

Convection au dessus de la membrane : $h=125W/m^2.K$, convection sous la membrane $h=60W/m^2.K$, température ambiante sous le substrat.

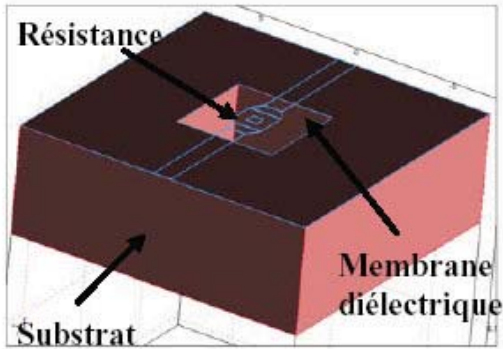


Figure 4. Structure de la plate forme chauffante sur Si

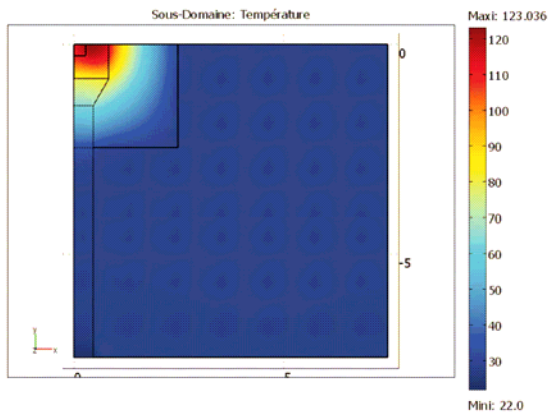


Figure 5. Echauffement de la plate forme chauffante : résultat sous COMSOL

Une deuxième simulation est réalisée en incluant l'effet de la température sur les propriétés conductrices des matériaux, notamment le polysilicium avec l'expression :

$$\sigma_{poly}(T) = \frac{\sigma_{poly}(23^{\circ}C)}{1,0483 - 0,0021 \times T}$$

Confrontation théorie expérience.

La Figure 6 montre la comparaison théorie/expérimentation de la température sur la plate forme chauffante avec les deux modèles implémentés. On peut constater

l'amélioration du modèle quand on considère l'effet de la température sur les propriétés des matériaux, ce qui fait un vrai couplage multiphysique.

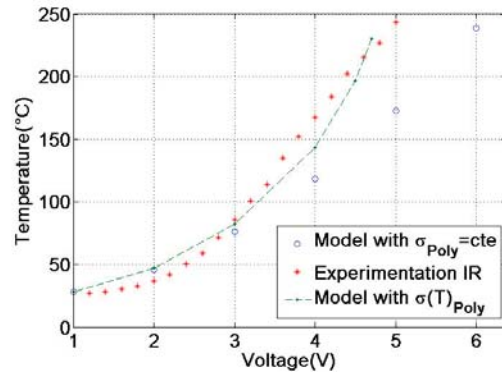


Figure 6. Variations de la température en fonction de la Tension pour la plaque chauffante : Théorie et expérience.

2.3. Modèle pour la génération et diffusion du gaz.

Ce modèle comprend deux parties : d'abord la génération de gaz et ensuite son évolution dans la cavité de l'actionneur.

Le matériau énergétique suit une loi de décomposition de type Arrhenius selon l'équation :

$$\dot{m}_g(T) = A_s \exp\left(-\frac{\Delta H}{RT_s}\right)$$

Pour simplifier ce modèle nous allons considérer une approche instantanée de cette loi :

- Si $T \geq T_i$: $m_g = m_s$
- Si $T < T_i$: $m_g = 0$

où m représente la masse et les subscripts g et s , l'état gazeux ou solide respectivement. Les deux lois sont montrées dans la Figure 7. Ensuite, pour évaluer l'évolution du gaz dans la cavité, on considère la loi de diffusion de Fick représentée par l'équation :

$$\frac{\partial c}{\partial t} - \nabla \cdot (D \nabla c) = 0$$

où c représente la concentration des espèces et D , le coefficient de diffusion donné par :

$$D = 435,7 \frac{T^{3/2}}{2p(V^{1/3})^2} \sqrt{\frac{2}{M}}$$

V indique le volume molaire et M est la masse molaire. Ensuite on peut représenter la pression dans la cavité à partir de la relation pour les gaz parfaits :

$$P = cRT$$

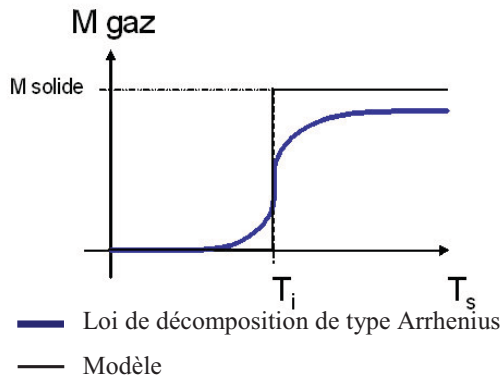


Figure 7. Modèles pour la décomposition d'un matériau énergétique.

Cette physique est ajoutée aux modèles électrique et thermique mentionnés précédemment sur l'actionneur. Dans cette nouvelle étape de modélisation, nous montrons aux étudiants comment on peut simplifier à nouveau la géométrie en utilisant un modèle 2D axisymétrique comme montré dans la Figure 8.

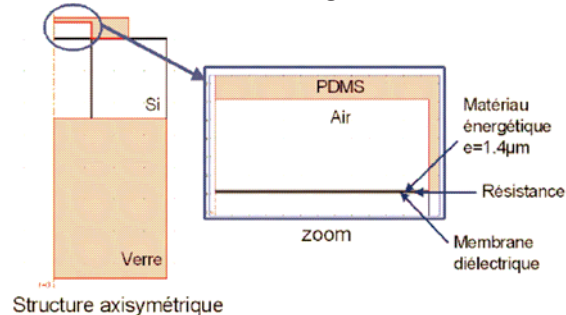


Figure 8. Structure 2D axisymétrique de l'actionneur

Evidemment la structure de la résistance chauffante dans une approche axisymétrique n'est pas la même que dans le modèle 3D réalisé précédemment, une calibration est nécessaire notamment en termes de tension appliquée et chauffage obtenu : La conductivité du polysilicium de la résistance chauffante est divisée par 3.

Procédure de simulation

Cette dernière étape de simulation est divisée en deux parties :

Etape 1 - D'abord on réalise une simulation statique liée au chauffage du dispositif par l'effet Joule. En regardant la distribution de la température du matériau énergétique nous pouvons déterminer la quantité de matériau qui se décompose (voir Figure 9), ceci nous donne notamment les conditions initiales en température et concentration de gaz issu de la décomposition du matériau énergétique pour l'étape suivante.

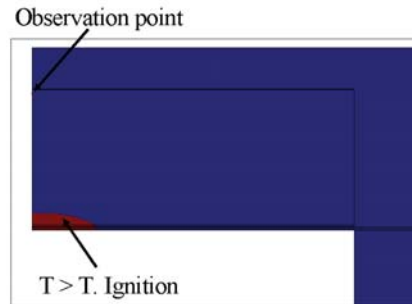


Figure 9. Schéma du modèle et positionnement du point d'observation dans la cavité.

Etape 2 - Dans cette étape nous allons simuler un échelon en tension en fonction du temps pour arrêter le chauffage de la résistance et nous allons observer l'évolution de la pression dans la cavité (Figure 10). La déformation de la membrane est calculée à partir d'une régression polynomiale de la courbe caractéristique du comportement de la membrane (Figure 3).

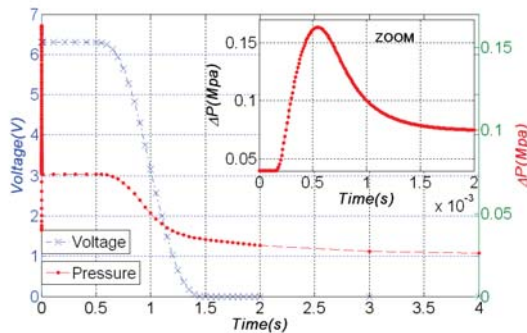


Figure 10. Evolution de la pression du gaz sur le point d'observation sous la membrane élastique.

3. Conclusions et perspectives

Dans cet article, nous avons présenté un bureau d'études concernant la modélisation multi physique à partir d'un environnement qui semble être très attractif dans le domaine des systèmes microélectroniques et des microsystèmes. Une application type dans le domaine des microactionneurs et dans la microfluidique particulièrement a été choisie, prenant en compte les multiples physiques interagissant dans le système et les multiples techniques de modélisation développées pour le concevoir. Ces différentes techniques sont montrées aux étudiants du Master Recherche en ordre croissant de difficulté. Nous commençons par un modèle simple au niveau géométrique et maillage considérant une seule physique, puis on ajoute des autres phénomènes physiques pour créer des modèles complexes.

Naturellement, ce bureau d'études ne couvre pas toutes les possibilités de modélisation du logiciel COMSOL. Pour compléter cette formation, une possibilité intéressante est d'inclure une introduction à la modélisation par « script » de COMSOL: un outil qui permet de créer des modèles à partir d'un code semblable à celui du MATLAB. Cela permet de réaliser des simulations paramétriques avec efficacité, en plus de présenter une grande versatilité si on ajoute les possibilités de la programmation avec MATLAB. Pour aller plus loin on peut

envisager une formation incluant les possibilités de coupler COMSOL avec Simulink/MATLAB (option inclus sur COMSOL) pour réaliser de l'optimisation ou des boucles de commande. Un exemple de cette option de simulation paramétrique est l'évaluation des performances de l'actionneur (surpression, déformation de la membrane) en fonction de la quantité de matériau énergétique déposé sur la résistance chauffante (voir Figure 11). La figure illustre aussi une caractérisation réalisée sur le dispositif final, avec une déformation de $46\mu\text{m}$ correspondant à 13kPa en surpression. Cette erreur est notamment due à l'imprécision dans la quantité de matériau déposé et la difficulté de centrer le dépôt au milieu de la résistance chauffante [3].

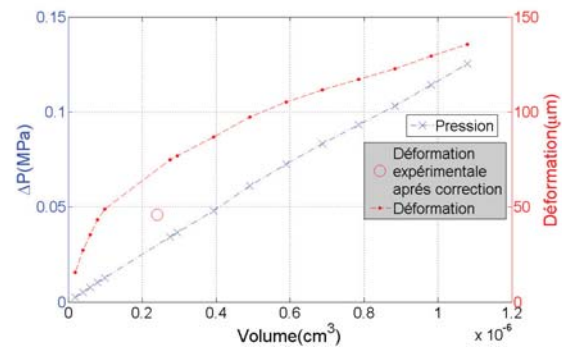


Figure 11. Surpression dans la cavité et déformation maximale de la membrane en fonction de la quantité de matériau énergétique déposé

Références

- [1] A. Cazarre, C. Rossi, G. A. Ardila Rodriguez *et al*, *Proc. JNCNFM 2006*, St-Malo, France.
- [2] G. A. Ardila Rodriguez, Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier (2008), Toulouse, France.
- [3] G. A. Ardila Rodriguez *et al*, "A micro actuator based on the decomposition of an energetic material for disposable Lab-on-Chip applications: Fabrication and Test", *Accepted au Journal of Micromechanics and Microengineering* en Octobre 2008.