



**HAL**  
open science

## Bistabilité d'une poutre flambée. Modélisation thermomécanique d'un microsysteme

Gatien Fleury, Sylvain Drapier, Roland Fortunier, Pierre-Louis Charvet

► **To cite this version:**

Gatien Fleury, Sylvain Drapier, Roland Fortunier, Pierre-Louis Charvet. Bistabilité d'une poutre flambée. Modélisation thermomécanique d'un microsysteme. 7e colloque national en calcul des structures, CSMA, May 2005, Giens, France. hal-01812946

**HAL Id: hal-01812946**

**<https://hal.science/hal-01812946>**

Submitted on 12 Jun 2018

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Public Domain

---

# Bistabilité d'une poutre flambée

## Modélisation thermomécanique d'un microsysteme

**Gatien Fleury\*\*\* — Sylvain Drapier\*\*\* — Roland Fortunier\*\*  
— Pierre-Louis Charvet\***

\* *LETI, Laboratoire d'Electronique et Technologie de l'Information,  
CEA Grenoble*

*17, Rue des Martyrs 38054 Grenoble cedex (France)*

*{gatien.fleury, pl.charvet}@cea.fr*

\*\* *Dpt Packaging et Supports Souples, Centre Microélectronique de Provence*

*« Georges Charpak »,*

*Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne,*

*Avenue des Anémones, 13541 Gardanne (France)*

*fortunier@emse.fr*

\*\*\* *Dpt Biomatériaux et Mécanique – Centre Ingénierie et Santé,*

*Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne*

*158, cours Fauriel 42023 Saint-Etienne Cedex 02 (France)*

*drapier@emse.fr*

---

*RÉSUMÉ. Nous avons réalisé une étude thermomécanique par éléments finis afin de valider le fonctionnement d'un micro-commutateur bistable commandé par dilatation thermique. Ce fonctionnement repose d'une part sur le flambage d'une micro-poutre sous l'action de contraintes résiduelles de dépôt et d'autre part sur l'utilisation séquentielle de deux types d'actionneurs thermiques situés pour les uns dans l'axe de la poutre au niveau de ses encastremets, et pour les autres, parallèlement à la poutre dans le châssis où elle est encastrée.*

*ABSTRACT. We achieved a thermomechanical study with finite elements, in order to validate the operation of a bistable microswitch thermally actuated. This operation relies, on one hand, on the buckling of a micro-beam under residual stress from different thin films and, on the other hand, on the sequential use of two types of thermal actuators located for the first type within the axis of the beam by its clampings, and for the others, parallel to the beam in the frame where it is clamped.*

*MOTS-CLÉS : Analyse thermomécanique, Bistabilité, Contraintes résiduelles, Flambage, MEMS, Modèle éléments finis, Non linéarité géométrique*

*KEYWORDS: Thermomechanical analysis, Bistability, Residual stress, Buckling, MEMS, Finite elements model, Geometrical non-linearity.*

---

## 1. Introduction

Les microsystèmes sont des objets dont la taille peut varier de quelques microns à quelques millimètres. Grâce à cette petite taille, il est possible d'une part de fabriquer simultanément un grand nombre de prototypes et d'autre part de les mouvoir, les sculpter à l'aide de phénomènes physiques dont la mise en oeuvre à l'échelle macroscopique requiert des énergies considérables ou est simplement impossible. Nous avons choisi d'exploiter les contraintes résiduelles de dépôt (Hu, 1991) en faisant flamber une poutre afin de réaliser un dispositif qui possède deux positions stables, *i.e.* bistable, c'est-à-dire deux positions autour desquelles le dispositif revient après une sollicitation extérieure de faible amplitude. Un tel dispositif qui possède deux positions stables est, par exemple, utilisé pour réaliser des micro-commutateurs optiques (Hichwa et al., 2002), des micro-relais (Que et al., 2004), des micro-commutateurs électriques (Receveur et al., 2004), des capteurs de force (Saif, 2000), ou même des micro-valves (Wagner et al., 1996). Pour notre part, l'application envisagée pour ce MEMS bistable est de type micro-commutateur électrique. Nous présentons dans cette communication le fonctionnement du système bistable que nous sommes en train de développer et le modèle par éléments finis utilisé pour valider son fonctionnement.

## 2. Description et fonctionnement du système bistable

Notre dispositif est constitué d'une poutre qui flambe et fléchit dans une position préférentielle sous l'action conjuguée de contraintes résiduelles axiales de compression et de moments de flexion appliqués par les actionneurs thermiques 2 (cf. Figure 1.) au niveau de son encastrement sur le châssis.

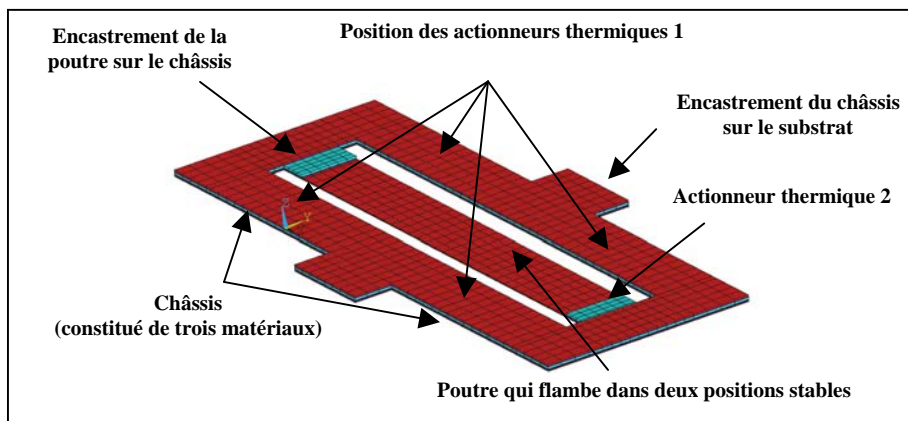
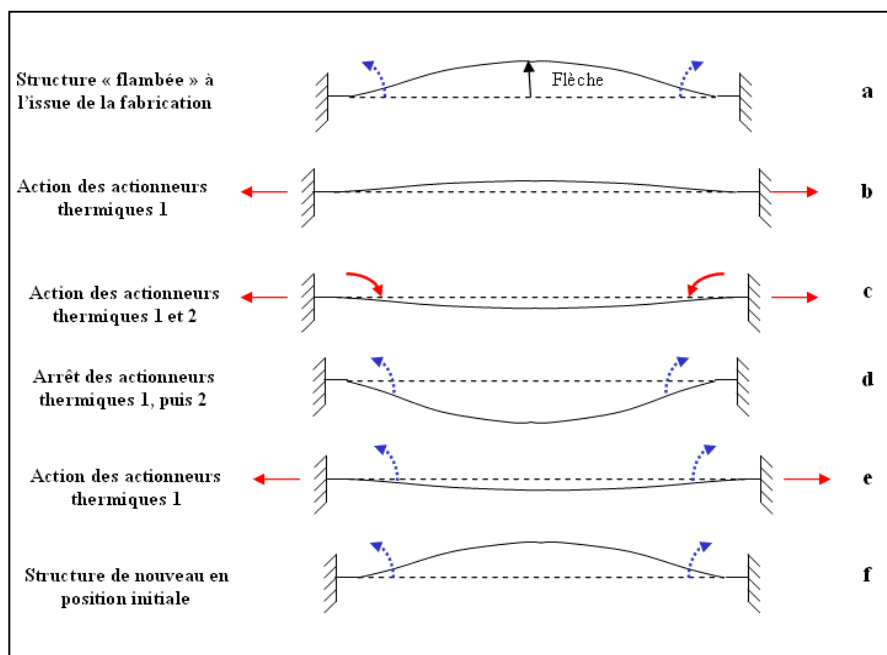


Figure 1. Description du micro-commutateur

Au cours de sa fabrication, notre dispositif accumule de l'énergie de déformation sous la forme de contraintes résiduelles. Pour éviter d'atteindre des contraintes qui dépasseraient la limite de rupture du matériau lors du passage d'une position de stabilité à l'autre (Figure 2-b), nous avons mis au point un dispositif constitué d'une première paire d'actionneurs thermiques (« Actionneurs thermiques 1 » des Figures 1. et 2.) qui relâchent la majorité des contraintes internes de la poutre lors de cette transition. Cette dernière (Figure 2-c) se fait par effet bilame grâce à une deuxième paire d'actionneurs thermiques, appelés « Actionneurs thermiques 2 » sur les Figures 1. et 2., placée au dessus de la poutre.



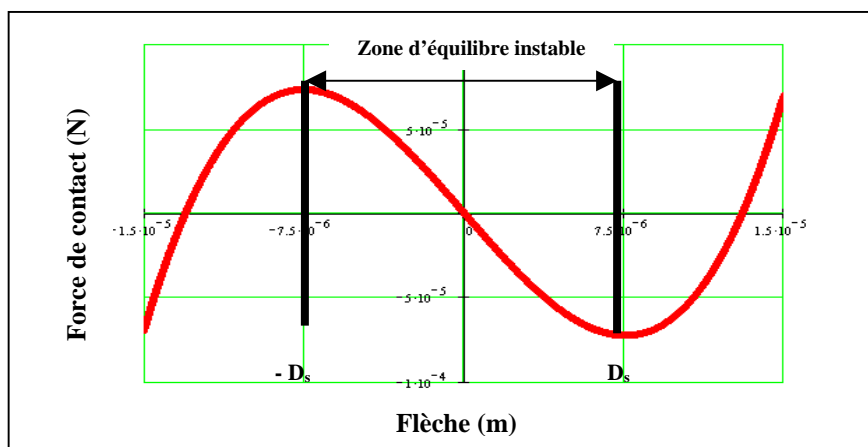
**Figure 2.** Séquence de commutation du système

Lorsqu'ils ne sont pas actifs, ces actionneurs thermiques 2 vont exercer un moment de rappel vers le haut (flèches en pointillés Figure 2-a et -d à -f) qui va privilégier la position de stabilité du haut. Ces actionneurs vont donc, par leurs contraintes résiduelles, permettre un retour dans la position initiale lorsque les actionneurs thermiques 1 seront enclenchés seuls (Figure 2-e et -f).

Pour réaliser un prototypage rapide du système, nous avons tout d'abord élaboré le modèle analytique présenté brièvement dans la partie suivante.

### 3. Intérêts et limites du modèle analytique.

Le modèle utilisé pour obtenir les résultats analytiques est une adaptation de (Saif, 2000). Ce modèle permet notamment de montrer que notre composant possède des équilibres instables pour des flèches comprises entre  $-D_s$  et  $D_s$  (cf. Figure 3.) pour une configuration géométrique et des matériaux donnés. Par ailleurs, il nous permet de tracer la valeur de la force de contact  $R$  (force transversale appliquée par la poutre sur une surface placée en vis-à-vis) en fonction de la flèche de la poutre comme représenté sur la Figure 3., et de quantifier en énergie l'équilibre de la poutre pour différentes configurations.



**Figure 3.** Force de contact  $R$  en fonction de la flèche de la poutre

Ce modèle est basé sur l'hypothèse que le système bistable est parfaitement symétrique. Nous l'avons donc utilisé pour réaliser le dimensionnement du système sans les actionneurs thermiques 2, car il est flexible et rapide. Mais, comme il ne permet pas d'incorporer les actionneurs 2 qui dissymétrisent le système, nous avons eu recours à l'analyse par éléments finis qui est présentée dans la partie suivante pour étudier l'influence des actionneurs thermiques placés au niveau des encastremets de la poutre sur l'équilibre du système.

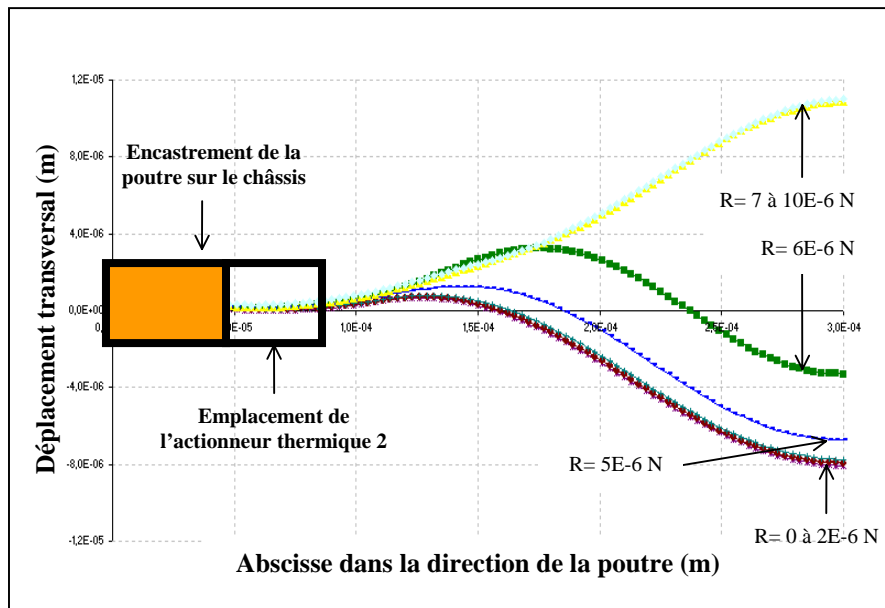
### 4. Méthodologie et résultats de l'analyse par éléments finis.

Notre analyse par éléments finis a été réalisée avec le code commercial ANSYS®. Notre analyse se décompose en deux temps.

Dans un premier temps, nous introduisons l'état de contrainte mesuré expérimentalement dans tous les matériaux utilisés dans notre système. Ces mesures ont été effectuées par la méthode de Stoney, qui consiste à mesurer la déformation

d'un substrat à l'issue du dépôt que l'on veut caractériser ; la formule utilisée et ses hypothèses sont rappelées dans (Klein, 2000). Pour cette méthode, l'état de contrainte de chaque matériau est considéré homogène, biaxial dans le plan du substrat. Nous nous sommes placés dans l'hypothèse où nos dépôts ne présentaient pas de contrainte dans la direction perpendiculaire au substrat. Nous calculons ensuite l'équilibre qui s'établit après le relâchement partiel des contraintes résiduelles dans le microsysteme. La contrainte initiale appliquée sur la poutre correspond à une force axiale nettement supérieure à la première charge critique d'Euler. L'équilibre qui s'établit fait ainsi apparaître le premier mode de flambement de la poutre, si l'incrément de charge utilisé lors du calcul est choisi suffisamment faible. Le résultat de ce premier calcul correspond à l'état du microsysteme à la fin de la fabrication.

Dans un deuxième temps, nous testons la bistabilité de notre microsysteme en appliquant une succession de chargements thermiques correspondant à la séquence résumée dans la Figure 2. Cependant, afin de quantifier la stabilité de la configuration testée, nous appliquons une force transversale au milieu de la poutre (notée  $R$  sur la Figure 4.) en accroissant progressivement son intensité au lieu d'utiliser les actionneurs thermiques 1 pour retrouver la position stable initiale (on supprime donc les étapes -e et -f de la séquence de la figure 2.).



**Figure 4.** Résultats de l'analyse par éléments finis

## 6. Conclusion et perspectives

Nous avons présenté ici l'analyse mécanique utilisée pour le développement d'un composant bistable de type micro-commutateur électrique réalisé par des technologies de micro-fabrication collective. Un modèle analytique, qui n'est pas détaillé ici, a été utilisé pour réaliser la sélection de quelques configurations clés qui représentent des compromis entre stabilité des équilibres et surface d'occupation d'un composant sur un substrat de silicium. Cependant, ce modèle analytique ne permettait pas de tester la bistabilité de configurations comprenant des actionneurs thermiques placés aux encastresments de la poutre.

L'analyse par éléments finis présentée dans cette communication nous a permis de valider d'une part le principe de fonctionnement du dispositif en quantifiant notamment l'influence de ces actionneurs thermiques situés aux encastresments de la poutre, et d'autre part le modèle analytique utilisé pour réaliser le prototypage de nos micro-commutateurs. Cette analyse a confirmé la faisabilité de ce type de composant, en montrant que nous avons des tolérances acceptables pour sa fabrication. Les premiers composants issus de cette analyse sont attendus en fin d'année 2005.

## 7. Bibliographie

- Hichwa B. Maxer C., Gale M., Brevet WO 02/075428 A1, Bi-stable Micro switch., 2002
- Hu S. M., « Stress-related problems in silicon technology », *J. Appl. Phys.* 70 (6), 1991, p.53-80
- Klein C. A., « How accurate are Stoney's equation and recent modifications », *J. Appl. Phys.* 88 (9), 2000, p 5487-5489
- Que L., Udeshi K., Park J., Gianchandani Y. B., « A bi-stable Electro-Thermal RF Switch for High Power Applications », *Proc. IEEE MEMS 2004 Conference*, 2004, p. 797-800.
- Qui J., Lang J. H., Slocum A. H., « A curved-beam Bistable Mechanism », *J. Microelectromech. Syst.*, Vol. 13, n°2, 2004, p. 137-146.
- Receveur R.A.M., Marxer C., Duport F., Woering R., Larik V., De Rooji N. F., « Laterally moving Bi-stable MEMS DC-switch for biomedical applications » , *Proc. IEEE MEMS 2004 Conference*, 2004, p. 854-856.
- Saif M. T. A., « On a tunable Bistable MEMS-Theory and Experiment », *J. Microelectromech. Syst.*, Vol. 9, n°2, 2000, p. 157-170.
- Wagner B., Quenzer H. J., Hoerschelmann S., Lisec T., Juerss M., « Bistable microvalve with pneumatically coupled membranes », *Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems Conference*, 1996, p. 384-388.