée à partir du modèle EBM. Le facteur de correction α_n est déduit de

la valeur du module Young Y et des valeurs du module Young E et du coefficient de Poisson ν introduites dans les simulations à partir de la relation suivante **(II.9)**:

$$\alpha_n = \frac{Y - E}{\frac{E}{1 - \nu^2} - E} \quad \text{(II. 10)}$$

Le choix du pas de maille dépend essentiellement de la géométrie et des dimensions de la poutre et il doit être proche d'un arrangement Les dimensions des poutres et résulter d'un compromis entre la précision et le temps de calcul.

II.4.2. Correction de modèle analytique

La formule classique des fréquences de vibration d'une poutre pour chaque mode de vibration peut être utilisée à condition de considérer le module Young qui dépend de la largeur de la poutre et du mode de vibration. La formule précise peut être utilisée ensuite pour calculer des fréquences de vibration plus précises.

$$f_n^e = \frac{a_n^{e^2}}{2\pi\sqrt{12}} \frac{h}{L^2} \sqrt{\frac{E}{\rho} \left[1 + \alpha_n \left(\frac{\nu^2}{1 - \nu^2} \right) \right]} \quad \text{(II.11)}$$

II.5. Étude de la sous-gravure à l'encastrement

II.5.1. Forme de La sous-gravure de la micropoutre

Il existe plusieurs différences entre Les poutres réelles et les poutres idéales et ceci s'apparait clairement au niveau de sous gravure au à proximité de l'encastrement comme s'illustre sur la figure au-dessous.

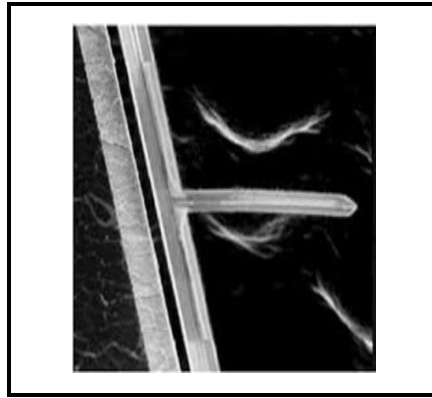


Figure II. 2: Image de microscopie électronique d'une poutre en couche d'Aluminium [25].

Une sous-gravure à la zone d'encastrement de la poutre est inhérente à pratiquement tous les méthodes de fabrication, et son effet sur la valeur de fréquence de vibration peut être modélisé par considération d'une liaison élastique avec le substrat ou par détermination de la longueur équivalente de la poutre sans sous-gravure, qui produit les mêmes fréquences de vibration. Cette dernière solution a été adoptée.

II.5.2. Modèle de l'effet de la sous-gravure

Dans selon la conception du masque et du processus de fabrication des poutres. Deux configurations principales d'encastrement de la zone sous gravée peuvent être rencontrées :

- ✓ Encastrement simple, seule l'extrémité de la zone gravée est encastree : la poutre a la forme d'un **T** ;
- ✓ Encastrement complet, les côtés de la sous gravure sont également encastres.

L'effet de la sous gravure est modélisé en recherchant la poutre sans sous-gravure de longueur L' qui produit la même fréquence de vibration qu'une poutre de longueur L avec une sous gravure de longueur L_{sg} et de largeur b_{sg} .

La poutre équivalente (**Figure II. 3. a**) est déterminée en prenant comme le module d'Young afin de séparer, en première estimation, l'effet du rapport b/L et de la sous gravure.

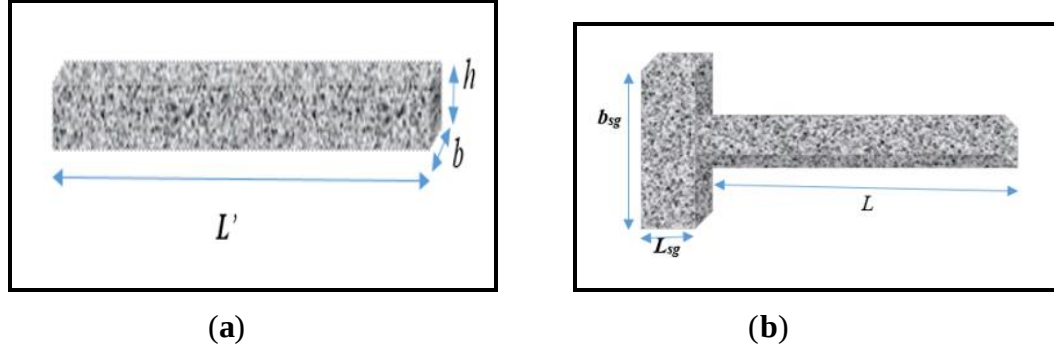


Figure II. 3: Configurations de la géométrie de la poutre :

(a) poutre équivalente sans sous-gravure

(b) poutre avec sous-gravure à d'encastrement.

II.5.3. Correction de modèle de la micropoutre

La formule des fréquences de vibration d'une poutre corrigée à un facteur correctif numérique (γ) estimé à partir des simulations par la méthode des éléments finis. Ce facteur permet de corriger l'effet de la sous-gravure à la zone d'encastrement qui est inhérente à pratiquement tous les procédés de fabrication utilisés pour l'élaboration des poutres. Le facteur correctif est calculé à partir de la relation suivante :

$$\gamma = \frac{\Delta L}{L} = \frac{L' - L}{L} \quad \text{Soit} \quad L' = L(1 + \gamma) \quad (\text{II. 12})$$

II.6. Étude de la section droite de la micropoutre

II.6.1. Forme non-rectangulaire de la section droite

Les poutres réalisées n'ont pas une section droite parfaitement rectangulaire. Lorsque la géométrie est définie par une gravure chimique ou par un plasma anisotrope.

- La section droite est généralement trapézoïdale avec des flancs inclinés symétriques (**Figure II. 4**).
- Lorsque la géométrie est définie par une gravure isotrope (ou quasi isotrope), les flancs de la section droite sont des arcs de cercles (**Figure II. 5**),
- Des arcs de parabole ou de la forme $h(x/d)^n$ (**Figure II. 6**).

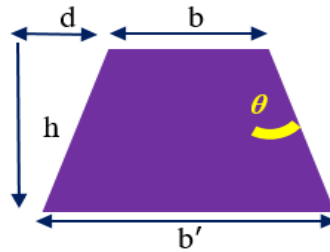


Figure II. 4: Profil de la section droite d'une poutre obtenue par gravure anisotrope : la section est trapézoïdale avec des flancs inclinés symétriques.

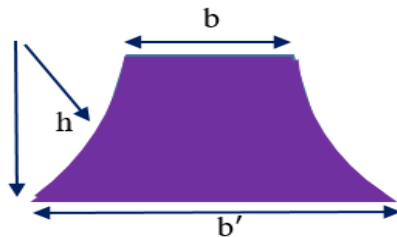


Figure II. 5: Profil de la section d'une poutre obtenue par gravure isotrope : les flancs de la section droite sont des arcs de cercles.

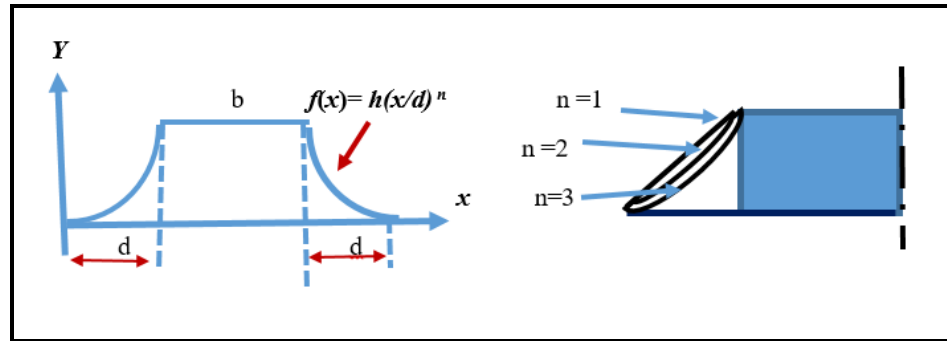


Figure II. 6: Section avec des flancs de forme polynomiale.

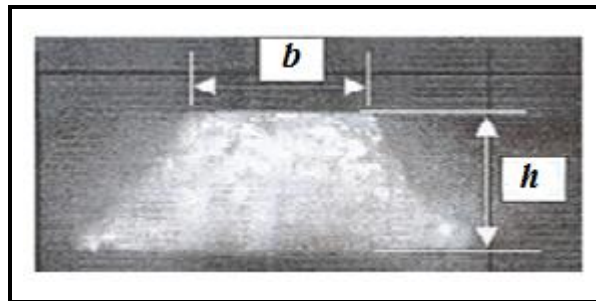


Figure II. 7: Image MEB de la section droite non rectangulaire d'une poutre en Aluminium [24].

Lorsque les poutres n'ont pas une section parfaitement rectangulaire, le moment d'inertie I de la section droite et l'aire A de la section sont augmentées et par conséquent, les valeurs des fréquences de vibration, ce qui sont proportionnelles à $(I/A)^{1/2}$ sont modifiées par rapport au cas d'une section droite parfaitement rectangulaire de largeur b .

II.6.2. Modèle de l'effet de la section droite

En réalité, Les poutres réelles n'ont pas toujours une section rectangulaire. Cet effet peut être pris en compte en calculant le moment d'inertie de la section droite réelle de la poutre. Et l'écart produit peut être quantifié en introduisant un facteur correctif β défini de la manière suivante :

$$\beta = (I/A)/(I/A)_{rect} - 1 \quad \text{Soit} \quad (I/A) = (I/A)_{rect} (1 + \beta) \quad (\text{II.13})$$

Le facteur correctif β peut être calculé analytiquement à partir des expressions de I et de A dans chaque cas. Les deux expressions ont été calculées par Chi Shiang Pan et al pour le cas des flancs de forme polynomiale [26]. Ces auteurs aboutissent aux expressions suivantes pour l'aire de la section droite A et pour le moment d'inertie I par rapport à l'axe passant par le barycentre :

$$A_n = \frac{h(2d + b(n+1))}{n+1} \quad (\text{II.14})$$

$$I_n = \frac{hb^3}{12} + 2 \left[\frac{hd^3}{n+3} + \frac{hd(2d+b)(2b+n(b-2d))}{4(n+1)(n+2)} \right] \quad (\text{II.15})$$

Dans le cas d'une section trapézoïdale le rapport moment d'inertie/aire de la section I/A est donné par la formule suivante :

$$\frac{I}{A} = \left(\frac{I}{A} \right)_{rect} \left\{ \frac{\left[1 + 2 \frac{h}{b} \tan(\theta) + \frac{2}{3} \left(\frac{h}{b} \right)^2 \tan^2(\theta) \right]}{\left(1 + \frac{h}{b} \tan(\theta) \right)^2} \right\} \quad (\text{II.16})$$

Où $(I/A)_{rect} = h^2/12$ est la valeur de ce rapport pour la section rectangulaire inscrite de largeur b et de hauteur h et θ l'angle au sommet des triangles latéraux.

Dans le cas d'une section avec des flancs en arcs de cercle le rapport moment d'inertie/aire de la section est donné par l'expression suivante :

$$\frac{I}{A} = \frac{h^2}{12} \left\{ \frac{1 + \left(12 - \frac{7\pi}{2} \right) \frac{h}{b} + \left(\frac{44}{3} - 7\pi + \frac{3\pi^2}{4} \right) \frac{h^2}{b^2}}{1 + (4 - \pi) \frac{h}{b} + \left(2 - \frac{\pi}{2} \right)^2 \frac{h^2}{b^2}} \right\} \quad (\text{II.17})$$

II.6.3. Correction de modèle de la micropoutre

La formule des fréquences de vibration d'une poutre corrigée précisément peut être utilisée à condition de considérer deux facteurs correctifs :

- 1) Facteur correctif numérique (γ) comme s'est indiqué en équation **(II.12)**;
- 2) Facteur correctif (β) peut être pris en compte analytiquement en calculant le moment d'inertie de la section droite non-rectangulaire de la poutre. Ce facteur dépend essentiellement de la forme de la section droite de la poutre ainsi que sa largeur et son épaisseur. Pour ce faire, on utilise la formule suivante qui est plus précise et qui conduit directement à calculer des fréquences de vibration.

$$f_n^e = \frac{a_n^{e^2}}{2\pi\sqrt{12}} \frac{h}{L^2(1+\gamma)^2} \sqrt{\frac{E}{\rho} (1+\beta) \left[1 + \alpha_n \left(\frac{\nu^2}{1-\nu^2} \right) \right]} \quad \textbf{(II.18)}$$

II.7. Conclusion

Au cours de ce chapitre nous avons établi à partir de l'analyse des vibrations à partir de la modélisation analytique et de la simulation numérique par éléments finis, des formules permettant de modéliser le comportement mécanique des poutres.

En effet, nous avons montré qu'il est nécessaire de considérer un module d'Young Y continûment variable entre E (module d'Young uniaxial) et $E/(1-\nu^2)$ (module d'Young biaxial) en fonction du rapport largeur/longueur de la poutre. La dépendance de Y avec ce rapport est une fonction du mode de vibration. L'augmentation du facteur correctif avec l'ordre du mode peut être très qualitativement comprise étant donné qu'une poutre vibrante dans des modes de vibration d'ordre élevé est constituée de tronçons de poutres de rapports b/L plus petits.

La méthode de détermination de la valeur du module d'Young des fréquences de vibration des poutres sont à priori précises si l'on prend en compte la correction de l'effet de largeur de la poutre, de l'effet de la sous gravure, et de la section non rectangulaire.

Des résultats expérimentaux obtenus à l'aide de la méthode de microvibrométrie seront présentés dans le chapitre suivant afin de déterminer les valeurs de module d'Young des couches minces d'Aluminium et de Chrome à partir des valeurs de fréquences de vibration mesurées pour les trois premiers modes de vibration.

Références

- [1] Lin, R.M., Wang, W.J., " Structural dynamics of Microsystems: current state of research and future directions ", Mechanical Systems and Signal Processing, 20 (2006) 1015-1043.
- [2] Ke, L. L., Wang, Y. S., "Size effect on dynamic stability of functionally graded microbeams based on a modified couple stress theory", Composite Structures, 93 (2011) 342-350.
- [3] Martins, P., " Caractérisation mécanique des matériaux pour les micro/nanosystèmes Procédés applicables aux épaisseurs submicroniques ", Thèse de Doctorat, INSAL (Janvier 2009).
- [4] Hubbard, T. J., " MEMS Design: The Geometry of Silicon Micromachining", Thèse de Doctorat, Institut de Technologie de California, (Avril 2009).
- [5] Bergaud, C., Nicu, L., Martinez, A., Gerard, P., and Benzohra, M., "Multi-mode frequency analysis for the dynamic characterization of microstructures ", Symposium on Design, Test and Microfabrication of MEMS and MOEMS, Paris, 3680 (1999) 757-764.
- [6] Yuan, Y., Du, H., Wang, P., Chow, K. S., Zhang, M., Yu, S., & Liu, B., " A ZnO microcantilever for high-frequency nanopositioning: Modeling, fabrication and characterization ", Sensors and Actuators A, 194 (2013) 75-83.
- [7] Chen, Y. J., & Luo, Q. Z., " Study for Dynamic Stability Behavior of I-Section Cantilever Beam under Axis Compressive Load ", Applied Mechanics and Materials, 351 (2013) 574-577.
- [8] Kong, S. L., "Size Effect on Natural Frequency of Cantilever Micro-Beams Based on a Modified Couple Stress Theory ", Advanced Materials Research, 694 (2013) 221-224.
- [9] Xu, D. S., Yin, J. H., Cao, Z. Z., Wang, Y. L., Zhu, H. H., & Pei, H. F., " A new flexible FBG sensing beam for measuring dynamic lateral displacements of soil in a shaking table test ", Measurement, 46 (2013) 200-209.

- [10] Baghche, Z., Shah, U., Aberg, J., Stemme, G., & Oberhammer, J., "Millimeter-wave SPST waveguide switch based on reconfigurable MEMS surface ", IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, (June 2013) 1-4..
- [11] Rajasekaran, S., "Buckling and vibration of axially functionally graded nonuniform beams using differential transformation based dynamic stiffness approach ", *Meccanica*, 48 (2013) 1053-1070.
- [12] Hajianmaleki, M., & Qatu, M. S., " Vibrations of straight and curved composite beams: A review ", *Composite Structures*, 100 (2013) 218-232.
- [13] Rao, S. S., "Mechanicals Vibrations", 3th edition, Addition-Wesley Publishing, (1995).
- [14] Xing, J. Z., & Wang, Y. G., " Free vibrations of a beam with elastic end restraints subject to a constant axial load " , *Archive of Applied Mechanics*, 83 (2013) 241-252.
- [15] Bahrami, A., & Nayfeh, A. H., "Nonlinear dynamics of tapping mode atomic force microscopy in the bistable phase ", *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 18 (2013) 799-810.
- [16] Bourouina, H., Yahiaoui, R., Majlis, B. Y., Hassein-Bey, A., Benamar, M. E. A., Sahar, A., "FEM Analysis for the Influence of Manufacturing Process Defects on Dynamic Behavior of Thin Chromium Microbeam ", *Applied Mechanics and Materials*, 548 (2014) 958-962.
- [17] Bourouina, H., Yahiaoui, R., Elmar Yusifli, A., Benamar, M. E. A., Sahar, A., " Analytical modeling of mechanical behavior of structures: comparative analysis, experimental: validation and numerical correction with FEM of material defects generated by anisotropic etching ", *Matec Web of conference*, 272 (2014) 758-760.
- [18] Facci, A. L., & Porfiri, M., "Analysis of three-dimensional effects in oscillating cantilevers immersed in viscous fluids ", *Journal of Fluids and Structures*, 38 (2013) 205-222.

- [19] Tsui, Y. Y., Huang, Y. C., Huang, C. L., & Lin, S. W., " A Finite-Volume-Based Approach for Dynamic Fluid-Structure Interaction ", Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals, 64 (2013) 326-349.
- [20] MEIROVITCH, L., "Analytical Methods in Vibrations ", New York: Macmillan Publications (1967).
- [21] Benaroya, H., "Mechanical Vibration ", Englewood Clids, Prentice Hall (1998).
- [22] Hoummady, M., Farnault, E., Kawakatsu, H., Masuzawa, T., "Applications of Dynamic Techniques for accurate determination of Silicon Nitride Young's Moduli", International Conference on Solid-State Sensors and Actuators Chicago, (1997) 615-618.
- [23] Nicu, L. and Bergaud, C., " Experimental and theoretical investigations on nonlinear resonances of composite buckled microbridges ", Journal of Applied Physics, 86 (1999) 5835-5839.
- [24] Yahiaoui, R., "Etude par microvibrométrie de films minces et de dispositifs micromécaniques", Thèse, IEF, Université Paris Sud, Mars 2002.
- [25] Castille, Christophe. Etude de MEMS piézoélectriques libérés et microstructures par sérigraphie. Application à la détection en milieu gazeux et en milieu liquide. Diss. 2010. Chi S. P., Wensyang H., "A microstructure for in situ determination of residual strain ", Journal of micromechanical systems, 8 (June 1999) 2-13.
- [26] Chi S. P., Wensyang H., "A microstructure for in situ determination of residual strain", Journal of micromechanical systems, 8 (June 1999) 2-13.

CHAPITRE III:
SIMULATION NUMÉRIQUE ET INTER PRÉPATION DE
RÉSULTATS

III.1. Introduction

Pour extraire les propriétés physiques de la couche mince qui compose la poutre, de nombreuses méthodes de mesure des fréquences de vibration ont été développées en instrumentation. Sachant que les fréquences de vibration mesurées sont très sensibles à la modification de la géométrie de la structure par le procédé de fabrication, nous devons donc modéliser nos poutres en tenant compte de la nouvelle géométrie qui présente des zones non uniformes telles que la section droite non rectangulaire et la sous-gravure à l'encastrement.

Le modèle analytique atteint rapidement leur limite et l'approche numérique s'avère un choix judicieux où la méthode des éléments finis (MEF) sera privilégiée pour la modélisation de la dynamique structurelle dont le but est d'extraire les paramètres mécaniques en utilisant des mesures dégagées à partir de la méthode de caractérisation par vibrométrie interférométrique en lumière monochrome appliquée à la caractérisation mécanique des couches minces.

Ce chapitre présente les résultats expérimentaux obtenus et leur analyse à l'aide de modèle établi que ce soit avant ou après correction de l'effet de la modification de la section de la poutre par le procédé de la gravure.

III.2. Méthode des éléments finis

III.2.1. Principe de base de la méthode

La méthode des éléments finis est une procédure qui consiste à trouver en même temps des approximations pour les fréquences de vibration naturelle et les modes associés, en faisant un découpage (maillage) de la structure en un nombre fini de sous domaines (éléments) dont le comportement est connu à partir d'un nombre fini de paramètres [1]. Les quantités physiques sont calculées pour tous les points de la structure. Afin d'obtenir un résultat sur un support continu, nous devons discrétiser le volume d'étude par un maillage, en le subdivisant en sous éléments finis. Tous ces éléments sont interconnectés par des nœuds et les solutions ne sont calculées que pour chaque nœud. L'approximation

de la solution finale est interpolée dans chaque élément à partir des résultats obtenus pour les nœuds qui les délimitent.

III.2.2. Optimisation de maillage et convergence du calcul

La simulation numérique du comportement mécanique de la poutre par la méthode des éléments finis a été réalisée en 3D, à l'aide de programmes paramétrés élaborés dans le cadre des scripts **COMSOL Multiphysics**, pour faciliter les changements dans les paramètres physiques et géométriques. L'analyse modale a été effectuée avec un maillage parallèle à 8 nœuds, la symétrie des structures étudiées a été utilisée pour limiter le nombre d'éléments et le temps de calcul. Dans le cas de COMSOL le maillage automatique est optimal pour la plupart des simulations après l'étude de convergence.

III.2.3. Mise en œuvre des simulations

Les simulations par éléments finis ont été réalisées en 3D à l'aide du **logiciel COMSOL Multiphysics** (version 4.3.a). Pour faciliter les changements de géométrie, les simulations ont été mises en œuvre à l'aide de programmes paramétrés. Les simulations ont été utilisées pour calculer les coefficients ou les facteurs correctifs génériques de modèle analytique. Pour ces simulations, il n'est pas nécessaire d'utiliser une valeur exacte du module Young E ou du coefficient de Poisson ν . Ils ont été utilisées les valeurs des propriétés des matériaux massifs indiquées dans le **tableau III. 1**.

	Matériau	
	Aluminium(Al)	Chrome(Cr)
E (GPa)	70	179
ν	0.35	0.27
P (kg/m ³)	2700	7190

Tableau III. 1: Valeurs du module d'Young E , du coefficient de Poisson ν et de la densité ρ utilisées pour les simulations.

III.3. Calcul des facteurs corrections

III.3.1. Facteur correctif de largeur

- Le facteur correctif α_1 (mode 1) de l'effet de la largeur b de la poutre est tracé en fonction du rapport b/L sur la figure III. 1 pour deux différentes épaisseur de la poutre ($10\mu m$ et $20\mu m$) et deux coefficient de Poisson ($\nu=0.35$ et $\nu=0.2$).

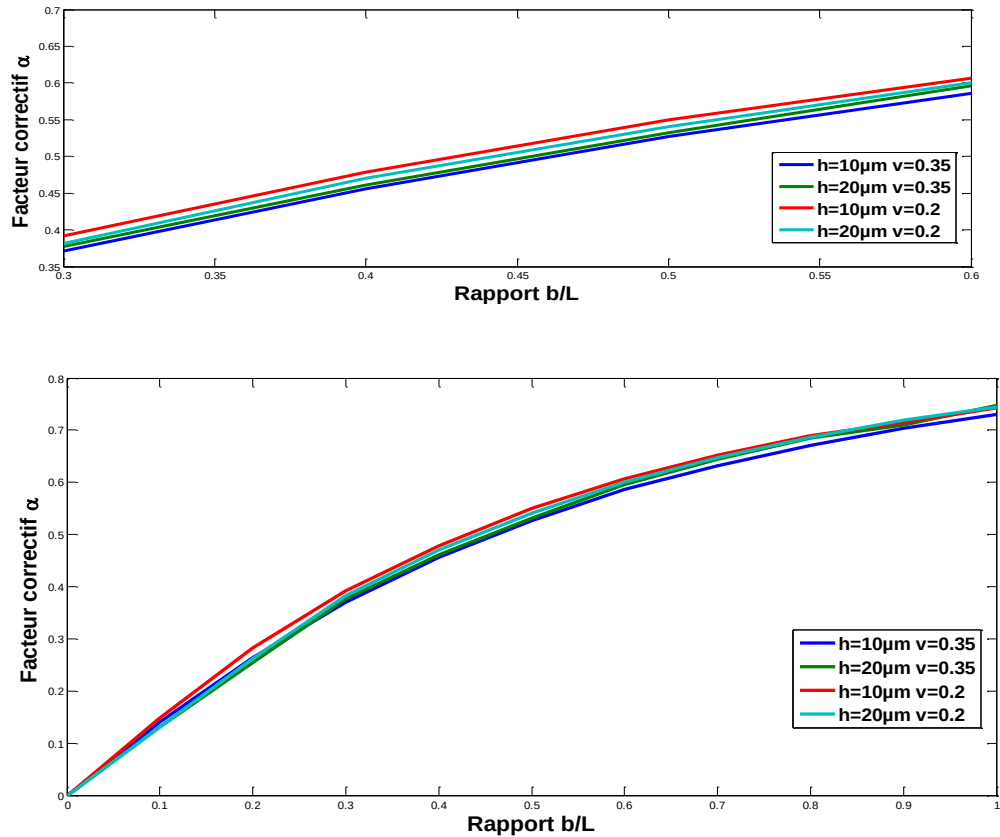


Figure III. 1: Variation du coefficient α_1 (mode 1) en fonction de b/L pour différentes épaisseur de la poutre ($h=10\mu m$ et $h=20\mu m$) et le coefficient de Poisson ($\nu=0.35$ et $\nu=0.2$) pour une longueur L de la poutre égale à $1000\mu m$.

- Le facteur correctif α_1 (mode 1) de l'effet de la largeur (b) de la poutre est tracé en fonction du rapport b/L sur la figure III. 2 pour deux différentes épaisseur de la poutre ($10\mu m$ et $20\mu m$) et deux modules d'Young ($E=70GPa$ et $E=80GPa$).

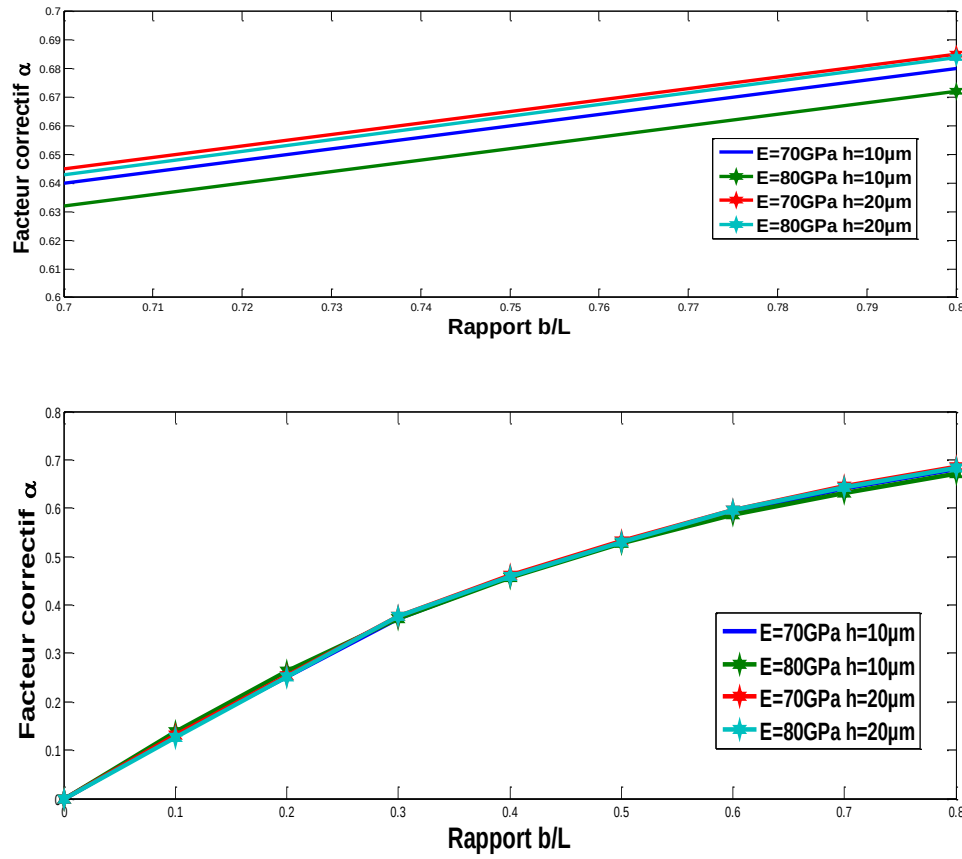


Figure III. 2: Variation du coefficient α_1 (**mode 1**) en fonction de b/L pour différentes épaisseur de la poutre ($h=10\mu\text{m}$ et $h=20\mu\text{m}$) et le module d'Young ($E=70\text{GPa}$ et $E=80\text{GPa}$) pour une longueur L de la poutre égale à $1000\mu\text{m}$.

La courbe représentée sur (**Figure III. 1**, **Figure III. 2**) confirme que le module d'Young Y varie entre le module d'Young uniaxial E et le module d'Young biaxial

$$E/(1-\nu^2) :$$

- $Y=E$ ($\alpha_1=0$) pour les petites valeurs du rapport b/L .
- $Y=E/(1-\nu^2)$ ($\alpha_1=1$) pour les grands rapports b/L .

Cette variation est identique pour les deux valeurs d'épaisseur h et le coefficient de Poisson ν , ce qui montre que le rapport b/L est la bien grandeur significative.

D'autres simulations ont confirmé que le résultat est indépendant du module d'Young E . En revanche une légère dépendance de α_1 avec le coefficient de Poisson ν a été mise en évidence (**Figure III. 3**) mais elle demeure inférieure à 5% dans la gamme ($\nu=0.2-0.35$).

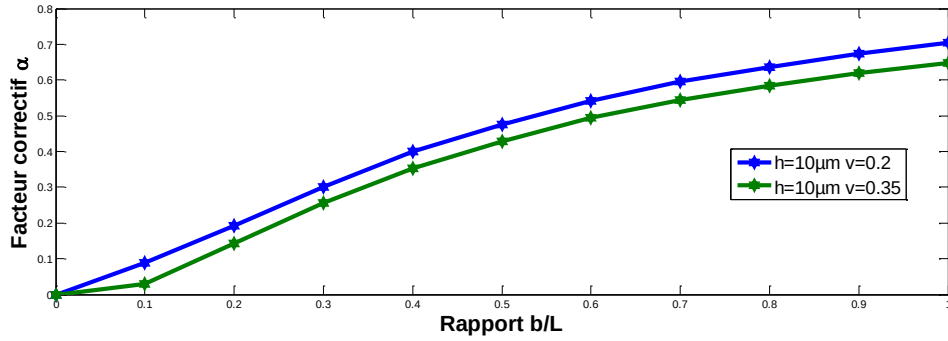


Figure III. 3: Evolution de la correction α_1 en fonction de b/L pour différentes valeurs du coefficient de Poisson ν . Dimensions de la poutre : $L=1000\mu m$, $h=50\mu m$.

On peut donc, en première approximation, négliger l'influence du coefficient de Poisson sur l'évolution du facteur correctif α_1 en fonction du rapport b/L .

L'utilisation du module uniaxial E pour le calcul de la fréquence de vibration d'une poutre n'est donc pas toujours justifiée. L'ajustement de la courbe $\alpha_1 = f(b/L)$ pour le mode 1 ($b/L < 1$) par un polynôme de degré 2 donne:

$$\alpha_1 = -42.84 \cdot 10^{-4} + 1.378 \left(\frac{b}{L} \right) - 0.622 \left(\frac{b}{L} \right)^2 \quad (\text{III.1})$$

L'analyse des résultats de simulation numérique montre que le facteur correctif α_n dépend de l'ordre n du mode. Ceci est illustré dans la figure III. 4, qui compare l'évolution de α_1 (mode1), α_2 (mode2) et α_3 (mode3) avec le rapport b/L .

L'augmentation du facteur correctif α_n avec l'ordre du mode de vibration peut être très qualitativement comprise si on considère qu'une poutre vibrante dans des modes d'ordre élevé est constituée de tronçons de poutres de rapports b/L plus petits.

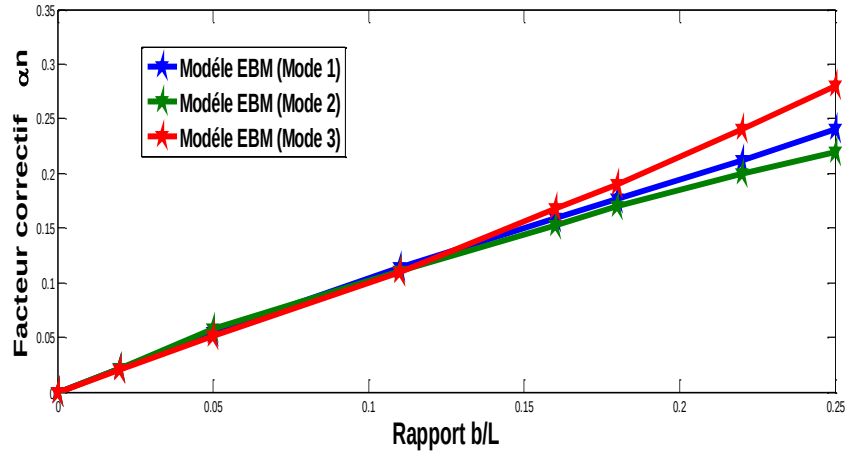


Figure III. 4: Variation du coefficient α_n en fonction de b/L pour les trois premiers modes d'une poutre $h=50\mu m$, $L=1000\mu m$.

L'ajustement des courbes $\alpha_n = f(b/L)$, (n variant de 2 à 3), pour $b/L < 0.2$ par un polynôme de degré 2 donne:

$$\alpha_2 = -10.1410^{-4} + 1.377\left(\frac{b}{L}\right) - 0.735\left(\frac{b}{L}\right)^2 \quad (\text{III.2})$$

$$\alpha_3 = -13.7010^{-4} + 1.295\left(\frac{b}{L}\right) + 2.046\left(\frac{b}{L}\right)^2 \quad (\text{III.3})$$

En conclusion la formule classique des fréquences de vibration d'une poutre démontrées dans le modèle peut être utilisée à condition de considérer un module d'Young Y qui dépend de la largeur b de la poutre et du mode de vibration n .

III.3.2. Facteur correctif de sous-gravure

L'encastrement simple, le rapport $\Delta L/L$ converge logiquement vers la valeur du rapport L_{sg}/L lorsque la valeur de bsg tend vers la valeur de b (figure III. 5 et figure III. 6) et devient indépendante de la largeur de la sous gravure lorsque bsg est supérieur à 8 fois b . Les simulations par méthode des éléments finis montrent que cette dernière situation correspond à une largeur de sous-gravure plus grande que la largeur de la zone de concentration de la contrainte à l'encastrement.

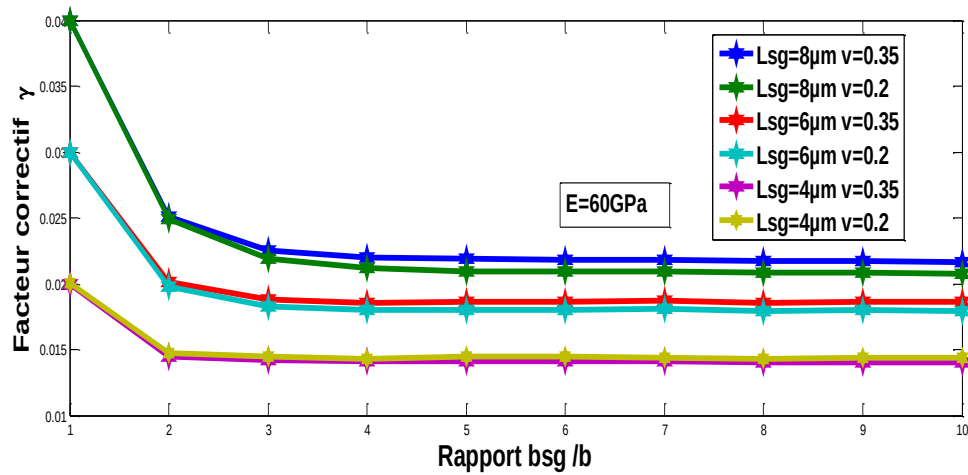


Figure III. 5: Variation de $\Delta L/L$ avec la largeur b_{sg} de la sous-gravure pour différentes valeurs de $L_{sg} = 4\mu m, 6\mu m, \text{ et } 8\mu m$. $L=200\mu m, b=8\mu m, h=2\mu m$, premier mode, encastrement simple.

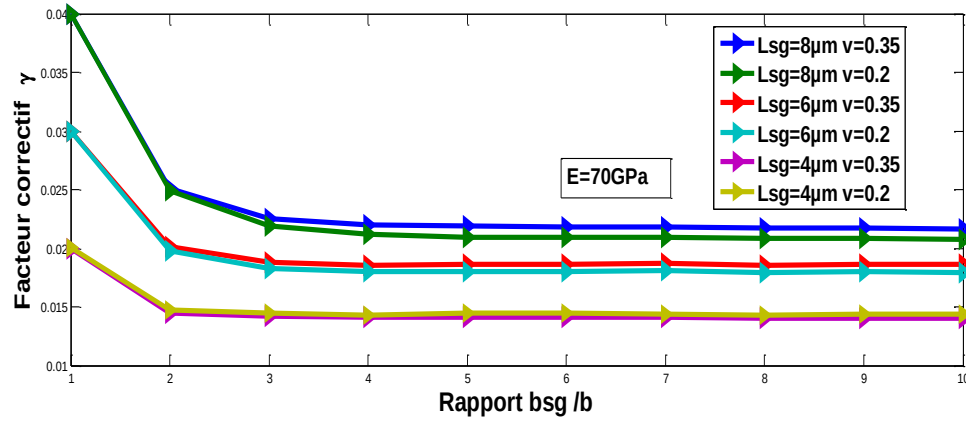


Figure III. 6: Variation de $\Delta L/L$ avec la largeur b_{sg} de la sous-gravure pour différentes valeurs de $L_{sg}=4\mu m, 6\mu m, \text{ et } 8\mu m, L=200\mu m, b=8\mu m, h=2\mu m$, premier mode, encastrement simple.

L'encastrement complet n'a aucun effet supplémentaire tant que la valeur de b_{sg} est supérieur à 8 fois la largeur de la poutre (**figure III. 7** et **figure III. 8**): la variation du rapport $\Delta L/L$ en fonction de L_{sg}/L est la même que pour un encastrement simple (**figure III. 6**).

On constate logiquement que la sous gravure a de moins en moins d'effet : la correction $\Delta L/L$ tend vers 0 lorsque b_{sg}/b tend vers 1.

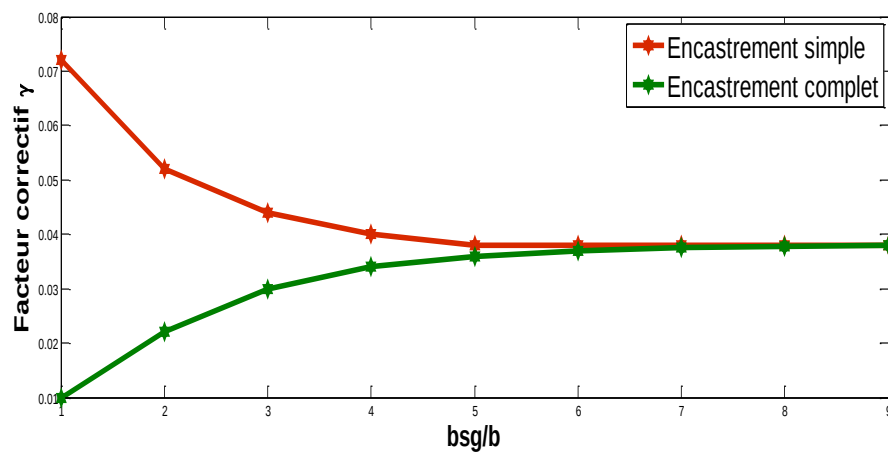


Figure III. 7: Variation de $\Delta L/L$ avec la largeur b_{sg} de la sous-gravure: $L_{sg}=800\mu m, L=1000\mu m, b=50\mu m, h=10\mu m$, premier mode de vibration (**mode1**).

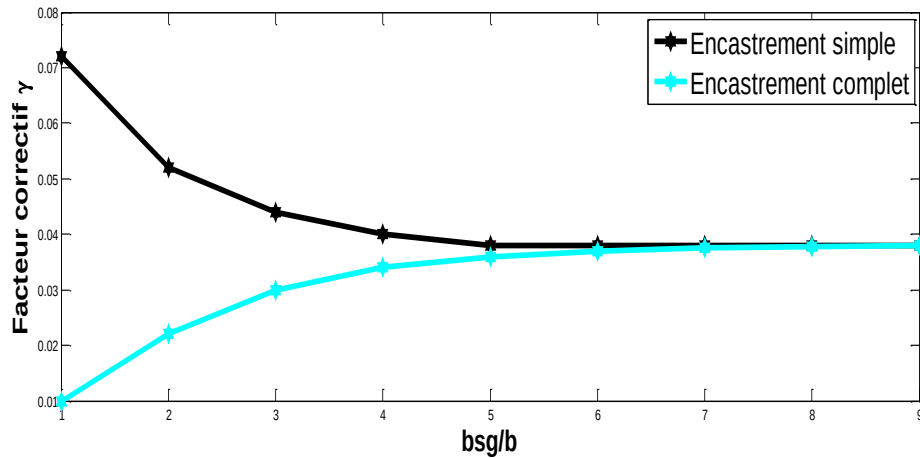


Figure III. 8: Variation de $\Delta L/L$ avec la largeur b_{sg} de la sous-gravure: $L_{sg}=800\mu m$, $L=1000\mu m$, $b=50\mu m$, $h=10\mu m$, deuxième mode de vibration (**mode2**),

ES : encastrement simple et EC : encastrement complet.

Les **figures III. 7** et **III. 8** indiquent que la correction à appliquer sur la longueur dépend légèrement du mode de vibration n'est plus élevée pour le mode 2 que pour le mode 1. Cet écart reste faible ($<2,5\%$) tant que la valeur de L_{sg} n'excède pas environ 8% de la valeur de L .

En conclusion, les formules classiques des fréquences de vibration d'une poutre corrigées précédemment peuvent être utilisées pour calculer les valeurs des fréquences de vibration d'une poutre présentant une sous-gravure à l'encastrement en remplaçant la longueur L de la poutre par $L'=L(1+\gamma)$.

III.3.3. Facteur correctif de la section droite

Les facteurs correctifs β calculés à partir des équations (II.16) et (II.17) sont tracés en fonction du rapport h/b dans figure III. 9.

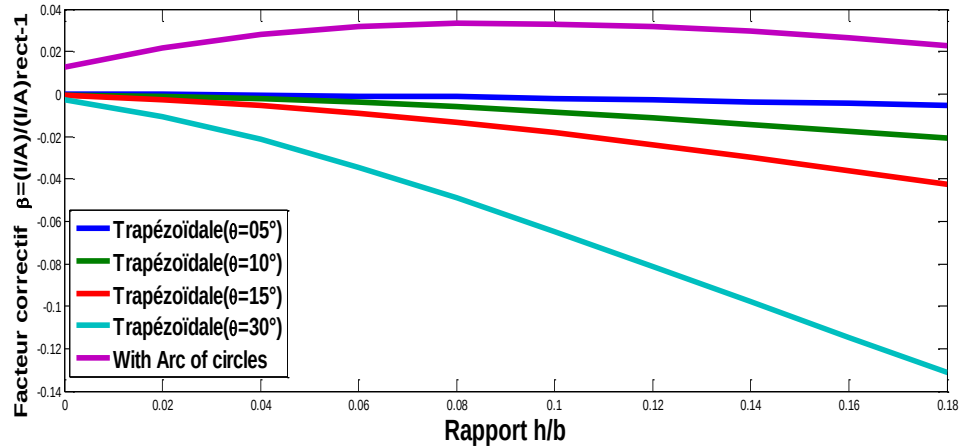


Figure III. 9 : Facteur correcteur β en fonction du rapport d'aspect de la poutre pour une section trapézoïdale avec différents angles θ et pour une section avec des flancs en arcs de cercle.

Les résultats montrent que :

Pour des poutres étroites dans lequel l'épaisseur h est environ la largeur b , la géométrie exacte de la section droite de la poutre doit être prise en considération pour éviter des erreurs qui peuvent atteindre quelques %.

Pour des poutres de largeur supérieure à 10 fois l'épaisseur, la valeur de facteur correctif β est négligeable (quelques 0.1%) pour des poutres de section trapézoïdale et voisine de 1% pour des poutres de section en arcs de cercle.

La géométrie réelle de la section n'étant pas aisée à mesurer, il est préférable de se placer dans cette dernière condition pour mesurer le module d'Young d'une couche à partir des fréquences de vibration d'une poutre.

III.4. Application à l'extraction de module élasticité

III.4.1. Méthode de calcul de module élasticité

Afin d'extraire une valeur plus précise du module d'Young à partir des fréquences de vibration des trois premiers modes de vibration nous avons procédé à de arrangement de équation (II.7) pour aboutir à :

$$\frac{f_n^{e^2} 48\pi^2 L^4 \rho}{h^2} = Y a_n^{e^4} \quad (\text{III.4})$$

$$\text{Soit en posant } Y_n^e = \frac{f_n^{e^2} 48\pi^2 L^4 \rho A}{h^2} \text{ nous obtenons } Y_n^e = Y a_n^{e^4} \quad (\text{III.5})$$

La valeur de module d'Young est donc la pente de la droite de l'équation $Y_n^e = f(a_n^{e^4})$ correspondante au modèle EBM.

Pour le modèle analytique, les facteurs correctifs α_n , β , et γ , traduisant respectivement la variation de la fréquence de vibration des modes de vibration avec la largeur de la poutre, la forme réelle de la section droite, et la sous-gravure, on obtient l'expression suivante :

$$f_n^e = \frac{a_n^{e^2}}{2\pi\sqrt{12}} \frac{h}{L^2(1+\gamma)^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}(1+\beta) \left[1 + \alpha_n \left(\frac{\nu^2}{1-\nu^2} \right) \right]} \quad (\text{III.6})$$

et en procédant au même arrangement que pour le équation (II.7) on aboutit à :

$$\frac{f_n^{e^2} 48\pi^2 L^4 (1+\gamma)^4 \rho}{H^2(1+\beta) \left[1 + \alpha_n \left(\frac{\nu^2}{1-\nu^2} \right) \right]} = Y a_n^{e^4} \quad (\text{III.7})$$

$$\text{Soit en posant } Y_{nc}^e = \frac{f_n^{e^2} 48\pi^2 L^4 (1+\gamma)^4 \rho}{h^2(1+\beta) \left[1 + \alpha_n \left(\frac{\nu^2}{1-\nu^2} \right) \right]} \text{ nous obtenons } Y_{nc}^e = Y a_n^{e^4} \quad (\text{III.8})$$

III.4.2. Extraction de module élasticité

La caractérisation des couches minces à partir de l'analyse des vibrations de poutres portent sur des couches d'Aluminium et de Chrome [2]. Les mesures présentées dans la suite correspondent des poutres en Aluminium et en Chrome dont la première est de section droite légèrement trapézoïdale, et présentant une longueur de sous gravure mesurées au MEB d'environ $8\mu\text{m}$. La poutre en Chrome est de section droite rectangulaire et présente une longueur de sous gravure d'environ $3\mu\text{m}$.

III.4.2.1. Cas d'une micropoutre en Aluminium ($100 \times 9 \times 0.6\mu\text{m}^3$)

Les fréquences de vibration des trois premiers modes de vibration sont mesurées par la technique de microvibrométrie interférométrique optique avec une résolution spatiale de $2.5\mu\text{m}$.

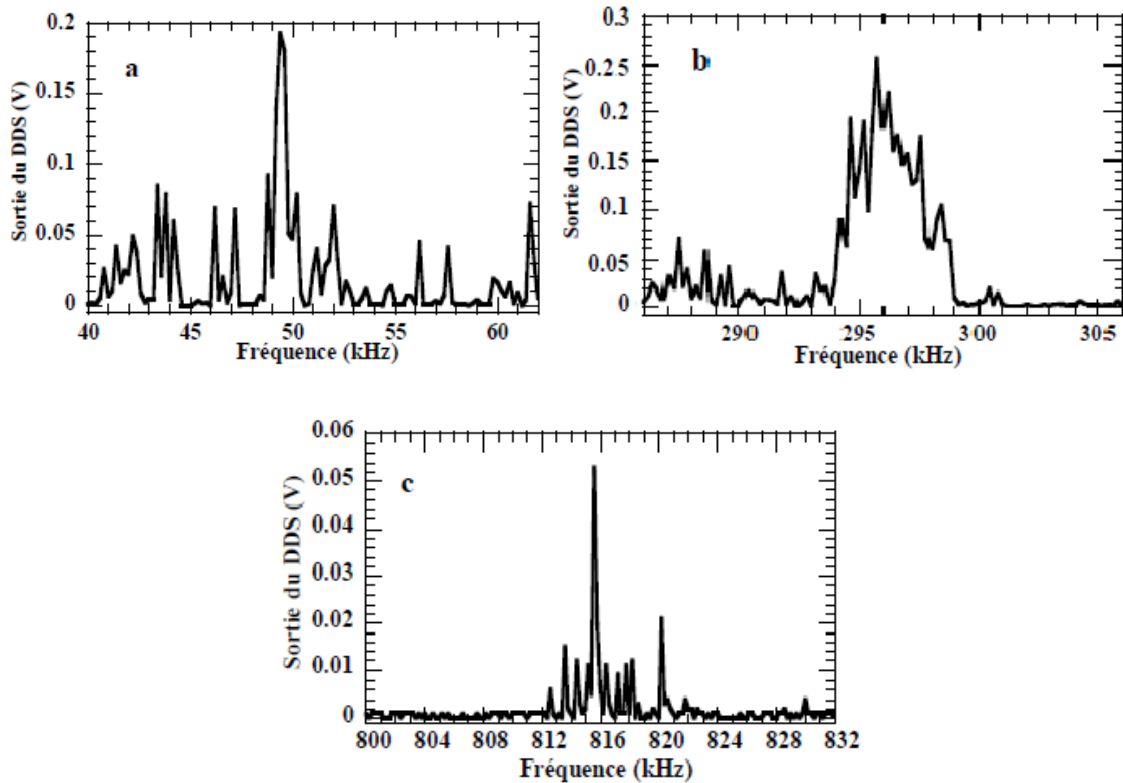


Figure III.10: Spectres de vibration d'une micropoutre en Aluminium de dimension $100\mu\text{m} \times 9\mu\text{m} \times 0.6\mu\text{m}$ [2] : (a) mode 1 : $f_1 = 49.5\text{kHz}$ excitation PZT 1Vpp ;
 (b) mode 2 : $f_2 = 296.1\text{kHz}$ excitation PZT 1Vpp ;
 (c) mode 3 : $f_3 = 816\text{kHz}$ excitation PZT 10Vpp.

Notez bien, pour une poutre de section droite rectangulaire, parfaitement encastrée à son extrémité fixe, les expressions des fréquences de vibration sont données par l'équation (II.7) pour le modèle EBM, le calcul direct du module d'Young Y à partir des fréquences de vibration mesurés a donné :

	Modes de vibration		
	1 st mode	2 nd mode	3 nd mode
Fréquences mesurées par vibrométrie (KHz)	049.500	296.100	816.000
Module d'Young (GPa)	070.4224	064.1612	062.1515

Tableau III. 2 : Valeurs du module d'Young Y non corrigé calculées à partir des fréquences mesurées pour une poutre en Aluminium.

Ces résultats montrent qu'une décroissance apparente de la valeur du module d'Young est observée avec l'augmentation de l'ordre du mode de vibration. Ceci est en accord avec les simulations par élément finis que nous avons effectuées et qui montre que le facteur correctif α_n à apporter au module d'Young, augmente avec l'ordre du mode de vibration.

La valeur corrigée de module d'Young est donc la pente de la droite de l'équation $Y_{nc}^e = f(a_n^{e^4})$ qui correspond au modèle EBM (**figure III. 11**).

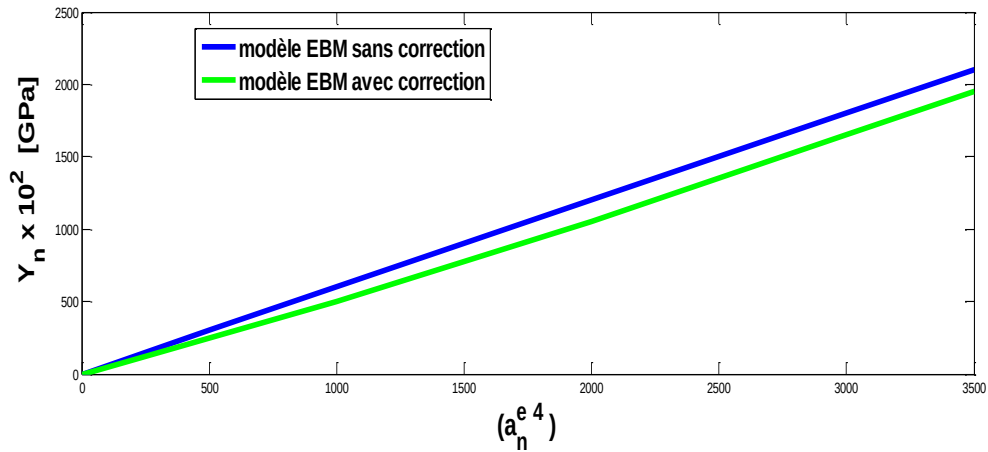


Figure III. 11: Courbes de $Y_n^e = f(a_n^{e4})$ (modèle EBM sans correction) et $Y_{nc}^e = f(a_n^{e4})$ (modèle EBM avec correction) pour le cas de la poutre en Aluminium.

Les courbes tracées dans la **figure III. 11** permettant l'extraction de la valeur de module d'Young pour le cas de la poutre en couche d'Aluminium à partir de modèle **EBM**. En ajustant par une droite les 2 courbes

	Sans correction	Avec correction	L'effet de la correction
la valeur du module d'Young(<i>GPa</i>)	62	71.9	15%

Tableau III. 3:La valeur sans correction et avec correction du module d'Young pour le cas de la poutre en Aluminium.

La valeur corrigée se trouve dans la gamme des valeurs publiées du module d'Young de l'Aluminium massif (69-72*GPa*). Ces résultats montrent alors l'importance de l'effet de modification de la section de la poutre sur l'élasticité de la poutre réalisée en couches minces élaborés par les procédés de fabrication.

III.4.2.2. Cas d'une micropoutre en Chrome ($80 \times 2 \times 0.95 \mu\text{m}^3$).

La **figure III. 12** montre le spectre de vibration d'une poutre en Chrome de petites dimensions ($80 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m} \times 0.95 \mu\text{m}$) dont la gamme du spectre est entre 100kHz jusqu'à 900kHz [2]. Les fréquences de vibration mesurées pour les trois premiers modes de vibration sont respectivement 135kHz , 839.5kHz et 2317kHz . Les deux premiers modes de vibration sont présents sur le spectre tandis que la troisième fréquence de vibration de valeur élevée a été mesurée à partir des interférogrammes moyennés dans le temps.

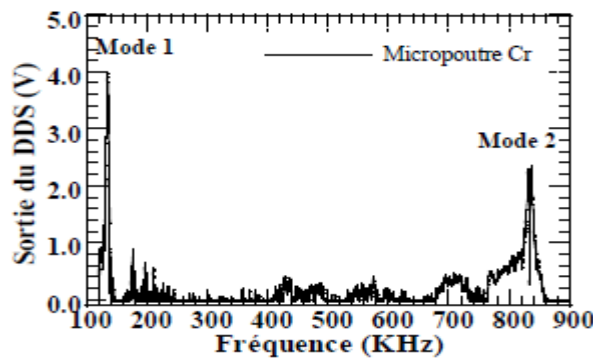


Figure III. 12 : Spectres de vibration d'une micropoutre au Chrome de dimension $80 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m} \times 0.95 \mu\text{m}$; excitation PZT 2Volts [2].

Le calcul du module d'Young à partir des fréquences des modes mesurés en utilisant l'équation (II.18) montre aussi une décroissance de la valeur apparente du module d'Young avec l'ordre du mode de vibration, ceci est illustré au **tableau III. 4**.

	Modes de vibration		
	1 st mode	2 nd mode	3 rd mode
Fréquences mesurées par vibrométrie (KHz)	0135.000	0839.500	2317.000
Module d'Young (GPa)	227.9022	224.3974	218.0236

Tableau III. 4: Valeurs du module d'Young Y non corrigé calculées à partir des fréquences mesurées (poutre en Cr).

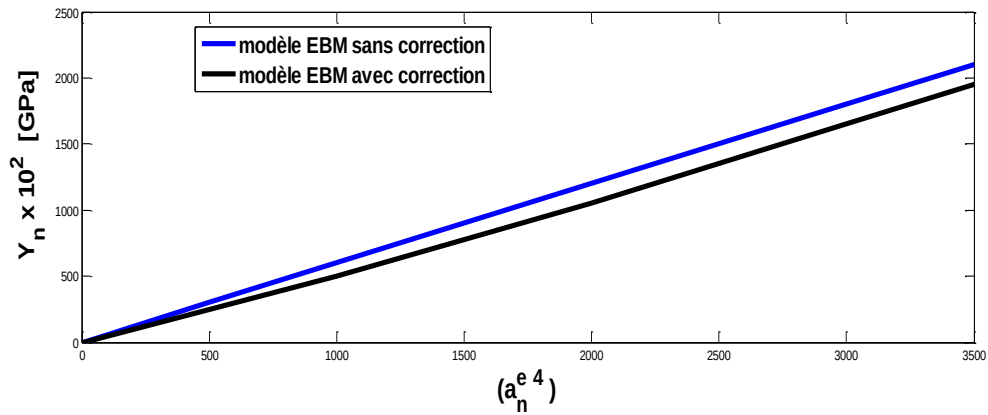


Figure III. 13 : Courbes de $Y_n^e = f(a_n^{e^4})$ (modèle EBM sans correction) et $Y_{nc}^e = f(a_n^{e^4})$ (modèle EBM avec correction) pour le cas de la poutre en couche de Chrome.

Les courbes tracées dans la **figure III. 13** permettant l'extraction de la valeur de module d'Young pour le cas de la poutre en Chrome à partir du modèle EBM. Le module d'Young déduits de l'ajustement par une droite des 2 courbes sont respectivement:

la valeur du module d'Young (GPa)	sans correction	avec correction
	226.15	250.35

Tableau III. 5:La valeur sans correction et avec correction du module d'Young pour le cas de la poutre en Chrome.

Ceci montre l'importance du sans correction de la sous-gravure pour des poutres de faible longueur. La valeur corrigée reste cependant très éloignée de la valeur du matériau massif (279GPa) et des valeurs mesurées sur une membrane en chrome par vibrométrie (281GPa) [3] et par la technique de gonflement test (270GPa) [4-5].

III.5. Conclusion

La méthode de détermination de la valeur du module de Young des couches d'Aluminium et du Chrome à partir des fréquences de vibration des poutres sont à priori précises si l'on prend en considération la correction de l'effet de largeur de la poutre, de la section non rectangulaire et de l'effet de la sous-gravure.

Les résultats obtenus à partir du modèle EBM ont montré que les valeurs obtenues ne sont pas toujours celles escomptées lorsque la valeur du module d'Young de la couche est élevée ou lorsque l'on utilise des poutres de faibles dimensions. En effet, si le module d'Young mesuré pour les couches d'Aluminium est voisin de celui de l'Aluminium massif et des valeurs publiées pour les couches minces, la valeur mesurée pour la couche de chrome est moins proche à celle publiées.

Références

- [1] Rao, S. S., "Mechanicals Vibrations", 3th edition, Addition-Wesley Publishing, (1995).
- [2] Yahiaoui, R., "Etude par microvibrométrie de films minces et de dispositifs micromécaniques", Thèse, IEF, Université Paris Sud, Mars 2002.
- [3] Sader, J. E., "Frequency response of cantilever beams immersed in viscous fluids with applications to the atomic force microscope ", Journal of Applied Physics, 84 (1998) 64-76.
- [4] Yahiaoui, R., Danaie, K., Petitgrand, S., Bosseboeuf, A., "An Automated interferometric system for bulge test and blister test measurements of micromachined membranes ", Proc. SPIE, 4400 (2001) 160-169.
- [5] Danaie, k, " Membrane micro-uside par gravure chimique: Application a la caracterisation des films minces ", Thèse de Doctorat, University of Paris VI, (Octobre 2002).

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif de travail réalisé dans ce mémoire est d'étudier les propriétés physiques des couches minces en présence de défauts de gravure isotrope. L'étude est basée sur la modélisation des couches minces et la correction des défauts technologiques afin d'améliorer l'extraction des propriétés physiques des couches minces qui composent les poutres où deux axes ont été examinés:

1) L'analyse numérique de modèle classique de la micropoutre avec l'effet de largeur et de rotation de la section de structure.

2) La modélisation des effets de la non uniformité de section et de la sous-gravure à extrémité de la structure.

Le modèle étudié était analysé à partir des simulations numériques en utilisant la méthode des éléments finis pour tester sa validité sous l'influence de l'effet de largeur de la section. Le modèle des fréquences de vibration développé permet d'analyser le comportement dynamique de la couche minces où les expressions développés dans un premier temps tien compte de l'effet de la larguer de la poutre non considérer dans le modèle analytique classique.

Malgré l'analyse de l'effet de la largeur, le modèle corrigé reste limité pour analyser l'effet de la section droite non rectangulaire et de la sous-gravure à l'encastrement. L'utilisation d'une poutre parfaite de longueur L' qui produit la même fréquence de vibration qu'une poutre de longueur L avec une sous-gravure de longueur L_{sg} et de largeur b_{sg} était trouvée très pratique et mène à de bon résultat.

La méthode de détermination de la valeur de module de Young des couches d'Aluminium et du Chrome à partir des fréquences de vibration de poutres sont à priori précises si l'on prend en compte la correction de l'effet du largueur de la poutre et des défauts technologiques engendrés.

Certain perspectives points peuvent être complétés, améliorés ou approfondis dans l'avenir.

La première perspective, concerne l'élaboration des micropoutres en collaboration avec l'Université de Franche-Comté (France) où nous pourrons également élaborer des poutres vibrantes de dimensions micrométriques.

La seconde perspective, notre laboratoire ne disposant pas de technique de caractérisation des microstructures, Il serait judicieux, de monter un système vibrometrique pour caractériser des propriétés des couches minces.

La dernière perspective, concerne la simulation numérique, afin de confronter les modèles analytiques des micropoutres à des modèles numériques par la méthode des éléments finis. Ainsi si les perspectives cités sont réunis notre travail pourra faire un projet complet de l'élaboration des couches minces à leurs modélisation et voire leurs à la caractérisation en étudiant l'analyse du comportement dynamique des micropoutres.

RESUME

L'objectif de ce mémoire était d'étudier les propriétés physiques des poutres intégrées dans les systèmes micrométriques comme élément de base, en tenant compte de l'effet du non uniformité de la structure géométrique. L'étude est basée sur l'analyse vibratoire de poutres afin de développer de nouveau modèle théorique afin d'améliorer l'extraction des propriétés physiques des couches minces. Nous avons présenté le principe d'intégration de la poutre dans les systèmes, ses enjeux scientifiques et stratégiques et les méthodes de la caractérisation mécanique des couches minces. Le modèle analytique dès la micropoutre présenté est corrigé, puis analysés à partir de simulations par méthode des éléments finis (MEF) sous le logiciel COMSOL pour tester leur validité et déterminer les facteurs de correction qui compte de l'effet du largeur sur le module de Young, l'effet de la sous-gravure à sur la fréquence de vibration et celui de la section droite non-rectangulaire de la poutre sur l'inertie de la structure vibrante. Enfin, les résultats montrent que le comportement des micropoutres élaborées par la gravure isotrope est bien liée à la variation leurs paramètres géométriques qui montre la nécessité de prendre en considération la correction des défauts technologiques pour bien extraire les propriétés physiques des couches minces.

ABSTRACT

The objective of this thesis was to study the physical properties of beams integrated in micrometric systems as a basic element, taking into account the effect of the non-uniformity of the geometric structure. The study is based on the vibratory analysis of beams in order to develop a new theoretical model to improve the extraction of the physical properties of thin layers. We presented the principle of integration of the beam in systems, its scientific and strategic issues and the methods of mechanical characterization of thin layers. The analytical model of the microbeam presented is corrected, then analyzed from simulations by finite element method (FEM) under the COMSOL software to test their validity and determine the correction factors which account for the effect of the width on the modulus of Young, the effect of under-etching on the vibration frequency and that of the non-rectangular cross section of the beam on the inertia of the vibrating structure. Finally, the results show that the behavior of the microbeams produced by isotropic etching is indeed linked to the variation in their geometric parameters, which shows the need to take into account the correction of technological defects in order to properly extract the physical properties of thin layers.

ملخص

كان الهدف من هذه المذكرة دراسة الخصائص الفيزيائية للروافد المدمجة في الأنظمة الميكرومترية كعنصر أساسي ، مع مراعاة تأثير عدم انتظام التركيب الهندسي. تعتمد الدراسة على التحليل الاهتزازي للروافد من أجل تطوير نموذج نظري جديد لتحسين استخلاص الخصائص الفيزيائية للطبقات الرقيقة. قدمنا مبدأ دمج الروافد في الأنظمة وأهميتها العلمية والاستراتيجية وطرق التوصيف الميكانيكي للطبقات الرقيقة. قد تم تصحيح النموذج التحليلي للروافد الميكروية المقدم ، ثم تحليله من عمليات المحاكاة بطريقة العناصر المنتهية (ط.ع.م) تحت برنامج (كومسول) لاختبار صحتها وتحديد معاملات التصحيح التي تفسر تأثير العرض على معامل يونغ ، تأثير النقش المتخلف على تردد الإهتزاز و تأثير المقطع العرضي غير المستطيل للرافدة على عطالة البنية المهتزة. أظهرت النتائج في الأخير أن سلوك الروافد الميكروية الناتجة عن النقش المتماثل يرتبط بشكل كبير بالتغير في خصائصها الهندسية ، مما يدل على الحاجة إلى مراعاة تصحيح العيوب التكنولوجية من أجل استخلاص الخصائص الفيزيائية للطبقات الرقيقة بشكل دقيق.

