



ÉTUDE DU COMPORTEMENT MÉCANIQUE PAR SIMULATION À ÉLÉMENTS FINIS POUR LA CARACTÉRISATION DES MICRO-PONTS MEMS

Nadir BELGROUNE¹,
Abdelkader HASSEIN-BEY¹,
Asmaa HASSEIN-BEY¹,
Amine AMRANE¹,
Burhanuddin Yeop MAJLIS²,
Mohamed El Amine BENAMAR^{1,*}

¹Equipe Physique des Microsystèmes & Nanosystèmes FUNDAPL Faculté des Sciences USDBI, BP. 270 route de Soumâa 09000 Blida Algérie.

²Institut IMEN Université Nationale de Malaisie (UKM), 43600 UKM Bangi, Selangor, Malaisie.

*benamardz64dz@yahoo.fr

RÉSUMÉ

Cet article est basé essentiellement sur l'analyse du comportement statique et dynamique de micro-dispositifs MEMS. Il s'intéresse plus particulièrement aux microstructures de type poutre doublement encastrée « micro-pont ». Suites aux procédés de micro-fabrications de couches minces et plus exactement de micro-ponts une variation apparaît sur les paramètres mécaniques tels que le module d'Young à travers des contraintes résiduelles initiales. D'où la difficulté d'extraire ces paramètres fortement affectés par les procédés de fabrication. Ce travail se propose d'illustrer les effets de variation des paramètres mécaniques sur le comportement des micro-ponts par des modélisations à éléments finis avec Comsol Multiphysics. Cette connaissance jumelée avec des méthodes de caractérisations vibrométrique permettra d'améliorer les étapes de conceptions et ainsi fiabiliser encore plus des micro-dispositifs MEMS.

MOTS CLÉS

- MEMS,
- Micro-pont,
- Modélisation,
- Caractérisation,
- Sans contact,
- FEM Simulation.

1. INTRODUCTION

Un microsystème est un dispositif de taille micrométrique qui réalise une fonction de capteur ou d'actionneur dans un domaine d'énergie non électrique (thermique, mécanique, chimique, optique, magnétique). La détermination non destructive de la géométrie et des paramètres microscopique du matériau des micro-dispositifs MEMS est un élément clé pour le contrôle des procédés de fabrication [1]. Une première technique est basée sur un système de mesure non destructive pour tester MEMS ou MOEMS (MEMS Optique) au niveau microscopique, cette technique a déjà fait l'objet de travaux par différents laboratoire en particulier à l'université de Franche-Comté par l'équipe de C. Gorecki [2], et à l'université d'Orsay par l'équipe de A. Bosseboeuf [3, 4, 5]. En préparations à des caractérisations sans contacts, nous voulons illustrer les effets des différents paramètres géométriques ou de matériau sur les variations de comportement tant statique que dynamique par des calculs numériques avec les modèles d'éléments finis. Les méthodes de caractérisations utilisent surtout les méthodes dynamique vibrométrique [1, 3] pour arriver à l'extraction des paramètres du matériau.

2. PRINCIPE DE SIMULATION PAR LA MÉTHODE A ÉLÉMENTS FINIS

La détermination des propriétés mécaniques par la déformation de microstructures ou nanostructures requiert une connaissance précise des modèles analytiques associés. A travers l'utilisation de simulations par la méthode d'éléments finis (FEA) à partir du logiciel Comsol Multiphysics dans notre cas précis, nous pouvons prendre en compte les imperfections géométriques et mécaniques issues des procédés de micro-fabrications. Les micro-ponts

réels à caractériser avec des méthodes vibrométriques possèdent des sections non rectangulaires par exemple que nous modélisons par des sections trapézoïdales [3].

Dans le cas de plaques bloquées sur les bords, S. Timoshenko et al. proposèrent en 1959 dans la seconde édition de « Theory of plates and shells » un modèle théorique sur le comportement de plaques sous l'effet d'une pression, basé sur la méthode de minimisation des énergies de déplacement de ces plaques [6]. Or ce modèle s'appliquait au cas simple de plaques immobiles sur les bords. Certains travaux, par la suite, ont appliqué ce modèle à la méthode expérimentale de gonflement de membranes en optimisant analytiquement ce modèle [7]. Malheureusement ces modèles n'ont pas tenu compte des effets d'encastrement des microstructures micro-usinées.

L'utilisation des simulations numériques, pour une méthode expérimentale ou même une méthode de caractérisation donnée, peut également être très utile dans l'étude de différentes géométries. Cette approche peut aussi s'utiliser dans les analyses modales. Il faut insister sur le fait que pour l'étude modale, les simulations par la méthode d'éléments finis peuvent être un outil intéressant pour la recherche des modes de résonances de diverses structures mais aussi pour l'identification de ces différents modes de résonance. Dans notre cas le choix du maillage est optimisé par le programme lui-même selon les zones à fort gradient. Les éléments finis sont choisis de telle manière qu'ils soient les plus simples possibles afin que l'analyse comportementale de la structure soit facile à mettre en œuvre. En effet, l'approximation de la solution (déplacements, contraintes,...) est définie pour chaque élément définissant la structure globale [8].

3. COMPORTEMENT MÉCANIQUE DES MICRO-PONTS

Les Micro-poutres se sont révélées être une excellente plate-forme pour les capteurs chimiques et biologiques. L'unique caractéristique des micro-poutres est que ce micro-dispositif peut subir une flexion en raison de l'adsorption moléculaire confinée sur une face du micro-pont. Cette flexion est due à la contrainte d'adsorption différentielle induite sur la poutre. Un micro-pont peut être considérée comme la fusion tête-à-tête de deux micro-cantilevers et le milieu du micro-pont se déforme de la même manière qu'un micro-cantilever (figure 1). Les méthodes de caractérisation mécanique des films minces pour les dispositifs MEMS sont généralement subdivisées en trois groupes [4-5, 9-13]. On pourrait ainsi arriver à caractériser les propriétés élastiques du micro-pont. Bien que dans la figure 3 la cause du flambement est due à la différenciation de la couche sensible mais cette figure illustre bien ce comportement. Il est clair que vu les dimensions des micro-dispositifs les moyens de chargement des microstructures peuvent différer selon les cas en utilisant dans la majorité des cas les effets électrostatique, électrothermique, électromagnétique ou bien piézoélectrique.

3.1. Les micro-ponts sous contrainte statique

Nous allons nous restreindre au cas des commutateurs à commande électrostatique. Une polarisation électrique (statique) entre le micro-pont (électrode supérieure) et le substrat (électrode inférieure) permet de générer un champ électrostatique créant une pression électrostatique d'attraction entre le micro-pont et le substrat (direction z) avec un gap g égal à quelques micromètres figure 2. La distance dans la direction x entre l'encastrement et un point du pont sera noté l_x . Si nous polarisons le pont avec une tension continue, un champ électrostatique est ainsi créé causant une contrainte due à la pression électrostatique induite. Des modèles analytique existe surtout avec des sections constante afin d'apprécier la contrainte ou la déformation moyenne résiduelle. Ces méthodes directes pour déterminer la rigidité emploient généralement des méthodes énergétiques, tels que le théorème de déplacement de Castigliano.

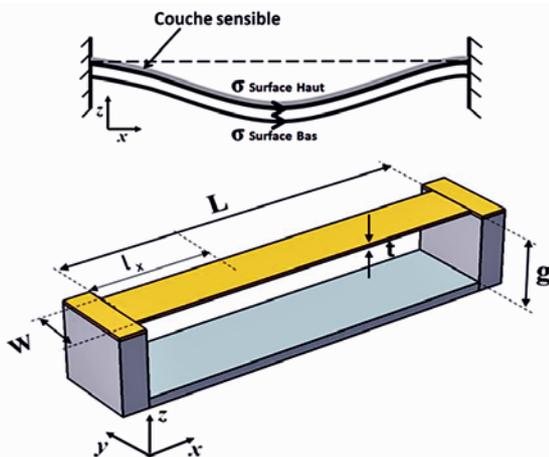


Figure 1. Micro-pont sous l'effet d'un différentiel de contrainte de surface $\Delta\sigma$ suite à l'absorption au niveau de la surface sensible. Schéma du Modèle d'un micro-pont.

Ce théorème indique qu'une déformation élastique peut être trouvée en prenant la dérivée partielle de l'énergie calculée en fonction de la charge appliquées. La flexion d'un micro-pont u_z en fonction de la force F peut être ainsi calculée analytiquement en se basant sur le théorème du déplacement de Castigliano [9] :

$$u_z = F \frac{3l_x^5 L - 3l_x^4 L^2 + l_x^3 L^3 - l_x^6}{3L^3 E_y} \quad (1)$$

E étant le module d'Young, I_y le moment d'inertie de la section droite. On rappelle que L est la longueur du micro-pont et l_x la distance d'application de la force selon l'axe z par rapport à l'encastrement. La raideur k du micro-pont peut être écrite comme suit :

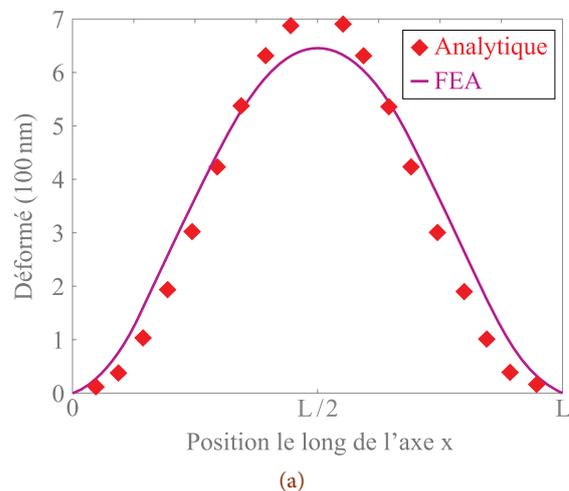
$$\sigma_p = 12F \frac{3L^3 E_y}{3l_x^5 L - 3l_x^4 L^2 + l_x^3 L^3 - l_x^6} \quad (2)$$

Les contraintes varient linéairement à travers la section droite en partant d'une tension vers une compression en passant zéro par l'axe neutre. La contrainte de flexion du micro-pont de la figure 3 peut être calculée d'une façon analytique en considérant le modèle de poutre d'Euler-Bernoulli :

$$u_z = F \frac{l_x^2 (L - l_x)}{W t^2 L^3} \quad (3)$$

Où t est l'épaisseur du pont et W sa largeur. Nous avons procédé à des simulations par la méthode d'éléments finis avec le logiciel Comsol Multiphysics. Le modèle utilisé est résumé dans la figure 1. Nous montrons dans la figure 2-a une simple comparaison entre le modèle analytique précédent "Eq. 1" donnant la déformé et les résultats de la simulation par la méthode d'éléments finis (FEA) en utilisant Comsol Multiphysics.

Il ya aussi d'autres problèmes de la réduction d'échelle et suite aux procédés de fabrication des micro-dispositifs MEMS en générale tel que les problèmes de sous gravure aux encastresments causant un gradient de contrainte et un décalage sur la déflexion au centre. D'où notre volonté d'illustrer les effets de variation des paramètres mécaniques sur des structures MEMS simples tel que les micro-ponts à section droite en utilisant une analyse par éléments finis avec le logiciel Comsol Multiphysics.



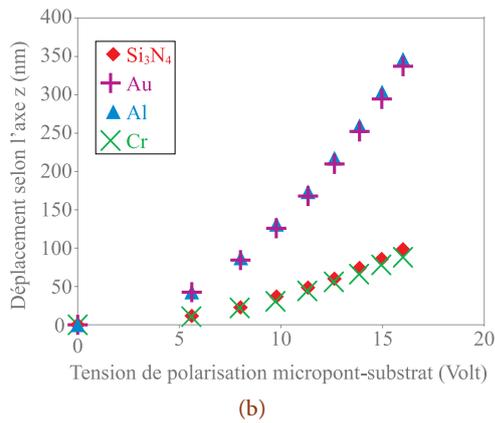


Figure 2 : (a) Déformée le long du micro-pont avec $L=400 \mu\text{m}$, $W=40 \mu\text{m}$ et $t=2 \mu\text{m}$. (b) Variation de la flèche du micro-pont en fonction de la tension électrique de polarisation.

Nous avons choisi une palette de matériaux réalistes utilisés dans les micro-ponts tels que l'aluminium, l'or, le chrome ainsi que le nitrure de silicium utilisé en tant que support mécanique à des micro-ponts et souvent recouvert de platine. Les résultats de simulation sont résumés dans la figure 2-b. Dans ce cas L est égal à $400 \mu\text{m}$, W à $40 \mu\text{m}$ ainsi que l'épaisseur du micro-pont t est égale à $2 \mu\text{m}$. On voit la variation de la flèche du micro-pont en fonction de la contrainte électrique. La distance pont-substrat (g) est égale à $3 \mu\text{m}$.

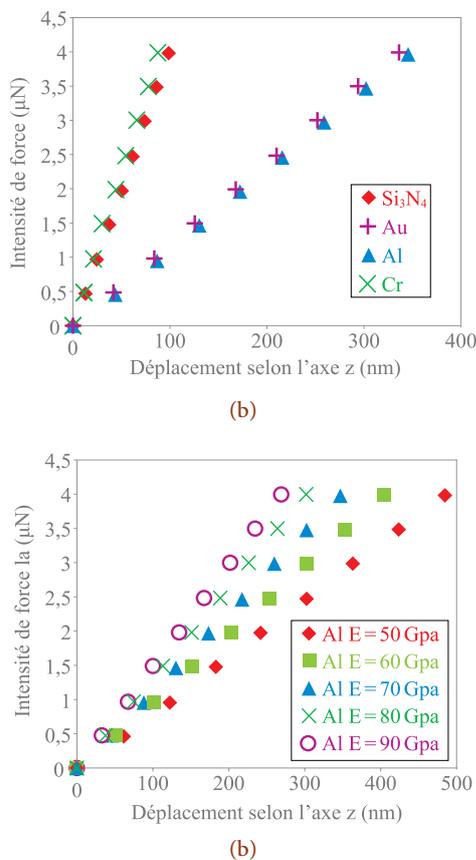


Figure 3. a) Caractéristique de la force appliquée en fonction de la flèche du micro-pont pour différents type de matériaux. b) Evolution de la caractéristique de la force appliquée en fonction de la flèche pour différente valeur du module d'Young pour l'aluminium.

Ceci nous permet aussi d'arriver à la caractéristique contrainte-déplacement de la figure 3-a. Et c'est grâce à la modélisation ainsi qu'à la simulation par la méthode d'éléments finis que nous pouvons, par exemple pour l'aluminium, suivre la variation de cette caractéristique par rapport aux variations du module d'Young. Dans le cas de la figure 2-b le module d'Young est égale 70GPa . On remarque bien les caractéristiques voisines de l'aluminium et l'or d'un côté et le chrome et le nitrure de silicium d'un autre côté. Il est clair que les caractéristiques contrainte-déplacement de la figure 3-a sont influencées par ces variations. Les dimensions choisies pour le cas de la figure 3-b sont typiques des micro-dispositifs avec un L/W égale à $400/40$ et un t égal à $2 \mu\text{m}$. Le matériau est de l'aluminium dont nous faisons varier le module de Young directement dans le menu d'entrée des caractéristiques de Comsol Multiphysics.

3.2. Les micro-ponts en vibration

Le tableau I montre des mesures obtenues pour des structures en silicium monocristallin sans tenir compte des phénomènes d'amortissement et, dans le cas particulier des micro-ponts qui nous concerne, en l'absence de contrainte interne.

Tableau 1 : Fréquence de résonance pour le mode fondamental de micro-dispositifs [9]

	Dimension du micro-dispositif ($L \times W \times t$ en μm^3)			
	$100 \times 3 \times 0.1$	$10 \times 0.2 \times 0.1$	$1 \times 0.05 \times 0.05$	$0.1 \times 0.01 \times 0.01$
Poutre	12 kHz	1.2 MHz	60 MHz	1.2 GHz
Pont	77 kHz	7.7 MHz	380 MHz	7.7 GHz

La connaissance des propriétés des matériaux de films minces avec exactitude est requise pour la maîtrise des étapes de conception et de fabrication. Il est clair que ces paramètres ne peuvent pas être déterminés à partir de films minces dans des structures de test séparées de ce matériau. Vu les dimensions des micro-dispositifs, les effets d'amortissement des vibrations, causés par l'air, est faible [10]. Les fréquences de résonance en flexion hors du plan des micro-ponts peuvent alors être assimilées à celles de leurs fréquences propres. Dans le cas précis de structures planes, une approche analytique donne les fréquences propres de résonance en flexion hors du plan [10] :

$$f_n = F \frac{\lambda_n^2}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{I_y E / (1 - \nu)}{\rho W t}} \sqrt{1 + \gamma_n \frac{\sigma}{\sigma_{cr}}} \quad (4)$$

Les valeurs de λ_n forment une série illimitée de constantes [9]. ρ étant la masse volumique et ν le coefficient de Poisson. σ est la contrainte initiale et σ_{cr} est la contrainte critique de flambement du micro-pont. γ_n est un coefficient d'ajustement sans dimension prenant une valeur différente en fonction du mode de vibration bien que certain travaux le considère constant. Nous montrons dans la figure 4 les quatre premiers modes propres ainsi que leurs fréquences à l'issue d'une simulation avec Comsol Multiphysics pour un pont en aluminium d'une longueur de $400 \mu\text{m}$, une largeur de $40 \mu\text{m}$ et une épaisseur de $2 \mu\text{m}$.

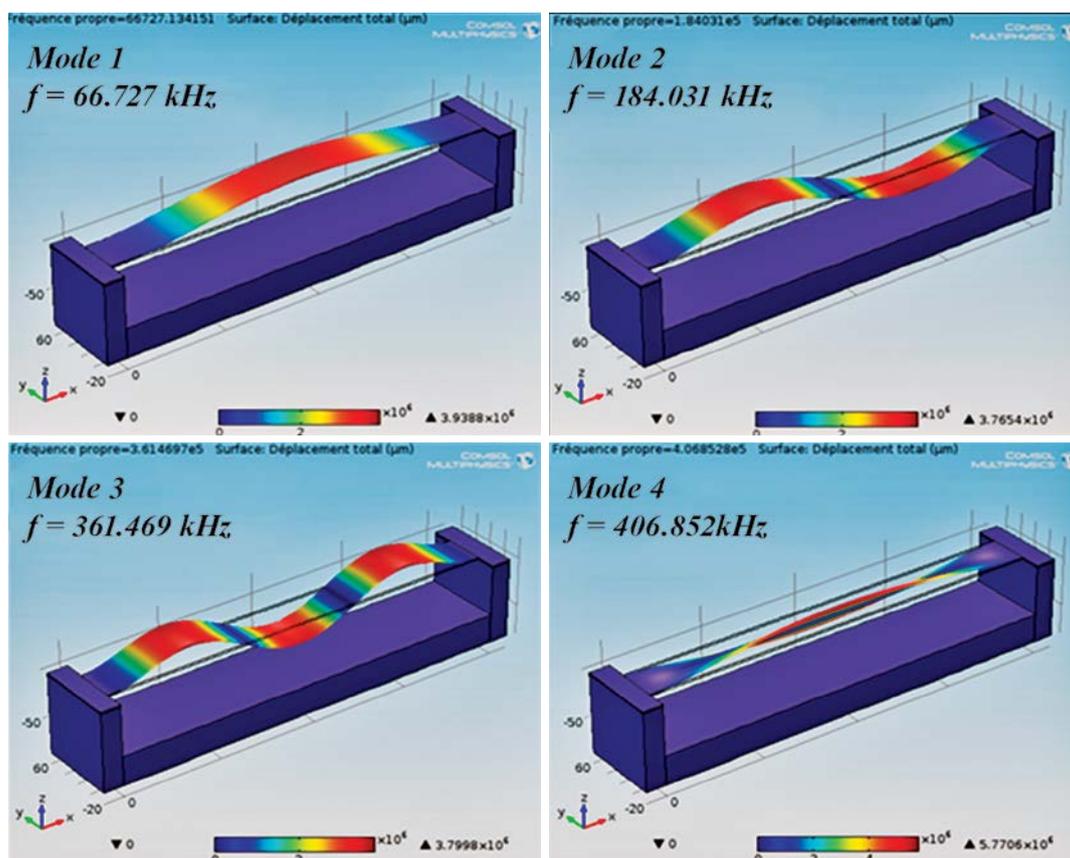


Figure 4. Visualisation des quatre premiers modes obtenue par simulation à éléments finis pour un micro-pont en aluminium ($L=400\mu\text{m}$, $W=40\mu\text{m}$ et $t=2\mu\text{m}$).

En effet, la réponse dynamique est affectée par la rigidité et la masse en même temps. Finalement, nous montrons dans le Tableau 2 les résultats de simulation par la méthode d'éléments finis pour un micro-pont dont nous avons fait varier le module d'Young. Les effets sont directement

visibles sur le décalage vers les hautes fréquences des différents modes lorsque E a tendance à augmenter. D'où l'importance de la connaissance des paramètres mécaniques a priori dans les méthodes de caractérisation vibrométrique.

Tableau 2 : Evolution de la fréquence des modes propres calculée par simulation par éléments finis en fonction de la variation du module d'Young

	E = 50 GPa	E = 60 GPa	E = 70 GPa	E = 80 GPa	E = 90 GPa
mode	Fréquence kHz				
1	56.394	61.777	66.727	71.334	75.661
2	155.534	170.379	184.031	196.737	208.671
3	305.498	334.656	361.469	386.427	409.867
4	343.853	376.672	406.852	434.943	461.327

4. CONCLUSION

La méthodologie d'identification des paramètres mécanique avec la combinaison de mesures statiques et dynamiques de caractérisation d'une part et la méthode d'éléments finis d'autre part est devenue une nécessité. Notre but était d'illustrer sur un modèle simple de micro-pont la sensibilité des paramètres fonctionnels tels que la flèche et les fréquences de résonances aux variations des paramètres géométriques et mécaniques. Ceci nous oblige à approfondir cette approche afin d'intégrer les modèles directement dans les processus de caractérisation-conceptions.

Les simulations numériques par la méthode d'éléments finis permettent directement d'explorer les effets de la variation des paramètres mécaniques et mêmes géométriques sur les résultats des méthodes de caractérisations expérimentales. Il faut comprendre que la modélisation par la méthode d'éléments finis est un outil important pour l'étude de méthodes expérimentales afin de déterminer les limites de leurs validités sous certaines conditions. Ce travail rentre dans le cadre d'un PNR domicilié à Université Saad Dahlab Blida Juin 2011- Juin 2013 et porté par le Dr. A. Hassen-Bey.

RÉFÉRENCES

1. Belgroune, N., Bourouina, H., Khalès, H., Hassein-Bey, A., Yahiaoui, R. (2012) *Proc. JEAFFD'2012*, 7984-.
2. Gorecki, C. et al. (2004) *Proc. SPIE*, 5543, 6369-.
3. Yahiaoui, R., (2002) *Thèse de Doctorat, Université de Paris-Sud, France*.
4. Bosseboeuf, A., Dupeux, M., Boutry, M., Bourouina, T., Bouchier, D., Debarre, D. (1997) *Microsc. Microanal. Microstruct.*, 8, 261272-.
5. Bosseboeuf, A., Gilles, J. P., Danaie, K., Yahiaoui, R., Dupeux, M., Puissant, J.P., Chabrier, A., Fort, F., Coste, P., (2000) *Proc. SPIE*, 3825, 123133-.
6. Lu, Y., Chivukula, V., Wang, M., Ji, H.F. (2006) *J. Micromech. Microeng* 16, 692698-.
7. Martins, P. Béclin, S., Stojanovic, S., Malhaire, C. (2007) *Microsyst. Tech.*, 13,14951500-.
8. Bonnotte, E, Delobelle, P., Bornier, L., Trolard, B., Tribillon, G. (1997) *J. Mater. Res.*,12, 22342248-.
9. R., Bosseboeuf, A., Yahiaoui, R., Petitgrand, S. (2001) *Science, technique et application*, 301, 581-593
10. Vlassak, J.J., Mater W. D. (1992) 12, 32423249-
11. Holmfelder, R.J., Luo, H., Vlassak, J.J., Chidsey, C.E.D., Nix., W.D. (1997) *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, 436, 115120-.
12. Tahei, N., Mohammadi, N., Shahidi, N. (2000) *Polymer testing* 19, 959966-
13. Volpicelli, M., Deutsch, E. R., Senturia, S.D. (1999) *Proc. Transducers*, 920923-