



Étude, conception et réalisation en technologie MEMS d'un commutateur mécaniquement bistable

G. Fleury

*Thèse préparée au CEA-LETI, Grenoble,
en collaboration avec l'École des Mines de Saint-Étienne*

Sous la direction:

- **CEA-LETI** : Pierre-Louis Charvet (DIHS/LCRF)
- **École des Mines** : Sylvain Drapier (CIS)
Roland Fortunier (CMP-GC)

Introduction

- I -** Etat de l'art des switches MEMS
- II -** Principe des prototypes développés
- III -** Modélisation des dispositifs
- IV -** Fabrication et caractérisation des prototypes

Conclusion et perspectives

Introduction :

Utilisation et élaboration des MEMS

– Définitions :

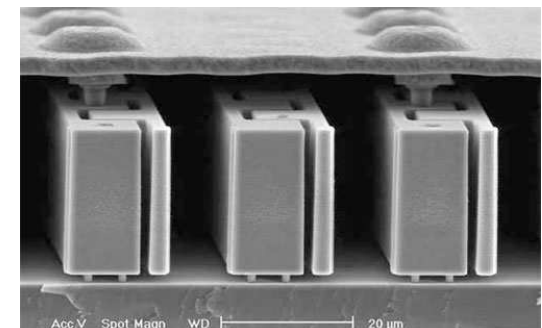
- **MEMS** : Micro Electro Mechanical System

– Particularités :

- Composants micro- ou millimétrique (typiquement: 1 mm^2)
- Fonctionnement et fabrication « **multiphysique** »

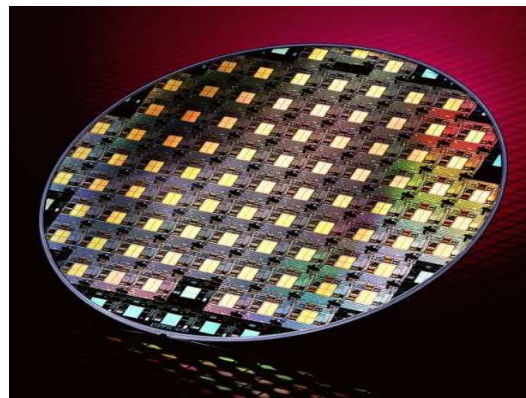
– Exemple de réalisation :

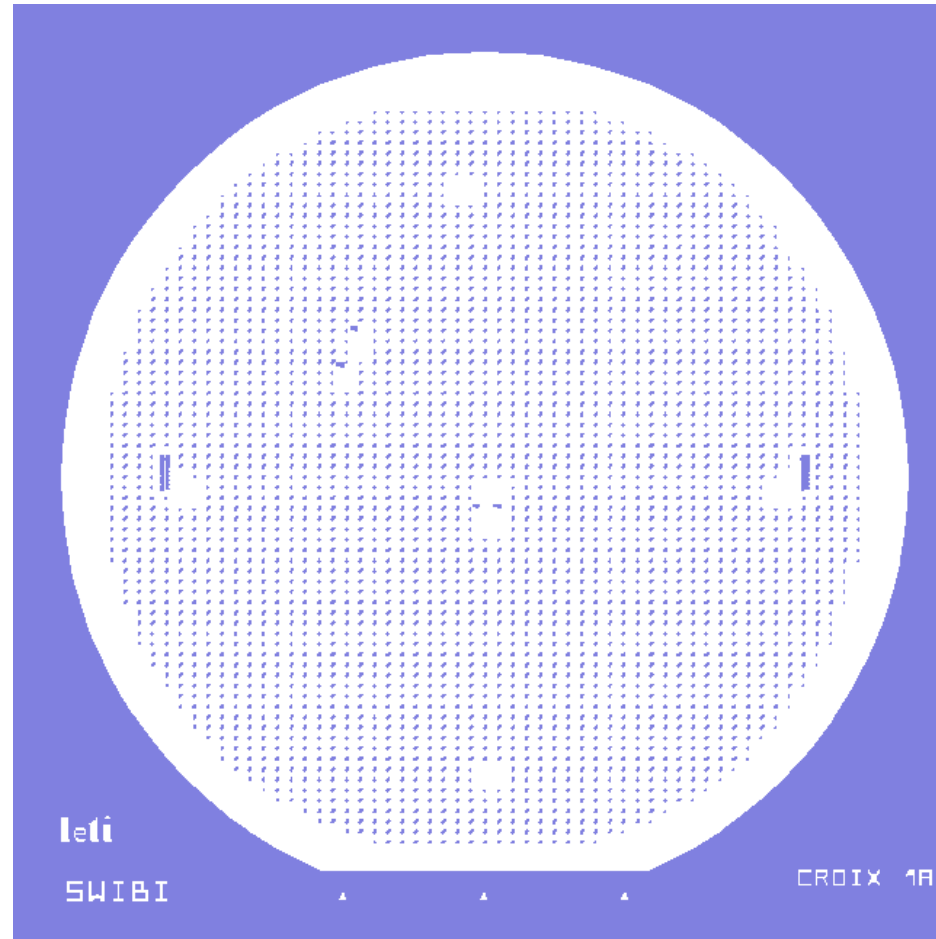
- **Capteurs** (chimique, de pression, d'accélération...),
- **Actionneurs** (micro-moteurs, micro-miroirs, commutateurs)



Accéléromètre

- **Avantage :**
 - Fabrication collective d'un grand nombre de prototypes éventuellement différents (28 dans notre cas).
 - Ex: ~ 2000 puces sur une plaquette Silicium ($\phi=100\text{mm}$)
- **Inconvénient :**
 - Maturité (comparée aux composants microélectroniques)





Masque de photolithographie

Introduction - Les MEMS mécaniquement bistables

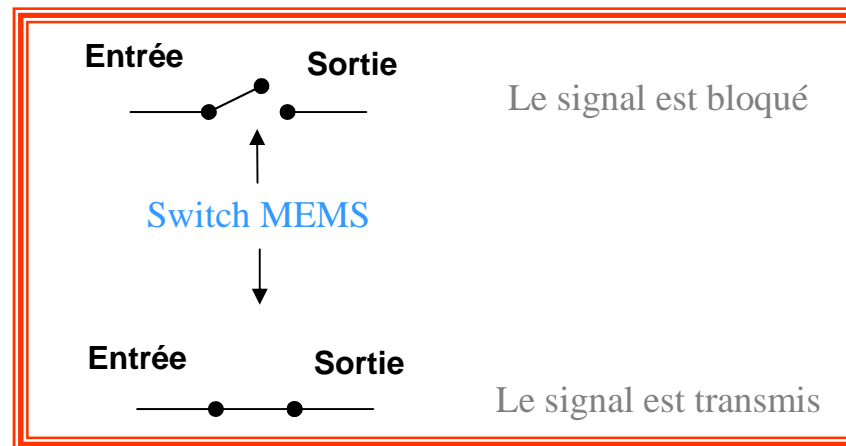
- **Définition** d'un MEMS bistable:
 - Microsystème à **deux positions** qui ne nécessite **pas l'utilisation d'une source d'énergie extérieure** lorsqu'il est dans l'une de ses positions.
- **Exemples d'applications :**
 - Valve (micro-fluidique),
 - Commutateur optique,
 - **Commutateur électrique** (ce travail).

Partie I :

État de l'art des switches MEMS

I - Principes des switches MEMS

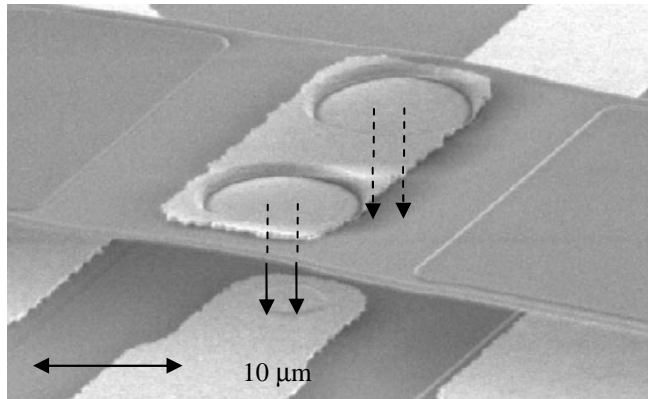
- **Fonction** : pouvoir ouvrir ou fermer un circuit électrique afin de diriger un signal continu (DC) ou alternatif (AC)



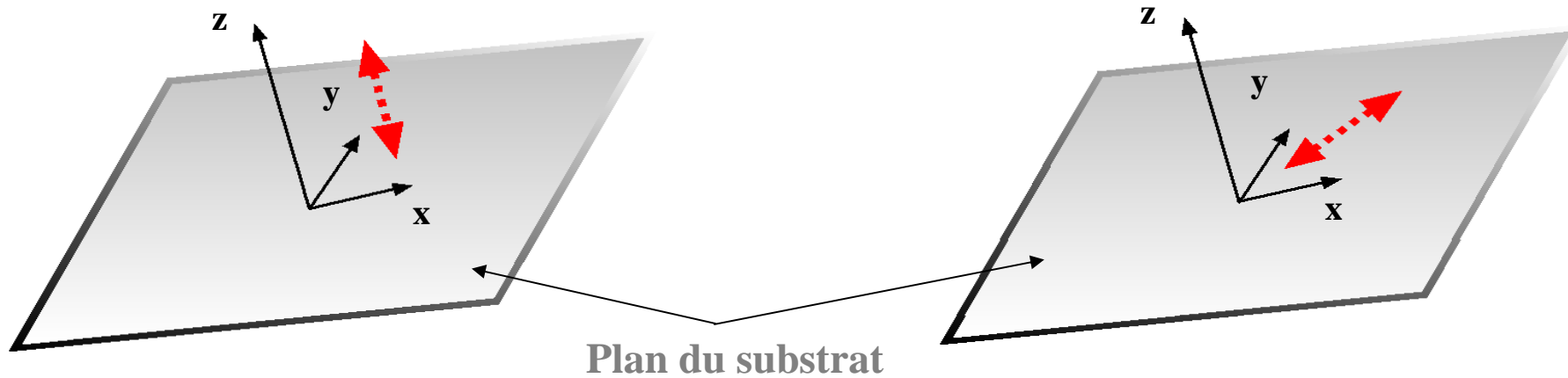
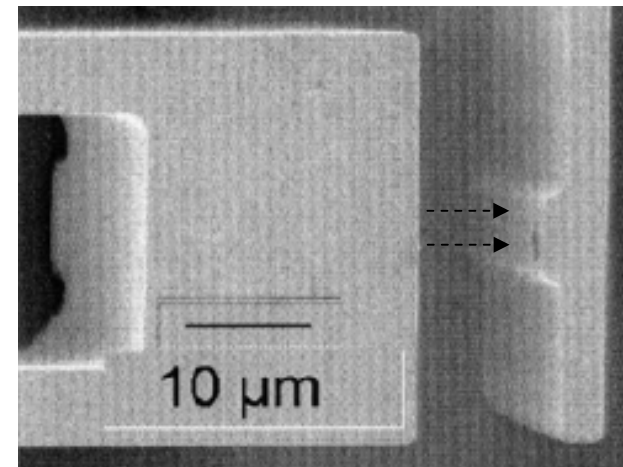
- **Secteurs d'application** : biomédical, télécommunication, défense.
- **Concurrents** : diodes PiN et transistors CMOS (microscopique), switches coaxiaux (macroscopique).
- **Avantages** : performances pour les signaux RF (pertes d'insertion, linéarité et isolation), taille, fabrication collective, faible consommation...
- **Inconvénients** : maturité et éventuellement coût...

I - Les deux types de contact ohmique

Contact de **type hors plan**
(déplacement vertical)

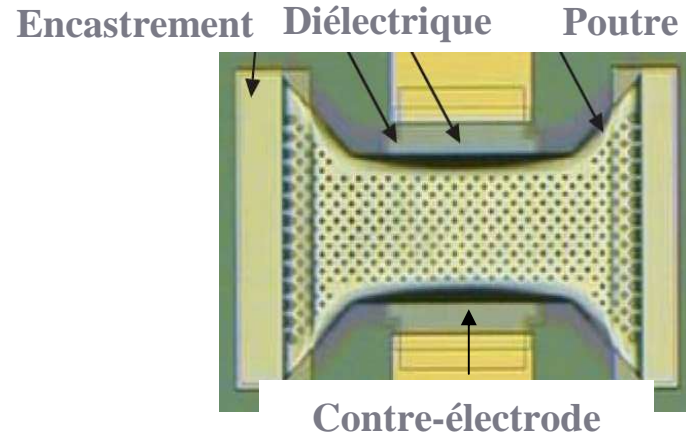


Contact de **type latéral**



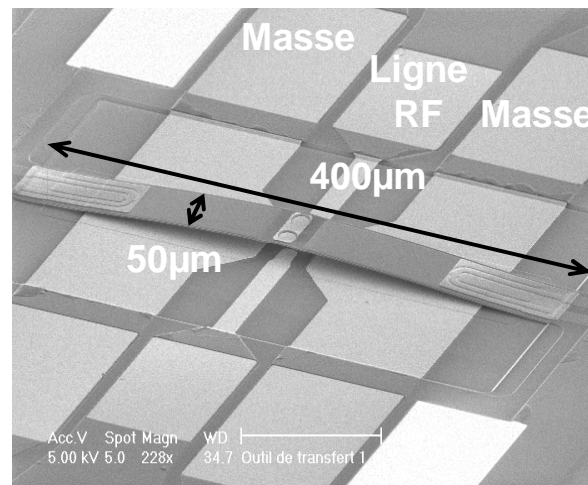
I - Les switches monostables

- Switch à **actionnement électrostatique**



C. Goldsmith et Al., IEEE μ wave and Guided Wave Letters 8 (8), 269-271 (1998).

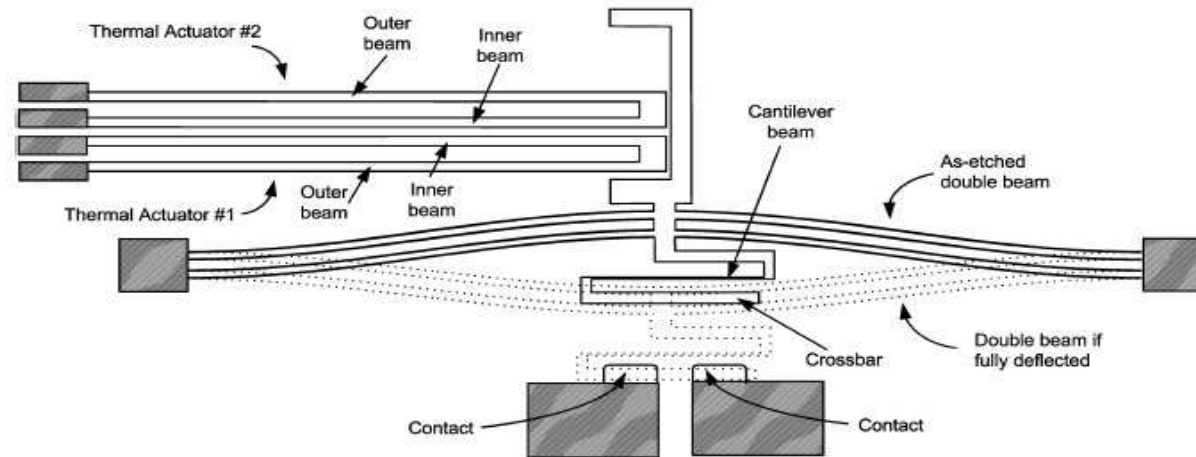
- Switch à **actionnement thermique** et **maintien électrostatique**



P. Robert et Al., IEEE Transducers'2003

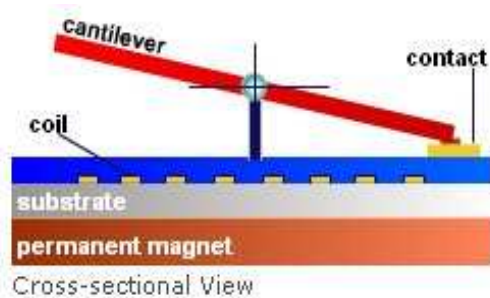
I - Les switches bistables

- **Maintien mécanique, contact latéral**

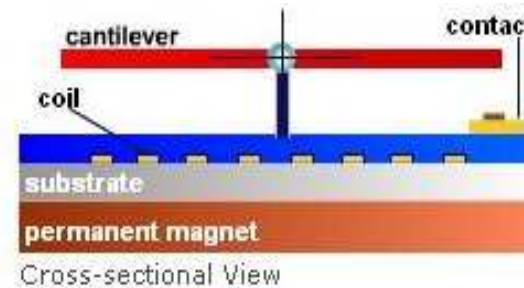


Qiu, PhD, MIT, 2003

- **Maintien magnétique, contact hors plan**



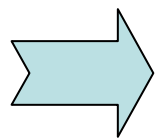
Actionnement de la bobine
du dessous



www.magfusion.com

I - Limites de l'état de l'art

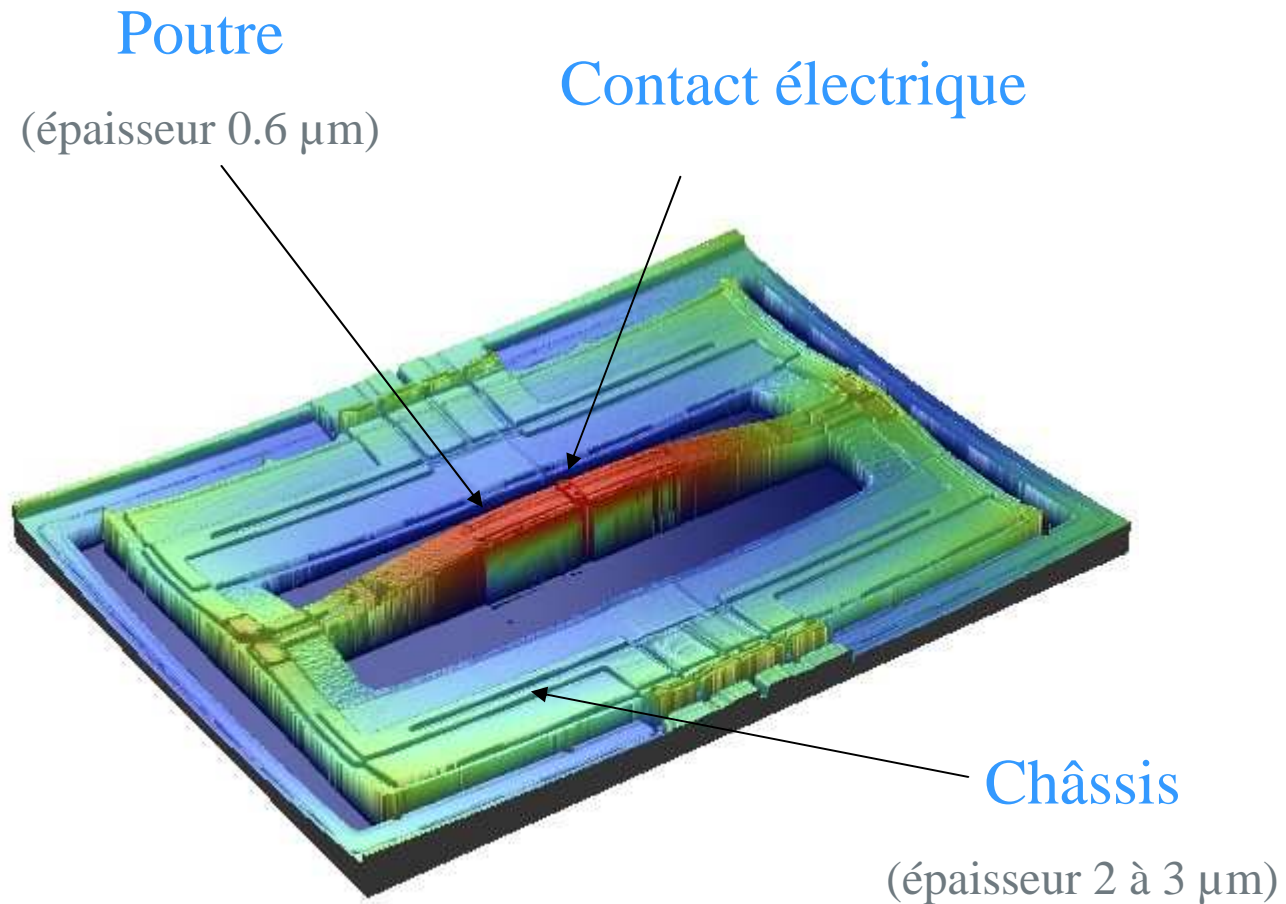
- Architectures **monostables** :
 - source d'alimentation en continu nécessaire pour le maintien en position,
 - problème de **chargement des diélectriques** lors du maintien électrostatique.
- Architectures **bistables** :
 - intégration de **matériaux magnétiques** (long et coûteux),
 - **contact** de type **latéral** (mauvaise résistance électrique).



**Architecture mécaniquement bistable,
comportant un contact de type plan**

Partie II :

Principe des prototypes développés

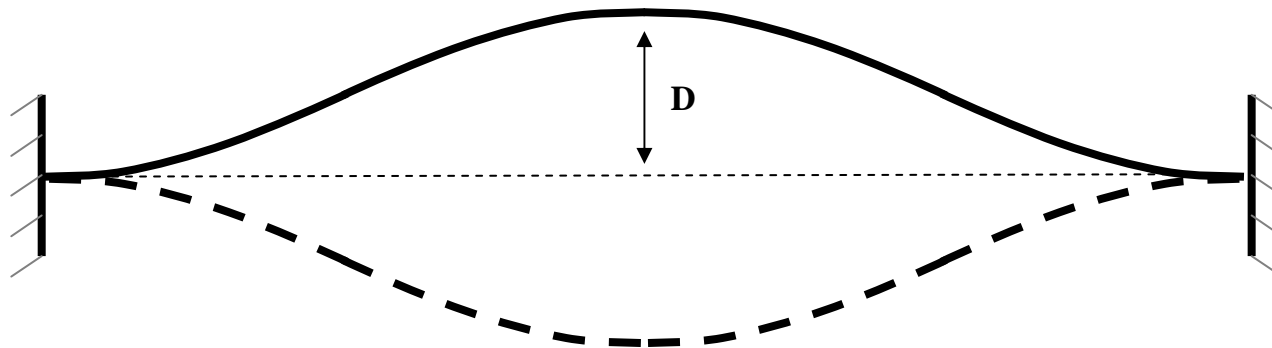


Veeco (profilomètre optique)

Bistabilité obtenue par la mise en compression d'une poutre :



Pour $\sigma_0 > \sigma_{\text{crit}}$:



- Origine liée aux procédés de dépôts des couches minces
- Léger pilotage possible par les paramètres de dépôt (puissance, pression, fréquence...)

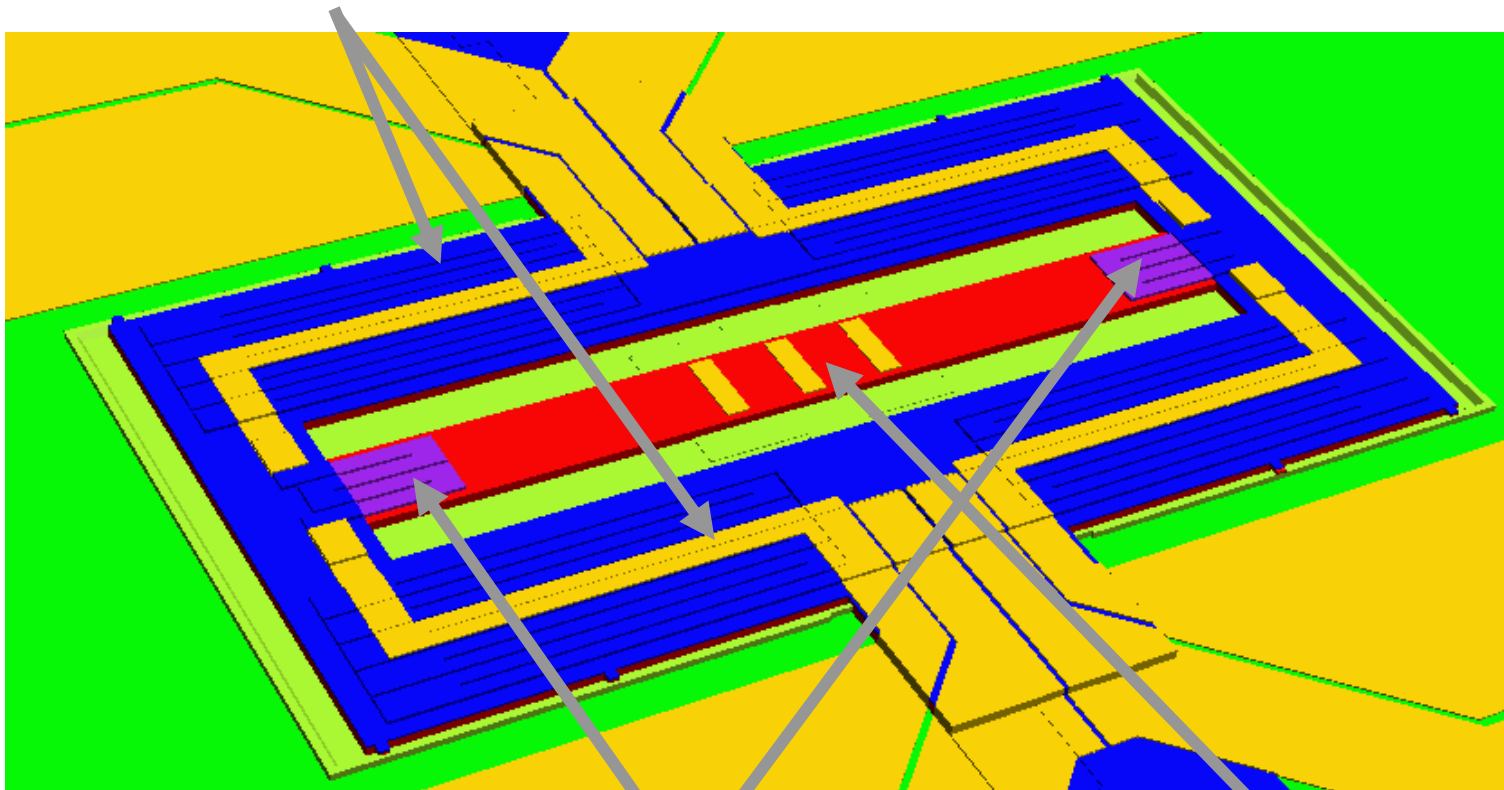
Hypothèse simplificatrice



Méthode de courbure

$$\underline{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma & 0 & 0 \\ 0 & \sigma & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{(0, \bar{x}, \bar{y}, \bar{z})}$$

Actionneurs thermiques **Type 1** (sur le châssis)

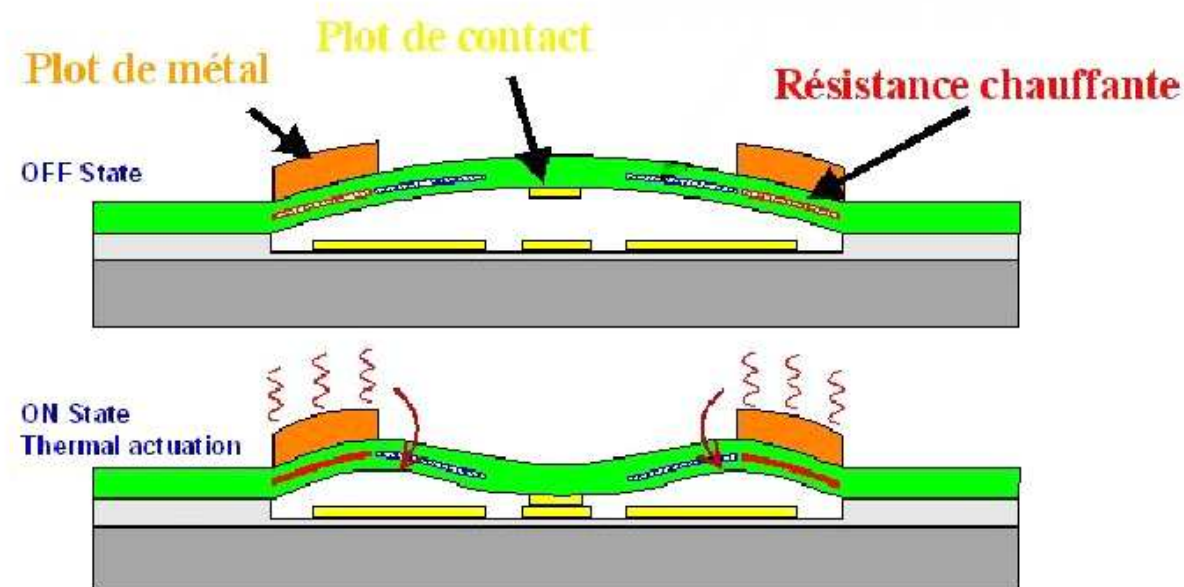


Actionneurs thermiques **Type 2** (sur la poutre)

Poutre

II – Principe du « bilame thermique »

- **Actionnement thermique** : deux matériaux de **coefficients de dilation thermique différents** et de module d'Young du même ordre de grandeur sont chauffés (principe du bilame)

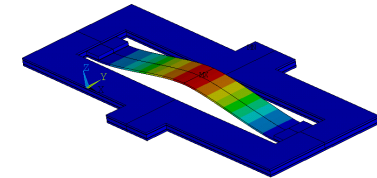
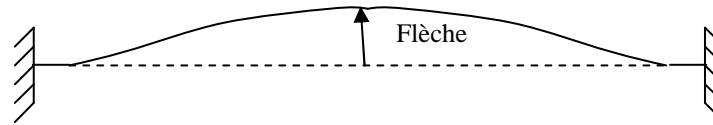


Ex.: commutateur électrique à actionnement thermique et maintien électrostatique.

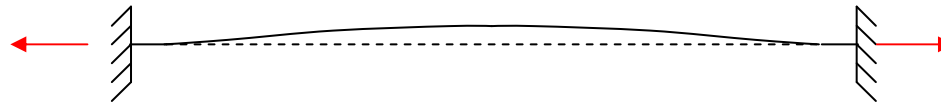
P. Robert et Al., Transducers'2003

II – Séquence de commutation

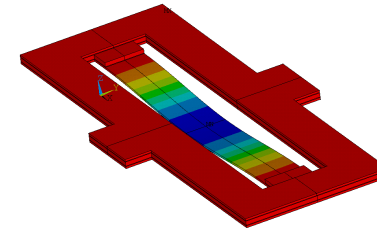
Structure « flambée » à l'issue de la fabrication



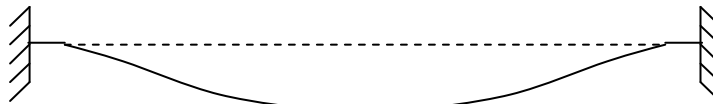
Action des actionneurs thermiques 1



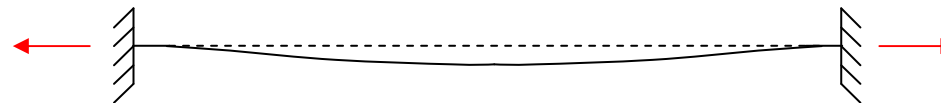
Action des actionneurs thermiques 1 et 2



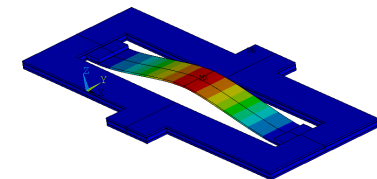
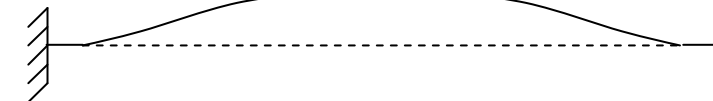
Arrêt des actionneurs thermiques 1, puis 2



Action des actionneurs thermiques 1

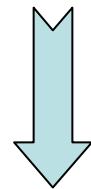
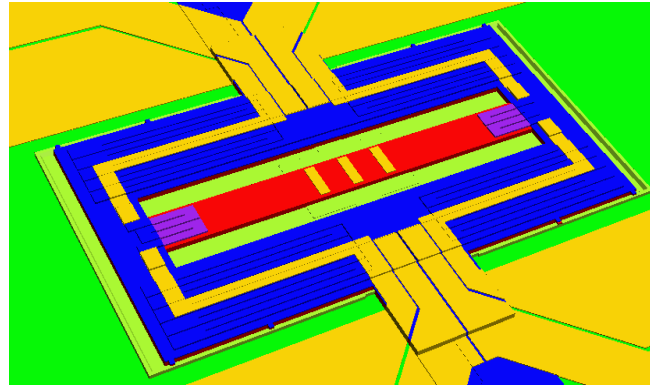


Structure de nouveau en position initiale

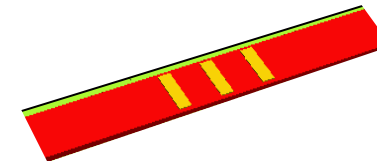
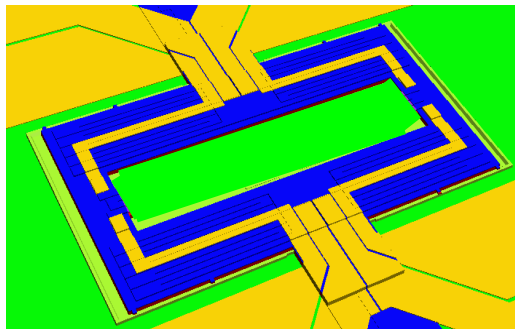


Partie III

Modélisation du dispositif



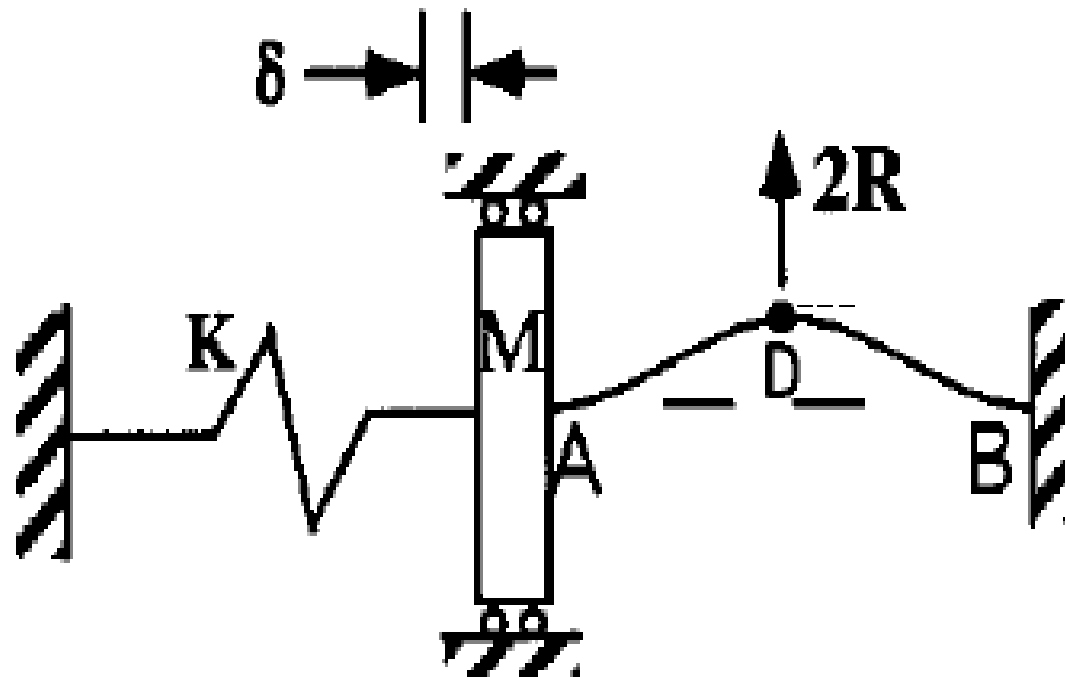
Rigidité poutre \ll Rigidité châssis



Redistribution des contraintes à la libération

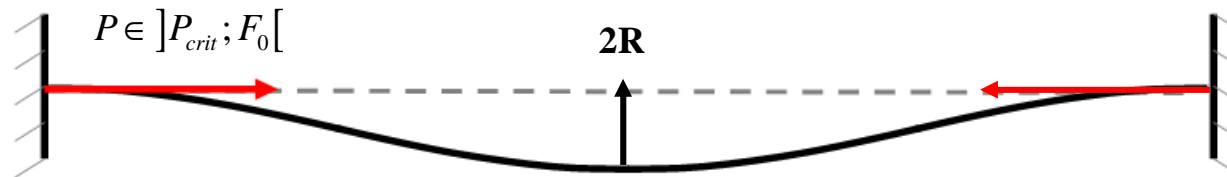
Modification des C. L

- Force axiale F appliquée par un actionneur de rigidité K .
- Force transversale $2R$ au milieu de cette poutre.



M. T. A. Saif, J. of MEMS 9 (2), 157-170 (2000)

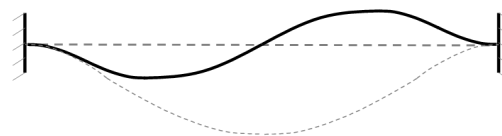
- Développement du cas où la force axiale provient des contraintes résiduelles.



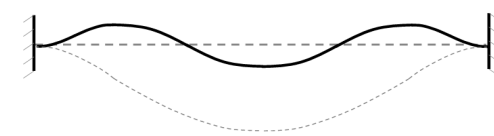
- Détermination de la limite du modèle (formation d'un mode de flambement de type 2 ou 3)



mode 1

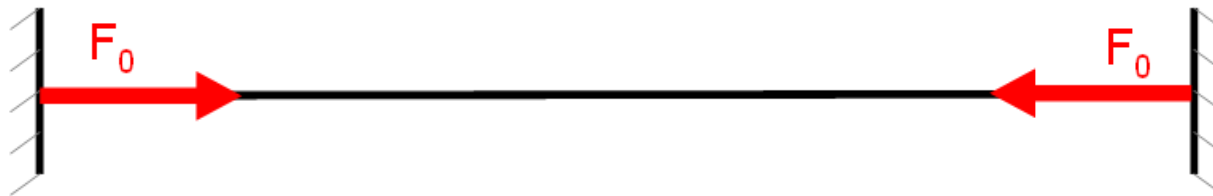


mode 2

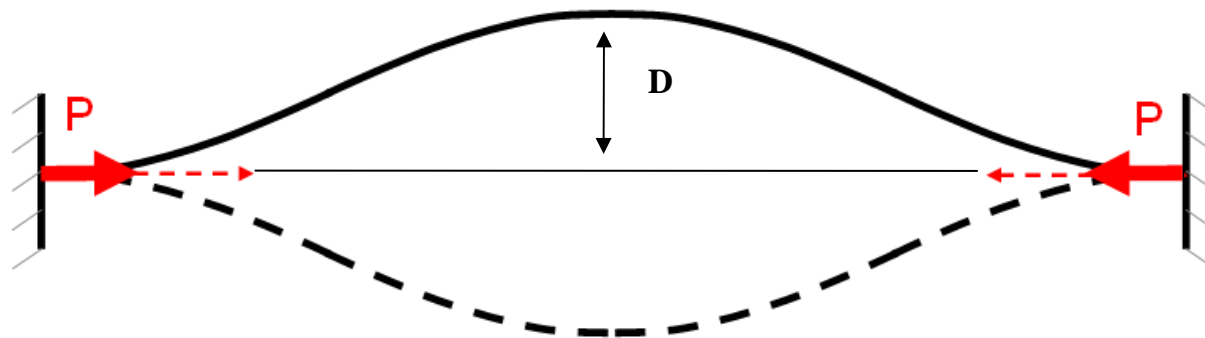


mode 3

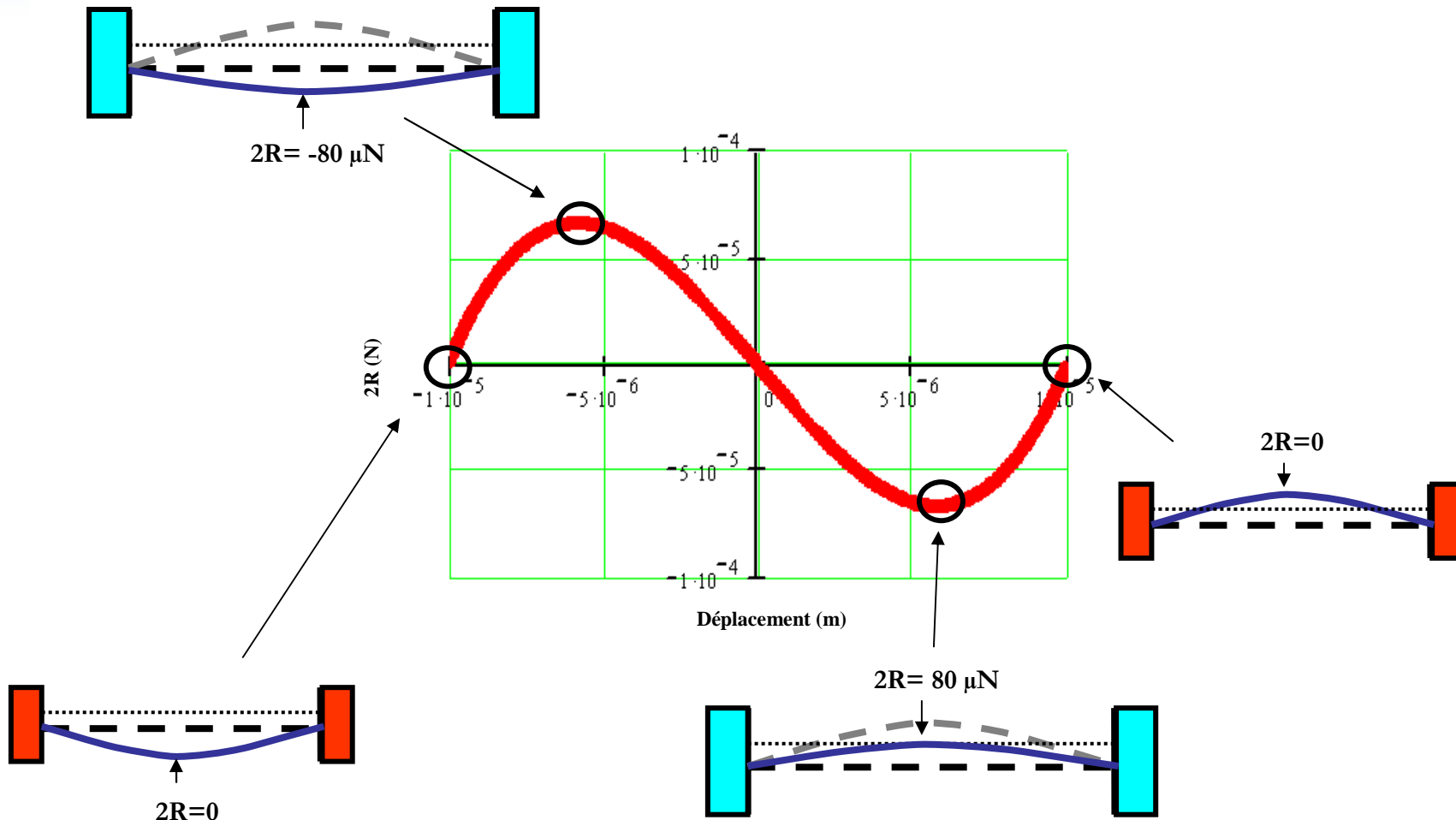
- Les contraintes résiduelles σ_0 exercent une force F_0 aux encastremements de la poutre.



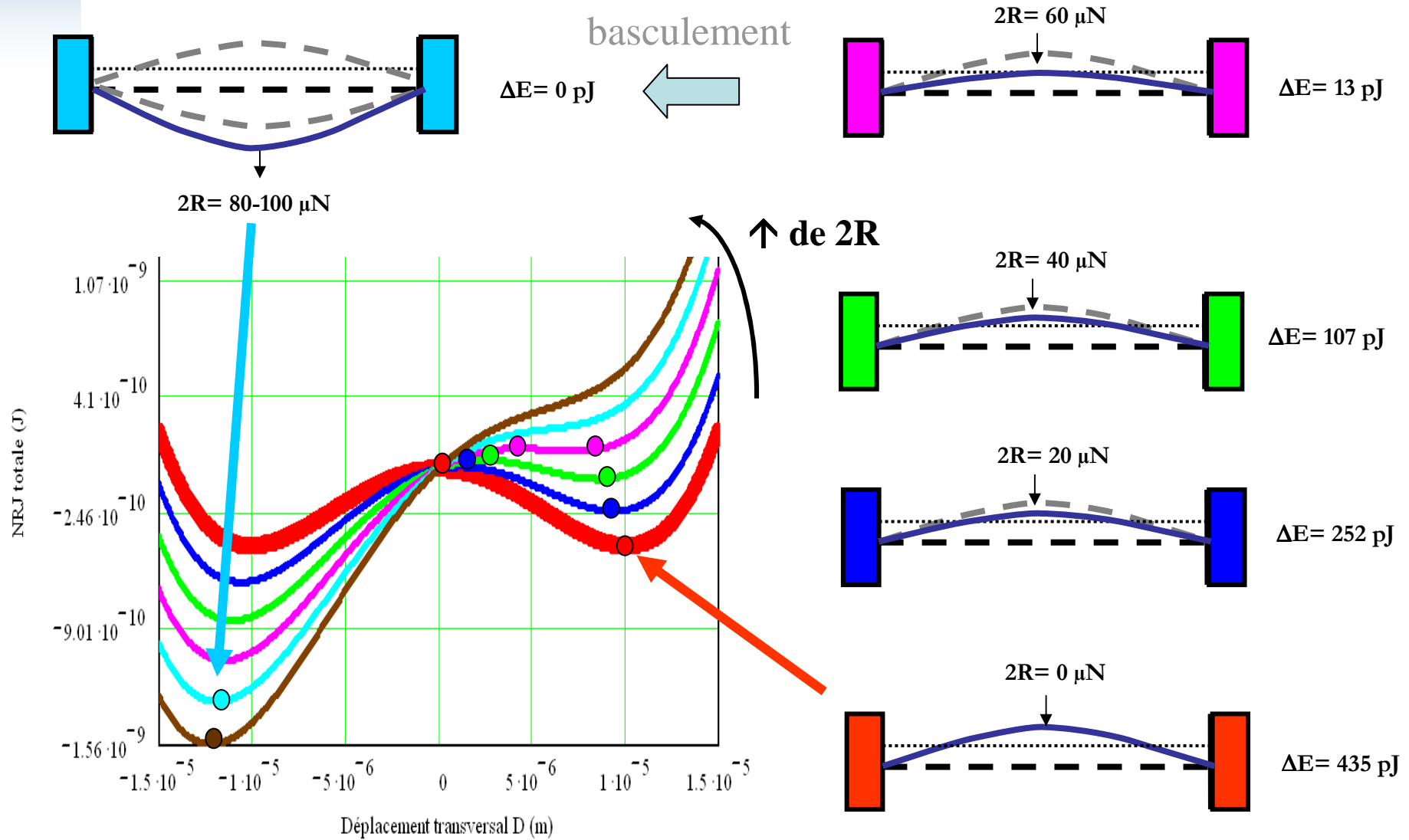
- Si $F_0 > P_{\text{crit}}$, cette force F_0 est relâchée lors de l'allongement de la poutre dû au flambement



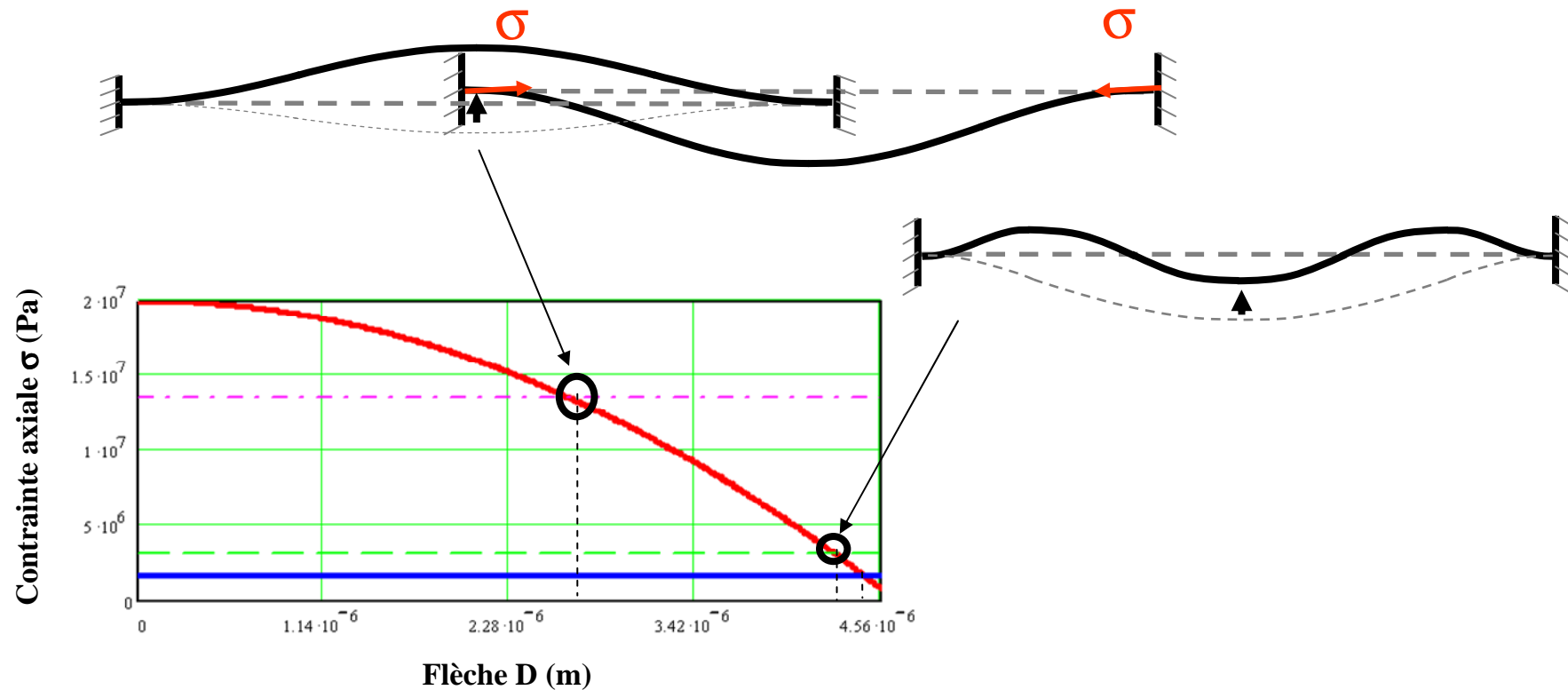
- Calcul de la force de contact du composant (mode 1)



III – Calcul stabilité selon un critère énergétique

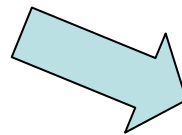


- Risque de mode supérieur avec l'augmentation de la force transversale $2R$:



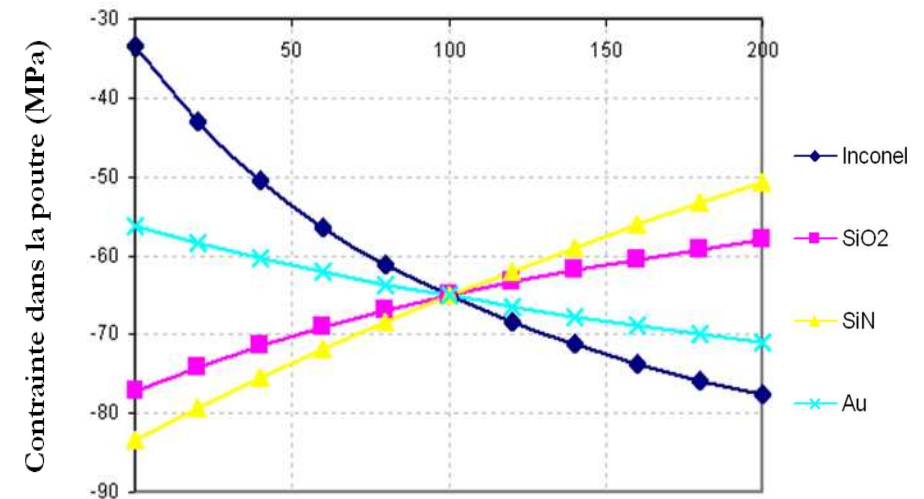
Différents dépôts du châssis :

N°	Dépôt	e (μm)	σ_0 (MPa)
1	SiO2 « Low Stress »	0,55	-70
2	SiN HF	0,1	450
3	Inconel	0,8	150
4	SiN HF	0,1	450
5	Cr/Au	0,6	80
6	SiO2 « Low Frequency »	0,55	-200



Pilotage possible de la **contrainte axiale** de la poutre (fonction de l'épaisseur, matériaux...) lors de la libération

Variation de l'épaisseur du dépôt (%)



Avantages :

- Permet de prévoir la force de contact maximale et la longueur de la zone de bistabilité.
- Etude paramétrique rapide

Inconvénient:

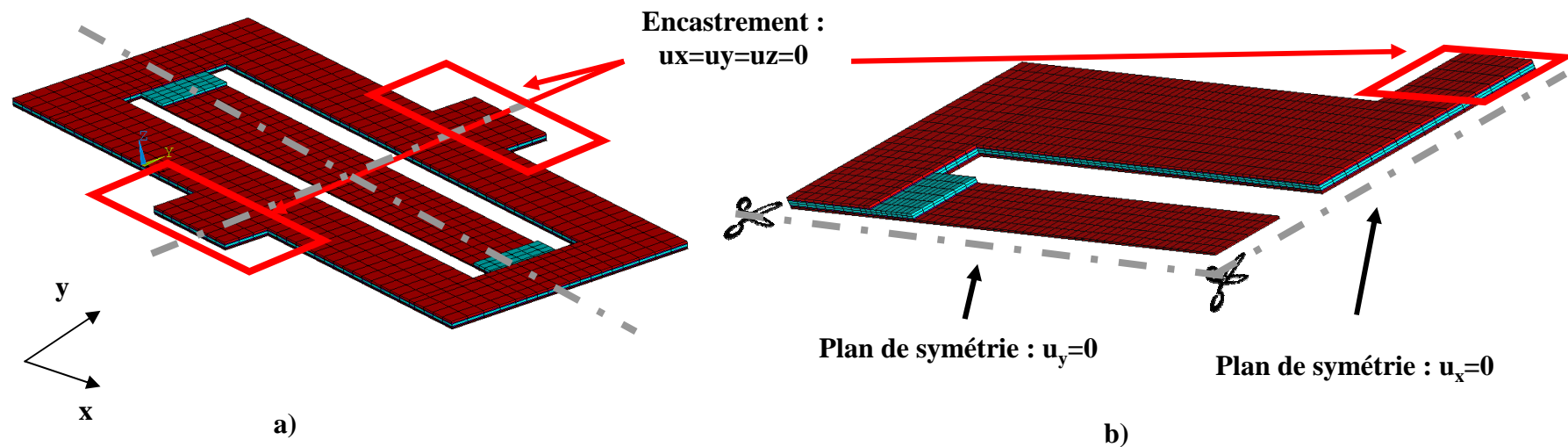
- Géométrie simple symétrique sans actionneurs aux encastremements (1D)



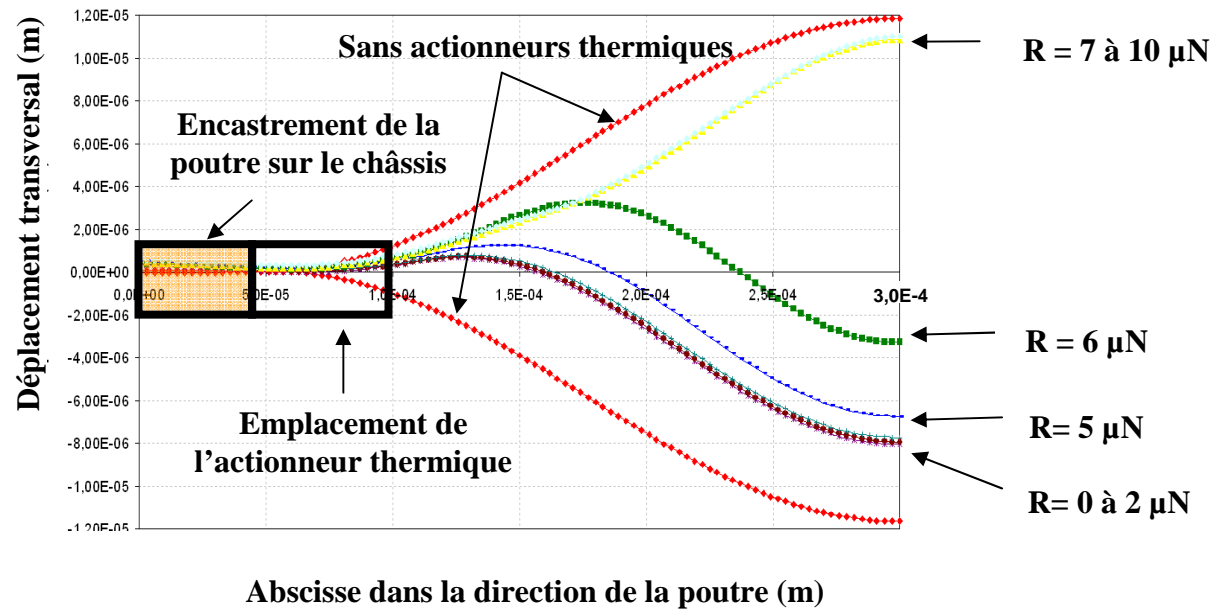
Nécessité d'un modèle éléments finis pour tenir compte de la géométrie 3D

III – Modélisation FEM: pourquoi, comment ?

- **But:** valider la séquence et évaluer la force de contact en prenant en compte les actionneurs de la poutre.
- **Moyen:**
 - Modélisation du quart de la structure (50 000 DDL)
 - Encastrement: modélisé en bloquant les degrés en translation
 - Éléments quadratiques
 - Comportement élastique des matériaux,
 - Contraintes résiduelles de chaque couche comme condition initiale



- Pour une géométrie asymétrique



- Comparaisons simulations FEM / Analytique (géométrie symétrique)

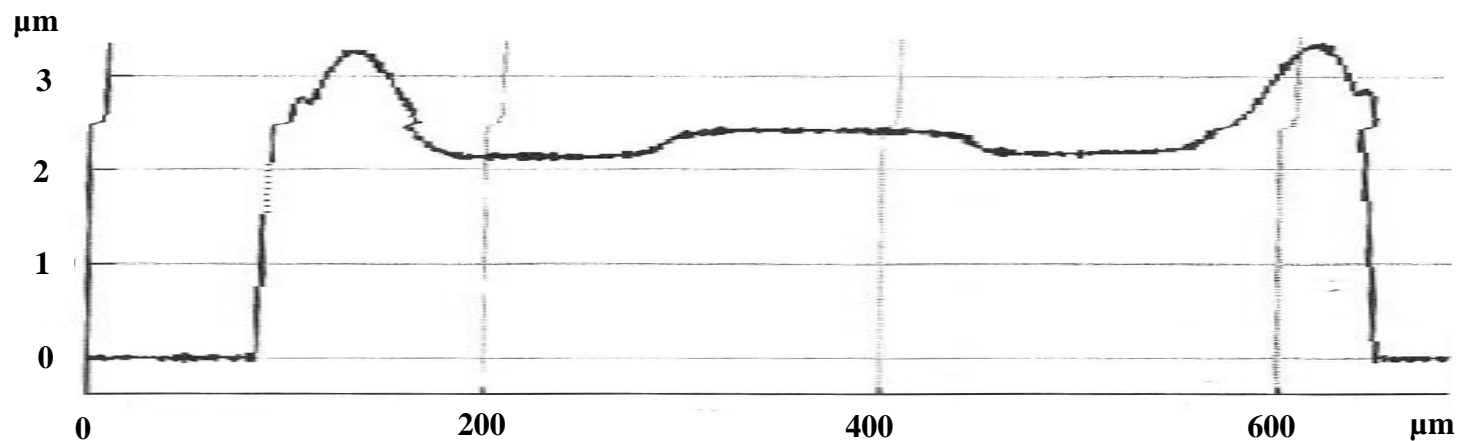
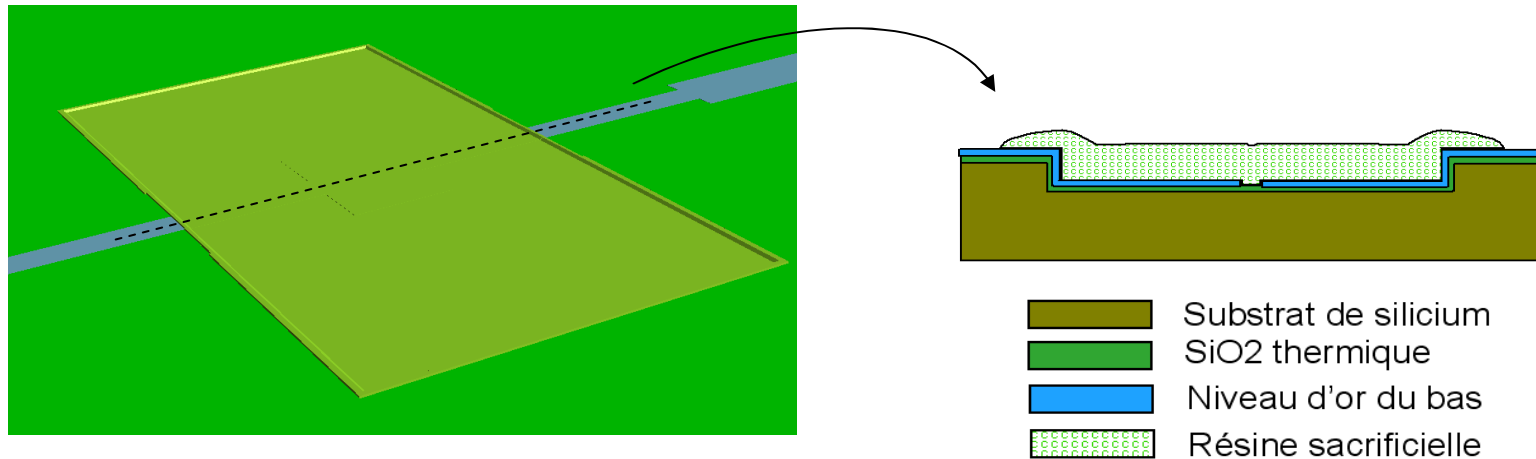
Type d'analyse	Flèche (μm)	Force de contact (μN)
FEM sans actionneurs	11,9	~8
Analytique (avec influence du châssis)	11,1	~15

Paramètres d'entrée du modèle:

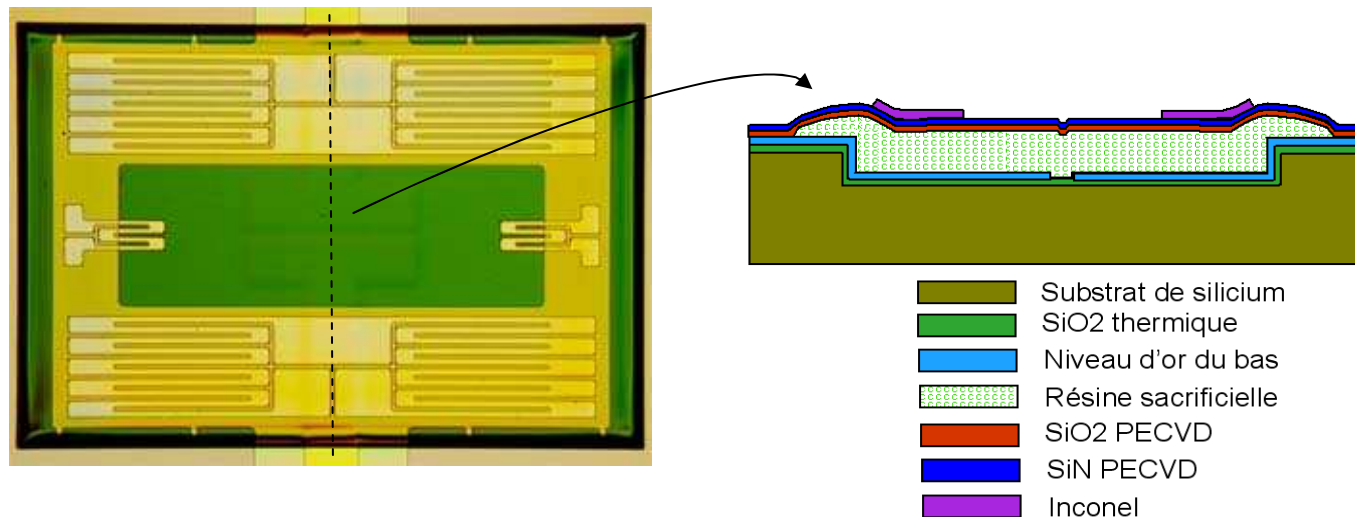
- Contraintes résiduelles σ_0
 - Modules élastiques (E, ν), CTE (α)
 - Géométrie de la poutre et du châssis
- } • Détermination expérimentale
• Littérature
• Conception
- Résultats en **sortie** du modèle **analytique** pour une **structure symétrique**
 - Force de contact pour une déflexion fixée
 - Stabilité des différentes configurations (critère énergétique)
 - Longueur de la zone de bistabilité
 - Résultats en **sortie** du modèle **éléments finis** pour **structure asymétrique**
 - Force de contact pour une déflexion fixée
 - Stabilité ou non d'une configuration asymétrique
 - Validation de la séquence de commutation

IV Fabrication et caractérisation des prototypes

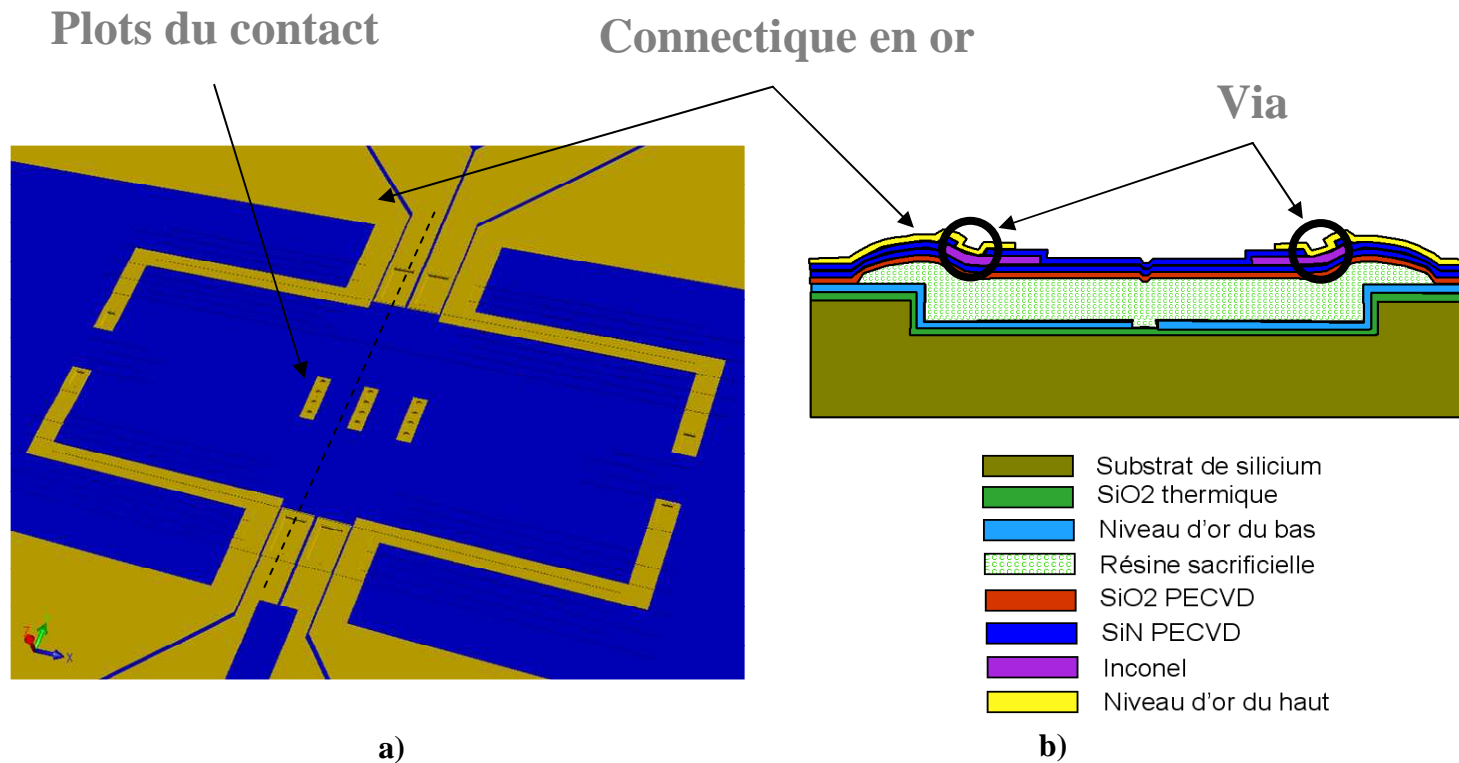
Réalisation d'une cavité, des pistes électrique et remplissage par un polymère sacrificiel:



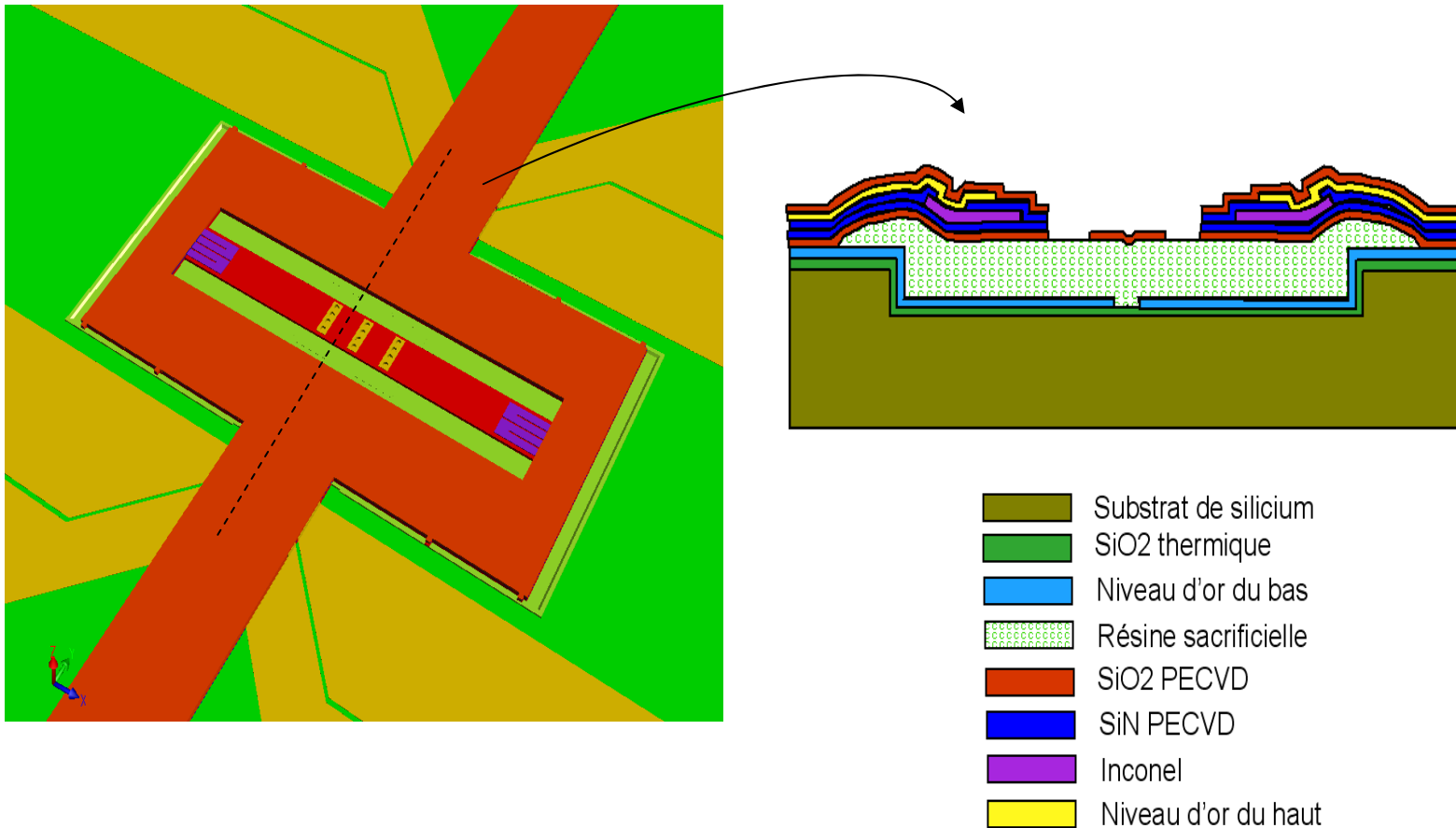
Dépôt du matériau de la poutre, des actionneurs ; structuration des actionneurs



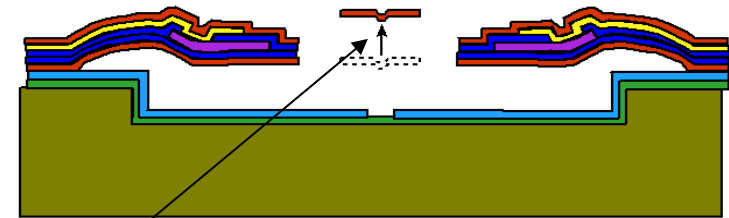
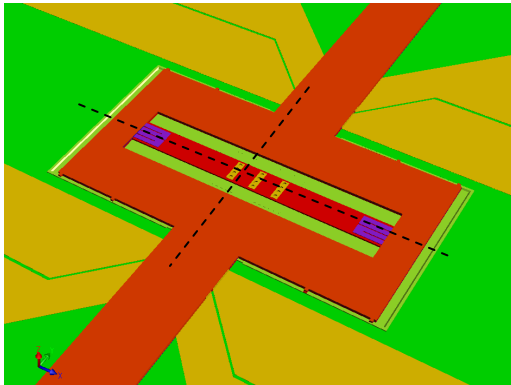
Réalisation des « via », des pistes et pads en or



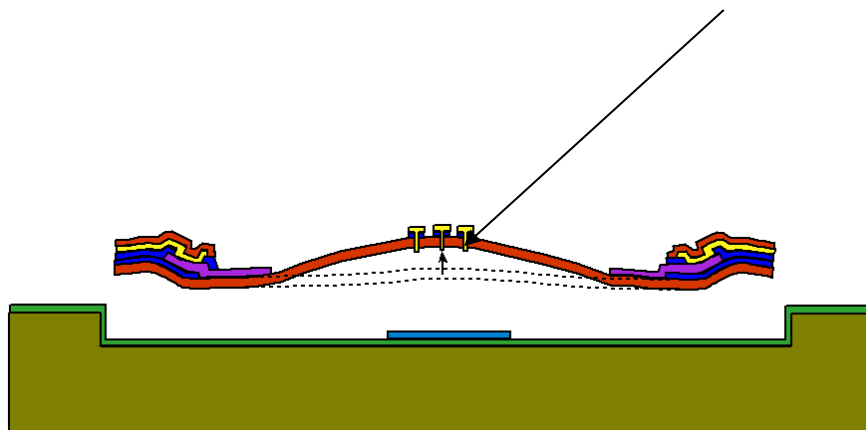
Finition du châssis et structuration de la poutre



Libération de la structure



Déplacement lié à la
relaxation des contraintes

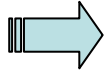


- Substrat de silicium
- SiO₂ thermique
- Niveau d'or du bas
- Résine sacrificielle
- SiO₂ PECVD
- SiN PECVD
- Inconel
- Niveau d'or du haut

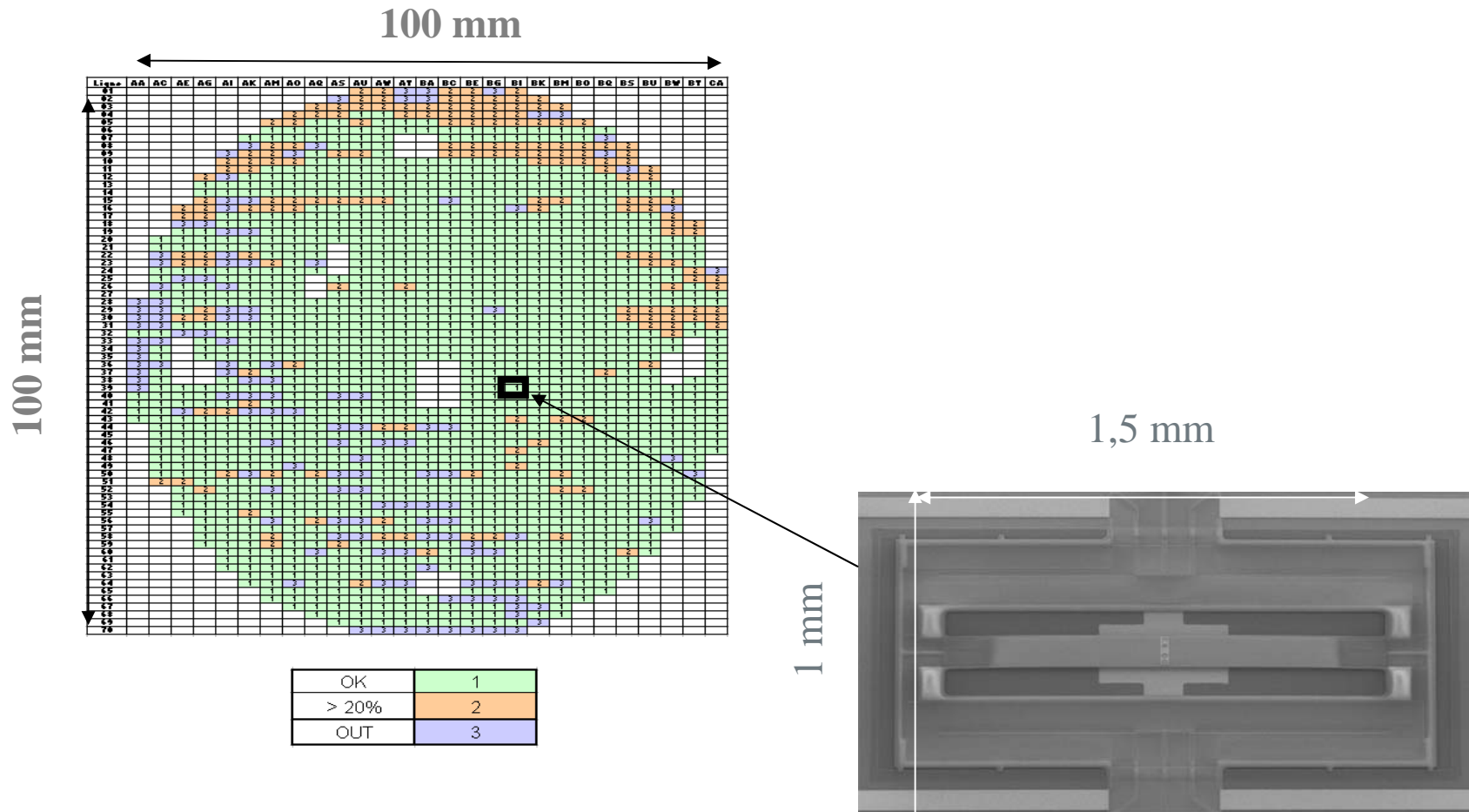
- **Bilan :**
 - Environ 50 étapes
 - 9 niveaux de photolithographie,
 - 7 dépôts différents (PVD, PECVD),
 - 6 types de gravures (RIE, DRIE, humide...).
- **Développements spécifiques :**
 - couche sacrificielle grande cavité,
 - dépôt et gravure de l'inconel.

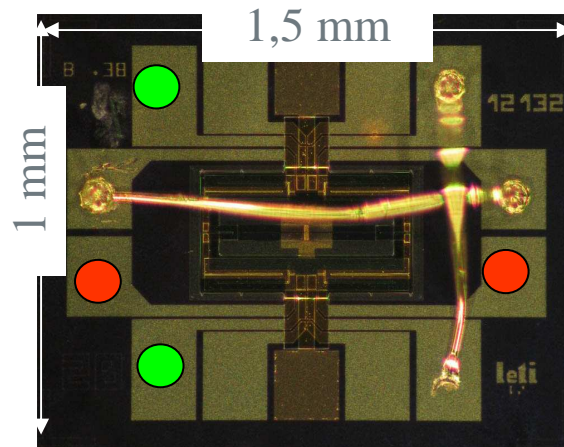
IV – Test et sélection des puces

- Test des puces par test sous pointe automatisé (Karl Süss TC1000/Labwindows)



- Mesure et comparaison des résistances électriques des actionneurs
- Sélection des prototypes

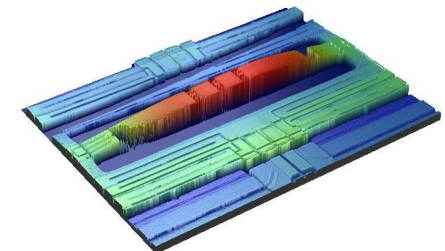
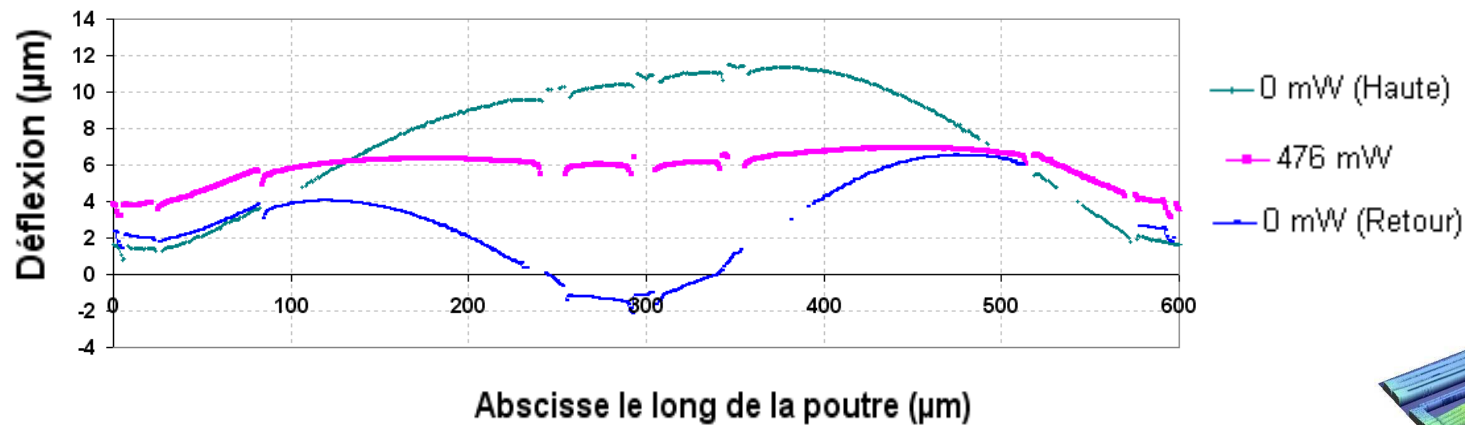
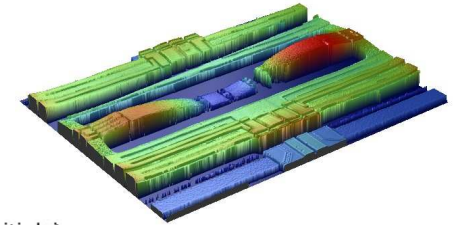
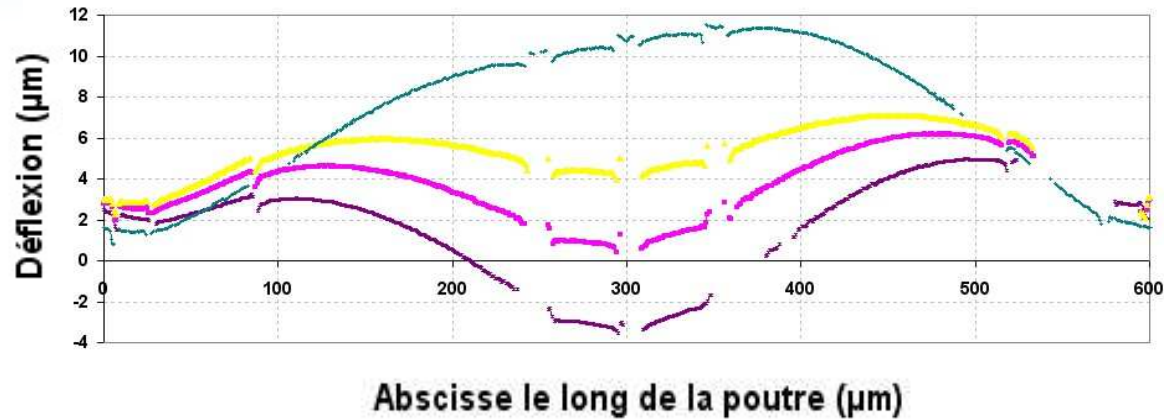




- Alimentation des actionneurs de la poutre
- Alimentation des actionneurs du châssis



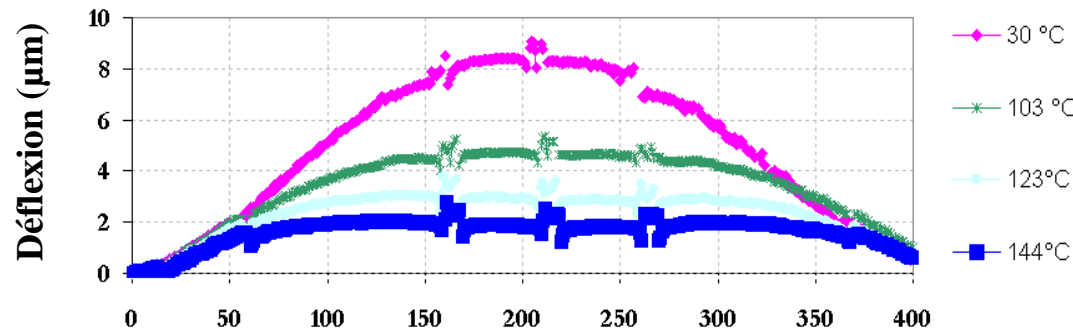
IV – Démonstration de la bistabilité mécanique



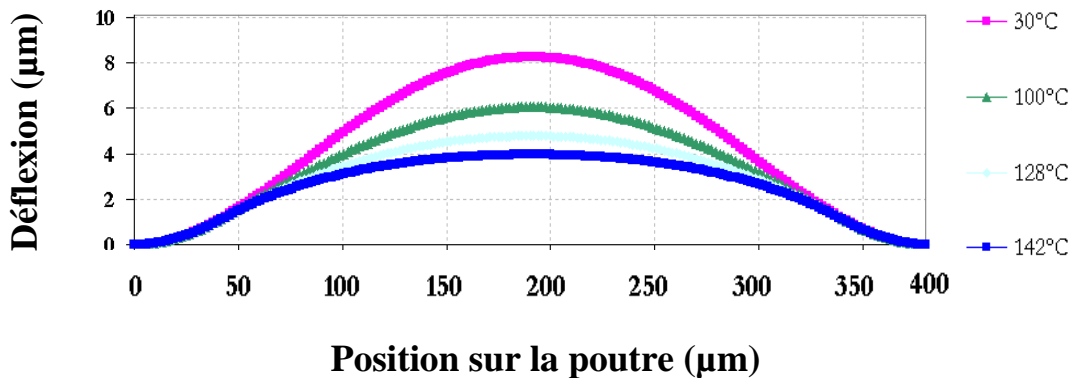
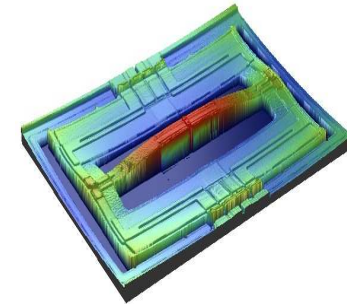
Conclusion et perspectives

- Architecture :
 - Mécaniquement bistable (contraintes résiduelles)
 - Contact de type plan (métallisation aisée)
- Modélisation:
 - Analytique : zone de bistabilité et force de contact
 - Eléments finis : bonne corrélation avec le modèle analytique
- Fabrication
 - Environ 50 étapes standardisées
 - Bon suivi des contraintes résiduelles des dépôts nécessaire
- Caractérisation
 - Premiers prototypes : bistabilité mécanique
 - Consommation importante, mais potentiel d'amélioration

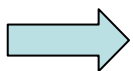
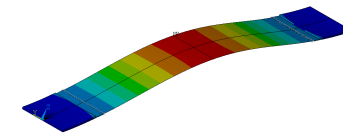
- Modélisation FEM poutre seule développée (10 000 DDL)



Veeco



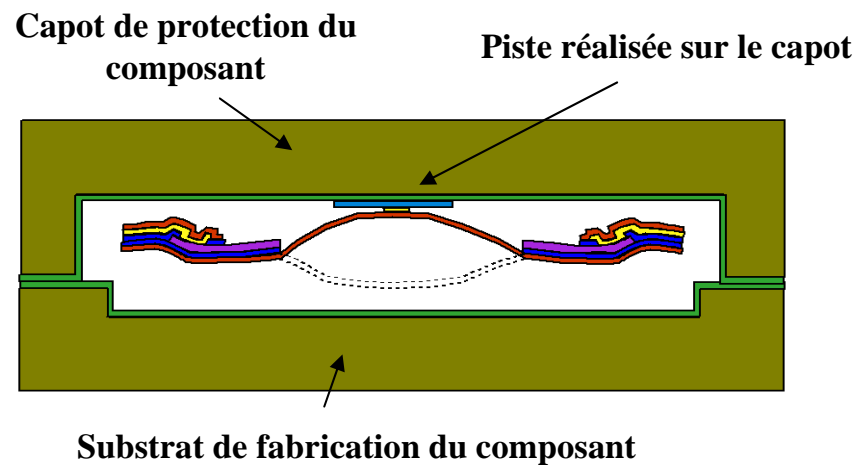
ANSYS



Des structures possédant un force de contact plus importante doivent être développées

... et perspectives (2/2)

- Fiabilisation du composant:
 - Étude amont sur le vieillissement des matériaux des actionneurs thermiques,
 - Utilisation d'actionneurs électrostatiques ?
- Intégration du switch avec son packaging



- Intégration du composant dans une matrice de commutation pour le secteur biomédical



Merci pour votre attention