



**HAL**  
open science

# Actionneurs électrostatiques complètement isolés : fabrication, fonctionnement et caractérisation en milieu liquide

Anne-Sophie Rollier, Bernard Legrand, Lionel Buchaillot, Dominique Collard

## ► To cite this version:

Anne-Sophie Rollier, Bernard Legrand, Lionel Buchaillot, Dominique Collard. Actionneurs électrostatiques complètement isolés : fabrication, fonctionnement et caractérisation en milieu liquide. 17e Congrès Français de Mécanique, 2005, Troyes, France. hal-04203498

**HAL Id: hal-04203498**

**<https://hal.science/hal-04203498>**

Submitted on 11 Sep 2023

**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.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

# Actionneurs électrostatiques complètement isolés : fabrication, fonctionnement et caractérisation en milieu liquide.

Anne-Sophie Rollier, Bernard Legrand, Lionel Buchillot et Dominique Collard

*Institut d'Electronique, de Microélectronique et de Nanotechnologie  
IEMN CNRS UMR 8520  
Département ISEN, Groupe Microsystèmes Silicium  
Cité Scientifique, Av. H. Poincaré, 59652 Villeneuve d'Ascq, FRANCE  
Dominique Collard est aussi au CIRMM/IIS-CNRS, Univ. de Tokyo, JAPON*

## Résumé :

*Cet article présente la mise en œuvre d'actionneurs électrostatiques fonctionnant en milieu liquide par le biais d'une complète encapsulation des parties structurelles avec du nitrure de silicium peu contraint. Ces actionneurs ont été fabriqués et caractérisés. L'actionnement a été réalisé en milieu liquide. Du fait des permittivités élevées des liquides, le déplacement de la structure peut être contrôlé sur toute la distance inter électrodes sans que le phénomène de « pull-in » n'intervienne.*

## Abstract :

*This submission demonstrates the operation of electrostatic actuators in liquid environment thanks to the complete encapsulation of the polycrystalline silicon structural parts in low stress silicon nitride in order to prevent electrical short-circuit. Furthermore, the actuator displacement can be controlled at any location within the initial gap without pull-in effect due to the high permittivity of the liquid medium compared to the dielectric one.*

## Mots clefs :

**MEMS, actionnement électrostatique, effet de *pull-in*, environnement liquide.**

## 1 Introduction

Le fonctionnement théorique des micro-actionneurs électrostatiques est bien maîtrisé et la réalisation technologique optimisée pour fonctionner sous vide ou dans l'air.

Cependant, une des applications les plus ambitieuses serait de les rendre utilisables en milieu liquide et ainsi d'envisager des applications biomédicales originales comme la manipulation et la caractérisation cellulaire ou encore le déplacement de micro - dispositifs dans un environnement liquide. L'enjeu étant d'éviter les courts circuits et l'électrolyse des liquides. Seulement quelques techniques permettent l'actionnement en milieu liquide [1]. Cet article propose un procédé de fabrication basé sur l'encapsulation des parties structurelles avec du nitrure de silicium peu contraint pour permettre l'actionnement en milieu liquide. De plus, les propriétés diélectriques relatives des liquides, *e.g* 80 pour l'eau deionisée et 21 pour l'alcool isopropylique, sont supérieures à celle d'un environnement sec, *e.g* 1 pour l'air, ainsi pour une même tension d'alimentation appliquée une force plus importante, proportionnellement à la permittivité diélectrique du milieu, que celle dans l'air est produite, ce qui permet d'envisager des applications compatibles avec une électronique basse tension.

De plus, sous certaines conditions, le déplacement de l'actionneur peut être contrôlé sur tout l'espace inter - électrodes, à l'opposé de l'actionnement dans l'air ou le control s'effectue seulement sur un tiers de la distance séparant les deux électrodes. Ainsi, des dispositifs de saisie de cellules par exemple peuvent être envisagés.

## 2 Procédé de fabrication et conception des structures

### 2.1 Procédé de fabrication

Le procédé de fabrication présenté à la figure 1 est réalisé à l'aide des techniques de micro usinage de surface, il nécessite 5 niveaux de masque. La première étape correspond au nettoyage du substrat 3 pouces de silicium orienté (100). Puis une oxydation sèche de 300nm à 1100°C est réalisée, suivie d'une croissance de 100nm de nitrure de silicium peu contraint sur laquelle est déposée 350nm de silicium polycristallin dopé *in situ*. La première lithographie optique permet de transférer par photolithographie et gravure SF<sub>6</sub> les électrodes enterrées. Pour isoler électriquement ces électrodes durant l'actionnement, une couche de 300nm de nitrure de silicium peu contraint, Si<sub>x</sub>N<sub>y</sub>, est utilisée, figure 1-a. La couche sacrificielle, un oxyde basse température LTO (Low Temperature Oxide), qui va permettre la libération des structures est déposée sur une épaisseur de 2µm et est gravé de manière anisotrope par un plasma de CF<sub>4</sub> et de CHF<sub>3</sub>, figure 1-b. Comme l'actionnement s'effectue en environnement liquide, pour prévenir les courts-circuits et les fuites de courant à travers le liquide, une encapsulation par du nitrure de silicium peu contraint est réalisée. Le premier niveau d'encapsulation est fait d'une couche de 300nm de nitrure de silicium peu contraint qui est gravée de manière anisotrope pour ouvrir les contacts électriques, figure 1-c. Le matériau structural est constitué de 2µm de silicium polycristallin dopé de type *n* qui est gravé par un plasma composé de SF<sub>6</sub>, figure 1-d. Le second niveau d'encapsulation de 300nm de Si<sub>x</sub>N<sub>y</sub>, est déposé et gravé de manière à isoler complètement la structure, figure 1-e. Un recuit à 1100°C durant 3heures permet de relaxer les contraintes mécaniques dans les différentes couches. La dernière étape correspond à la libération des structures dans une solution d'acide fluorhydrique HF à 50%, la structure est ensuite rincée et placée en milieu liquide, figure 1-f.

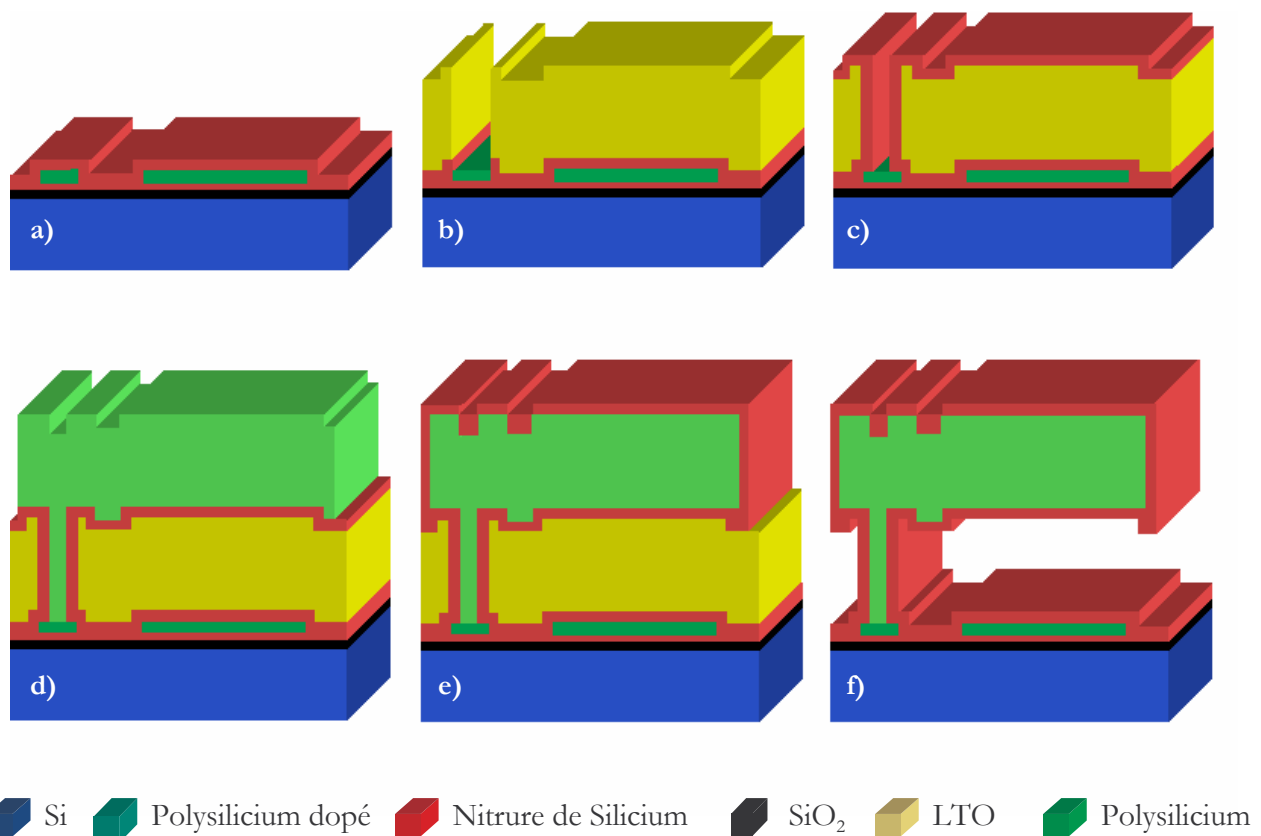


FIG. 1 – Procédé de fabrication : a) Création des électrodes enterrées. b) Dépôt et gravure de la couche sacrificielle. c) Première couche de nitrure peu contraint pour l'encapsulation. d) Dépôt de la couche structurale. e) Deuxième niveau d'encapsulation avec du nitrure de silicium peu contraint. f) Libération des parties mobiles dans une solution d'acide fluorhydrique.

## 2.2 Conception des structures

### 2.2.1 Modélisation de l'actionnement électrostatique

Un actionneur électrostatique est classiquement modélisé comme une capacité ayant une électrode fixe tandis que la deuxième est connectée à un ressort mécanique et est libre de bouger lorsqu'une force électrostatique est appliquée, figure 2. Cette force électrostatique tend à augmenter la valeur de la capacité de l'actionneur. La force mécanique de rappel qui est exercé par le ressort sur l'électrode mobile est proportionnelle à la constante de raideur et à son élancement.

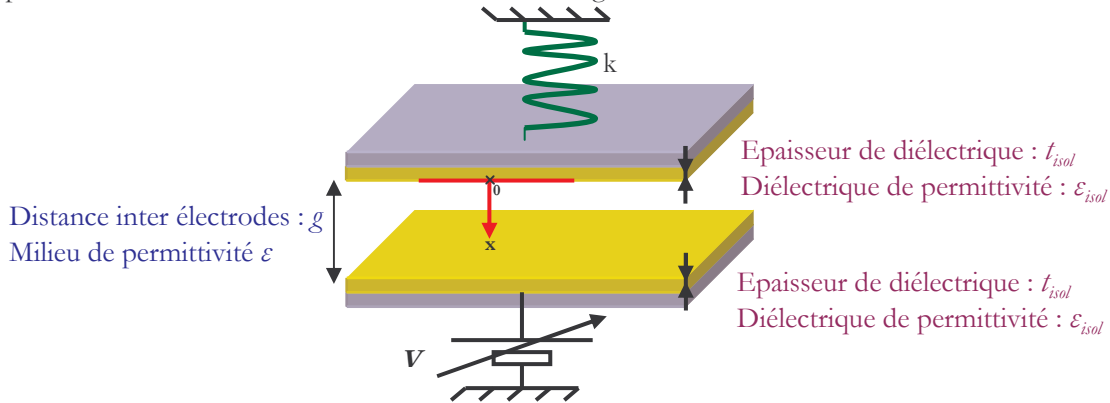


FIG. 2 – Actionnement électrostatique, avec  $k$  constante de raideur du ressort,  $g$  distance inter électrode,  $V$  tension d'alimentation,  $x$  déplacement de la partie mobile et  $t_{isol}$  épaisseur d'isolant.

Lorsque l'on applique une tension, les électrodes se trouvent sous influence capacitive engendrant une attraction électrostatique. Cette force est de la forme :

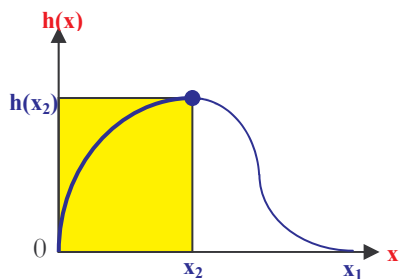
$$F_{\text{élect}} = \frac{1}{2} \times \frac{\varepsilon \times S \times V^2}{\left[ 2 \times t_{isol} \times \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{isol}} + (g - x) \right]^2} \text{ pour } x \in [0, g[.$$

La position d'équilibre s'effectue quand les forces électrostatique et mécanique se compensent. La résolution de cette équation conduit à une condition sur l'équilibre des forces qui détermine l'étendue de la zone stable d'actionnement :

$$F_{\text{élect}} + F_{\text{méca}} = 0 \quad \Leftrightarrow \quad \frac{1}{2} \times \frac{\varepsilon \times S \times V^2}{\left[ 2 \times t_{isol} \times \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{isol}} + (g - x) \right]^2} = k \times x$$

Pour résoudre cette équation, on s'intéresse à la fonction :  $h(x) = \left[ 2 \times t_{isol} \times \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{isol}} + (g - x) \right]^2 \times x$ .

La représentation graphique de cette fonction est présentée à la figure 3.



$$x_1 = 2 \times t_{isol} \times \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{isol}} + g$$

$$x_2 = \frac{1}{3} \left[ 2 \times t_{isol} \times \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{isol}} + g \right]$$

$$h(x_2) = \frac{4}{27} \times \left[ 2 \times t_{isol} \times \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{isol}} + g \right]^3$$

FIG. 3 – Actionnement électrostatique, délimitation de la zone d'actionnement stable en jaune sur la courbe.

Dans des milieux avec des permittivités diélectriques relatives supérieures à 1 et où l'actionneur a ses parties structurales isolées, l'épaisseur et la permittivité des couches doivent être prises en compte dans le calcul de la délimitation de la zone d'actionnement stable. La zone surlignée en jaune sur la figure 3, correspond à la zone stable, elle s'étend de  $x = 0$  à  $x = x_2$ . Comme  $x_2 = \frac{1}{3} \left[ 2 \times t_{isol} \times \frac{\epsilon}{\epsilon_{isol}} + g \right]$  et que  $g$  représente l'entrefer initial, alors on pourra contrôler le déplacement sur toute la distance inter électrode si :

$$x_2 > g \Leftrightarrow t_{isol} \times \frac{\epsilon}{\epsilon_{isol}} > g$$

Ainsi si cette condition est respectée durant le dimensionnement des structures alors le déplacement de la partie mobile peut-être contrôlé sur toute la distance inter électrodes.

En effet, si la condition précédente n'est pas respectée alors l'équilibre devient instable et la partie mobile de l'actionneur vient se coller à l'électrode inférieure sans que l'on puisse agir sur ce phénomène, c'est le *pull-in*. Si on considère un actionneur à plaques parallèles avec une distance inter électrodes de  $2\mu\text{m}$  évoluant dans l'eau, de constante diélectrique 80, dont ses parties structurales sont isolées avec  $300\text{nm}$  de nitrure de silicium peu contraint, le calcul de la position instable relié au phénomène de *pull-in* nous donne  $2,6\mu\text{m}$ . Ce déplacement dépasse la distance physique entre les deux électrodes, ainsi le phénomène de *pull-in* ne peut pas se produire. Dans ce cas on définit une tension d'actionnement qui correspond à la fermeture des  $2\mu\text{m}$  séparant les deux électrodes.

## 2.2.2 Les structures testées

Pour étudier l'actionnement électrostatique en milieu liquide plusieurs types de structures ont été mis en œuvre. Des actionneurs à plaques parallèles de  $200\mu\text{m}$  de long,  $20\mu\text{m}$  de large, ont été réalisés pour tester le déplacement hors du plan, l'image de la figure 4-1 a été prise durant l'actionnement dans de l'eau. Un type d'actionnement dont le comportement en milieu liquide est intéressant est l'actionnement électrostatique en torsion. Pour mettre en évidence ce principe, des structures de types plaques parallèles sont maintenues par des poutres encastées, ainsi lorsque l'actionnement a lieu, ces poutres se trouvent soumises à des moments mécaniques de torsion [2]. La figure 4-3 présente un actionneur en torsion avec un plateau carré d'actionnement électrostatique de  $300\mu\text{m}$  de côté soutenu par des poutres en torsion de  $490\mu\text{m}$  de long et  $5\mu\text{m}$  de large, le mouvement est observé par le biais d'un levier de  $1100\mu\text{m}$  de long et  $90\mu\text{m}$  de large. Comme l'actionnement a lieu en milieu liquide, l'actionnement entraîne le déplacement du fluide, pour tester la solidité des structures, des membranes rectangulaires de  $400\mu\text{m}$  de long et  $250\mu\text{m}$  de large sont réalisées et présentées à la figure 4-2.

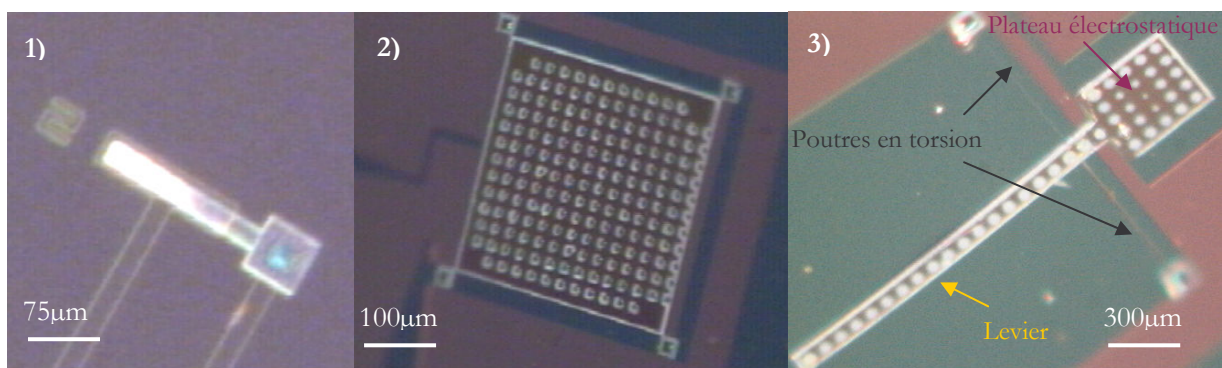


FIG. 4 – Image durant l'actionnement en milieu liquide des actionneurs électrostatiques. 4-1 : Actionneur à plaques parallèles. 4-2 : Membrane soutenue en ses 4 extrémités. 4-3 : Actionneur en torsion.

Sur l'image 4-2 et 4-3 des trous ont été percés dans la partie structurale pour permettre une meilleure libération des membranes et des structures en torsion. En effet, cette libération s'effectue en milieu liquide et ces trous favorisent l'écoulement du HF.

### 3 Caractérisation en milieu liquide

Les structures ont été testées dans de l'eau déionisée et de l'eau du robinet ayant une constante diélectrique de 80, ainsi une tension d'alimentation  $\sim 9$  fois plus faible que celle nécessaire pour actionner les structures dans l'air est requise. A la tension  $V_{\text{actionnement}}$  l'électrode supérieure vient au contact de l'électrode inférieure, la distance de  $2\mu\text{m}$  séparant les deux électrodes est atteinte. La tensions  $V_{\text{actionnement}}$  a été mesurée expérimentalement, ces résultats ont été confrontés aux simulations faites avec le logiciel CoventorWare.

La structure à plaques parallèles possède une tension d'actionnement, qui correspond à un déplacement maximum de  $2\mu\text{m}$ , située dans la gamme de 2,3 à 2,54V contre 2,31V selon la simulation sous CoventorWare, figure 5-a. Un autre dispositif testé pour fonctionner en milieu liquide est la structure en torsion, cet actionneur peut être utilisé pour réaliser une micro pince, figure 5-c. Le minimum mesuré pour la tension d'actionnement est de 0,18V et le maximum se situe à 0,26V, la simulation donne 0,19V. Dans ce cas le déplacement est caractérisé par l'angle de rotation de la structure. Le dernier dispositif testé est la membrane encastrée à ses quatre extrémités, elle possède une tension d'actionnement variant entre 4 et 5V contre 4,8V par la simulation, figure 5-b.

Les mesures expérimentales, figure 5-a, b, et c, correspondent au maximum et au minimum mesurés pour la tension d'actionnement et de séparation sur plusieurs identiques actionneurs. Cette variation sur la tension correspond à la non uniformité du procédé de fabrication, particulièrement durant les dépôts sur le wafer 3 pouces. Les images optiques dans la configuration d'une distance inter électrodes maximale sont présentées sur la figure 5-d, e, et f. La configuration de la tension d'actionnement lorsque l'entrefer est fermé, est présentée à la figure 5-g, h, et i, comme l'actionnement à lieu en milieu liquide il n'y a pas de phénomènes de collage de la structure sur le substrat.

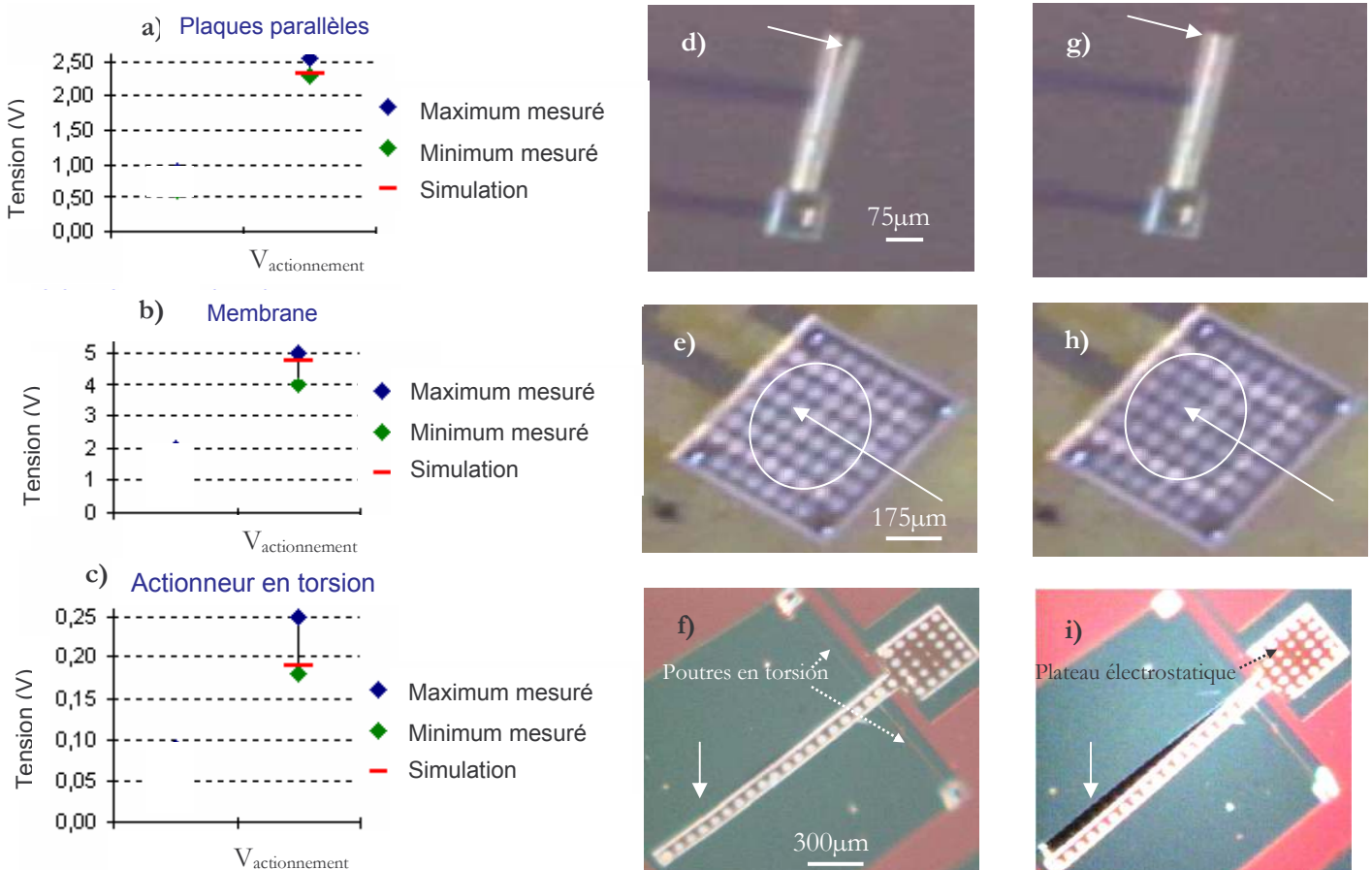


FIG. 5 : a), b) et c) Caractérisation de la tension d'actionnement et de déplacement nul dans de l'eau déionisée pour des actionneurs à plaques parallèles, des membranes et des structures en torsion. d), e) et f) Images optiques de l'actionnement lorsque l'actionneur a un entrefer de g, g, h) et i) Images optiques durant l'actionnement en milieu liquide de la tension d'actionnement (entrefer nul). Les flèches blanches localisent le lieu d'actionnement.



De plus l'actionneur à plaques parallèles a été testé dans l'eau du robinet à 1MHz, pour contrer l'écrantage du potentiel appliqué par les ions mobiles en solution [3], ses tensions d'actionnement restent dans le même ordre de grandeur.

Pour tester l'effet de différents fluides sur l'actionnement électrostatique en milieu liquide, une membrane carré de 500 $\mu$ m de coté a été actionné dans l'eau et dans de l'Alcool IsoPropylique, IPA. La tension d'actionnement est de 10,3V dans l'eau du robinet contre 6,6V dans l'IPA. La tension de séparation quant à elle est de 9,4V pour l'eau et de 5,4V pour l'IPA. On remarque que les phénomènes de pull-in et pull-out sont présents car la condition  $x_2 > g$  n'est pas respectée.

## 4 Conclusion

Un nouveau procédé de fabrication avec une complète encapsulation par du nitrure de silicium peu contraint a été optimisé pour permettre l'actionnement électrostatique en milieu liquide. De plus, le phénomène de *pull-in* n'intervient plus et ainsi le déplacement de la structure peut être contrôlé sur toute la distance inter électrodes. Comme l'actionnement se fait en milieu liquide le problème de *collage* des parties mobiles, inhérent aux microsystèmes, n'existe plus, en raison du fluide qui entoure la structure.

### Références :

- [1] T. L. Sounart, *et al.*, Transducers'03, pp.615-618.
- [2] O. Degani, *et al.*, Journal of Microelectromechanical Systems, Vol.7, No.4, pp.373-379, 1998.
- [3] V.Pomes, *et al.*, Colloids and Surfaces A, pp.481-490, 1999.