



STRATEGIES D'OBTENTION D'UNE ONDE PROGRESSIVE DANS UN MILIEU ELASTIQUE EN VUE DE L'ACTIONNEMENT D'UNE MICROPOMPE

HERNANDEZ Camilo, BERNARD Yves, RAZEK Adel
LGEP Laboratoire de Génie Electrique de Paris, Paris, France
LGEP/SPEE Labs; CNRS UMR8507; Supelec; Univ. Pierre et Marie Curie-P6; Univ. Paris Sud-P11

camilo.hernandez@lgep.supelec.fr, bernard@lgep.supelec.fr, razek@lgep.supelec.fr,

Résumé

Afin d'innover dans le domaine de la mécanique et après une étude bibliographique de l'état de l'art actuel des micro-systèmes de pompage, on cherche à mettre en œuvre un nouveau concept de micropompe qui résolve en plusieurs aspects les faiblesses des architectures traditionnelles. Cet article porte sur la simulation numérique de la partie électromécanique du système d'actionnement de la micropompe. Cet actionnement repose sur le principe d'un mouvement à onde progressive dans un milieu élastique excité par des céramiques piézoélectriques. Dans cet article, le processus de modélisation de la structure d'actionnement est décrit en trois étapes principales : L'étude des principes physiques de chaque composant, l'intégration des équations dans une seule expression et sa solution par un algorithme numérique. Trois approches pour l'obtention d'une onde progressive sont ensuite étudiées.

Mots Clés. (Onde progressive, micropompe, piézoélectrique)

Parmi les différentes façons de classifier les micropompes [1] [2], on choisit un classement dépendant de la présence de valves. Deux groupes principaux ressortent alors. Celui où les micro pompes utilisent des valves pour diriger le flux et celui pour lequel il n'y a pas de valve. Dans les deux catégories on distingue encore des subdivisions. Pour les architectures possédant des valves, on différencie les dispositifs utilisant des valves actives (valves actionnées par des forces extérieures) et les dispositifs qui se servent de valves passives (valves actionnées par la direction du flux). Du côté des géométries à valve absente; on retrouve les pompes péristaltiques et les pompes de type Nozzle/Diffuser. Chacune de ces subdivisions présente des caractéristiques plus ou moins adaptées aux applications (biologie, électronique, chimie, etc). On souligne ainsi, la fiabilité, la simplicité mais le faible rendement des pompes sans valve, et le rendement, mais la complexité et la fiabilité réduite des pompes incluant des valves.

Dans ce cadre, on propose une architecture de micro pompe qui surmonte les déficiences des architectures mentionnées précédemment. On présente alors une structure d'usinage facile (miniaturisable), sans retour de flux et présentant une faible consommation d'énergie. Comme avantages additionnels, son fonctionnement est peu dépendant du fluide à pomper et sa géométrie peut être adaptée à l'application visée.

Le principe de fonctionnement du dispositif est basé sur un mouvement péristaltique continu des parois du réservoir de fluide afin de créer un flux. Ce mouvement est généré par l'action d'une onde progressive induite dans une lame métallique vibrante qui transmet son mouvement à un canal

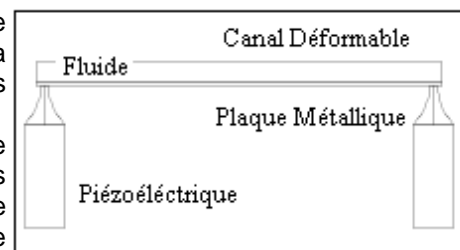


Figure 1

déformable contenant le fluide (figure 1). C'est ainsi qu'on propose un système d'actionnement composé de deux transducteurs piézoélectriques et d'une lame utilisés pour obtenir la dynamique souhaitée (figure 1). La suite de cet article expose la mise en équations des principes mécaniques et piézoélectriques qui décrivent la physique de chacun des composants ainsi que le couplage dans une expression qui exprime la dynamique de l'ensemble.

SYSTEME PROPOSE

Le système est constitué de deux céramiques piézoélectriques collées aux extrémités d'une lame métallique. Un premier transducteur piézoélectrique est utilisé comme générateur de vibrations sur la plaque. Le deuxième transducteur placé de l'autre côté de la poutre est utilisé comme élément complémentaire qui pourra être utilisé comme un deuxième actionneur ou comme amortisseur en fonction de la stratégie d'utilisation choisie.

STRATEGIES D'OBTENTION D'UNE ONDE PROGRESSIVE

Une onde progressive est un phénomène par lequel l'énergie produite par une perturbation est transmise d'un point à un autre sans déplacement de matière. Une onde progressive apparaît donc naturellement dans les plaques d'épaisseur non nulle soumises à des vibrations [3]. Néanmoins, la progressivité de l'onde disparaît lorsque l'onde rencontre un milieu différent et qu'elle se réfléchit. Une onde stationnaire se forme alors.

Les géométries qui nous intéressent sont celles pour lesquelles il n'y a pas de réflexion de l'onde progressive lorsqu'elle rencontre la fin du guide d'onde.

Trois architectures sont envisageables.

Pour une plaque semi-infinie par exemple, la solution à l'équation de propagation d'onde dans des milieux élastiques est par nature de forme progressive car les réflexions ont lieu à l'infini. Cependant cette solution n'est pas applicable à un système réel.

Une autre approche, est d'utiliser l'amortissement interne du guide d'onde pour dissiper l'énergie de l'onde appliquée avant que celle-ci arrive à l'extrémité d'une plaque finie.

La dernière stratégie est d'utiliser le deuxième matériau piézoélectrique comme moyen d'absorption de l'onde progressive. Ainsi, l'énergie de l'onde est dissipée par une charge électrique branchée au deuxième transducteur.

DISSIPATION D'ENERGIE PAR AMORTISSEMENT INTERNE DU GUIDE D'ONDE

Afin d'analyser cette approche, une étude des équations fondamentales de la déformation d'une poutre lorsque elle est en vibration transversale s'avère nécessaire.

Le mouvement transversal u d'une poutre élastique orientée suivant x s'exprime par l'équation suivante [4] :

$$E \cdot I \frac{\partial^4 u}{\partial x^4} + \rho \cdot A \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = f(t) \quad \text{Équation 1.}$$

Où E représente le module de Young, I le moment quadratique, ρ la masse volumique, A la surface transversale de la poutre et f la force appliquée dans la direction du mouvement.

L'équation 1 est valable si le niveau de dissipation du système est faible, les effets d'amortissement y sont négligés. Pourtant, cette hypothèse doit être vérifiée expérimentalement.

L'intégration des phénomènes d'amortissement est réalisée par la discrétisation de l'équation 1 par la méthode des éléments finis qui amène au système matriciel suivant :

$$[M] \left\{ \ddot{u} \right\} + [K] \{u\} = \{f\} \quad \text{Équation 2}$$

On utilise ensuite le concept d'amortissement proportionnel énoncé par Rayleigh [5] qui modélise l'amortissement comme une combinaison linéaire de $[M]$ et $[K]$:

$$[C] = \alpha [M] + \beta [K] \quad \text{Équation 3}$$

Pour laquelle α et β sont des constants d'amortissement qui peuvent être trouvées expérimentalement. Le système final devient alors :

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{f\} \quad \text{Équation 4}$$

L'allure de la propagation d'une onde pour ce système est montrée en figure 2. On y observe une onde progressive décroissant exponentiellement dans le temps.

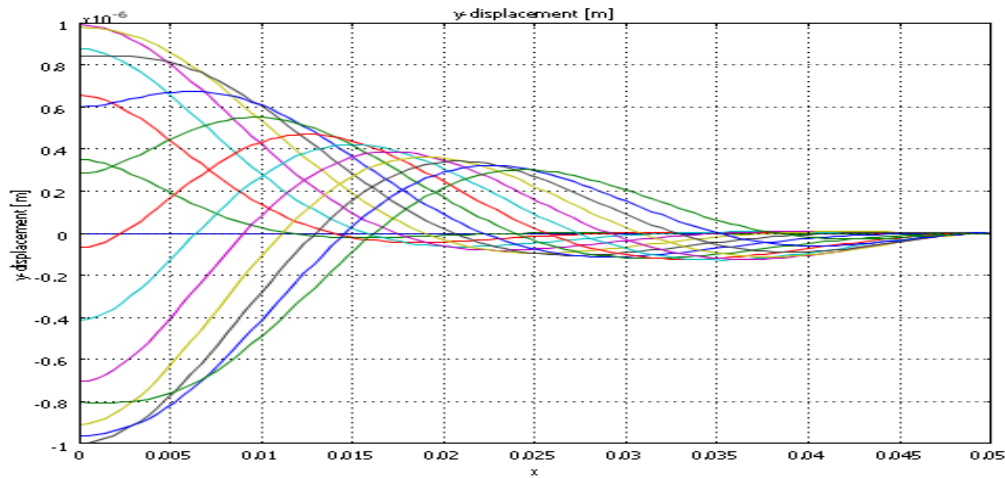


Figure 2

DISSIPATION D'ENERGIE PAR UNE CHARGE CONNECTEE AU DEUXIEME TRANSDUCTEUR

Les équations de la piézoélectricité lient la contrainte T , la déformation relative S , le champ électrique E , l'induction électrique D , par la compliance s^E , la constante de piézoélectricité d et permittivité ε^T sont :

$$S^T = s^E \cdot T^T + d \cdot E^T \quad \text{Équation 5}$$

$$D^T = d \cdot T^T + \varepsilon^T \cdot E^T$$

Afin d'ajouter l'effet d'un matériau piézoélectrique qui agit comme amortisseur au bout de la poutre, il faut modifier le modèle matriciel présenté précédemment. La force exercée par le transducteur piézoélectrique est exprimée à partir des équations constitutives.

$$F_3 = \frac{u_3 \cdot A}{s_3^E \cdot l} - \frac{d_{33} \cdot A \cdot V}{s_3^E \cdot l} \quad \text{Équation 6}$$

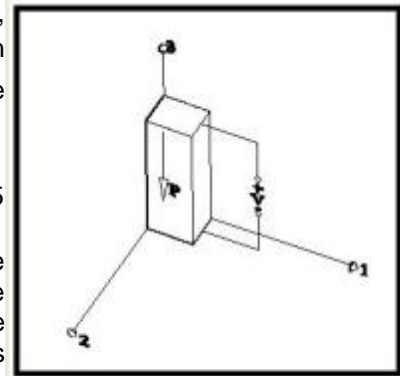


Figure 3

Cette expression est introduite dans le système matriciel de la poutre pour les zones en contact avec le transducteur :

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + \left[K + \frac{A}{s_3^E \cdot l} \right] \{u\} - \left[\frac{d_{33} \cdot A}{s_3^E \cdot l} \right] \{V\} = \{f\} \quad \text{Équation 7}$$

La résolution de ce système dépend fortement de la charge connectée. Pour une charge R-L et une excitation sinusoïdale, on obtient :

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C - K_1 \cdot K_4] \{\dot{u}\} + \left[K + \frac{A}{s_3^E \cdot l} - K_1 \cdot K_3 \right] \{u\} = \{f\} \quad \text{Équation 8}$$

Avec $K_1 = \frac{A \cdot d_{33}}{s_3^E \cdot l}$, $K_2 = (C_0 - C_0 \cdot k_{33}^2)$, $K_3 = \frac{(-K_1 \cdot \omega^2 \cdot RL) \cdot (R + \omega^2 \cdot K_2 \cdot RL)}{(R + \omega^2 \cdot K_2 \cdot RL)^2 + (\omega L)^2}$ et

$$K_4 = \frac{(K_1 \cdot \omega^2 \cdot RL)(L)}{(R + \omega^2 \cdot K_2 \cdot RL)^2 + (\omega L)^2}$$

L'allure de l'onde progressive à différents instants est montrée en figure 4

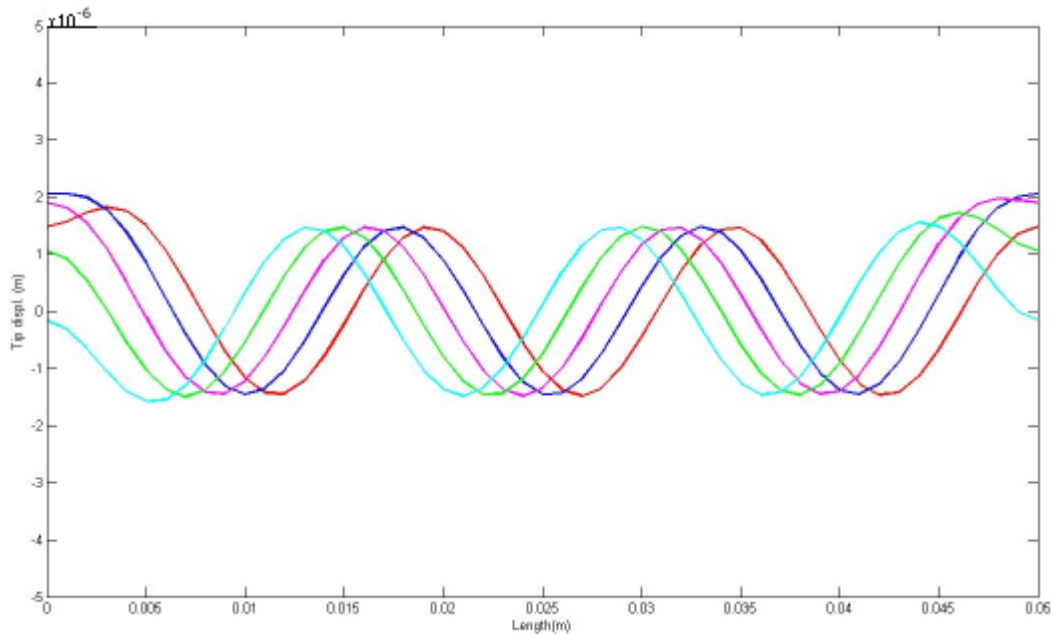


Figure 4

CONCLUSION

Un code éléments finis a été développé pour étudier la dynamique d'une poutre en vibration en vue d'utiliser un mouvement à onde progressive comme moyen d'actionnement d'une micropompe péristaltique continue. Trois approches conduisant à l'obtention de cette onde progressive ont été considérées, des calculs ont mené à la résolution des équations différentielles. Les résultats de ces travaux sont utilisés pour établir les rapports entre les différents paramètres physiques des composants du système d'actionnement et les grandeurs de sortie (vitesse de propagation de l'onde, force générée par la poutre, puissance consommée, etc) afin de mettre au point les paramètres de la micropompe.

REFERENCES

- [1] SANTIAGO J.G. LASER D.J., A review of micropumps, J. Micromech. Microeng. Volume 14 (2004) R35–R64
- [2] WOIAS P., Micropumps past, progress and future prospects. Sensors and Actuators B: Chemical, Volume 105, Issue 1, 14 February 2005, Pages 28-38.
- [3] NOGAREDE B., Moteurs piézoélectriques, Techniques de l'ingénieur, traité génie électrique, D3 765, 06/1996.
- [4] GRAFF K. F., Wave motion in elastic solids, Dover publications Inc, New York
- [5] DE SILVA C. W, Vibration: Fundamentals and Practice, Boca Raton: CRC Press LLC, 2000