



Conception, simulation et réalisation d'un micro actionneur à base de matériau énergétique pour l'actionnement microfluidique

Gustavo Aldolfo Ardila Rodriguez

► To cite this version:

Gustavo Aldolfo Ardila Rodriguez. Conception, simulation et réalisation d'un micro actionneur à base de matériau énergétique pour l'actionnement microfluidique. Micro et nanotechnologies/Microélectronique. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2008. Français. NNT: . tel-00258425

HAL Id: tel-00258425

<https://theses.hal.science/tel-00258425>

Submitted on 22 Feb 2008

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.

UNIVERSITE TOULOUSE III – PAUL SABATIER
LABORATOIRE D'ANALYSE ET D'ARCHITECTURE DES SYSTEMES DU
CNRS

THESE

en vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE TOULOUSE
délivré par l'Université Toulouse III – Paul Sabatier

Discipline : Conception des Circuits Microélectroniques et Microsystèmes

présentée et soutenue

par

GUSTAVO ADOLFO ARDILA RODRIGUEZ

Le 21 Janvier 2008

Titre :

Conception, simulation et réalisation d'un micro actionneur à base
de matériau énergétique pour l'actionnement microfluidique

Directeur de thèse :

Mme. Carole ROSSI

JURY

M. Thierry PARRA	, Président
M. Patrick TABELING	, Rapporteur
M. Michel DE LABACHELERIE	, Rapporteur
M. Yves FOUILLET	, Examineur
M. Patrick BROYER	, Examineur
M. Daniel ESTEVE	, Examineur
Mme. Sylviane SABO-ETIENNE	, Invitée
Mme. Monique MAUZAC	, Invitée

Avant-propos

Ce mémoire présente mes travaux de recherche effectués au Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes du CNRS au sein du groupe Microsystèmes et Intégration des Systèmes (MIS). Je remercie les directeurs successifs du LAAS, M. Ghallab et R. Chatila, ainsi que les directeurs successifs du groupe MIS, Anne-Marie Gue et Jean-Yves Fourniols pour m'avoir accueilli.

Je tiens à remercier Thierry Parra pour avoir accepté d'être le président de mon jury de thèse. Je remercie également à Patrick Tabeling et Michel de Labachellerie d'avoir accepté la tâche de rapporteur, ainsi que à tous les autres membres du jury : Yves Fouillet, Patrick Broyer, Sylviane Sabo-Etienne et Monique Mauzac pour leur présence et leurs commentaires constructifs sur mon travail.

Je tiens à remercier à ma directrice de thèse, Carole Rossi, pour toute son aide, guide et disponibilité qui m'a permis d'amener ce travail à son but. Je remercie aussi Daniel Estève pour ses sages conseils tout au long de ma thèse.

Mes remerciements s'adressent aussi à toutes les personnes qui m'ont beaucoup aidé et qui ont travaillé avec moi dans le cadre de ce projet : d'abord Samuel Suhard, chimiste qu'a beaucoup travaillé dans le développement des matériaux, puis au Laboratoire de Chimie de Coordination (LCC): Bruno Chaudret, Sylviane Sabo-Etienne, Pierre Fau. Au Laboratoire d'Interactions Moléculaires et Réactivité Chimique et Photochimique (IMRCP) : Monique Mauzac, Anne-Françoise Mingotaud, Juliette Fitremann, ainsi qu'au LAAS Kaili Zhang, Jorge Curtidor et Saint-Yves Mbeng.

Bien sûr ce travail a été bien mené grâce à une grande collaboration à l'intérieur du laboratoire. Je remercie l'ensemble du personnel TEAM pour leur disponibilité et patience pour toutes les « petites questions » : V. Conedera, H. Granier, M. Benoit, L. Mazenq, F. Mesnilgrete, L. Salvagnac, S. Pinaud, P. Dubreuil, L. Bouscayrol, B. Rousset, P. F. Calmon, J-B. Doucet, D. Bourrier, D. Colin, F. Carcenac, L. Jalabert, A. Arnoult...

Je remercie également l'ensemble du service 2I pour toute son aide utile à mes « soucis » informatiques, notamment avec le logiciel COMSOL et pour les caractérisations : M.-D. Cabanne, J. Libouriel, C. Benazeth, B. Meunier, N. Maura, S. Assie-Souleille, A. Coustou, D. Lagrange, P. Marcoul, D. Medale, X. Dollat... Egalement, je remercie le service de documentation pour l'impression de ce manuscrit.

Je tiens à remercier aussi Nicolas Huc et tout le service de support de COMSOL France pour leur conseil concernant la modélisation.

Je remercie tous ceux qui m'ont donné un « coup de main » pour la rédaction du manuscrit et la préparation de la soutenance : Carole, Daniel, Hélène, Corinne, Pierre, Anne-Marie, Guillaume, Marine, Jean-Marie, Stéphane, Julie, Cécile...

Je remercie aussi toutes les personnes que j'ai croisées dans les couloirs du laboratoire pendant toutes ces années et qui m'ont porté leur soutien et conseil à plusieurs occasions :

A. Chalaane, C. Escriba, D. Guihal, S. Bonhomme, S. Charlot, H. Camon, A. Estève, A. Boukaache, G. Landa, J. Sudor, T. Camps, A. Cazarré, M. Djafari, A. Marty, J. Tasselli, C. Bordas, E. Havard, D. Peyrou, A. Bancaud, M. Saadaoui, W. Caid, H. Hachkar, D. Pellion, P. Pons, K. Grenier, K. Yacine, E. Tournier, C. Viallon, H. Brahimi, D. Venturin, B. Miegemolle, A. Martinez, Lamine, H. Chalabi, J-F. Le Neal, P. Lefillastre, C. Ayela, M. Brut, R. Fulcrand, B. Marty, A. Cerf, M. Genevieve, T. El Mastouli, J-L. Fock, B. Jammes, P. Menini, A. Hemeryck., E. Scheid, N. Nolhier, F. Therez, M. Al Bahri, T. Sthatopolous, F. Pennec, F. Severac, C. Tropis, N. Yoboue, G. Renvez, E. Colle, H. Tap-Bêteille, A. Cid-Pastor, A. Soler-Antich, M. Caccioppoli, E. Marchand, A. Evrard, M. Powell, C. Berty, D. Daurat, G. Ablart...

Un grand coucou aux plusieurs générations de collègues de bureau : Ty, Benoit, Juan Carlos, Sylvaine, Pierre Pennarun, Pierre Joseph, Hélène...

Je remercie a tout ceux qu'on partagé avec moi des moments intenses dans des activités diverses qui m'ont permis de me décontracter pour continuer la route :

Evidement l'ancien groupe dénommé « underground » d'escalade : Rémy Maurice, Patrick Abgrall et Andreas Schroeder, et les nouveaux partenaires de grimpe : Ghilhem, Hélène, Xavier...Le groupe littéralement « underground » de ping-pong : Thibault, Floriane, Jason, Jean-Marie, Stéphane, Mohamed, Sofiane...L'équipe de basket du samedi matin : Nacho, Luis, Gustavo, Ixbalank, Jason, Urtzi, Thierry, Mehdi, Edu, Albert...Le réseau Colombien, partenaires de voyages, buñuelos, natillas, novenas, nacimientos, juegos y espectáculos entre autres : Claudia, Juan Carlos, Fernando, Tatiana, Rafa, Margarita, Jorge, Hernan...

Je remercie aussi toutes ces personnes très spéciales pour moi qui viennent de l'extérieur du labo et qui m'ont toujours soutenu :

Le groupe de mathématiciens, même si certains entre eux ne le sont pas : Jess, Mic, Rafi, Max, Soazig, Seb, Solenne, Romano, Emilie, Gachete, Alain...

Le groupe « d'aventure extrême » Ceci, Vivien, Juju, Isa, Sandrine, Ludo, Cyril, Cath, Seb...Je remercie aussi à Annie, Jenni, Sabine et Carine pour leur soutien et amitié.

Agradezco tambien a todos aquellos que me han dado coraje y apoyo desde Colombia : Nix, Litch, Peich, Jorge, John, Camilo, Rey, Copo, Nata, Fernando, Mauricio, Angela, Anyeliza...

Finalement todos mis agradecimientos a mi familia, mis padres, mi hermana, Eric y los pequeños : Nicolás y Esteban, que siempre han estado alli, apollandome incondicionalmente, gracias a ustedes he logrado llegar al final y les dedico este trabajo.

Table de matières

NOMENCLATURE	5
INTRODUCTION GENERALE	7
 CHAPITRE I : L’actionnement en microfluidique. Etat de l’art et problématique.....	13
1 Introduction	15
2 Les microsystèmes fluidiques : historique et applications	18
2.1 La situation dans le monde.....	19
2.2 Rappel des activités du LAAS-CNRS dans le domaine de la microfluidique	21
2.3 Les applications et les verrous	23
3 L’ actionnement des fluides en microfluidique	25
3.1 Les principaux mécanismes d’actionnement en microfluidique	25
3.2 L’actionnement par matériau énergétique.....	37
3.3 Le positionnement relatif des actionneurs par matériau énergétique	38
4 Présentation de notre projet de recherche.....	40
5 Les objectifs de recherche.....	41
6 Conclusion	42
 CHAPITRE II : Conception et simulation multiphysique du microactionneur PYRACT	45
1 Introduction	47
2 Cahier des charges.....	47
3 Technologie, matériaux et dimensionnement de l’actionneur PYRACT	51
3.1 Choix de technologies et matériaux de structures	52
3.2 Dimensionnements des démonstrateurs	54
3.2.1 Le réservoir et la membrane	56
3.2.2 La plate-forme chauffante	56
4 Simulation du microactionneur PYRACT.....	57
4.1 Choix de l’outil multiphysique et présentation de l’approche suivie.....	57
4.2 Propriétés matériaux et conditions de simulation	59
4.2.1 La conductivité électrique de la résistance en polysilicium $\sigma_{\text{poly}}(T)$	60
4.2.2 Propriétés du matériau énergétique	60

4.2.3	Coefficient de convection du gaz généré par le matériau énergétique.....	61
4.2.4	Propriétés mécaniques des matériaux PDMS de la membrane et du réservoir	62
4.3	Modélisation de la plate-forme chauffante.....	63
4.3.1	Modèle et équations	63
4.3.2	Implémentation et maillage.....	64
4.3.3	Conditions aux limites.....	66
4.3.4	Résultats et validation expérimentale.....	67
4.4	Modélisation de l'expansion de la membrane élastique.....	70
4.4.1	Modèle et équations	70
4.4.2	Implémentation et maillage.....	72
4.4.3	Conditions aux limites.....	73
4.4.4	Résultats et validation expérimentale.....	73
4.5	Modélisation de la décomposition du matériau énergétique et expansion du gaz généré	77
4.5.1	Modèle et équations	77
4.5.2	Implémentation et maillage.....	79
4.5.3	Conditions aux limites et de simulation	80
4.5.4	Résultats	81
5	Modèle complet de conception	83
5.1	Modèle de l'actionneur PYRACT	83
5.1.1	Performances en fonction du volume de matériau énergétique	85
5.2	Modèle de l'éjecteur complet.....	87
5.2.1	Modèle et équations	87
5.2.2	Implémentation et maillage.....	88
5.2.3	Conditions aux limites.....	88
5.2.4	Résultats	89
6	Dimensionnement du démonstrateur	92
7	Conclusion	93
 CHAPITRE III : Fabrication du microactionneur PYRACT		95
1	Introduction	97
2	Rappel des dimensions et matriçage.....	97
3	Plate-forme chauffante.....	99
3.1	Étapes technologiques de réalisation.....	99
3.2	Photos de réalisation.....	102
4	Les murs du réservoir	103
4.1	Le traitement de surface pour réaliser des liaisons covalentes.....	104
4.1.1	Procédé de fonctionnalisation	104
4.1.2	Photo sensibilisation du silicone RMS083	107
4.1.3	Mise au point du dépôt à la tournette	107
4.1.4	Accrochage du silicone RMS083 sur substrat fonctionnalisé.....	108
4.2	Dépôt et structuration du silicone.....	109
4.3	Procédé de réalisation du réservoir	110

5	Dépôt du matériau énergétique.....	111
5.1	Synthèse	111
5.2	Mise au point du dépôt du matériau énergétique sur la membrane diélectrique....	112
6	Membrane élastique	116
6.1	Choix du laminage	117
6.1.1	Réalisation de la membrane élastique sur un substrat souple	118
6.1.2	Report de la membrane sur les murs du réservoir par laminage	121
7	Récapitulatif du procédé d'intégration complet.....	122
8	Conclusions et perspectives d'amélioration.....	124

CHAPITRE IV : Caractérisation et validation des modèles de conception.....127

1	Introduction	129
2	Caractéristique thermique et mécanique de la plate-forme chauffante	129
2.1	Tenue en pression de la membrane diélectrique	129
2.1.1	Description du banc de mesure	130
2.1.2	Résultats des mesures.....	131
2.2	Caractérisation thermique	132
2.2.1	Description du banc de mesure	132
2.2.2	Résultats des mesures.....	133
3	Caractérisation de la décomposition du matériau énergétique	135
4	Caractérisation de la déformation de la membrane élastique	141
4.1	Propriétés mécaniques du Sylgard 184	142
4.1.1	Mesure du module de Young et de la contrainte initiale par « Bulge test » ..	142
4.1.2	Description du banc de mesure	143
4.1.3	Résultats et analyses.....	144
4.1.4	Mesure du module de Young par nanoindentation	147
5	Test de la structure multicouche avant intégration	149
5.1	Préparation des échantillons.....	150
5.2	Résultats	151
5.2.1	Echantillons traités par plasma.....	151
5.2.2	Echantillons ayant la membrane réticulée partiellement.....	151
5.2.3	Résumé.....	152
6	Test de l'actionneur complet	152
7	Conclusions	155

CONCLUSION GENERALE

ANNEXES

ANNEXE A : Tableau comparatif des technologies d'actionnement pour la microfluidique.....	167
ANNEXE B : Modélisation de l'actionneur PYRACT de taille 1mm×1mm	171
ANNEXE C : Caractérisation électrique de la plate-forme chauffante	183
ANNEXE D : Script des modèles COMSOL de l'actionneur PYRACT	185
ANNEXE E: Masques pour la réalisation technologique de l'actionneur PYRACT	233
ANNEXE F : Détail du calcul du module de Young à partir des courbes de « bulge test ».....	235
ANNEXE G : Publications	237
 BIBLIOGRAPHIE	 241

Nomenclature

Q	Flux de chaleur (W/m ³)
Q_f	Débit (m ³ /s)
V_e	Tension (V)
I	Courant (A)
P	Pression (Pa)
V	Volume (m ³)
C_p	Capacité calorifique à pression constante (J/kg.K)
T	Température (K)
u	Déformation générale (m)
w	Déformation dans la direction z (m)
C	Tenseur de Cauchy-Green
F	Matrice de gradient de déformation
p	Stress selon formulation Piola-Kirchhoff
$Whyp$	Strain energy function (Pa)
I'_1	Premier invariant de déformation modifié
J	Rapport entre volumes actuel et initial
E	Module de Young (Pa)
m	Masse (kg)
M	Masse molaire de l'air (kg/mol)
g	Gravité (m/s ²)
h	Coefficient de convection (W/m ² .K)
Nu	Nombre de Nusselt
Pr	Nombre de Prandtl
Gr	Nombre de Grashof
R	Constant du gaz
n	Nombre de molécules d'air (mol)
$f()$	fonction de
R	Résistance (Ω)
D_H	Diamètre hydraulique (m)
A_s	Facteur pré exponentiel de Arrhenius
ΔH	Enthalpie de décomposition
c	Concentration des espèces (mol/m ³)

D	Coefficient de diffusion (m^2/s)
$\bar{v}$	Champ de vitesse dans un fluide (v_x, v_y) (m/s)
$\bar{v}_m$	Vitesse du système de coordonnées dans le modèle fludique (v_{xm}, v_{ym}) (m/s)
F	Force appliquée sur la pointe de nano indentation
h_c	Profondeur de contact pour la nano indentation

Lettres grecques

σ	Conductivité électrique (S/m)
ρ	Masse Volumique (kg/m^3)
k	Conductivité thermique (W/m.K)
ε	Déformation
μ	Module de cisaillement (Pa)
κ	Module de bulk (Pa)
ν	Coefficient de Poisson
σ	Tenseur de contrainte (Pa)
σ_0	Contrainte résiduelle (Pa)
$\mu(\eta)$	Viscosité dynamique (kg/m.s)
ρ	Résistivité ($\Omega.\text{m}$)
β	Coefficient d'expansion thermique ($1/\text{K}$)

Subscripts

th	Thermique
air	Air
el	élastique en mécanique de déformation
vis	Mécanisme visqueux en mécanique de déformation
$poly$	polysilicon
max	Maximum
$mean$	Valeur moyenne
$init$	Etat initial
N_2	Gaz azote
g	Matériau énergétique à l'état gaz
s	Matériau énergétique à l'état solide
f	fluide

Introduction générale

Les microsystèmes, dont le concept émergeant date de la fin des années 80s, sont des composants destinés à toucher tous les grands secteurs d'applications : transports, santé, télécommunications, environnement... Ces microsystèmes s'enrichissent depuis l'origine, de l'intégration de nouvelles technologies : mécanique (MEMS), optique (MOEMS), fluide (BioMEMS)... Un objectif permanent de la recherche est, au-delà d'imaginer de nouvelles applications, de mettre au point des technologies compatibles avec une intégration multifonctionnelle sur silicium.

Notre projet de recherche relève, dans cette optique, de l'intégration multifonctionnelle : il vise **la conception et la mise au point d'un actionnement fluide à partir de l'utilisation d'un matériau énergétique déposé sur une plate-forme chauffante**, par la récupération de l'énergie pneumatique lors de sa combustion pour gonfler la membrane élastique d'un actionneur.

Il se situe au carrefour de deux axes d'efforts :

1. L'utilisation des matériaux énergétiques sur Silicium proposée par C. ROSSI dès 1995 [1],
2. Le développement des microsystèmes fluidiques appliqués à la biologie et à la chimie pour lesquels il est nécessaire de disposer d'actionneurs et de valves pouvant s'intégrer dans des canalisations micro-usinées sur Silicium, plastique ou polymère.

Les intérêts de l'option que nous avons choisie d'explorer dans ce contexte, sont multiples :

- capacité de stockage longue durée avant la mise à disposition de l'actionneur,
- concentration de l'énergie dans le matériau énergétique pouvant produire de la chaleur et du gaz,
- compatibilité, déjà démontrée par des travaux antérieurs, à l'intégration sur Silicium,
- conformité de l'actionneur vis-à-vis des exigences de productions microsystèmes : bas coût, taille réduite, dispositif ajustable, fiable et compatible avec les objectifs de dispositifs portables et jetables.

A noter que quelques limitations existent a priori, liées au fait que l'actionnement est unique (one shot) ou presque, car on peut toutefois multiplier les points de mise à feu [2].

Nous soulignons ici qu'il y a des intérêts applicatifs très forts, compte tenu des caractéristiques déjà exposées. Par exemple :

nous pouvons imaginer, dans un avenir proche, intégrer ces dispositifs dans des appareils portables et peu encombrants permettant aux médecins, aux pharmaciens, de réaliser des tests de diagnostic pour dépister des maladies, avec un temps de réponse réduit à quelques minutes à comparer avec les analyses lourdes actuelles réalisées dans des laboratoires fortement équipés et délivrant des résultats sur un ou plusieurs jours.

Ces dispositifs miniaturisés peuvent aussi trouver leur place dans les applications sécuritaires embarquées, par exemple, sur la surveillance des risques biologiques : les personnes exposées seraient munies de dispositifs permettant de détecter des possibles contaminations biologiques ou chimiques et d'injecter automatiquement les médicaments.

Dans ces applications, il est souhaitable de disposer de systèmes de détection et de commande de taille réduite, peu chers, consommant peu d'énergie, pour un usage unique.

Par ailleurs, une nouvelle génération de dispositifs appelés laboratoires sur puce et/ou biopuces, commencent d'être développés. Leur objectif est d'intégrer sur une simple puce de quelques cm^3 toutes les capacités d'analyse que l'on trouve dans les laboratoires conventionnels pour des applications diverses d'analyses et d'essais chimiques ou biochimiques. Des exemples sont déjà très nombreux : puces à ADN, criblage de médicaments, synthèse de protéines, tests des vaccins. L'objectif partagé de ce type de dispositif est, à faible coût, de faire des analyses multiples, avec des délais d'analyse très courts...

Le cœur de ces nouvelles technologies est la « microfluidique » c'est-à-dire la manipulation maîtrisée de faibles quantités de fluides. Pour ce faire, des réseaux de canalisations, avec une largeur comprise entre 10 et 100 μm , sont réalisés. Pour commander les fluides dans ces canalisations, des éléments actifs doivent y être intégrés comme des valves, des pompes, des mélangeurs, etc... C'est ce domaine de **l'actionnement intégré de fluides** que nous voulons aborder dans notre travail de thèse.

Compte tenu de ces considérations générales sur les objectifs et les besoins de microsystèmes fluidiques, nous avons élaboré le cahier de charges suivant typique des besoins d'actionnement des laboratoires sur puce (volumes manipulés : entre 10nl et 100nl, canalisations de diamètre : 20 μm environ) en appliquant **le principe simple de gonfler une membrane élastique à l'intérieur de la canalisation** et d'utiliser la pression pneumatique pour pousser le liquide ou obturer la canalisation...

Pour mettre en œuvre ce principe ; nous avons travaillé avec différents types de matériaux comme le Silicium pour la plate-forme chauffante, les polymères pour la membrane élastique, le matériau énergétique, etc. Notre ambition a été de rechercher des solutions nouvelles pour permettre une bonne intégration de ces matériaux dans les technologies plus génériques « microsystèmes », avec la finalité d'obtenir un **actionneur performant et intégrable**.

Evidemment, la compréhension détaillée du fonctionnement d'un tel actionneur est essentielle pour concevoir et optimiser un système fiable. Vu la nature multiphysique des fonctions de l'actionneur : électrique, thermique, fluidique, thermodynamique, mécanique..., une bonne conception d'un tel ensemble doit considérer toutes les interactions entre tous les phénomènes mis en jeu dans l'actionnement. On développera donc, préalablement à la réalisation, un modèle multiphysique complet du microsystème, basé sur une analyse en éléments finis de son fonctionnement et proposera «un prototypage virtuel» pour évaluer à priori les performances du dispositif.

Le travail que nous présentons a été réalisé au LAAS, au sein du groupe MIS, dans l'équipe dirigée par C. ROSSI, chargée de recherche au CNRS. Il s'est inscrit dans un projet ANR : PYRACT, où participent aussi :

- l'équipe de S. Sabo-Etienne du laboratoire LCC CNRS (Laboratoire de Chimie de Coordination) – équipe d'Architecture Organométallique et Catalyse.
- l'équipe de M. Mauzac du laboratoire IMRCP UMR 5623 (Interactions Moléculaires et Réactivité Chimique et Photochimique) – groupe de polymères et polymères cristaux liquides.

Les résultats que je vais présenter, reprennent, pour partie, la contribution de ces différents laboratoires que je remercie ici pour leur appui scientifique et technologique.

Le premier chapitre a comme objectif de souligner l'importance des microsystèmes en général et des microsystèmes microfluidiques en particulier dans les applications de la vie quotidienne. Tout d'abord, nous allons présenter les microsystèmes, leurs origines, leurs développements et leur croissante participation dans le marché mondial. Nous présenterons ensuite une brève description des microsystèmes microfluidiques, ses origines, ses évolutions et applications. Nous nous centrerons sur un des composants actifs des systèmes microfluidiques : les actionneurs fluidiques, pour pousser les fluides dans les canalisations. Dans cet esprit, nous présenterons un état de l'art que nous avons collecté dans la littérature scientifique et dans les caractéristiques de produits commerciaux. Finalement, nous donnerons

nos arguments pour proposer un **nouveau système d'actionnement basé sur la déflagration d'un matériau énergétique.**

Le deuxième chapitre concerne la conception de notre actionneur utilisant une approche multiphysique. Tout d'abord, nous présenterons le cahier de charges de l'application. Nous décrirons la structure de l'actionneur avec l'argumentation des choix technologiques pour sa réalisation, et développerons une modélisation multiphysique : nous verrons les différents outils qui nous ont permis de réaliser ce type de modélisation. Nous développerons, l'approche utilisée pour concevoir la microsource de pression : décomposition d'un modèle global en plusieurs sous-modèles jusqu'à décrire chaque partie élémentaire du système : la plate-forme chauffante, la membrane élastique et la décomposition du matériau énergétique. Nous proposerons d'abord des modèles simplifiés et décrivons les différentes étapes de complexification pour rendre ces modèles chaque fois plus proches de la réalité. Finalement nous montrerons le couplage multiphysique entre sous-modèles pour **proposer une description globale de l'actionneur et pouvoir évaluer ses performances.**

Le troisième chapitre traite de la réalisation de l'actionneur et décrit les différentes étapes de l'intégration technologique. D'abord la réalisation de la plate-forme chauffante avec les techniques de fabrication en surface et en volume des microsystèmes. Deuxièmement, nous décrirons le mode d'élaboration du matériau énergétique, ses propriétés et caractéristiques...et le procédé de dépôt. Troisièmement, nous montrerons la réalisation des deux éléments en Silicone : un mur qui définit un réservoir pour le matériau énergétique et une membrane qui va fermer le dispositif et sera l'élément d'actionnement direct. Finalement nous décrirons le **procédé global d'intégration technologique pour le dispositif complet.**

Le dernier chapitre concerne la caractérisation des éléments constitutifs du dispositif et la validation des modèles réalisés lors de la conception en commençant par les caractéristiques thermiques de la plate-forme chauffante. Ensuite, nous analyserons les propriétés chimiques du matériau énergétique et sa décomposition. Nous analyserons aussi les propriétés mécaniques des matériaux polymères qui font le mur de réservoir et la membrane élastique. **Finalement, nous présenterons les performances du dispositif ainsi fabriqué avant son intégration dans une canalisation microfluidique.**

CHAPITRE I

L'actionnement en microfluidique. Etat de l'art et problématique

1 Introduction

Au cours des 25 dernières années, motivé par des objectifs de performances et de réduction des coûts et par des perspectives de production de masse, un travail important a été effectué pour miniaturiser toutes sortes de systèmes : mécaniques, électromécaniques, thermiques, fluidiques. C'est cette volonté de miniaturisation qui a donné naissance à ce que l'on appelle les Microsystèmes : MST (MicroSystem Technology) en Europe ou MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) aux Etats-Unis. La première personne à évoquer l'idée des microsystèmes a été Richard Feynman dans son discours visionnaire à Caltech en 1959 intitulé « There is plenty of room at the bottom » [1] où il montrait l'intérêt de la miniaturisation des machines, même si, à cette époque, aucune application concrète n'était clairement définie.

Les microsystèmes aujourd'hui ont des tailles typiquement comprises entre $100\mu\text{m}$ et quelques millimètres bien que quelquefois la notion de microsystème concerne des dispositifs multifonctionnels de taille bien supérieure au centimètre (Figure 1). Ils sont constitués de capteurs, d'actionneurs et de fonctions de traitement du signal, intégrés sur un substrat unique (monolithique) ou assemblés (hybrides).

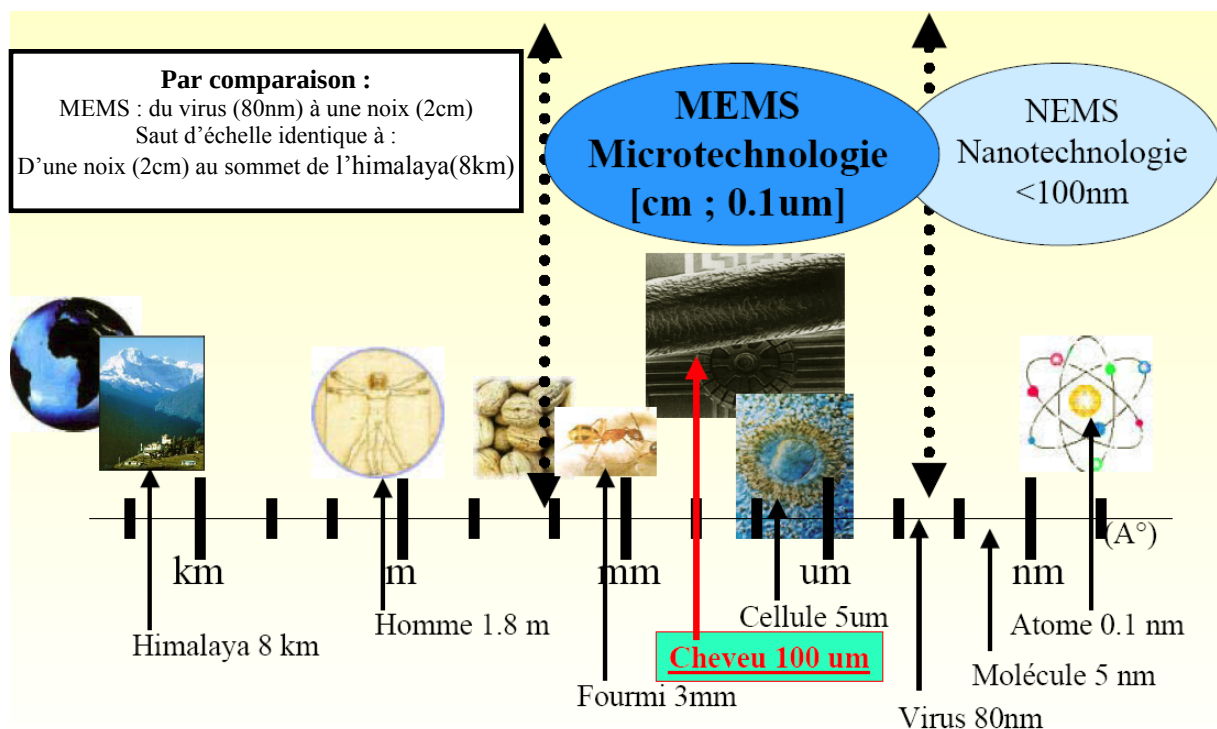


Figure 1. Positionnement des microsystèmes dans l'échelle de taille des objets.

L'histoire des microsystèmes a été marquée par quelques dates et périodes caractéristiques :

- les années 80-90 ont vu se développer quelques micro capteurs intégrant la mesure et l'électronique de traitement du signal [2].
- Fin des années 80, le fameux micromoteur rotatif réalisé sur puce de silicium par l'équipe de R. S. Muller à Berkeley [3], a été déterminant sur l'essor qu'allait connaître les microsystèmes dans le monde : cet exemple a démontré pour la première fois, la possibilité d'intégrer de manière compatible avec les procédés de la microélectronique, des moyens d'actionner. Le terme MEMS prenait alors toute sa légitimité.
- Les années 90 ont été marquées par deux faits majeurs :
 - 1) tout d'abord, l'émergence des premiers microsystèmes sur des marchés industriels de grand volume comme l'automobile et la péri informatique. En particulier, l'airbag pour les applications automobiles [2], qui consistait en l'intégration d'un capteur (accéléromètre), avec des capacités de traitement de l'information, de l'électronique et un actionneur (résistance chauffante initiant un matériau énergétique), reste tout à fait illustratif de ces succès industriels.
 - 2) Ensuite, l'extension du concept vers la microfluidique : en 1989, Manz et al lancent le concept de Laboratoire sur Puce ou μ TAS (Micro Total Analysis Systems), lors de la cinquième conférence internationale de Solid-State Sensors and Actuators [4], en proposant des systèmes miniaturisés annonçant de multiples éléments totalement intégrés comme des valves [5], des pompes [6], des mélangeurs [7], pour manipuler des fluides dans un réseau de canalisations et faire des analyses multiples sur la même puce. **C'est le début d'une discipline nouvelle à dominante technologique : la microfluidique¹.**

Poussé par des perspectives d'applications importantes en biologie (biopuces) et en chimie (laboratoire sur puce), l'effort de Recherche et Développement (R&D) en microfluidique a été croissant ces dernières années, selon des axes scientifiques variés incluant la technologie, la mécanique des fluides, la physique et aussi la chimie des interfaces.... Ceci est illustré, sur la Figure 2, qui montre un

¹ La microfluidique peut être définie comme la science et la technologie de la manipulation de faibles volumes de fluides, entre 10^{-9} et 10^{-18} litres, mettant en œuvre des canalisations de quelques dizaines à quelques centaines de microns [8].

accroissement rapide du nombre de publications en relation avec le mot clé « microfluidics » à partir de la base de données de l'INSPEC de l'INIST.

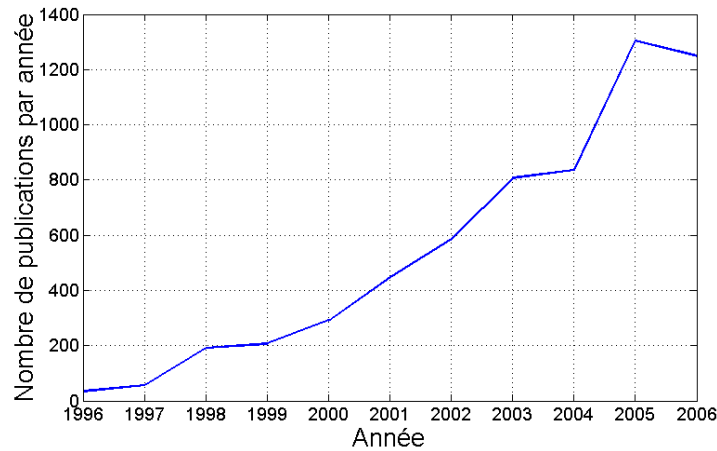


Figure 2. Nombre de publications par année en relation avec la microfluidique

- Dans les années 2000, les dispositifs et les applications de microsystèmes sont partout présents (cf. tableau 1), avec l'intégration de fonctions multiples : mécaniques, fluidiques, optiques et biochimiques. Les microsystèmes deviennent de plus en plus pluridisciplinaires et des appellations comme MOEMS, Bio-MEMS ou RF MEMS sont utilisées pour désigner les principales spécificités de MEMS selon que les fonctions principales soient optiques, biologiques, chimiques ou radio fréquences [9].

Le tableau ci-dessous illustre cette diversité d'applications qui explique aussi une croissance rapide du marché des microsystèmes représentant aujourd'hui près de 5 milliards de dollars annuels avec un taux de croissance attendue de 20% dans les prochaines années. [10]

Domaine technologique	Dispositif/Applications	Compagnies
Mesures Inertielles	Accéléromètres, capteurs de vitesse, capteurs de vibration	TI, Boeing, Motorola, ADI, Sarcos, entre autres.
Microfluidique et test/processus chimique	Puce ADN, laboratoire sur puce, capteurs chimiques, contrôleurs de flux, micro valves	Berkeley MicroInstruments, Hewlett Packard, Xerox, Canon, Epson, Caliper, Agilent, entre autres.
MEMS optiques (MOEMS)	Ecrans, interrupteurs optiques, optique adaptative	Tanner, SDL, GE, Samoff, Northrop-Grumman, entre autres.

Mesures de pression	Capteurs de pression pour applications moteur, médicales et industrielles	Goodyear, Delco, Motorola, Ford, Siemens, TI, entre autres.
Technologie RF	Interrupteurs RF, filtres, capaciteurs, inducteurs, antennes, décaleurs de phase, ouvertures scannées	Rockwell, Hughes, ADI, Raytheon, TI, Aether.
Autres	Actionneurs, micro relais, senseurs d'humidité, stockage de données, capteurs d'effort, composants microsatellite	Boeing, HP, Xerox, Aerospace, Siemens, ISSYS, Honeywell, IBM entre autres.

Tableau 1. Les principales applications MEMS en 2003. [11]

En 2003, la totalité du marché de la microfluidique a été évalué à 3000 et 4450 millions de dollars selon une analyse faite aux Etats-Unis [11]. Cette analyse prend en compte des objets comme des systèmes de contrôle de fluide, de mesure de gaz et de fluides, des systèmes de dépistage médical et d'autres systèmes comme les pompes miniaturisées pour l'administration de médicaments. Il est prévu, selon le groupe de travail canadien CNW, que le marché des technologies microfluidiques (biopuce, laboratoire sur puce...) atteigne 6,2 milliard de dollars d'ici 2011.

Les technologies microfluidiques et les dispositifs associés sont donc un domaine technologique en très forte croissance et nous allons tenter de l'appréhender dans les paragraphes suivants.

2 Les microsystèmes fluidiques : historique et applications

Dès les années 90, la réduction des dimensions attendue de l'intégration microsystème des dispositifs d'analyse biologique et chimique ouvre des perspectives avantageuses :

- l'utilisation des technologies microélectroniques pour la réalisation de systèmes de détection, permet la fabrication massive de microdispositifs et va réduire les coûts d'élaboration.

- L'utilisation de faibles quantités de fluides et réactifs va réduire les coûts d'opération, en exploitant le fait que de faibles volumes de fluide peuvent être suffisants pour réaliser certaines analyses [12][6]: chimie clinique ($\approx 10^{-15}$ l), immunoessais pour le diagnostic et la compréhension des maladies ($\approx 10^{-9}$ l), analyses d'ADN ($\approx 10^{-3}$ l), analyse des cellules unitaires ($\approx 10^{-12}$ l), séparation des espèces par électrophorèse ($\approx 10^{-12}$ l à 10^{-6} l), analyse du glucose pour le contrôle du diabète ($\approx 10^{-6}$ l).
- Les délais d'analyses pourront être réduits et la sensibilité des mesures accrues [8].

2.1 La situation dans le monde

Même si les premiers systèmes faisant intervenir un élément microfluidique sont proposés dès les années 80 par la Recherche Académique, comme par exemple le chromatographe à gaz miniaturisé dans une puce de quelques centimètres de côté [11], c'est à partir des années 90 qu'un réel travail de miniaturisation commence dans les domaines de la chromatographie, des systèmes de séparation par électrophorèse, des pompes électroosmotiques, des mélangeurs, etc. [11].

Ainsi les premiers véritables systèmes microfluidiques intégrant de multiples fonctions ont commencé à voir le jour dans les années 90. On peut citer, par exemple, la puce à trois fonctions : mélange de réactifs, réaction enzymatique et séparation de Jacobson et al [13], et un système de titrage de solutés aqueux, intégrant des mélangeurs et des amplificateurs capables de faire de la digestion enzymatique et de l'électrophorèse de Burns et al [14].

Au début des années 2000, les premiers « laboratoires sur puce » commerciaux permettant d'identifier des fragments d'ADN, différents bio-objets comme des virus par séparation électrophorétique et les protéines. Dans cette catégorie, il faut citer le système Agilent 2100 Bionalyzer, commercialisé à partir de 1999 par la société Agilent Technologies : les échantillons à analyser sont très petits (entre 1 et 4 μ l) et l'analyse ne dure que 30 minutes (Figure 3a). Notons que, ces systèmes ont encore besoin d'un ordinateur relativement encombrant pour réaliser les traitements du signal, les analyses et la consultation des bases de données (Figure 3b), ce qui montre que tous les verrous technologiques d'intégration ne sont pas levés. Nous y reviendrons au cours du chapitre.

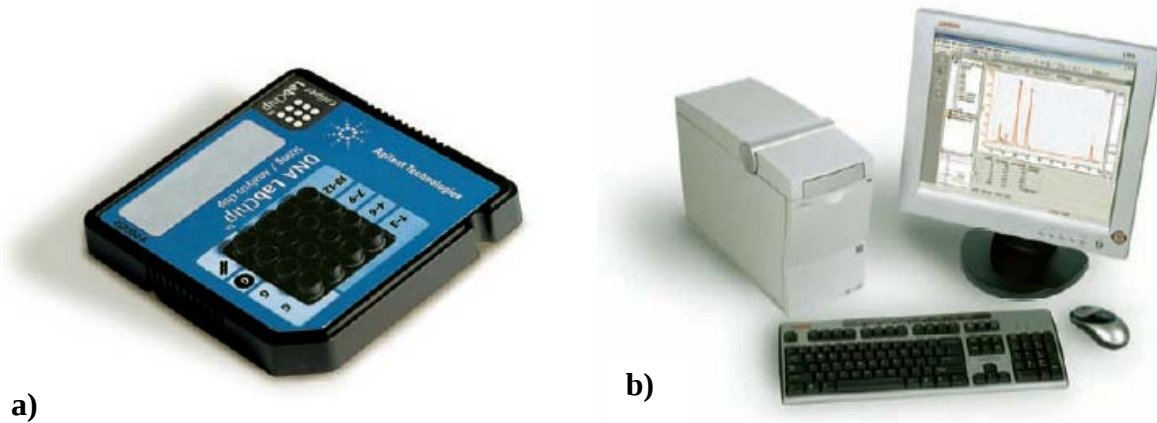


Figure 3. Système Agilent 2100 Bionalyzer a) microsystème fluide b) système d'analyse

Plus récemment, des systèmes ont été commercialisés pour détecter le niveau de glucose dans le sang et contrôler le diabète. La société Abbott Point of Care Inc. commercialise son dispositif FreeStyle Lite™ (à partir de mai 2007) qui prélève une très faible quantité de sang de 0,3µl (une goutte comparable à la taille de la tête d'une épingle) et fait l'analyse en 5 secondes environ. Le système fait 7,6×4×2cm soit un volume d'environ 63cm³ (Figure 4)[15].



Figure 4. Système FreeStyle Lite™ pour le contrôle de la diabète

La même société commercialise aussi le système i-STAT® (Figure 5a). Il s'agit d'un système d'analyse du sang à partir de faibles volumes prélevés, de 17µl jusqu'à 95µl. Le système utilise des cartouches jetables utilisables une seule fois. Les résultats des analyses sont donnés avec seulement 10 minutes d'analyse ce qui est extrêmement performant par rapport à des analyses classiques dans les laboratoires spécialisées qui peuvent prendre facilement une dizaine d'heures. A noter ici que les cartouches utilisent le principe d'un stockage de gaz comprimé. Quand les cartouches sont introduites dans le système d'analyse (Figure 5b), par action mécanique, une membrane éclate et libère le gaz qui pousse le fluide

dans une canalisation pour permettre des analyses d'électrolytes, de chimie générale, des gaz et de l'hématologie. Les cartouches utilisés ont une surface d'environ 3×3cm, le système d'analyse fait 6,41×20,97×5,21cm avec un poids de 520g. Il faut une cartouche différente pour chaque analyse. Une amélioration possible du système, au delà de la réduction de ses dimensions, serait l'intégration de plusieurs analyses dans une seule cartouche ainsi que l'automatisation de l'actionnement. Ce système fonctionne avec une batterie de Lithium de 9V. [16].

D'autres systèmes microfluidiques commerciaux peuvent être trouvés [17], pour des applications comme la cristallisation de protéines, les immunoessais, l'administration de médicaments, les pompes d'infusion implantables, et autres systèmes non invasifs [18]...

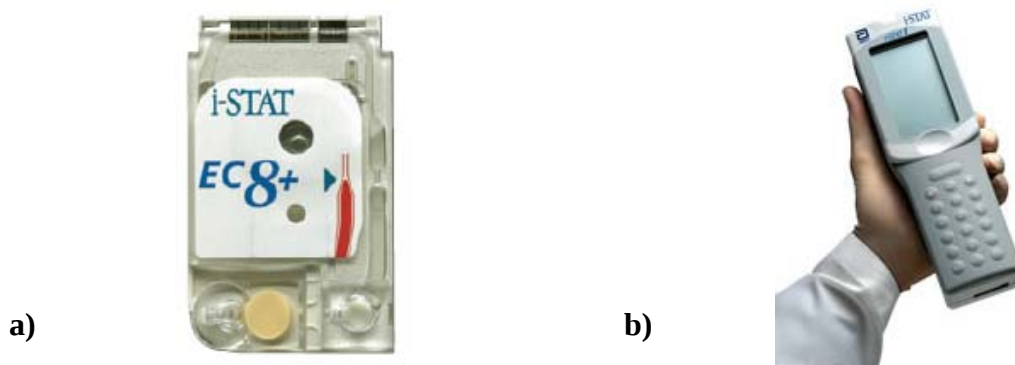


Figure 5. Système i-STAT® a) cartouche jetable b) analyseur portable

2.2 Rappel des activités du LAAS-CNRS dans le domaine de la microfluidique

Notre activité s'inscrit naturellement dans l'effort que le LAAS consacre aux microsystèmes fluidiques depuis les années 90s, dans le prolongement des travaux de pionniers des équipes de BERKELEY [19] sur le micro usinage du Silicium :

- la première étape de cet effort a porté sur la définition d'une filière d'actionneurs dont les valves fluidiques sont intégrées sur Silicium. Cette option est illustrée par le projet européen BARMINT [20] que le LAAS a coordonné dans le milieu des années 90s et par le projet CNRS qui a suivi, intitulé MICROMED [21]. Le projet applicatif portait sur l'intégration d'une pompe doseuse pour le traitement médical continu de l'hypertension. Le système associant toute l'électronique, les capteurs et le traitement de signal. Le projet couvrait à la fois le développement d'une filière fluidique sur silicium

et la mise au point d'un procédé d'assemblage 3D des différentes fonctions associées aux fonctions fluidiques. D'intéressants résultats ont été obtenus sur les procédés technologiques notamment mais le projet a rencontré dans l'intégration Silicium, des difficultés graves de « collages électrostatiques Si-Si » qui ont mis en sommeil cette filière monolithique Silicium.

- La deuxième étape a correspondu à l'émergence des puces à ADN et à la volonté du CNRS de définir des approches alternatives à l'approche par photolithographie proposée par AFFYMETRIX [22]. Deux projets parallèles ont été lancés au LAAS : l'un, sur la base de la mise au point de matrices d'éjecteurs fluidiques commandables, éjecteur par éjecteur, par A.M. GUE ([23][24]), l'autre sur la base de matrices de poutres commandables par C. BERGAUD [25].
- Actuellement, plusieurs groupes du laboratoire sont concernés par la microfluidique et de nombreux projets sont en cours qu'il s'agisse d'applications à la médecine, à la biologie ou à la chimie. Des applications pour la chimie ont, en particulier, vu le jour avec un accord entre le LAAS et le laboratoire de chimie du CNRS sur Toulouse. Cette activité, coordonnée au niveau du laboratoire par J. TASSELLI et A. MARTY [26], vise à réaliser des systèmes de micro réaction chimique et aussi à intégrer des puces en Si dans des systèmes microfluidiques (avec la collaboration de S. CHARLOT) [27]. D'autres études ont été réalisées aussi en technologie microfluidique pour réaliser l'intégration de réseaux de canalisations 3D, sur des puces actives de capteurs (thèse de P. ABGRALL [28] sous la direction de A. M. GUE). Ce travail se poursuit maintenant par la thèse de R. FULCRAND, sous la direction de A. BOUCABACHE. Plus récemment enfin, en collaboration avec le LETI, des études ont été mises en place, sur le contrôle des fluides à partir des polymères thermosensibles, notamment avec la participation de J. SUDOR [29].

L'idée d'exploiter la filière des **microsystèmes pyrotechniques** pour actionner des fluides remonte aux activités de C. ROSSI [30] qui, pour la première fois, a proposé d'exploiter l'énergie stockée dans les matériaux énergétiques pour réaliser des fonctions mécaniques de puissance dans les microsystèmes. Cette proposition a été explorée dans plusieurs directions, par le laboratoire, durant ces dix dernières années : micro propulsion [31][32], actionnement mécanique [33], sécurité civile et militaire [34][35] **Notre travail de thèse s'inscrit dans cette continuité et aborde l'idée d'un actionneur pneumatique de liquides. Les avantages que nous essayons de mettre en avant sont :**

- la capacité de stockage des matériaux pyrotechniques et la disponibilité immédiate de l'énergie en cas de besoin,
- l'énergie par gramme que l'on peut ainsi stocker pour réaliser des efforts mécaniques très intenses,
- l'aptitude à l'intégration dans les microsystèmes, biopuces, laboratoires sur puces...

2.3 Les applications et les verrous

De cette analyse rapide de l'état de l'art (international et local), nous percevons que, si les progrès attendus sont confirmés, la microfluidique et les microsystèmes fluidiques amèneront une véritable révolution dans le domaine des sciences du vivant, de la santé et aussi de la chimie. Nous pouvons classer les applications potentielles de la microfluidique en 3 grands domaines :

- **Sciences du vivant et la biologie**

Le développement des connaissances fondamentales du vivant, illustré par la génomique et la protéomique, a impliqué de travailler de façon massivement parallèle sur des milliers d'objets ou de réactions biologiques : systèmes de criblage haut-débit. La réflexion a débuté aux Etats-Unis, dans les années 80, avec des études sur le génome humain invitant à développer des microsystèmes capables de faire des analyses multiples avec une haute sensibilité et une grande résolution. Cette dynamique a conduit à l'émergence du concept de biopuce. Aujourd'hui, tous les experts s'accordent à penser que la biologie moléculaire et la génétique sont parmi les enjeux majeurs de demain pour notre société [6][36][37][38].

- **La chimie ou le génie des procédés**

La chimie connaît, de la même manière que la biologie, des perspectives nouvelles motivées par des objectifs d'analyse de sécurisation, d'optimisation, de réduction des quantités stockées et analysées, etc. qui donnent toute la légitimité aux recherches en microfluidique. L'enjeu est crucial et a été identifié dès les années 90 : les microréacteurs chimiques devraient permettre à terme de réduire les temps d'analyse, les volumes mis en jeu et les coûts...

- **La santé**

Dès la fin des années 80, les microsystèmes ont ouvert des perspectives intéressantes pour les applications médicales [39]. De nouvelles applications sont dans le prolongement des systèmes de criblage haut débit pour réaliser des analyses moins coûteuses en consommables, en main d'œuvre et en volume d'échantillons que celles d'aujourd'hui.

Une deuxième famille de dispositif concerne les microsystèmes (instrumentation portable) pour aider à la médecine de ville, les soins à domicile, la sécurité environnementale et alimentaire. Ces systèmes pourraient avoir des conséquences très bénéfiques en santé publique.

* * * *

Mais, il est évident que ces dispositifs microfluidiques (biopuces, laboratoires sur puces, microréacteurs) sont des systèmes très complexes qui mettent en jeu des technologies et un savoir faire au carrefour de disciplines différentes, principalement de la physique, de la biologie moléculaire et des microtechnologies. En effet un processus d'analyse biochimique implique d'enchaîner une longue série d'opérations : il faut stocker, mélanger, filtrer, extraire, synthétiser, détecter des espèces ou molécules chimiques ou biologiques. Après 10 ans d'efforts de recherche soutenus (Figure 2) et en dépit de quelques dispositifs commercialisés, plusieurs verrous technologiques sont encore à lever pour aboutir aux objectifs d'intégration visés [11]:

1. La connectique, c'est-à-dire l'interface avec l'extérieur ou avec d'autres systèmes microfluidiques est encore trop souvent non prise en compte. Plusieurs équipes travaillent sur ce point notamment pour des applications liées à la spectrométrie de masse [10] : dispositif d'analyse intégré permettant de connaître la composition d'un échantillon.
2. L'injection et la manipulation des fluides est une difficulté sans solution unique et simple actuellement. Nous trouvons dans la littérature des systèmes intégrant des valves pneumatiques pour injecter le fluide de façon hydrodynamique ou des systèmes fluidiques utilisant des forces électrocinétiques et hydrostatiques ou encore une pression négative [10][40]. Comme nous le verrons plus en détail dans ce chapitre, tous les besoins en actionnement de fluide ne sont pas satisfaits et de nombreux verrous technologiques d'intégration de ces modes d'actionnement dans les canalisations persistent.
3. L'intégration technologique des éléments de contrôle comme les vannes [5], mélangeurs [41][42][43], etc. La réduction de taille, l'intégration sur des systèmes microfluidiques sont des aspects essentiels pour l'évolution des systèmes microfluidiques. Notons ici, comme nous l'avons déjà indiqué, que ces exigences ont conduit à des choix de

réalisation, utilisant dans un premier temps des technologies « dures »² et plus récemment, à des choix de technologies « molles »³.

3 L' actionnement des fluides en microfluidique

3.1 Les principaux mécanismes d'actionnement en microfluidique

La problématique de la manipulation des fluides en microsystèmes est apparue, dès les années 90, essentiellement pour les applications médicales [44]. Les premiers dispositifs développés, dès la fin des années 80, pour prélever, manipuler et injecter, sont des micro pompes piézoélectriques proposées par van Lintel et *al.* [45] : un matériau piézoélectrique en contact avec une membrane (Figure 6) déforme cette dernière quand une tension électrique est appliquée. [46]-[49]. Ce principe simple a été aussi utilisé par Luginbuhl et *al.* [50] pour générer une onde mécanique à partir des transducteurs inter-digités, sur une membrane recouverte par un matériau piézoélectrique. L'onde mécanique induit une onde acoustique dans le fluide qui réalise la poussée (Figure 7).

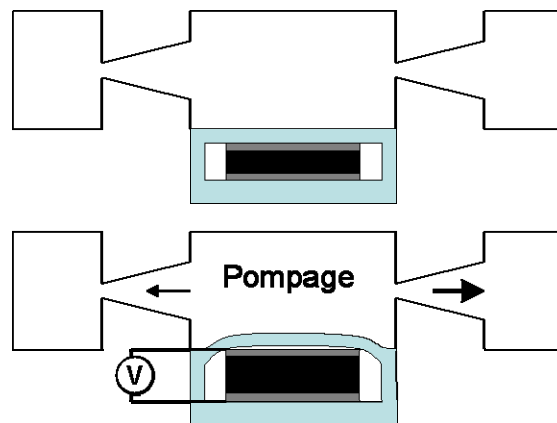
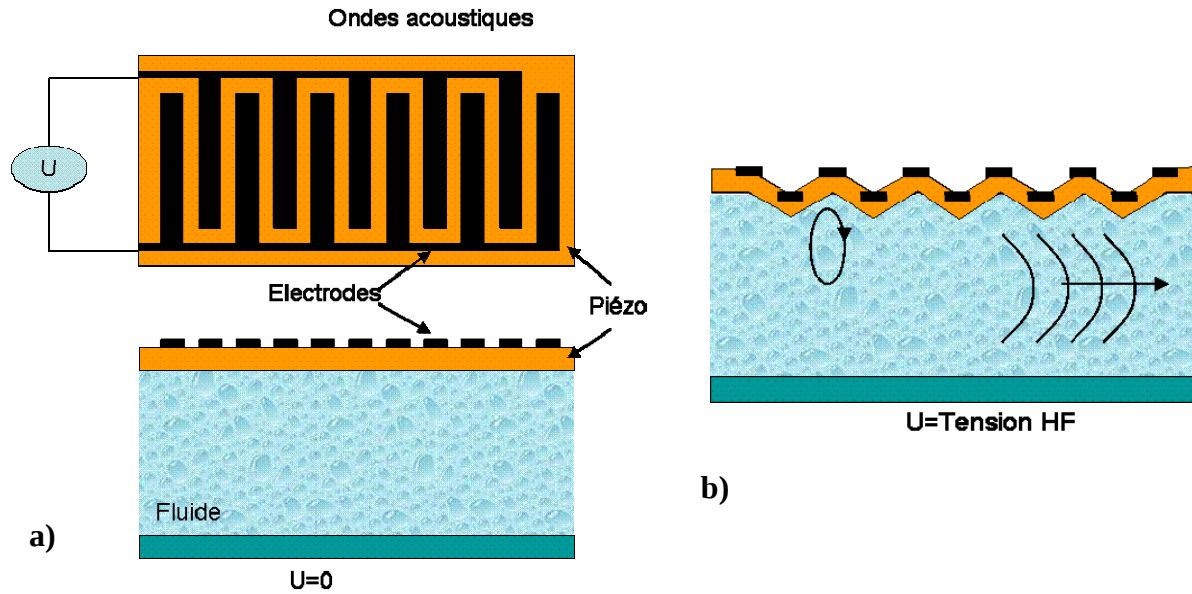


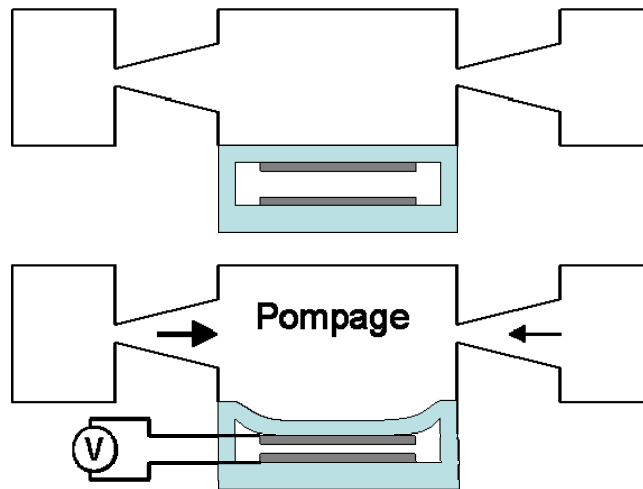
Figure 6. Principe de fonctionnement d'une pompe piézoélectrique

² Technologies basées sur les matériaux comme le verre ou le silicium

³ Technologies moins coûteuses basées sur les matériaux polymères comme le PMMA ou le PDMS



D'autres principes d'actionnement ont été explorés dans les années 90s : les pompes électrostatiques [51][52] où la membrane de la pompe est déformée par un potentiel électrique (Figure 8).



On rappellera ici, la structure de la pompe « tout Silicium » conçue et construite par notre laboratoire [53]. Elle utilise une pompe électrostatique et deux valves micro usinées comme le schématise la Figure 9. Ces options « tout silicium » se sont heurtées à des difficultés de collage des pièces mobiles qui ont, malgré le haut niveau d'intégration, entraîné un ralentissement des études.

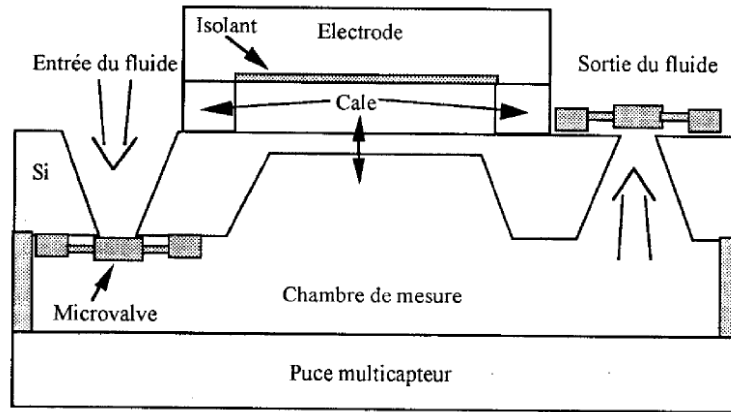


Figure 9. Architecture monolithique proposée par le LAAS en 1997 d'après [53]

Le principe électrostatique entraîne en général certaines difficultés principalement dues aux grands champs électriques produits qui peuvent affecter les fluides en produisant notamment l'électrolyse. Une exception se trouve dans le travail récent du groupe de Y-T. Tai *et al.* [54] utilisant une technologie polymère basé en Pylène pour enrober les contacts métalliques et en utilisant un principe péristaltique avec des cavités d'actionnement remplies d'air. Ceci permet de concentrer les champs électriques au maximum dans les cavités évitant l'électrolyse et permettent en même temps une haute intégrabilité du fait de la taille ($\approx 600\mu\text{m} \times 200\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$), par contre requièrent un niveau assez élevé de tension ($\approx 150\text{V}$).

Les pompes électromagnétiques [55]-[57] qui nécessitent un champ magnétique, généré souvent par des solénoïdes extérieurs : ces dispositifs, quoique déjà performants, sont très souvent complexes à mettre en œuvre et difficiles à intégrer dans des microsystèmes fluidiques de type laboratoire sur puce car trop volumineux et nécessitant des niveaux de tension ou de courant trop élevés.

D'autres mécanismes moins performants mais aussi moins volumineux ont été développés dans les mêmes années. La Figure 21 résume les différents mécanismes d'actionnement. On notera ici les principaux.

Des pompes thermo pneumatiques [58]-[64] ont été proposées, qui consistent en une chambre contenant un liquide ou gaz. Cette chambre est chauffée par une résistance électrique réalisée en couche mince. Pour augmenter l'effet de changement de volume dans la chambre primaire, des membranes élastiques sont utilisées (Figure 10a). Ces systèmes de pompage thermique consomment une grande quantité d'énergie électrique, ce qui en limite leur intérêt en microsystèmes fluidiques.

Des pompes, fonctionnant avec des alliages à mémoire de forme (Figure 10b) (typiquement TiNi) ont été proposées qui sont compatibles avec les technologies

microsystèmes. Le matériau à mémoire de forme, déformé par différents moyens à température ambiante, récupère sa forme initiale par chauffage à une température plus élevée entre 70 et 75°C [65][66]. Là encore, ces dispositifs ne sont pas bien adaptés aux applications microfluidiques : ils restent trop volumineux.

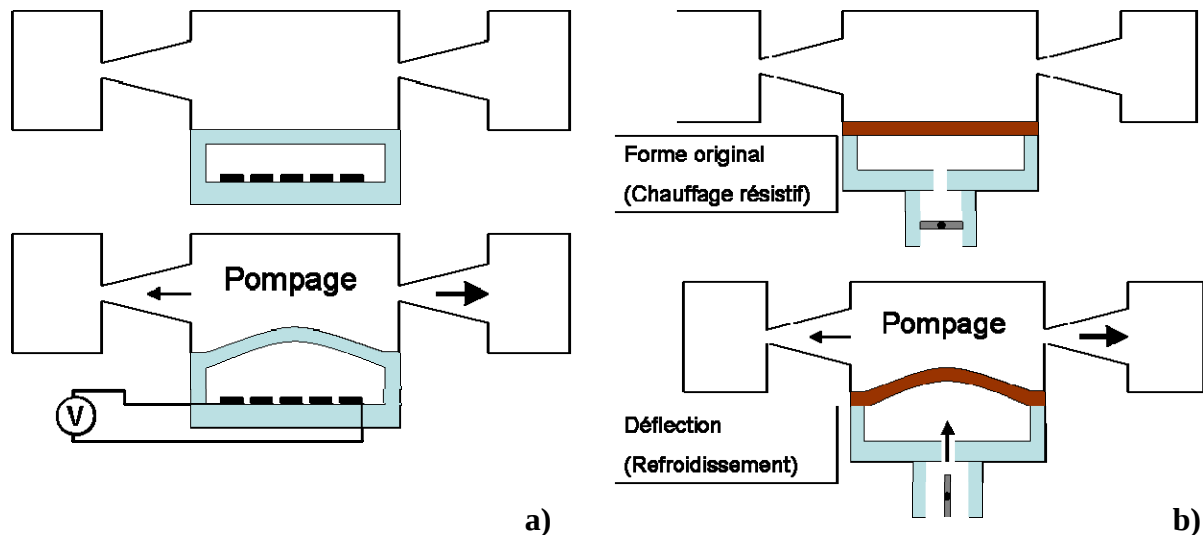


Figure 10. Principe de fonctionnement d'une pompe a) thermo pneumatique, b) à alliage à mémoire de forme

Avec le développement de la microfluidique dans les années 90, de nouveaux mécanismes de manipulation ont été explorés :

L'exploitation des effets électrohydrodynamiques (EHD), électro-osmotiques et magnétohydrodynamiques (MHD). Ces mécanismes sont basés sur l'exploitation des interactions entre le fluide et un champ électrique (pour EMD) et électromagnétique (pour la MHD). Il faut alors fournir de l'énergie de façon continue au fluide pour incrémenter sa quantité de mouvement ou sa pression, qui est en général assez faible, à l'exception des pompes par effet électroosmotique, qui elles nécessitent par contre, un niveau de tension très important. Les pompes EHD [67]-[71] sont basées sur les forces électrostatiques agissant sur des fluides diélectriques. Les mécanismes sont les suivants :

1. des charges électriques sont induites à l'interface entre deux fluides par effet d'un champ électrique sur l'interface, puis drainées par un autre champ électrique transverse qui met en mouvement le fluide chargé (Figure 11a),
2. des charges électriques sont injectées à partir d'une électrode par une réaction électrochimique. Ces ions sont collectés dans une deuxième électrode pour pousser le

fluide (Figure 11b). Les forts niveaux de tension rendent ces pompes EHD non adaptées aux exigences des dispositifs portables.

Les pompes MHD [72][73] utilisent l'effet d'un champ électrique et magnétique sur des ions contenus dans une solution (force de Lorentz) (Figure 12a). Ces systèmes sont donc difficilement intégrables car ils nécessitent des aimants permanents ou des bobines miniatures. De plus, des effets thermiques limitent aussi la densité de courant applicable. Les pompes électroosmotiques [74]-[77] tirent parti de la présence de charges à l'interface fluide/paroie. Des ions dans le liquide compensent cet effet. Un champ électrique est appliqué pour mettre en mouvement le fluide (Figure 12b). L'électroosmose est un mécanisme simple et facilement intégrable dans des micro canalisations car il suffit d'intégrer des électrodes métalliques.

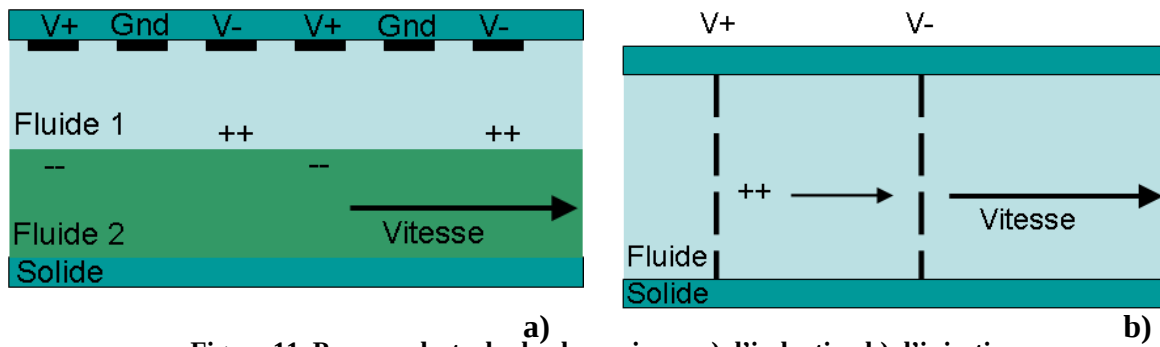


Figure 11. Pompes électrohydrodynamiques a) d'induction b) d'injection

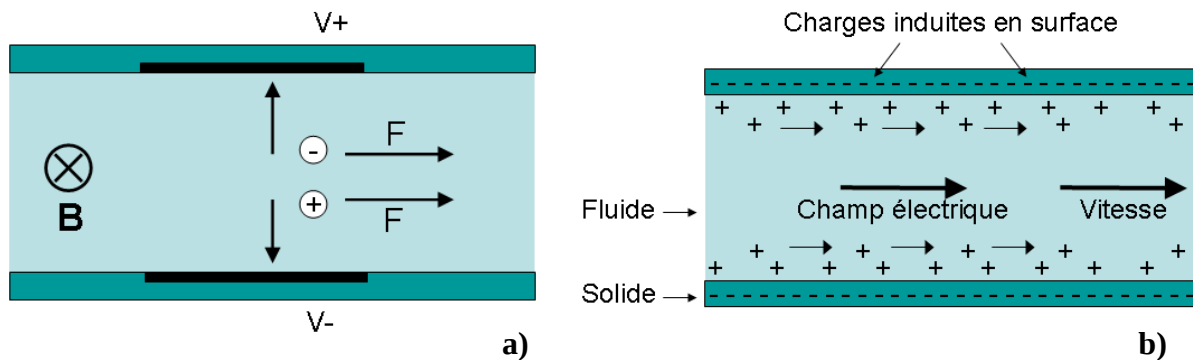


Figure 12. Principe d'une pompe a) magnétohydrodynamique, b) électroosmotique

D'autres solutions consistent à modifier la capillarité le long d'une canalisation : en d'autres termes la mouillabilité ou l'angle de contact entre le matériau de la paroi et le fluide. Deux propositions ont été publiées :

1. par « thermocapillarité » [78]. Il s'agit d'évaporer le fluide en créant une bulle de vapeur. Quand on change l'endroit d'échauffement (à partir des résistances) cette bulle se déplace générant le mouvement du fluide (Figure 13a). Le même principe est utilisé aussi pour déplacer des gouttes de PDMS (Figure 13b). [79]. Une exigence de cette technique est de devoir intégrer plusieurs résistances pour pouvoir déplacer le fluide.
2. Par électrocapillarité, en appliquant un potentiel électrique. On parle de « Continuous Electrowetting » (CEW) [80] quand un métal liquide comme le mercure est inséré dans un capillaire rempli d'un électrolyte. Au départ la distribution de densité de charges est homogène, par contre, sous l'action d'un champ électrique, une redistribution des charges va être générée, ce qui va entraîner une tension de surface mettant en mouvement le métal liquide dans l'électrolyte. (Figure 14). On trouve aussi « Electrowetting » (EW) et « Electrowetting-on-dielectric » (EWOD) [81][82], mécanismes qui utilisent un électrolyte en contact avec l'air. Une tension électrique appliquée produit le changement de l'angle de contact liquide-solide à l'interface liquide-solide-gaz, ce qui fait avancer le liquide dans la canalisation (Figure 15a et Figure 15b). Ces mécanismes sont caractérisés par de forts niveaux de tension pour obtenir de faibles niveaux de pressions et de débits, les rendant incompatibles avec une intégration technologique pour des applications portables.

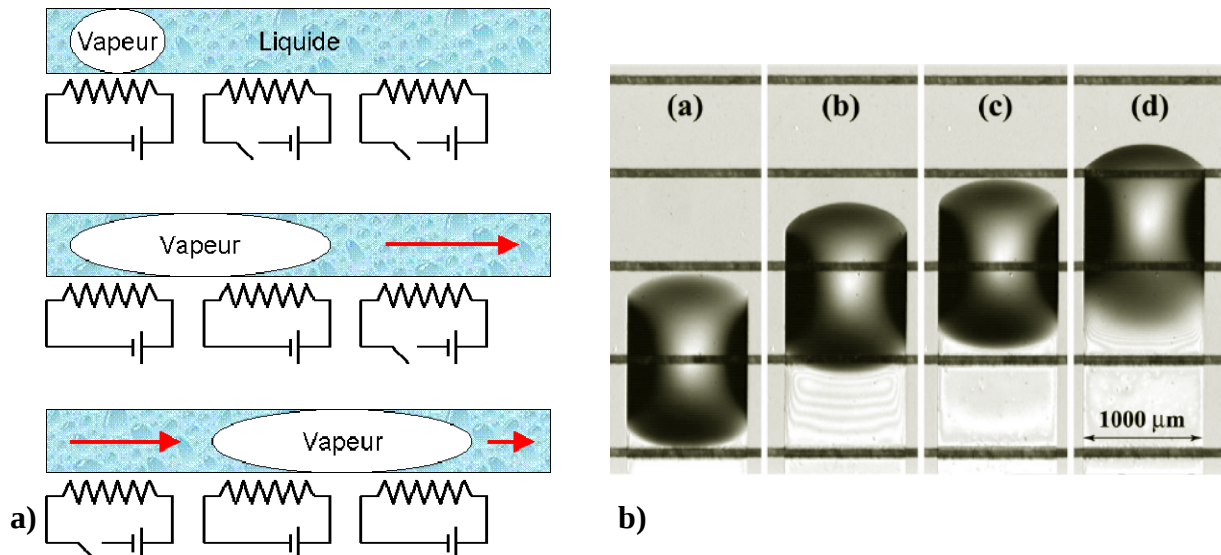


Figure 13. a) Principe de thermocapillarité b) photo de réalisation

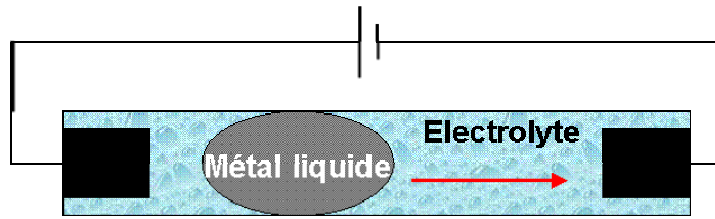


Figure 14. Principe d'électrocapillarité « Continuous Electrowetting » (CEW)

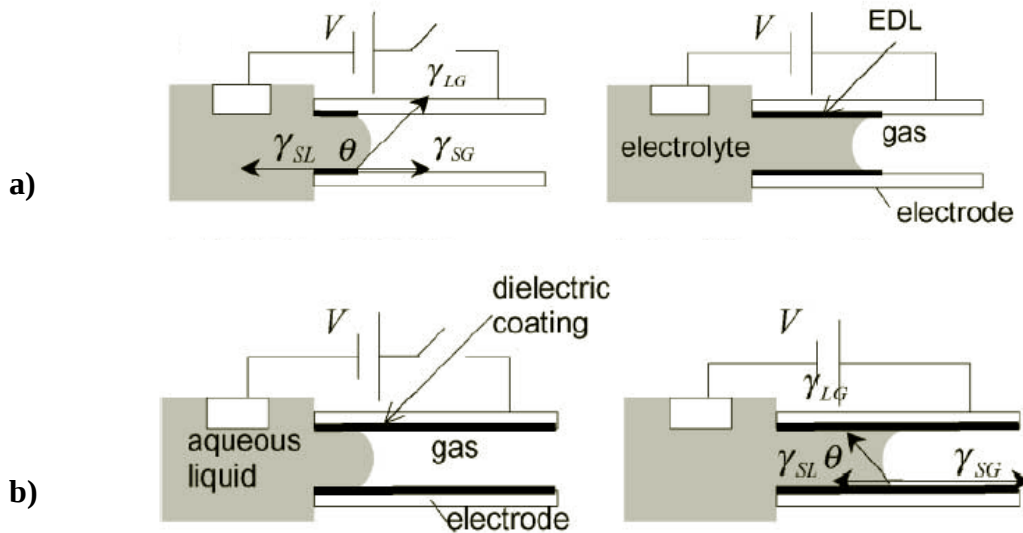


Figure 15. Principe d'électrocapillarité a) electrowetting (EW) b) electrowetting-on-dielectric (EWOD)

En résumé, les mécanismes d'actionnement de type électroosmotiques, par électro et thermo capillarité semblent aujourd'hui les mieux adaptés à la microfluidique des biopuces et laboratoires sur puce :

1. ils sont simples et n'ont pas besoin d'éléments mécaniques internes.
2. Ils tirent profit des faibles dimensions : par exemple avec le gain en viscosité dans le fluide et des effets de surface qui dominent sur les effets inertiels aux faibles dimensions.

Par contre ils restent limités aux faibles débits (<0.01ml/min) et les pressions dépendent des niveaux de tensions. Pour des tensions d'actionnement <10V, les surpressions obtenues sont <5kPa. Bien sûr avec des tensions plus élevées, des forts niveaux de débits et de pression peuvent être obtenus : 500ml/min et 2MPa pour 100V [77]. Ces mécanismes sont limités aussi à certains types de fluide. Des limitations peuvent intervenir avec l'échauffement par effet Joule dû au courant qui passe dans le fluide.

Des équipes américaines ont déjà exploré l'actionnement pneumatique [83]-[87]. La structure de base est montrée à la Figure 16a, comportant des sources de pression externes avec des pressions $> 100\text{kPa}$ et des valves rapides. Un des travaux remarquables qui fait référence dans le domaine du micro actionnement pneumatique est le travail de Unger et al [83] dans le groupe de Quake aux Etats-Unis qui vise une très haute intégration à grande échelle de valves et pompes : 30 dispositifs par mm^2 sont intégrés sur un matériau polymère choisi (Figure 16b) qui évite les difficultés d'une intégration de plusieurs matériaux (contraintes, adhérence, etc.).

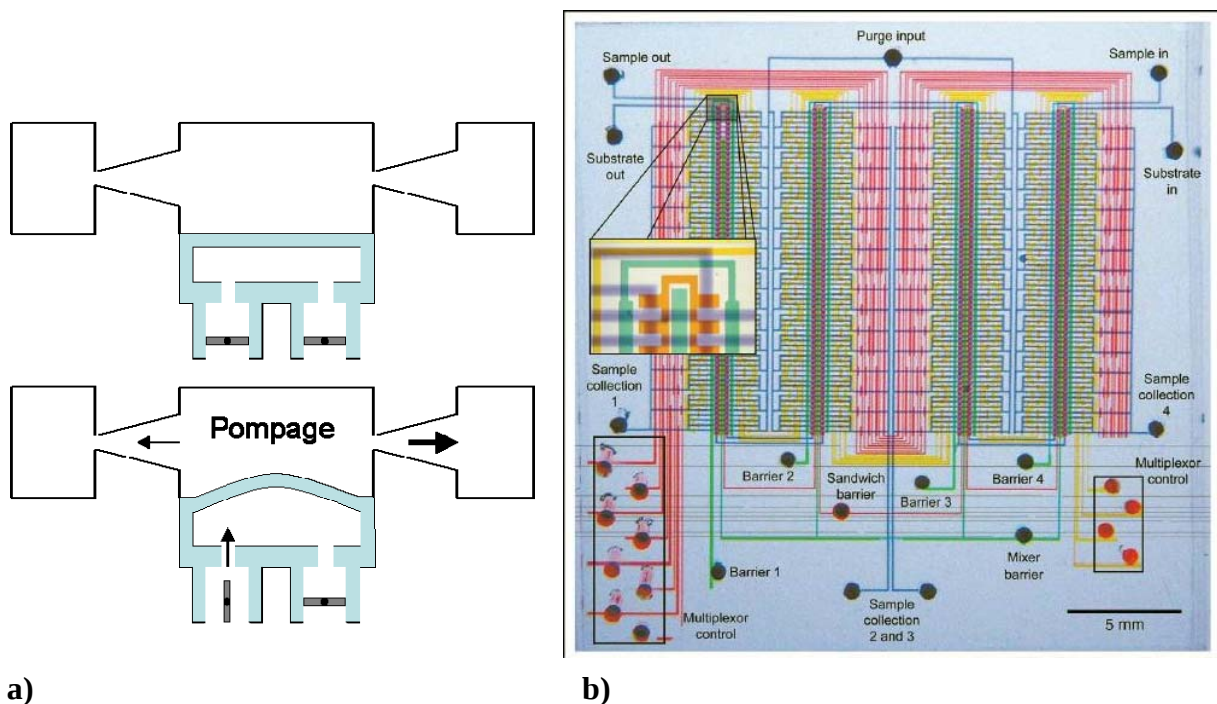


Figure 16. Pompe pneumatique a) principe de fonctionnement b) application avec une haute intégration de valves d'après [84]

Une autre proposition qui nous concerne plus directement, développée par Hong et *al.*, est l'intégration de réservoirs de gaz pressurisés (Figure 17). Les réservoirs sont fermés par une membrane plastique, généralement en SU8 ou en COC (Cyclic Olefin Copolymer). Lors de l'actionnement, le gaz est libéré par rupture thermomécanique [88][89] ou mécanique comme dans le système commercialisé i-STAT[®] [16]. L'énergie mécanique délivrée par le dispositif est fixée par la pression et le volume du réservoir aux pertes près. Ces actionneurs pneumatiques sont puissants mais le fait d'utiliser des sources externes de fluides sous pression ou d'intégrer des réservoirs de gaz pressurisés conduit à des objets encore volumineux, ce qui limite leur intérêt d'application dans les laboratoires sur puce.

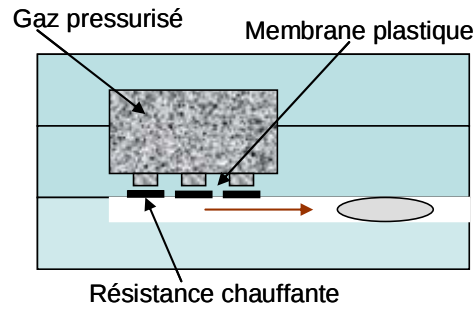


Figure 17. Pompe apériodique à réservoir de gaz d'après [88]

Des approches de microactionnement tout intégré de type « thermo-activé » ou à changement de phase méritent d'être mentionnées pour leur simplicité. Plusieurs systèmes sont reportés dans la littérature :

- des systèmes de pompage basés sur le changement de phase solide/liquide de la paraffine peuvent être utilisés [90]. Trois actionneurs de paraffine sont alors placés en série pour réaliser un effet péristaltique. Ces systèmes résistent à des contrepressions de 1MPa, mais souffrent d'un volume relativement important (0.75cm^3) et des problèmes de fuite de paraffine sont rapportés.
- Cooney et *al.* [91] proposent un actionnement basé sur l'évaporation thermique d'un matériau liquide à base de perfluorocarbons. Ce dernier est placé dans un réservoir fermé par une membrane polymère qui sépare le liquide à éjecter du matériau d'actionnement. Pour l'actionnement, le matériau liquide est chauffé avec une résistance chauffante ce qui modifie l'équilibre bi-phasique : liquide-vapeur et la pression exercée sur la membrane. Le concept est attractif mais la réalisation conduit à un actionneur de trop grande taille.
- On trouve aussi dans la littérature des pompes basées sur l'expansion irréversible de sphères de PDMS remplies de gaz [92]. L'expansion du gaz se produit par chauffage avec l'aide de résistances intégrées. Ces sphères sont placées dans un réservoir en PMMA fermée par une membrane en Vinyl qui transfère l'actionnement au liquide (Figure 18). Un autre dispositif de même nature consiste en un mélange de PDMS avec des sphères contenant un liquide hydrocarbure, isobutane ou isopentane expansibles à une température supérieure à 80°C . Ce mélange est déposé à la tournette. Le chauffage se fait avec une résistance sur PCB (Printed Circuit Board), des valves sont réalisées avec ce même procédé [93]. A noter que ce principe a été appliqué très récemment dans un système de laboratoire sur puce avec l'intégration des valves et pompes [94]. Ces actionneurs

à changement de phase apportent donc une première solution intéressante en terme d'intégration et de puissance d'actionnement mais leur consommation d'énergie reste encore importante ($\approx 1W$).

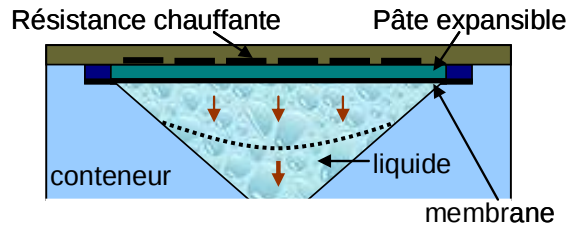


Figure 18. Pompe apériodique basée dans le principe du changement de phase d'après [92]

On trouve aussi, dans la littérature, des propositions de mécanismes plus marginaux pour actionner un fluide. Une technique publiée récemment [95] propose des polymères ioniques comme le Nafion déjà envisagé pour réaliser des « muscles artificiels » et actionner électromécaniquement des poutres immergées dans l'eau, en utilisant des électrodes en Polypyrrole pour réduire la consommation de puissance. Quand une tension électrique est appliquée, les cations et les anions se déplacent sous l'effet du champ électrique entraînant des molécules d'eau avec eux. Cet effet de migration crée une compression de volume près de la cathode et l'effet inverse près de l'anode, ce qui provoque une déformation de la structure. Deux de ces dispositifs peuvent être placés en forme de ciseaux pour fermer une canalisation, ou pour générer un débit. Ces actionneurs consomment peu de puissance mais ils ont une taille importante, rendant difficile une intégration technologique à haute densité d'actionneurs.

D'autres modes d'actionnement basés sur des réactions chimiques ont aussi été explorés : Choi et *al.* [96] utilise la génération de O_2 à partir de la réaction catalytique de décomposition de H_2O_2 , à l'état liquide, avec comme catalyseur du MnO_2 , en poudre. Pour séparer les composants chimiques avant réaction, il mélange de la paraffine avec la poudre avant de déposer le liquide. Pour actionner, la paraffine est chauffée avec une résistance chauffante déposée sur verre et passe de l'état solide à liquide. Ce dispositif consomme peu d'énergie et est peu encombrant mais le stockage de liquide est peu pratique. (Figure 19)

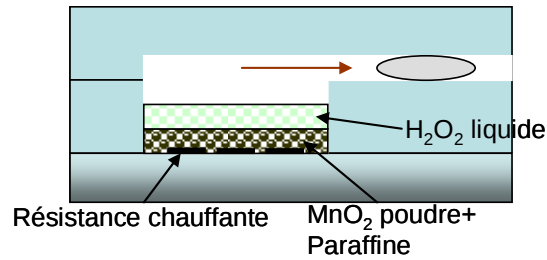


Figure 19. Pompe basée sur le principe de réaction chimique du $H_2O_2 + MnO_2$ pour générer un gaz, d'après [96].

* * * *

Le rapide tour d'horizon des propositions dans la littérature, montre que les chercheurs et ingénieurs ont déjà exploré de nombreuses possibilités techniques, mettant en jeu différents phénomènes physiques ou physico-chimiques.

Il n'apparaît pas de perspective claire pour une solution unique qui pourrait être déclinée dans les différentes applications visées. On voit toutefois se profiler quelques solutions pratiques :

- I. S'il s'agit de microsystèmes qui disposeraient d'un accès à des actionneurs externes, la proposition pneumatique du groupe de Quake est à approfondir et à enrichir car elle distingue intrinsèquement le réseau d'actionnement du réseau actif.
- II. Dans les systèmes microfluidiques autonomes, embarqués, sur puce, le mode d'actionnement électroosmotique, lorsqu'il est applicable, est sûrement la solution la plus attractive, par sa souplesse et son aptitude à l'intégration... la nature de fluides peut apporter des limitations, de même que la puissance d'actionnement.

En restant dans l'axe de développement de systèmes fluidiques autonomes, on reste à la recherche d'une technologie assez universelle qui découplerait parfaitement l'actionnement du liquide que l'on souhaite mettre en mouvement.

L'idée « d'actionneur à membranes » s'impose alors mais le mode d'actionnement reste ouvert à différentes approches : électrostatiques, thermo pneumatiques, thermo chimiques ..., qui ont chacune des qualités notamment en puissance et des défauts au niveau d'encombrement, puissance électrique consommée, température nécessaire au fonctionnement, temps de réponse...

Notre réflexion personnelle est qu'il faut approcher cette solution par deux voies distinguant les cas où l'on a besoin d'actionnements répétés ou continus et le cas où l'on a besoin d'actionner une seule fois, par exemple pour « lancer » une réaction chimique ou biologiques... Ce deuxième cas ouvre la possibilité d'utiliser des réactions chimiques

irréversibles très énergétiques donc très compactes : nous avons déjà repéré des propositions allant dans ce sens et c'est la voie que nous proposons d'explorer à partir des travaux réalisés au LAAS depuis 1995, sur les matériaux énergétiques dans les microsystèmes.

Ouvrons donc ici la problématique de l'actionnement de puissance, monocoup, intégrable, compact et compatible avec les technologies microfluidiques. Pour répondre à cette problématique, les matériaux énergétiques semblent pouvoir apporter une réponse prometteuse :

- La capacité d'actionnement, définie comme le rapport entre l'énergie (force par déplacement maximal) et le volume de l'actionneur : $(P_a(J/m^3) = Fd/V)$, est comprise entre $10^7 J/m^3 - 10^8 J/m^3$ [97][98], alors que les autres mécanismes d'actionnement restent sur des valeurs comprises entre 10^3 et $10^7 J/m^3$, pour les plus performants, comme l'illustre le Tableau 2.

Type d'actionnement	Pression d'actionnement ou densité d'énergie (J/m^3)
Piézoélectrique (PZT)	10^5
Electrostatique	10^3
Electromagnétique	10^5
Thermomécanique	10^5
Thermopneumatique	10^6
Alliage à mémoire de forme (SMA)	10^7
Changement de phase solide liquide	10^6 (acetimide) – 10^7 (paraffine)
Combustion matériau énergétique	$10^7 - 10^8$

Tableau 2. Puissance d'actionnement pour les différents mécanismes d'actionnement

- La miniaturisation est possible et les coûts de réalisation sont potentiellement maîtrisables, si l'on développe des technologies compatibles avec les acquis de la microélectronique et des microsystèmes.
- Le LAAS a une bonne expérience dans ce domaine à partir de ses activités dans les « microsystèmes pyrotechniques » proposés par C. Rossi [30] dès 1995, pour répondre à la problématique d'éjection de fluides pour des applications médicale. Depuis, la micropyrotechnie a suscité l'attention d'équipes nombreux et renommées aux Etats-

Unis, en Europe et en Asie pour l'actionnement de fluide comme le montre l'analyse de l'état de l'art qui suit.

3.2 L'actionnement par matériau énergétique

Plusieurs pompes basées sur la déflagration des différents matériaux énergétiques ont été développées et présentées dans la littérature :

L'azoture de sodium (NaN_3) a été proposé pour générer de l'azote et actionner un piston : Norton et Minor [99] ont présenté un système comprenant un piston de 100 μm de large et 1,5mm de long dans une cavité de 2mm³. La déflagration du NaN_3 y est initiée thermiquement avec le chauffage d'une résistance en tungstène. Par contre l'azoture de sodium est un matériau très toxique.

Un autre type de pompe proposée par Hong et *al.* [100] utilise la déflagration d'un matériau propergol solide : l'AIBN (azobis-isobutyronitrile), pour produire du N_2 . Ce matériau se présente sous forme de poudre. Il est mélangé avec du Téflon et déposé par sérigraphie sur une résistance chauffante (Or) réalisée sur un substrat en COC (Figure 20). La température de déflagration du matériau est de 110°C. Cette approche est très intéressante, car compacte et faiblement consommatrice d'énergie pour son déclenchement. Par contre la surpression générée est faible (3.5kPa).

On trouve aussi, dans la référence [101], un système d'actionnement de fluide à partir de la déflagration du AMBN: 2,2' azobis (2 methylbutyronitrile). L'initiation se fait à partir d'une source infrarouge pour chauffer le matériau entre 67°C et 90°C et produire ainsi du N_2 . Pour cet actionneur, il faut 5,16W pendant 4 secondes et le système génère 5.5kPa pour 1mm³ de matériau énergétique.

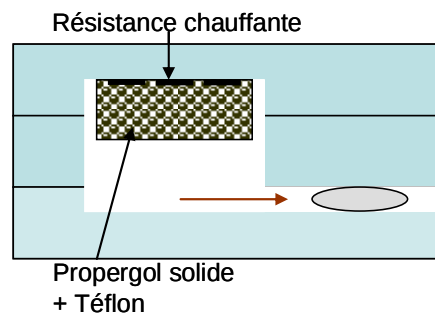


Figure 20. Pompe basée sur le principe de déflagration thermique d'un propergol solide d'après [100]

Toutes ces tentatives consacrées à l'usage de matériaux énergétiques montrent que des solutions sont possibles si l'on optimise les matériaux énergétiques, les systèmes de mise à feu et la membrane d'actionnement.

3.3 Le positionnement relatif des actionneurs par matériau énergétique

Le paragraphe précédent a mis en évidence qu'il n'y avait pas de solution unique à la manipulation des fluides. La Figure 21 et la Figure 22 ci-après résument les différents actionneurs développés pour l'actionnement de fluides et applicables en microfluidique et tentent de les classer dans deux diagrammes. Un tableau plus détaillé est donné en annexe A.

La Figure 21 propose un premier tableau de la pression délivrée en fonction de l'encombrement. Ainsi les systèmes présentés en haut à gauche, sont à pression constante les plus compacts. On y trouve les actionneurs pyrotechniques qui nous concernent et l'actionnement électrostatique.

La Figure 22 classe les actionneurs en fonction de la pression générée et la tension d'actionnement. Dans ce cas les actionneurs à réservoir de gaz et changement de phase sont capables de générer une forte pression (typiquement $>10\text{kPa}$) sous faible tension (typiquement $<10\text{V}$).

Les actionneurs pyrotechniques sont, à partir des réalisations déjà effectués au LAAS [97], capables de générer plusieurs MPa si le volume de la chambre est très petit pour une puissance électrique de mise à feu de 150mW (2V, dans une résistance de 26Ω , 10V dans une résistance de 650Ω)

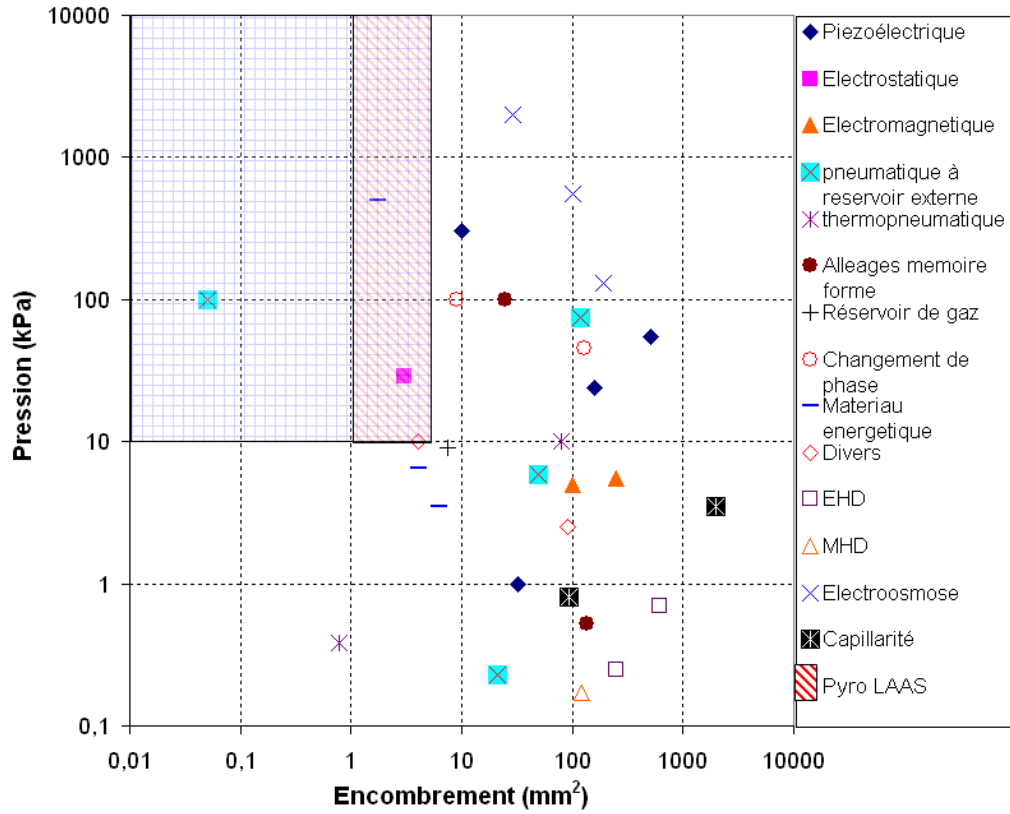


Figure 21. Pression générée en fonction de l'encombrement (mm^2) pour les différents types d'actionnement

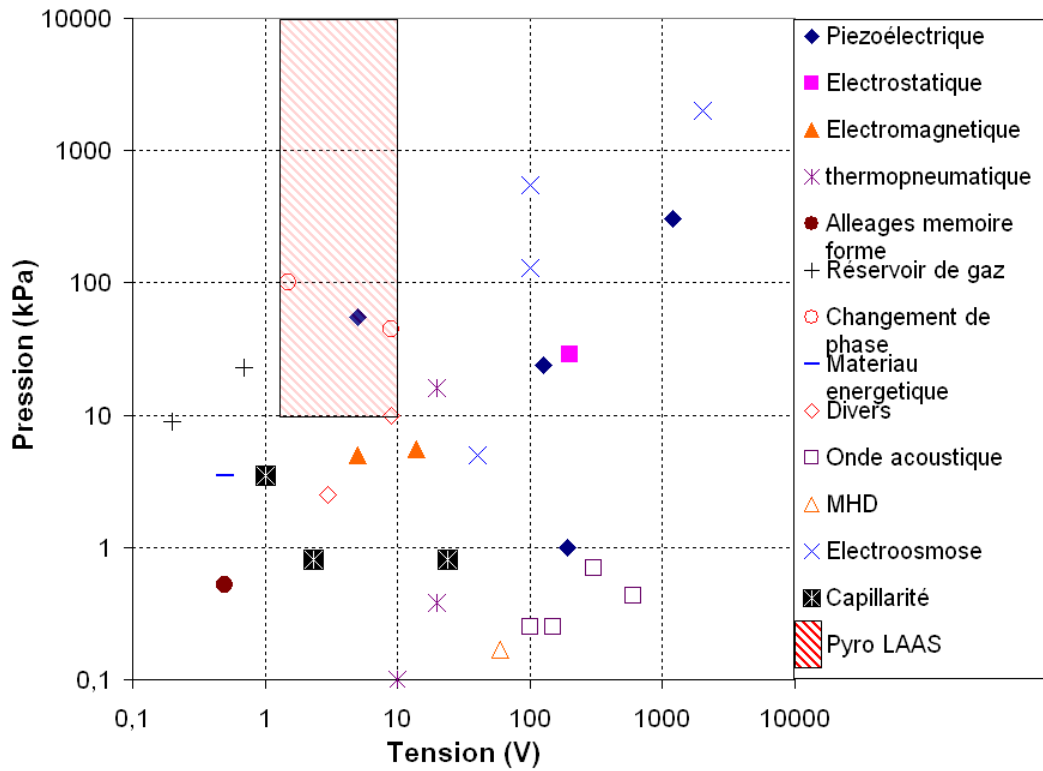


Figure 22. Pression générée en fonction de la tension appliquée pour les différents types d'actionnement

Ces diagrammes montrent bien les performances potentielles d'une nouvelle génération de pompes monocoup basées sur des principes des réservoirs de gaz [88][89], changement de phase [90]-[94] ou des matériaux énergétiques [99]-[101]. **Leur aptitude à la miniaturisation fait d'elles les plus petites de la littérature avec en général la consommation de puissance la plus faible pour un niveau de surpression comparable et même supérieur aux autres types de pompage** : les dispositifs à matériaux énergétiques sont ceux qui, à moindre puissance d'alimentation, sont capables de générer le plus de surpression.

Son caractère monocoup, pouvant être un handicap, reste bien adapté pour des applications de produits jetables. Pour compenser le caractère monocoup, le matriçage d'actionneurs est possible pour des actionnements multiples. Evidemment, dans ce cas la réduction des dimensions et la facilité d'élaboration et d'intégration technologique pour l'actionneur sont les contraintes principales. **Pour l'instant, l'intégration d'actionneurs à matériau énergétique dans les canalisations n'a pas été reportée à notre connaissance et un travail de miniaturisation est encore nécessaire jusqu'à la mise au point d'un procédé d'intégration compatible avec les autres fonctions embarqués.**

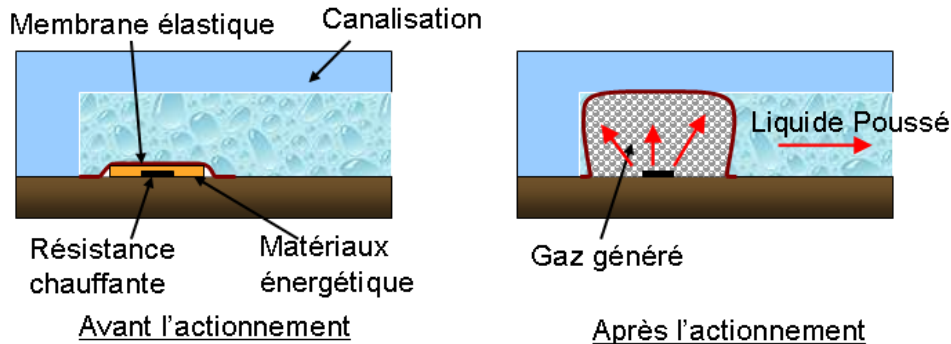
4 Présentation de notre projet de recherche

Notre projet de recherche s'inscrit dans une action collective : PYRACT, financée par le « **Programme blanc de l'ANR** ». Ce projet est animé par le LAAS et associe les équipes des laboratoires : LCC (UPR8241) et l'IRMCP (UMR CNRS 5623). L'objectif est de concevoir et développer une technologie d'intégration de micro actionneur en s'appuyant sur le savoir faire de la centrale de technologie du laboratoire et de son expérience en micropyrotechnie [30][31][34][97][102]. Ce projet participe de l'action conduite en technologie pour répondre au mieux aux contraintes de miniaturisation, et d'intégration poussée requises par les microsystèmes fluidiques. Plus concrètement, PYRACT **visé à concevoir et développer un microactionneur basé sur la décomposition d'un matériau énergétique intégré dans un réseau de canalisation microfluidique pour vidanger un volume compris entre 10 à 100nl d'eau contenue dans une micro canalisation.**

Quand l'actionnement est requis, le matériau énergétique sera chauffé jusqu'à sa température d'initiation pour libérer un grand volume de gaz qui doit être « non toxique ». La

pression dans la chambre de combustion augmente, déforme la membrane et pousse alors le liquide (voir Figure 23).

Comme le montre la Figure 23, le micro actionneur à concevoir et à développer doit exploiter les propriétés d'un **matériau énergétique à très fort rendement de gaz, déposé sur une résistance chauffante intégrée (surface < 1 mm²), le tout placé dans la canalisation à vider. Une membrane élastomère déformable fait l'isolation biochimique et thermique entre le matériau énergétique et le fluide à actionner...**



La tâche du LAAS, à laquelle cette thèse est la contribution principale est de réaliser la conception du dispositif et de mettre en place une technologie de fabrication et d'assemblage compatible microsystèmes. Le travail présenté ci-dessous bénéficie des expériences et savoir faire du LCC, pour la conception et la fabrication du matériau énergétique, de l'IMRCP pour la conception et la mise au point des matériaux silicone.

5 Les objectifs de recherche

Des actionneurs pyrotechniques ont déjà été développés au LAAS depuis 1995. On peut dire qu'au démarrage de ce travail, la conception des ces dispositifs élémentaires est acquise et que la technologie de base est maîtrisée pour des systèmes millimétriques et centimétriques.

Dans ce projet PYRACT, l'actionneur reste basé sur le même principe (matériau énergétique sur résistance chauffante), mais la miniaturisation plus poussée exigée par l'application microfluidique et la compatibilité avec la technologie microfluidique soulèvent de nouveaux verrous technologiques et matériaux.

Ainsi, le développement d'une technologie d'intégration compatible avec celle de la microélectronique et de la microfluidique, répondant aux exigences de précision, bas coût, de

flexibilité mais aussi de la précision de l'actionnement, sont, à notre avis, la clé de la réussite de notre projet. Par ailleurs, les enjeux de recherche sont triples :

- (i) au niveau scientifique, il faut développer des modèles adaptés pour bien comprendre les phénomènes mis en jeu et permettre la conception précise de l'actionneur : nous verrons dans le chapitre II qu'il est nécessaire de mettre en place un modèle multi-physique pour prendre en compte les interactions de tous les phénomènes impliqués et avoir un modèle de conception prédictif réaliste.
- (ii) au niveau technologique, il faut résoudre les problèmes d'intégration dans un environnement contraint par les perspectives multifonctionnelles et par l'association des matériaux très différents et des fonctionnalités aux petites dimensions visées.
- (iii) au niveau matériau : les matériaux énergétiques « sur étagère » ne suffisent pas, il faut développer de nouveaux matériaux énergétiques adaptés aux très petites dimensions et aux exigences d'un actionnement pneumatique précis et contrôlable. Les matériaux de la membrane qui assurent l'interface actionneur/fluide doivent être travaillés chimiquement pour assurer la fonctionnalité et la fiabilité, notamment l'accrochage à certains endroits et pas à d'autres, l'innocuité chimique et biologique, l'étanchéité, l'élasticité et/ou avoir des caractéristiques thermiques particulières...

Nos objectifs de thèse seront donc d'apporter des réponses aux deux premiers verrous cités, pendant que les laboratoires du LCC (UPR8241) et de l'IRMCP (UMR CNRS 5623) ont la charge des développements matériaux.

6 Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons présenté brièvement un état de l'art d'un des problèmes centraux dans le domaine de la microfluidique, l'actionnement des fluides dans une canalisation. Plusieurs approches sont proposées dans la littérature, certaines sont commercialisées. Nous montrons ici qu'il n'existe pas de solution unique, applicable aux différentes applications microfluidiques. Par contre si nous visons les applications portables et jetables avec un besoin de déclencher, par mouvement du fluide, une réaction chimique ou biologique une seule fois, il est intéressant de trouver une solution d'actionneur puissant, compact et peu coûteux en termes économique et énergétique. Dans cette idée, la littérature et les résultats antérieurs obtenus au LAAS montrent que des solutions basées sur la décomposition d'un matériau énergétique pourraient répondre bien à ces exigences

d'encombrement et de consommation énergétique. Toutefois, des propositions puissantes d'intégration biocompatibles sont inexistantes. Nous proposons donc, dans ce travail de thèse de rechercher une solution d'actionneur puissant, économique, compact et biocompatible, basé sur la décomposition d'un matériau énergétique, compatible avec son intégration dans une canalisation microfluidique.

Dans le chapitre II nous allons décrire plus en détails les spécifications, la structure et le fonctionnement de cet actionneur pyrotechnique monocoup.

CHAPITRE II

Conception et simulation multiphysique du microactionneur PYRACT

1 Introduction

Nous avons, dans le chapitre I, montré l'intérêt de disposer de micro actionneurs totalement intégrables dans des micro canalisations et relativement puissants pour l'éjection de fluide. Nous avons choisi les matériaux énergétiques comme matériaux actifs de notre microactionneur pour tirer profit de leur forte énergie interne et leur aptitude à générer une surpression pneumatique. Compte tenu du savoir faire en micropyrotechnie capitalisé au LAAS durant ces 10 derniers années, nous avons proposé une architecture de microsystème consistant en un empilement de plusieurs couches tel qu'il a été proposé dès les années 90, pour des applications médicales: résistante chauffante, matériau énergétique, membrane élastique. Quand l'actionnement est requis, un courant passe dans la résistance qui chauffe par effet joule le matériau énergétique en contact avec la résistance jusqu'à sa température d'initialisation ($\approx 225^{\circ}\text{C}$). La décomposition de ce dernier produit un grand volume de gaz qui actionne la membrane et pousse le liquide dans la canalisation.

Nous allons, dans ce deuxième chapitre, présenter le modèle de conception précis de notre actionneur. Nous commencerons par préciser le cahier des charges que nous nous sommes fixé et nous choisirons les caractéristiques dimensionnelles principales de notre actionneur. Nous analyserons ensuite les technologies d'intégration et les matériaux de structures les mieux adaptés par rapport au cahier de charges.

Nous proposerons enfin un modèle complet de conception multiphysique qui permettra donc de prédire les performances de l'actionneur, notamment en termes de pression et température générées, en fonction de ses caractéristiques dimensionnelles et de la quantité de matériau énergétique utilisé.

2 Cahier des charges

Pour définir un cahier des charges, nous nous sommes fixés les objectifs applicatifs suivants :

- système d'analyse médicale nécessitant la vidange d'un micro réservoir sur une matrice de micro valves comme schématisé sur la Figure 1.
- Le volume du réservoir sera compris entre 10nl et 100nl, suffisant par exemple pour réaliser des immunoessais pour le diagnostic et le criblage des maladies comme est mentionné dans la section 2 du chapitre I.

- Nous visons des niveaux de miniaturisation élevés pour satisfaire aux exigences microsystemes fluidiques jetables de demain. Ainsi les dimensions de l'actionneur seront sous millimétriques.

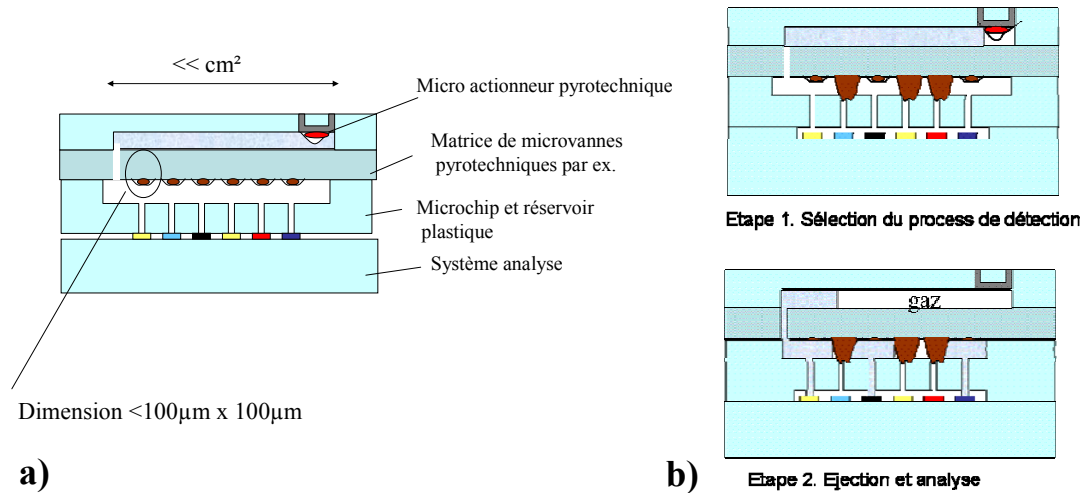


Figure 1. Exemple d'application visée : système d'analyse médicale, a) structure du système, b) étapes de fonctionnement du dispositif

Le système imaginé est donné pour illustration sur la figure 1. Dans une première étape, les canalisations à irriguer sont sélectionnées (ouvertes ou fermées) par des micro vannes. Ensuite, la solution à analyser est éjectée par le micro actionneur pyrotechnique intégré dans le réservoir.

Dans ce projet, nous limitons l'ambition à mettre au point les procédés technologiques pour intégrer l'actionneur PYRACT, aux dimensions visées et à fournir un modèle de conception validé pour la prédiction de ses performances.

Ainsi, nous avons choisi un démonstrateur simple consistant à intégrer l'actionneur PYRACT dans une microcanalisation comme le montre le schéma de la Figure 2.

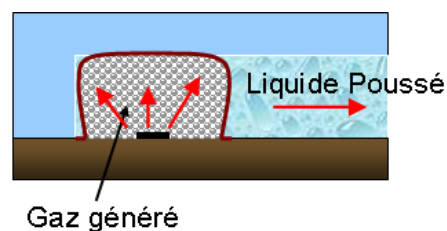


Figure 2. Géométrie pour le démonstrateur

Dans ces conditions, le cahier de charges PYRACT comporte 6 points :

1. la vidange de 10nl en moins de 0,5 secondes, fixe un débit d'éjection de 0,0012ml/min : nous allons viser un débit correspondant à la vidange de 100nl, ce qui fait un temps de vidange de moins de 5 secondes.
2. Les canalisations microfluidiques ont des sections carrées typiquement comprises entre $20 \times 20 \mu\text{m}^2$ et $500 \times 500 \mu\text{m}^2$ et des longueurs de 2 à 70mm. A partir de ces données, nous avons fixé pour nos dimensionnements une longueur totale de 10mm et une section comprise entre $20 \times 20 \mu\text{m}^2$ et $500 \times 500 \mu\text{m}^2$. Le dimensionnement exact de la section de la canalisation sera précisé ci-après.
3. Pour satisfaire les exigences économiques des applications, des systèmes d'analyse portables et grand public, les technologies de fabrication seront choisies bas coûts et collectives.
4. L'actionneur doit pouvoir être ajustable en pression pour le rendre compatible à différentes applications.
5. La température dans le liquide que l'on actionne ne doit pas dépasser 37°C.
6. Les gaz dégagés par la décomposition du matériau énergétique ne doivent pas être toxiques.

* * * *

A partir des points 1 et 2 du cahier des charges, nous pouvons calculer la surpression à générer pour vidanger 10nl en moins de 0,5s et 100nl en moins de 5s au travers d'une canalisation de section $< 500 \times 500 \mu\text{m}^2$.

A ces dimensions, l'écoulement est laminaire et caractérisé par une valeur très faible du nombre de Reynolds [1]. Ainsi, son comportement peut être décrit par la loi de Poiseuille, qui donne la relation entre le débit et la pression [2] comme suit :

$$Q_f = \frac{\pi D_H^4}{128 \mu \alpha} \Delta P \quad (1)$$

Avec Q_f le débit, D_H le diamètre hydraulique, α la longueur de la canalisation, μ la viscosité dynamique du fluide, et ΔP la différence de pression aux bornes de la canalisation.

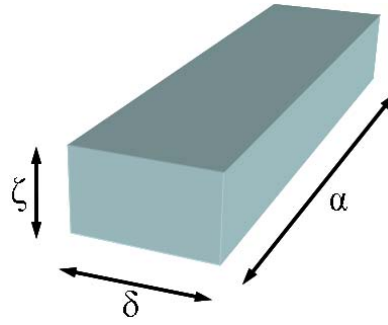


Figure 3. Canalisation à section rectangulaire

La technologie disponible au laboratoire nous permet de réaliser des canalisations de géométrie rectangulaire [3]. Si nous considérons les paramètres de la section comme le montre la Figure 3, le diamètre hydraulique s'écrit [4]:

$$D_H = \frac{2\zeta\delta}{(\delta + \zeta)} \quad (2)$$

Les surpressions à générer, calculées en fonction des paramètres géométriques de la canalisation et à partir de l'équation 1, sont résumées dans le Tableau 1.

Q (ml/min)	ζ (μm)	δ (μm)	α (mm)	ΔP (Pa)
0,0012	20	20	10	40k
10nl t = 0,5s	500	500	10	0,1
100nl t = 5s				

Tableau 1. Surpression en fonction des paramètres géométriques de la canalisation et du débit

Ces calculs montrent que les surpressions à générer par notre actionneur sont comprises **entre 0.1Pa et 40kPa**, pour atteindre les débits que nous avons fixés. Evidement, si l'on vise à déplacer 10nl ou 100nl, une canalisation de section 500μm×500μm ne nous permettra de déplacer le fluide que de quelques microns, ce qui est peu intéressant dans les applications microfluidiques.

Avec la surpression requise pour obtenir le débit désiré (40kPa), il faut fixer le diamètre de la canalisation à 20μm, ce qui permettrait de déplacer le fluide de quelques millimètres jusqu'à quelques centimètres.

3 Technologie, matériaux et dimensionnement de l'actionneur PYRACT

Les technologies de fabrication choisies pour la réalisation de notre micro actionneur sont celles des microsystèmes dans la mesure où elles permettent d'atteindre les objectifs de réduction des dimensions, de coûts de fabrication, de précision d'usinage et de compatibilité avec les technologies microfluidiques brièvement rappelées dans le cahier de charges.

Le silicium est le matériau encore aujourd'hui privilégié en technologie microsystème car il présente les atouts suivants :

- il possède des propriétés mécaniques, physiques et chimiques très intéressantes outre celle de la semi conductivité [5] explorée en microélectronique,
- Les technologies microsystèmes Silicium appelées aussi technologies « dures » [5] sont matures et bien maîtrisées comme nous l'avons souligné en introduction du chapitre 1.

Cependant en microfluidique, l'utilisation du silicium présente des limites. Par exemple, le Silicium est cher pour des systèmes qui seraient jetables, opaques dans le spectre visible et ultraviolet [3], ce qui pose des problèmes pour certaines applications comme la chromatographie et l'électrophorèse. Pour ces raisons, de nombreuses équipes ont développé de nouvelles filières technologiques plus simples, plus rapides à utiliser et moins coûteuses dites technologies « douces » ou « molles » [5] pour le prototypage de microsystèmes fluidiques. L'utilisation de matériaux plastiques comme le PMMA ou des matériaux élastomères comme le PDMS sont illustratifs. Ces technologies « douces » présentent l'avantage d'avoir un coût très bas par rapport aux technologies « dures » et la possibilité de faire des prototypes très rapidement. Dans les technologies « douces », deux techniques principalement sont utilisées :

- la structuration directe, qui est une technique adaptée à l'usinage en surface du Silicium aux polymères, avec des matériaux structuraux comme le Pyralène, qui est un matériau déposé en phase vapeur à température ambiante [6] ou récemment la résine négative SU8 déposée à la tournette [3].
- Les techniques de répllication qui se déroulent en deux étapes : élaboration d'un moule en Silicium, verre ou en résines épaisses d'une part et la répllication proprement dite avec des techniques comme l'emboutissage, l'injection liquide, le thermoformage ou le coulage d'autre part [3]. Cette dernière technique est la plus répandue avec l'utilisation du PDMS permettant de faire des systèmes complexes monolithiques, c'est-à-dire fait dans un seul matériau et avec des propriétés très flexibles [7].

3.1 Choix de technologies et matériaux de structures

Concernant les matériaux de structure, nous avons donc sélectionné des matériaux compatibles avec les technologies micro fluidiques dites « molles »:

- *le silicium* pour les parties qui nécessitent des usinages 3D complexes ou qui supportent des fonctions électriques (initiation et diode d'adressage à termes).
- *Des silicones* pour la membrane et le réservoir du matériau énergétique.

Le microactionneur comporte 4 parties comme il est montré sur la Figure 4 : une plate-forme chauffante, une membrane élastique, un matériau énergétique et un réservoir qui encapsule le matériau énergétique.

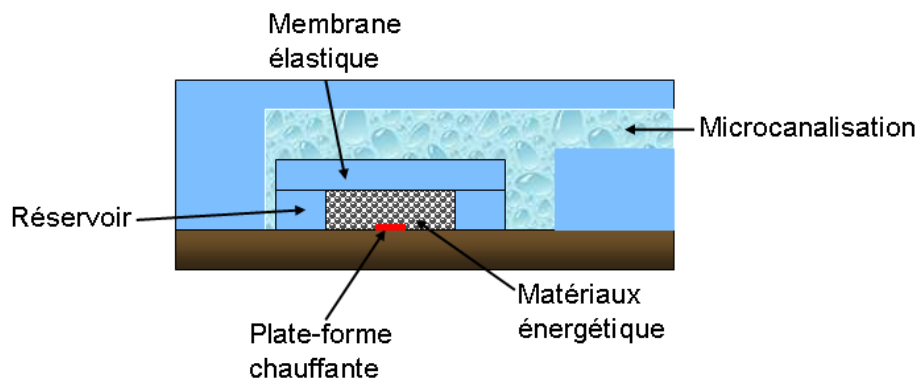


Figure 4. Parties conformant le microactionneur

Pour chacune de ces parties, nous allons discuter et choisir les matériaux de structures et les technologies de réalisation.

1. La plate-forme chauffante.

Il y a plusieurs façons de faire une plate-forme chauffante. On trouve ainsi plusieurs technologies: des résistances métalliques sur verre [15], pyrex [16], Alumine [17] et des résistances sur membranes diélectriques SiO_2/SiNx [9]. Des calculs et des caractérisations ont déjà montré dans [18][19], que la structure plate-forme chauffante sur membrane diélectrique était la plus performante en termes de rendement thermique : température maximale/puissance électrique. Ainsi, nous choisirons la structure résistance polysilicium sur membrane SiO_2/SiNx car elle a un très bon rendement thermique et la technologie est bien maîtrisée au LAAS [18]-[20].

2. Un matériau énergétique.

Le matériau énergétique est un point central de l'actionneur car c'est lui qui génère la pression après initiation. Il doit être choisi et formulé précisément en fonction des spécifications et des performances attendues en termes d'initiation et d'actionnement.

En micropyrotechnie, un certain nombre de matériaux énergétiques ont été considérés en fonction des applications et des niveaux d'intégration visés. Jusqu'en 2002, les équipes travaillant en micropyrotechnie ont exploré deux options : (i) les matériaux « sûrs », peu sensibles de type propergols homogènes ou composites disponibles [9]-[11] et (ii) les matériaux de classe 1:1 très sensibles et très énergétiques [12]-[14]. Depuis 2002, la tendance est à mettre au point de nouveaux matériaux avec des performances « à la carte » et « compatibles MEMS ». C'est bien sûr la voie que nous proposons de suivre dans ce projet avec la collaboration du laboratoire LCC. Les contraintes importantes issues du cahier des charges qui ont guidé le choix du matériau énergétique dans PYRACT sont les suivantes :

- sa décomposition doit être initiée à basse température par point chaud localisé pour avoir des puissances d'initiation compatibles avec les microsystèmes (<250mW),
- sa décomposition doit être possible en couches minces et doit générer des gaz non toxiques,
- il faut pouvoir déposer ce matériau en couche mince et par procédés collectifs.

A partir de ces spécifications, le matériau énergétique retenu a été développé dans le travail parallèle de la thèse de C. Pradère [21] pour des applications Airbag. Il s'agit d'un matériau bi-métallique composé de Mn et Co ($[Mn(NO_3)_4]_3[Co(NH_3)_6]_2$) présenté sous forme de poudre et qui génère un grand volume de gaz biocompatible (N_2 , O_2 et vapeur H_2O) quand sa température atteint $\approx 225^\circ C$.

3. Une membrane élastique.

La membrane élastique transfère la pression générée dans la cavité pour exercer une poussée sur le fluide à éjecter.

Pour la membrane, les premiers prototypes PYRACT utiliseront le PDMS car ses caractéristiques élastiques sont très intéressantes; il est disponible facilement et son utilisation est bien maîtrisée dans la centrale technologique du LAAS. Par ailleurs il a des caractéristiques additionnelles très intéressantes : il est transparent, biocompatible et il a une haute perméabilité au dioxygène et dioxyde de carbone.

Deux matériaux PDMS ont été choisis par notre partenaire IMRCP du projet:

- Le Sylgard 184 de chez Dow Corning : c'est le matériau PDMS standard pour les applications microfluidiques.
- La Zipcone TR de chez Gelest, choisi pour une meilleure tenue en température ($>300^\circ C$ caractérisé par des mesures de TGA, voir chapitre IV) par rapport au Sylgard 184 ($200^\circ C$) [8]

4. Un réservoir qui encapsule le matériau énergétique.

Pour le réservoir et support de la membrane élastique, nous avons choisi un silicone commercial pour réduire les coûts, photosensible pour obtenir la précision d'usinage requise par le cahier de charges, et de type PDMS pour réduire les soucis d'adhérence entre le silicone de la membrane et du réservoir. Le silicone retenu est donc le RMS 083 de chez Gelest dans lequel on ajoutera un photoinitiateur (voir chapitre III).

5. La microcanalisation.

La technologie disponible au LAAS et développée lors de thèses antérieures [3] est basée sur la SU8 et le PDMS avec des techniques de moulage et laminage. Il est possible avec ces matériaux de réaliser des microcanalisations de diamètre compris entre 10 μ m et plus de 100 μ m. Nous nous appuierons sur ces travaux pour intégrer l'actionneur dans une canalisation et valider son fonctionnement au cours du projet PYRACT. En revanche ce travail ne fera pas partie de mon travail de thèse.

3.2 Dimensionnements des démonstrateurs

Pour construire un modèle de conception et pour valider le fonctionnement de l'actionneur et les choix technologiques, nous proposons un démonstrateur simple qui consiste à intégrer l'actionneur PYRACT dans une canalisation qu'il faut vider.

A partir du cahier des charges, le volume du réservoir de liquide est de 100 μ m $\times$ 1mm $\times$ 1mm pour celui contenant 100nl et de 40 μ m $\times$ 0.5mm $\times$ 0.5mm pour celui contenant 10nl. Le diamètre des canalisations en sortie du réservoir est fixé à 20 μ m. (voir Figure 5)

La Figure 6 schématise le design précis des démonstrateurs de l'actionneur PYRACT et leur caractéristiques géométriques. La Figure 7 donne les caractéristiques géométriques de la plate-forme chauffante.

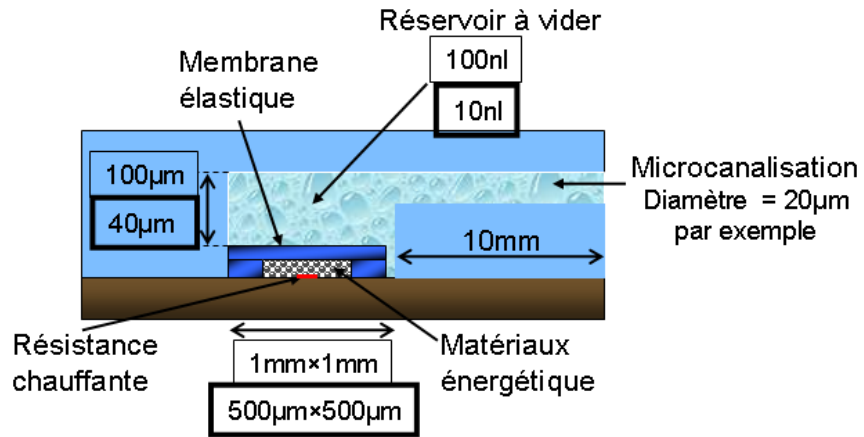


Figure 5. Schéma en coupe du démonstrateur complet avec les deux dimensions d'actionneurs PYRACT

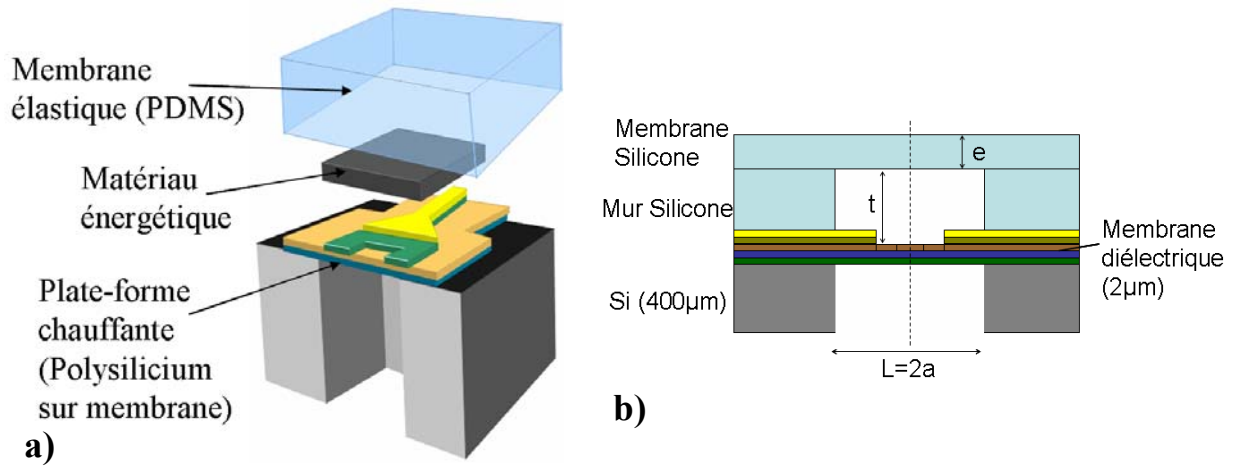


Figure 6. Schéma a) 3D de l'actionneur PYRACT, b) Vue en coupe de l'actionneur PYRACT

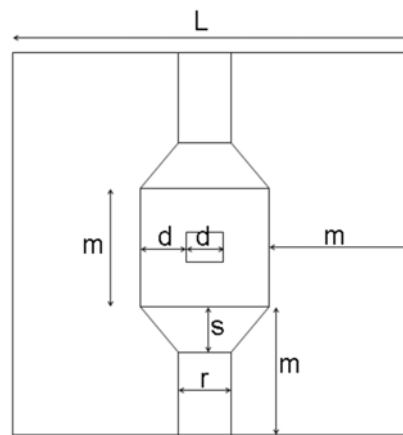


Figure 7. Caractéristiques géométriques de la plate-forme chauffante

3.2.1 Le réservoir et la membrane

Le volume de liquide à vider fixe donc la surface de l'actionneur à 1mm^2 ($L=1\text{mm}$) pour le plus volumineux et $0.5\text{mm}\times 0.5\text{mm}$ ($L=500\mu\text{m}$) pour le plus petit. La hauteur du réservoir de liquide dans la canalisation est égale à $40\mu\text{m}$ et $100\mu\text{m}$. L'épaisseur de la membrane (e) a été fixée à $30\mu\text{m}$ car des expérimentations sur du PDMS ont montré que c'était un bon compromis entre élasticité et faisabilité technologique.

La hauteur du réservoir contenant le matériau énergétique (t) a été fixée dans un premier temps à $100\mu\text{m}$. (voir Figure 6b). Cette dimension n'est pas critique et peut donc varier sans conséquence sur les performances de l'actionneur.

3.2.2 La plate-forme chauffante

Pour concevoir la plate-forme chauffante, deux aspects importants ont été considérés :

- 1) l'optimisation du rendement thermique (température maximale / puissance électrique),
- 2) la bonne tenue mécanique pour supporter le matériau énergétique.

Ainsi, la résistance chauffante sera supportée par une membrane diélectrique ($\text{SiO}_2/\text{SiN}_x$), très bon isolant thermique. L'épaisseur de ces deux diélectriques est choisie respectivement à $1,4\mu\text{m}$ et $0,6\mu\text{m}$ pour avoir une contrainte mécanique $<100\text{MPa}$ et donc une bonne tenue mécanique [22]. Ensuite des travaux antérieurs, par modélisation, et expérimentaux, ont montré que pour concentrer au mieux la chaleur sur la membrane diélectrique $\text{SiO}_2/\text{SiN}_x$, le rapport entre le côté de la membrane et le côté de la résistance chauffante (L/m) (Figure 7a) doit avoir une valeur supérieure ou égale 3 [19]. Nous avons choisi $L/m=3$. Ce qui fixe m à $166\mu\text{m}$ ($L=500\mu\text{m}$) et $330\mu\text{m}$ ($L=1\text{mm}$).

Enfin, nous souhaitons initier le matériau énergétique avec moins de 250mW et sous des tensions inférieures à 10V pour être compatible avec une électronique de commande qui pourrait à terme être intégrée. Compte tenu des contraintes technologiques (épaisseur du polysilicium standard au LAAS= $0.5\mu\text{m}$), nous avons fixé la largeur de piste du polysilicium à $83\mu\text{m}$ pour supporter une densité de courant maximal de $0,6\text{mA}/\mu\text{m}^2$. Cette largeur de piste et la surface optimale de chauffe ne permet pas l'élaboration d'une résistance en serpent, classiquement réalisée dans les thèses précédentes. Ainsi nous avons conçu une résistance carrée comme schématisée sur la figure 5.

Le trou au centre du carré résistif est inclus pour avoir un chauffage plus homogène [19]. La forme oblique au niveau des contacts en Or pour rejoindre la résistance en polysilicium sert à éviter les points chauds au niveau du passage de la zone très conductrice (Au) à la zone résistive (polySi). Les caractéristiques géométriques et dimensions de la résistance sont données dans le Tableau 2.

* * * *

Le tableau ci-dessous résume les valeurs choisies pour les paramètres géométriques des deux actionneurs PYRACT.

Paramètre géométrique	Valeur (μm)	Valeur (μm)
	Actionneur 1	Actionneur 2
L	500	1000
m	166	330
r	92	80
d	55	110
s	72	144
a	250	500
e	30	30
t	100	100

Tableau 2. Paramètres géométriques des actionneurs PYRACT

4 Simulation du microactionneur PYRACT

Dans cette section nous allons décrire la modélisation de l'actionneur PYRACT en vue d'avoir un modèle de conception. Nous décrirons en détail la construction du modèle pour l'actionneur de taille $500\mu\text{m} \times 500\mu\text{m}$. Les résultats pour le deuxième actionneur ($1\text{mm} \times 1\text{mm}$) seront seulement donnés. Le détail des modèles est fourni en annexe B.

4.1 Choix de l'outil multiphysique et présentation de l'approche suivie

L'objectif de notre travail de modélisation est de pouvoir simuler le fonctionnement de l'actionneur à partir de modèles multiphysiques, afin de prédire ses performances en termes d'actionnement (prototypage virtuel).

Dans la modélisation de phénomènes physiques couplés, nous distinguons deux types de couplage [23]:

- le modèle « pluridisciplinaire » quand la démarche de modélisation est linéaire. Par exemple : le modèle thermoélectrique d'une résistance couple le modèle de courant électrique qui produit un échauffement.
- Le modèle « multiphysique » quand la démarche est bouclée. Si nous prenons le même exemple de la résistance, la température peut affecter la conductivité des matériaux et donc le courant qui traverse la résistance. Ce type de couplage est beaucoup plus exigeant en termes de mémoire, de temps de calcul, et très souvent, pour des phénomènes complexes, des problèmes de convergence peuvent se poser.

Les couplages multiphysiques et pluridisciplinaires peuvent être réalisés à partir de différents logiciels spécialisés : des logiciels dédiés à la modélisation des fluides (CFD pour Computational Fluid Dynamics) comme FLOTHERM, ceux dédiés à la mécanique de solides (CSM pour Computational Solid Mechanics) comme ANSYS, et ceux dédiés aux calculs électromagnétiques (CEM pour Computational Electromagnetics) comme HFSS.

Récemment, on a vu apparaître sur le marché des logiciels dédiés aux couplages multi pluridisciplinaires et multiphysiques dans le domaine des microsystemes. On peut citer : ANSYS [24], COMSOL [25], ANSOFT [26], FLOMERICS [27] et PHYSICA [28] entre autres.

Dans ce travail de thèse, on a choisi le logiciel COMSOL MULTIPHYSICS pour réaliser la modélisation du microactionneur, car il est facile à prendre en main et rapide pour réaliser des modèles simples. De plus il est possible de réaliser sur le même outil des modèles dans différents domaines couplés en écrivant directement les équations correspondantes dans le logiciel. Ce logiciel 3D est basé sur les méthodes de résolution par éléments finis.

La démarche que nous proposons de suivre pour la modélisation complète de notre actionneur PYRACT est la suivante : tout d'abord, nous étudierons des modèles simples de chacun des mécanismes mis en jeu dans le fonctionnement de notre actionneur. Ces modèles individuels seront validés si possible par expérimentation et enfin couplés sur le logiciel COMSOL pour obtenir un modèle complet de l'actionneur (prototype virtuel).

La variable d'entrée du modèle global est la puissance électrique appliquée et les variables de sortie sont : la surpression générée, la déformation de la membrane et la vitesse du fluide en sortie de la canalisation. Les paramètres de réglage sont le volume du matériau énergétique et les caractéristiques géométriques de l'actionneur. Le modèle global est composé de quatre sous modèles élémentaires (Figure 8):

- le modèle électro-thermique pour simuler le chauffage du matériau énergétique par effet Joule,

- la génération des gaz à partir de la décomposition du matériau énergétique, une fois la température d'initiation atteinte,
- le modèle mécanique pour simuler la déformation de la membrane en fonction de la pression du gaz,
- le modèle fluide pour simuler la mise en vitesse du fluide dans la canalisation.

Un couplage thermique intervient entre la plaque chauffante et le modèle de l'expansion du gaz et entre la plaque chauffante et la membrane élastique. Un autre couplage d'abord thermique, puis de type fluide-structure est nécessaire entre le modèle de l'expansion du gaz et le modèle mécanique de la membrane. Un couplage fluide-structure sera aussi nécessaire entre la déformation de la membrane élastique et le fluide dans la canalisation si l'on veut prédire la vitesse du fluide dans la canalisation ou le temps de vidange du volume de fluide désiré.

Les variables de couplages sont donc la température (T), la pression (P) et la déformation de la membrane (ω), selon le schéma de la Figure 8.

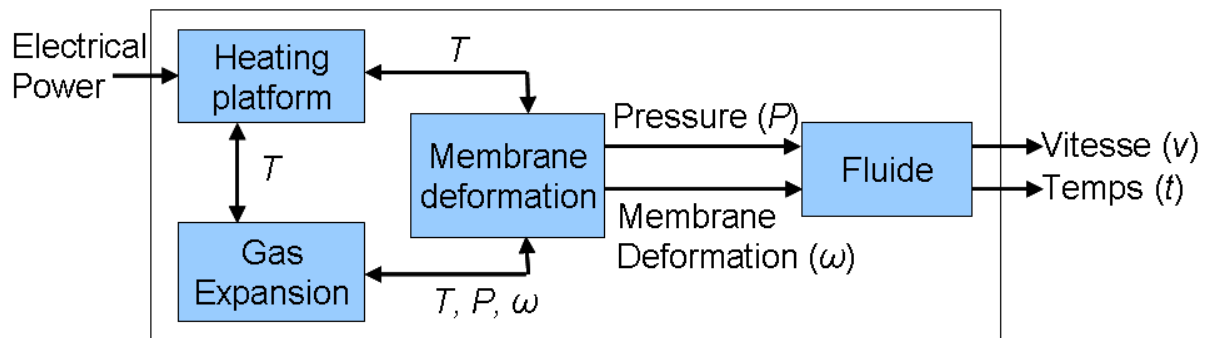


Figure 8. Diagramme de couplage entre sous modèles de l'actionneur PYRACT

4.2 Propriétés matériaux et conditions de simulation

Plusieurs propriétés des matériaux sont nécessaires pour résoudre les différentes équations physiques présentées ultérieurement :

- la conductivité électrique (σ), la conductivité thermique (k), la capacité calorifique (C_p) et la masse volumique (ρ) de tous les matériaux de structure et pour le gaz¹ (air): voir le Tableau 3.
- Le module de Young (E), le coefficient de Poisson (ν) et la contrainte résiduelle (σ_0) des matériaux constituant la membrane et le réservoir.

¹ Le gaz de combustion étant composé de 34.78% de N₂, 13.04% d'O₂ et 52.17% de vapeur de H₂O, nous supposons pour le modèle qu'il s'agit d'air même si la proportion de ces espèces est différente dans l'air (78% de N₂, 21% d'O₂ et de 0-7% de vapeur de H₂O)

- Les caractéristiques de l'air: la masse volumique (ρ_{air}) et masse molaire (M) en fonction de la pression (P), la température (T) et du volume initial.

Matériau	σ (S/m)	k (W/m.K)	C_p (J/Kg.K)	ρ (kg/m ³)
Silicium	non utilisé	100	702	2328
SiO2	non utilisé	1.4	1000	2270
SiNx	non utilisé	49	1000	2270
Polysilicium (Implanté avec Bore)	$\sigma_{poly}(T)$ 5146,3 (23°C)	100	700	2328
Or	$4,4 \times 10^7$	297	128,7	19300
Chrome	$7,3 \times 10^6$	93,7	449	7150
PDMS (Sylgard 184)	non utilisé	0,15	1200	965
Air	non utilisé	$k_{air}(T)$	$C_{air}(T)$	$\rho_{air}(P, T)$
Matériau énergétique	non utilisé	0,15	1850	1500

Tableau 3. Propriétés des matériaux utilisés pour la modélisation du micro actionneur PYRACT

4.2.1 La conductivité électrique de la résistance en polysilicium

$$\sigma_{poly}(T)$$

La résistivité électrique, mesurée à la température ambiante (23°C) est égale à 5146,3 S/m [29]. La conductivité électrique en fonction de la température est déduite par caractérisation :

$$\sigma_{poly}(T) = \frac{\sigma_{poly}(23^\circ C)}{1,0483 - 0,0021 \times T} \quad (3)$$

Avec T en degrés Celsius. Les détails des mesures sont donnés dans l'annexe C.

4.2.2 Propriétés du matériau énergétique

En plus des propriétés du matériau énergétique données dans le Tableau 3, deux paramètres sont nécessaires :

1. l'enthalpie de décomposition (ΔH) du matériau énergétique, car elle donne l'énergie dégagée lors de sa décomposition. Elle a été mesurée à 333,5J/g (voir chapitre IV).

2. Le taux de décomposition du matériau énergétique. Une fois la température d'initiation atteinte, 66% (en masse) du matériau se décompose en gaz. 34% du matériau reste donc dans un état solide (voir chapitre IV). Néanmoins, dans une première approche de modélisation nous allons considérer que tout le matériau se décompose en gaz (voir section 5.5.1).

4.2.3 Coefficient de convection du gaz généré par le matériau énergétique

On considère l'air contenu dans une cavité carrée de largeur $2a$ et hauteur t (Figure 6b).

Pour calculer le niveau de raréfaction de l'air dans la cavité, nous calculons le nombre de Nusselt (Nu) et Grashof (Gr).

Le nombre de Nusselt est utilisé pour déterminer le coefficient de convection (h) dans la cavité, il est donné par :

$$h = Nu \frac{t}{2a} \quad (4)$$

$$Nu = A(Gr.Pr)^n \left(\frac{t}{2a} \right)^m \quad (5)$$

A , n et m sont des constantes qui dépendent de la valeur du produit $Gr \times Pr$. Les nombres de Grashof et Prandtl (Pr) pour l'air enfermé dans la micro cavité sont écrits comme suit :

$$Gr = \frac{g \cdot \beta_{air} (T_{max} - T) t^3 \rho_{air}^2}{\mu_{air}^2} \quad (6)$$

g est la gravité avec comme valeur 9.8 m/s^2 , β_{air} , ρ_{air} , μ_{air} sont les coefficients d'expansion de l'air, la densité et la viscosité dynamique respectivement. Ces valeurs sont dépendantes de la température et peuvent être trouvées à pression atmosphérique dans la littérature [30].

On calcule le nombre de Grashof pour les conditions extrêmes en pression et température dans la cavité en fonction du temps. Nous obtenons un pic de pression de 466,7MPa et une température maximale sur la plate-forme chauffante (T_{max}) de 342°C. Ainsi le nombre de Grashof est égal à 606 et le nombre de Prandtl égal à 0,7 [30].

$Gr \times Pr = 424,2 \ll 1700$ étant la limite du régime de conduction thermique [30].

Ainsi, l'air dans la cavité même en condition extrême de P et T , est en régime uniquement de conduction et le coefficient de convection est mis à zero ($h=0$).

Les expressions pour les coefficients de conductivité thermique (k_{air}), chaleur spécifique (C_{air}) utilisées pour l'air dans le modèle ont été déduites à partir de [30], avec la température en degrés Kelvin comme suit:

$$k_{air}(T) = 6,14 \times 10^{-18} T^5 - 3,66 \times 10^{-14} T^4 + 8,93 \times 10^{-11} T^3 - 1,12 \times 10^{-7} T^2 + 1,23 \times 10^{-4} T - 2,55 \times 10^{-3} \quad (7)$$

$$C_{air}(T) = -4,06 \times 10^{-15} T^5 + 1,42 \times 10^{-10} T^4 - 4,63 \times 10^{-7} T^3 + 4,98 \times 10^{-4} T^2 + 1,64 \times 10^{-2} T + 1006,3 \quad (8)$$

La masse volumique de l'air (ρ_{air}) est considérée à partir de la relation du gaz idéal :

$$\rho_{air}(P, T) = \frac{PM_{air}}{RT} \quad (9)$$

Avec R la constante du gaz, P la pression dans l'enceinte, et M_{air} la masse molaire de l'air.

4.2.4 Propriétés mécaniques des matériaux PDMS de la membrane et du réservoir

Trois types de silicone seront considérés pour la réalisation du microactionneur comme nous l'avons indiqué dans la section 3.1 (voir détails au chapitre III). Cependant, pour la modélisation nous ne considérons que le PDMS Sylgard 184 de chez Dow Corning qui est le matériau PDMS standard pour les applications microfluidiques et qui servira aux premiers prototypages pour la validation des modèles.

Il est difficile de calculer précisément les caractéristiques mécaniques (E, ν, σ_o) du PDMS car ces dernières dépendent fortement de leur degré de polymérisation et du rapport entre le polymère et l'agent de réticulation. On peut trouver, dans la littérature, des valeurs pour le module de Young compris entre 0,3 et 9MPa [31][32]-[35], et pour le coefficient de Poisson de 0,48 [35] ou 0,5 [31]. La contrainte résiduelle a été estimée par Yang et al à 15% du module de Young [36].

Compte tenu de la forte dispersion des valeurs trouvées dans la littérature, nous avons choisi de caractériser expérimentalement le module de Young par deux méthodes : le « Bulge test » et la nano indentation. Le détail de ces caractérisations est donné dans le chapitre IV. Les résultats obtenus par les deux méthodes sont donnés dans le Tableau 4.

Matériau :	Module de Young	Coefficient de	Contrainte initiale
Sylgard 184	(MPa)	poisson	(MPa)
Nano indentation	4	0,48	0
Bulge test	6,55	0,48	0

Tableau 4. Caractéristiques mécaniques mesurées par « Bulge test » et nano indentation des matériaux PDMS

4.3 Modélisation de la plate-forme chauffante

Un calcul théorique simple permet de calculer la valeur de la résistance en faisant une approche des résistances en série et parallèle (Figure 9), avec les expressions :

$$R = \rho \frac{L}{\varepsilon \times \omega} \quad (10)$$

$$R_{total} = \frac{R_{half} \cdot 2}{2R_{half}} = \frac{R_{half}}{2} \quad (11)$$

Avec ρ la résistivité, ε l'épaisseur de la couche résistive, ω la largeur de la piste et L la longueur de la piste et $R_{half} = 2R_B + R_A$.

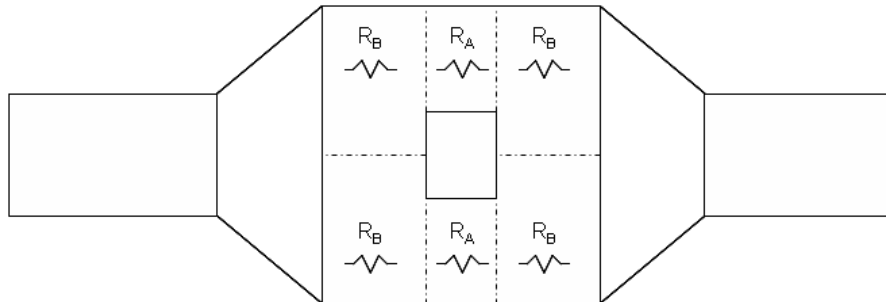


Figure 9. Approche des résistances en série/parallèle pour le carré résistif

Ainsi, pour un polysilicium dopé avec des atomes d'Arsenic, la valeur de la résistance théorique calculée à partir de l'équation (10) est de 484Ω . Cette valeur a été comparée à un modèle COMSOL ($525,4\Omega$) et à la valeur mesurée expérimentalement ($\approx 540\Omega$) ce qui fait une erreur du 3% par rapport au calcul par COMSOL et 10% à partir de l'équation (11).

4.3.1 Modèle et équations

Le modèle électrothermique de la plate-forme chauffante, est constitué par l'équation de la chaleur et l'équation du potentiel électrique. Le lien entre ces deux équations est bien sûr l'effet Joule ($Q = \sigma |\nabla V_e|^2$).

Potentiel électrique

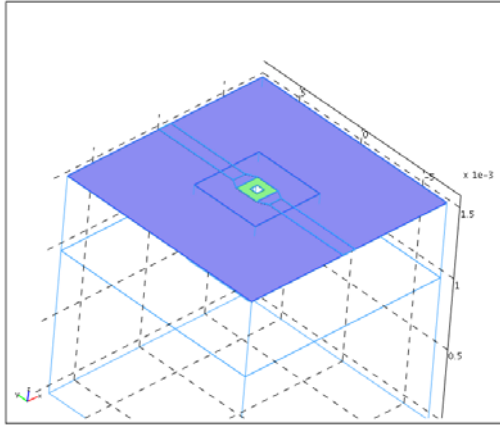
$$-\nabla \cdot (\sigma \nabla V_e) = 0 \quad (12)$$

Transfert de chaleur

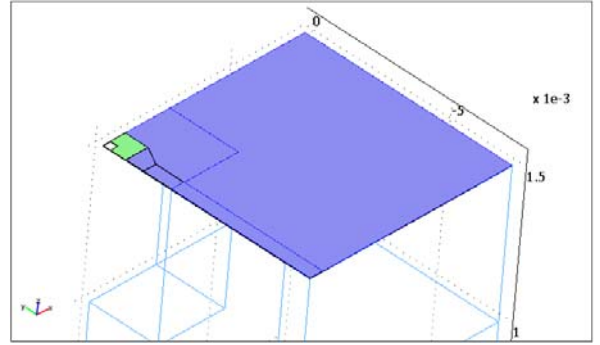
$$\rho \cdot C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (k \nabla T) = Q \quad (13)$$

4.3.2 Implémentation et maillage

La géométrie de la plate-forme chauffante étant symétrique, seul $\frac{1}{4}$ de la structure suffit pour la simulation (Figure 10b). Cela permet de gagner 1,7 minutes de temps de simulation par rapport à la géométrie complète (9,5s pour un quart de la géométrie, 114s pour la géométrie complète). (Figure 10a)



a)



b)

Figure 10. Structures réalisées de la plate-forme chauffante a) structure complète, b) $\frac{1}{4}$ de la structure

Vu le rapport important entre la surface/épaisseur des couches minces (SiO_2 , SiNx , PolySi , Cr et Au), le maillage de ces couches peut poser des problèmes. Notre choix a été de mailler d'abord une géométrie 2D et d'extruder ce maillage vers une géométrie 3D pour les couches minces. Le substrat, n'ayant pas un fort rapport de forme peut être maillé directement dans la géométrie 3D (Figure 11). Finalement nous faisons le couplage thermique entre le substrat et les couches minces.

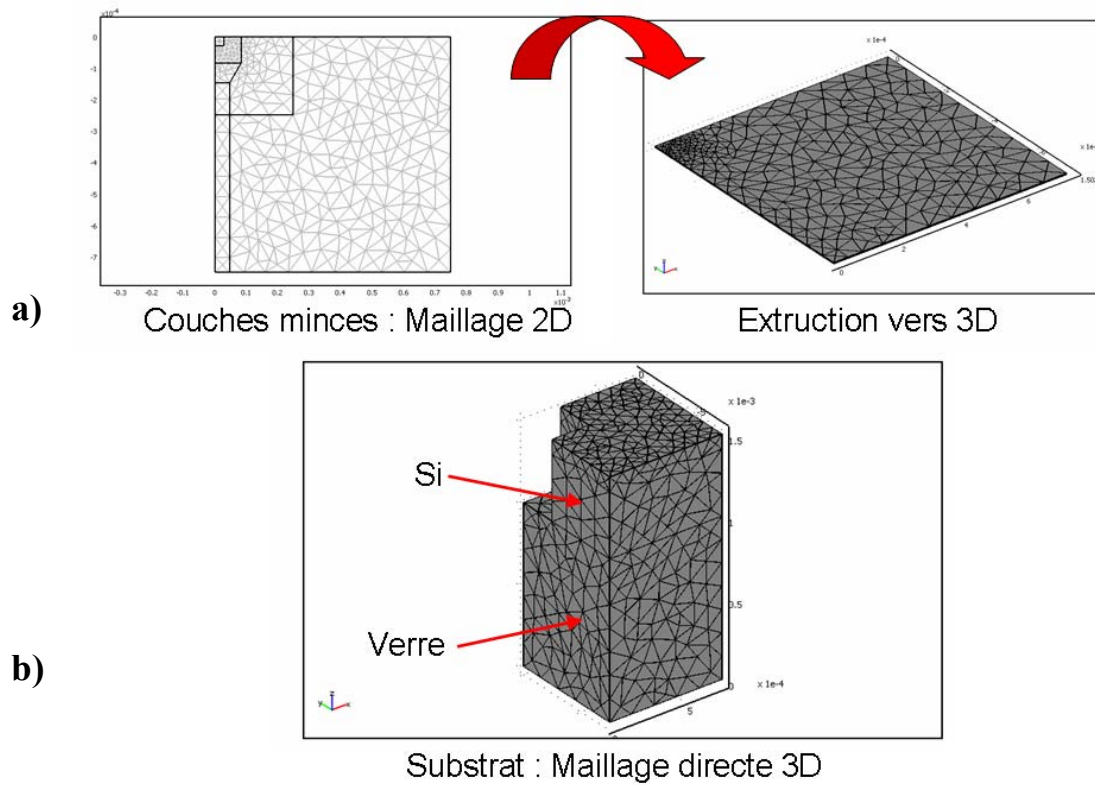


Figure 11. Maillage de la plate-forme chauffante, a) Procédé d'extraction du maillage 2D vers une géométrie 3D, b) maillage direct du substrat

Le maillage optimal² pour la simulation est déterminé en réalisant une étude indépendante pour minimiser l'erreur dans la modélisation. Quand le changement dans la solution entre étapes subséquentes de raffinement de maillage est considéré comme négligeable, le maillage le moins raffiné, mais encore suffisant pour obtenir un résultat acceptable est conservé. La Figure 12 illustre la procédure d'optimisation pour la plate-forme chauffante avec comme condition une tension électrique de 4V: la température maximale dans la résistance de polysilicium et le temps de simulation sont comparés entre les différentes étapes de raffinement de maillage, le compromis entre temps de simulation et précision est trouvé pour le point cerclé sur la Figure 12.

² Maillage optimal : nombre d'éléments minimum permettant une précision suffisante du résultat.

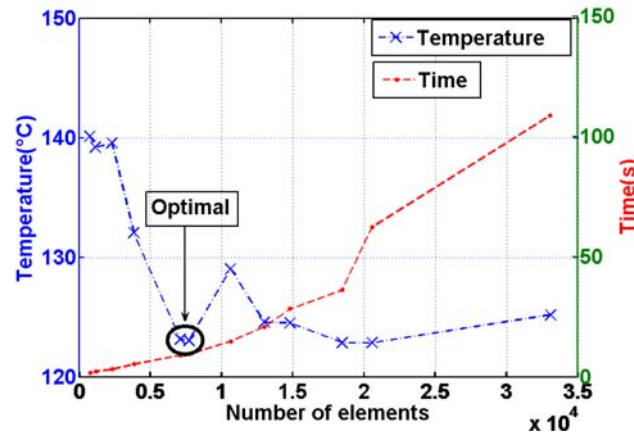


Figure 12. Optimisation du maillage pour le modèle de la plate-forme chauffante

Pour la plate-forme chauffante, le maillage optimal compte 7707 éléments tétraédriques et prismes pour un quart de la structure.

4.3.3 Conditions aux limites

Les conditions aux limites sont les suivantes (Figure 13):

- La température ambiante est imposée sur le dessous de la structure et au niveau des contacts pour simuler le contact avec la source de tension.

Pour avoir des conditions aux limites thermiques réalistes, un support en verre (1mm d'épaisseur) est ajouté au bas de la structure sous le Silicium. De cette façon la condition de température ambiante est appliquée sous le verre et non sous le Silicium. Cet artefact aide à la convergence du modèle. [19](Figure 11)

- Convection sous la membrane diélectrique avec un coefficient de convection (h) = $60 \text{ W/m}^2\text{K}$. [37]
- Convection sur la membrane diélectrique avec un coefficient de convection (h) = $125 \text{ W/m}^2\text{K}$. [19]
- Isolation thermique sur le reste du modèle.
- Une condition de symétrie est appliquée sur les parties correspondantes.
- On applique une tension V_0 sur un contact électrique et la moitié de cette tension ($V_0/2$) au milieu de la résistance (Figure 13). La condition d'isolation électrique est appliquée sur le reste du modèle.

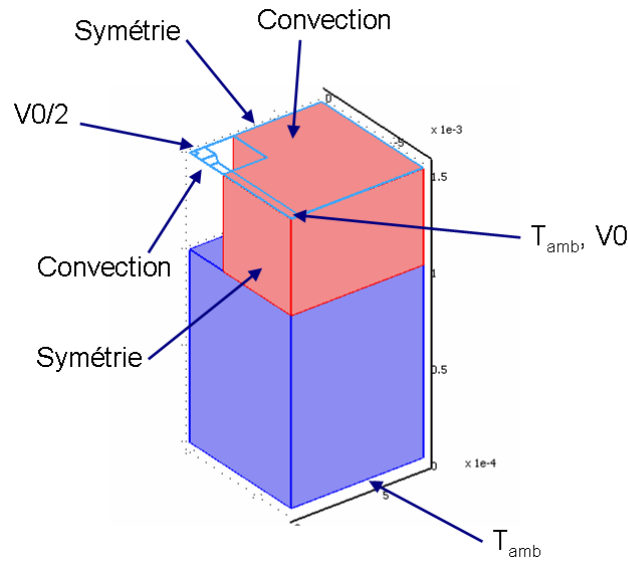


Figure 13. Conditions aux limites pour le modèle thermique et électrique d'un quart de la plate-forme chauffante

4.3.4 Résultats et validation expérimentale

A partir de la simulation, la puissance électrique requise et la distribution de la température résultante sont obtenues. Les résultats de la simulation sont montrés dans la Figure 14. La température sur la plate-forme est donnée en état stationnaire et pour les conditions suivantes :

- Tension appliquée: 4V
- Puissance électrique: 29.8mW

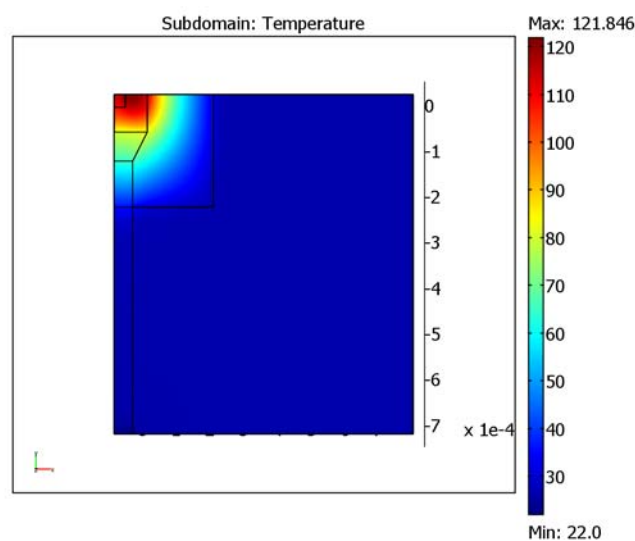


Figure 14. Distribution de température pour une plate-forme chauffante avec une membrane diélectrique de $500\mu\text{m} \times 500\mu\text{m}$

a) Modèle simplifié : sans tenir compte de l'effet de la température sur la résistivité

Dans un premier temps, une simulation selon l'approche « pluridisciplinaire » est réalisée : le courant passe dans la résistance et génère de la chaleur par effet Joule. (Par contre, la chaleur n'affecte pas les propriétés électriques de la résistance). Les résultats de ces simulations peuvent être observés sur la courbe avec une valeur de la conductivité électrique du polysilicium constante sur les Figures 15 et 16.

b) Modèle prenant compte de l'effet de la température sur la résistivité

Une modélisation multiphysique a été réalisée en tenant compte de l'effet de la température sur la conductivité électrique du polysilicium (équation (3)). Les résultats de cette simulation sont reportés sur les Figures 15 et 16.

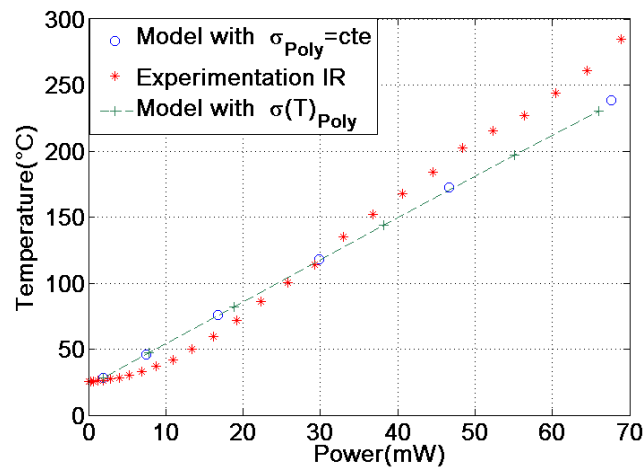


Figure 15. Température maximale sur la plate-forme chauffante en fonction de la puissance électrique

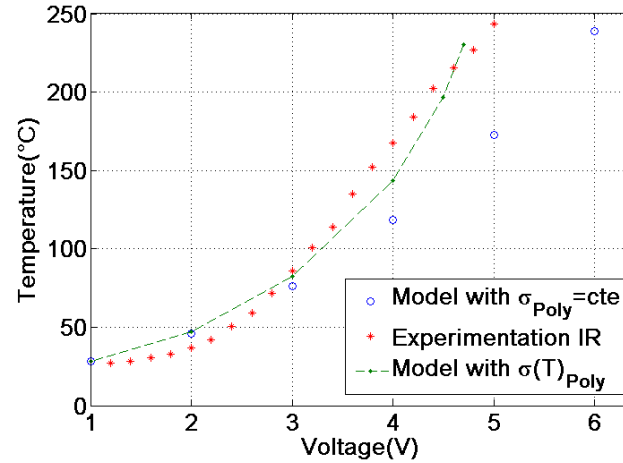


Figure 16. Température maximale sur la plate-forme chauffante en fonction de la tension électrique

La Figure 15 donne la température en fonction de la puissance électrique : aucune différence ne peut être observée entre les deux modèles. La Figure 16 donne la température en fonction de la tension électrique appliquée : on remarque une meilleure corrélation des résultats du modèle réel avec les mesures expérimentales.

Finalement, une étude du coefficient de convection a été réalisée pour évaluer son effet sur la température, les coefficients de convection sur et sous la membrane diélectrique sont mis alternativement à zéro. Les résultats sont montrés dans les Figure 17 et 18. D'après ces résultats, l'influence de la convection à cette échelle ($<mm^2$) n'est pas significative.

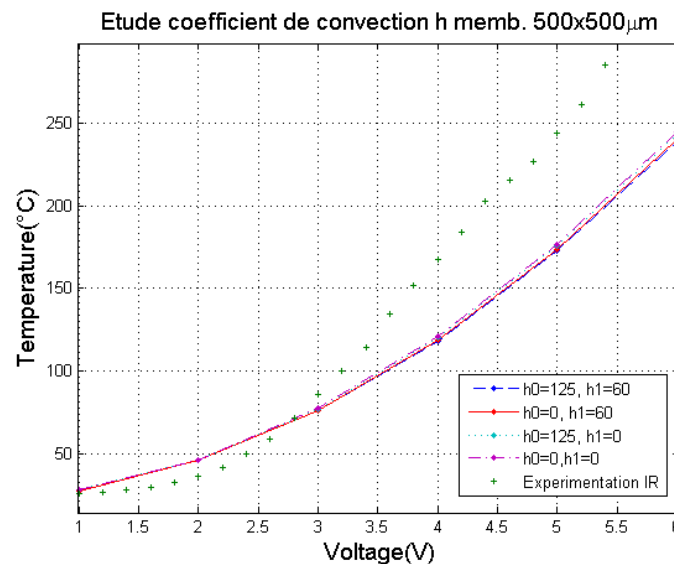


Figure 17. Etude sur le coefficient de convection pour la plate-forme chauffante. Température maximale en fonction de la tension électrique appliquée

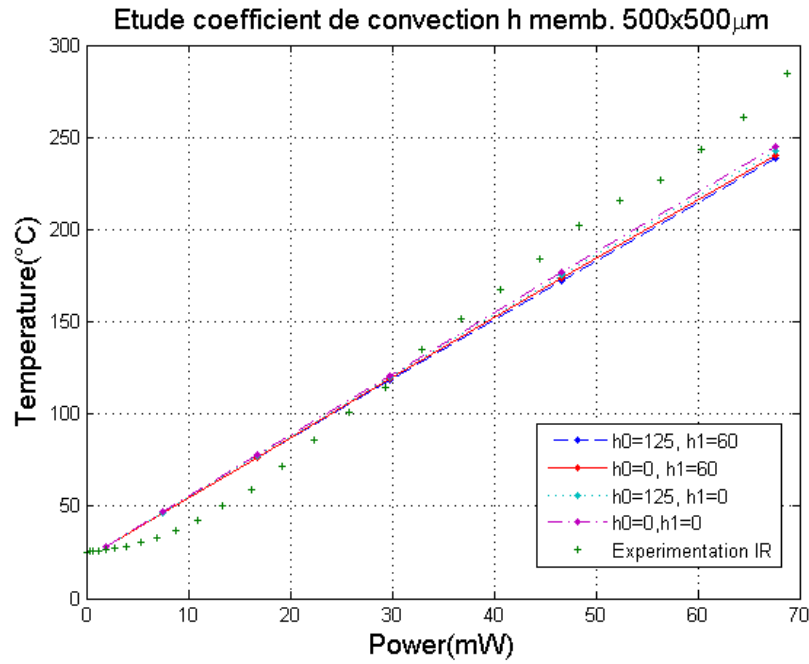


Figure 18. Etude sur le coefficient de convection pour la plate-forme chauffante. Température maximale en fonction de la puissance électrique appliquée

4.4 Modélisation de l'expansion de la membrane élastique

4.4.1 Modèle et équations

Les modèles classiques de déformation mécanique [38] sont basés, le plus souvent, sur des approximations de faibles déformations, c'est-à-dire :

- le rapport entre la déformation de la membrane et son épaisseur est très faible ($w_{max}/e \ll 1$),
- le rapport entre la déformation de la membrane et sa dimension latérale est très faible ($w_{max}/2a \ll 1$) [38]. (voir Figure 19)

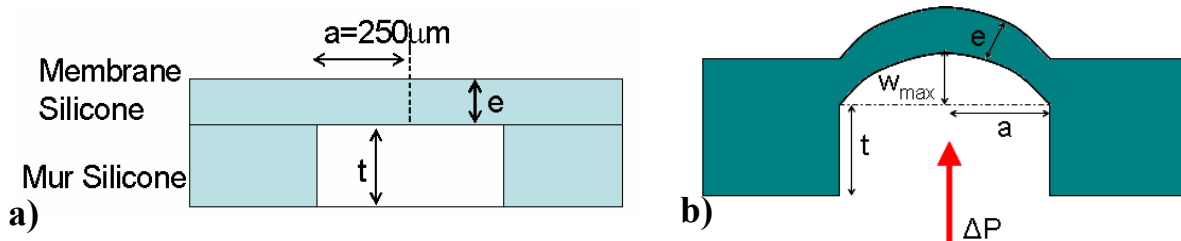


Figure 19. Structure du modèle pour la membrane élastique, a) Structure initiale b) structure sous l'effet de la pression appliquée

Ces approches simplifiées de la déformation mécanique fonctionnent très bien quand les matériaux utilisés ont un module de Young important (>GPa) et un coefficient de Poisson autour de 0,3 comme on peut voir dans la littérature [39].

Dans notre cas, w_{max}/e est attendu dans la gamme de 3 à 5 et $w_{max}/2a$ entre 0,2 et 0,4. En conséquence, la simulation de la déformation d'une membrane faite PDMS doit être réalisée en utilisant un modèle aux grandes déformations.

Le modèle aux grandes déformations utilise l'expression du tenseur de déformation suivant [38]:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \cdot \frac{\partial u_k}{\partial x_j} \right) \quad (14)$$

Avec :

- u représente la déformation dans une direction déterminée
- x est la coordonnée spatiale
- les indices i, j, k représentent chaque composant dans la direction x, y, z .

Le terme non-linéaire $\frac{\partial u_k}{\partial x_i} \cdot \frac{\partial u_k}{\partial x_j}$ caractérise le comportement de grande déformation.

Le tenseur de déformation ε_{ij} peut être exprimé aussi sous forme matricielle:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (C - I) \quad (15)$$

Avec:

- I : matrice d'identité
- C : le tenseur de Cauchy-Green : $C = F^T F$ où F est la matrice de gradient de déformation qui contient l'information sur la déformation et la rotation.

Le stress (p) dans la membrane peut être calculé à partir de la première formulation de Piola-Kirchhoff [40]:

$$p = \frac{\partial W_{hyp}}{\partial \nabla \vec{u}} \quad (16)$$

Avec:

- $\nabla \vec{u}$ est le gradient de déplacement
- W_{hyp} est la fonction d'énergie de déformation que caractérisent les propriétés hyperélastiques des matériaux type PDMS.

Le modèle Neo-Hookean [41][42] considère la fonction d'énergie de déformation comme suit :

$$W_{hyp} = \frac{1}{2} \mu (I_1' - 3) + \frac{1}{2} \kappa (J_{el} - 1)^2 \quad (17)$$

Avec:

- μ et κ sont les modules de cisaillement et de bulk pour le PDMS, respectivement.
- J_{el} est la partie élastique du changement total de volume dans le matériau type PDMS:

$$J_{el} = \frac{J}{J_{th}} = \frac{J}{(1 + \varepsilon_{th})^3} \quad (18)$$

- o J représente le rapport entre le volume actuel et le volume initial.
- o J_{th} est l'expansion thermique exprimée en termes de la déformation thermique

$$\varepsilon_{th} : J_{th} = (1 + \varepsilon_{th})^3$$

I_1' est le premier invariant de déformation modifié : $I_1' = (C_{11} + C_{22} + C_{33}) J_{el}^{-\frac{2}{3}}$ avec C_{11} , C_{22} et C_{33} les composants matriciels du tenseur de Cauchy-Green définie précédemment.

4.4.2 Implémentation et maillage

Comme dans le cas de la plate-forme chauffante, la membrane élastique est symétrique suivant x et y , nous permettant d'implémenter un modèle d'un quart de la structure. (voir Figure 20)

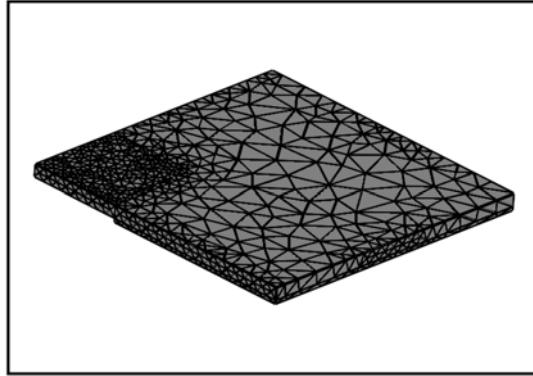


Figure 20. Maillage de la membrane élastique

Les couches de Silicone sont plus épaisses ($t=10\mu\text{m}$ et $e=30\mu\text{m}$) que celles de SiO_2/SiNx ($e=1,4\mu\text{m}$ et $0,6\mu\text{m}$) de la membrane de la plate-forme chauffante. Ainsi nous pouvons mailler la structure 3D directement (voir Figure 20).

La même procédure que celle décrite pour la plate-forme chauffante a été utilisée pour déterminer le maillage optimal. Les résultats sont donnés sur la Figure 21.

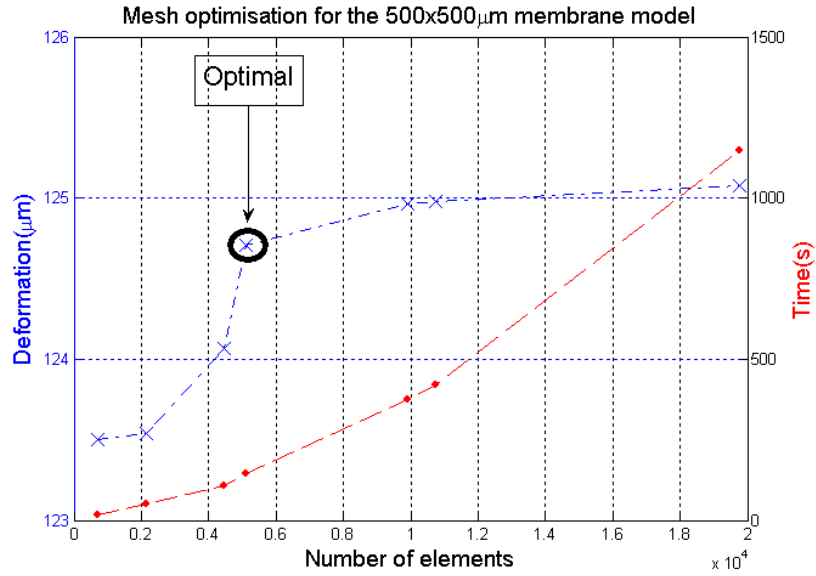


Figure 21. Procédure d'optimisation pour le modèle de la membrane élastique

Ainsi, le maillage optimal pour la membrane en PDMS contient 5104 éléments tétraédriques. Le maillage peut être observé dans la Figure 20.

4.4.3 Conditions aux limites

Les conditions aux limites sont les suivantes (Figure 22):

- la structure est considérée encastree en sa partie inférieure et sur les cotés (déformation nulle). Toutes les autres frontières ont une déformation libre.
- Une condition de symétrie est appliquée sur les parties correspondantes.
- Une pression est appliquée sous la membrane.

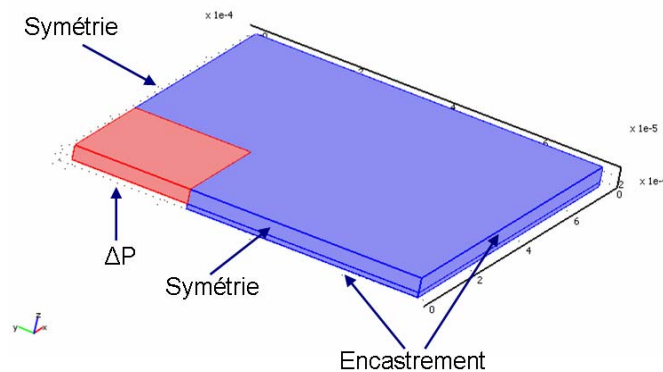


Figure 22. Conditions aux limites pour le modèle mécanique d'un quart de la membrane élastique

4.4.4 Résultats et validation expérimentale

Les résultats pour la simulation de la déformation de la membrane sont illustrés dans la Figure 23. Le matériau PDMS (Sylgard 184) est considéré avec les paramètres caractérisés

$E=4\text{MPa}$; $\nu=0,48$; $\sigma_o=0$. La déformation (w) de la membrane est donnée en état stationnaire pour la condition suivante : pression appliquée sous la membrane : 0.01MPa

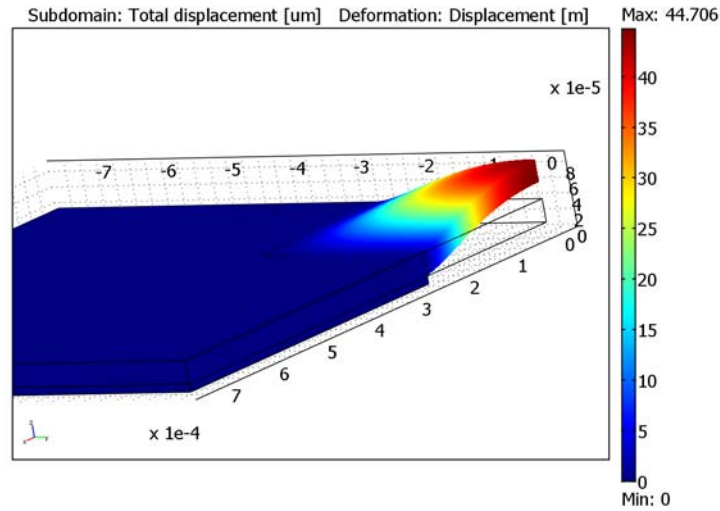


Figure 23. Déformation de la membrane élastique de $500\mu\text{m} \times 500\mu\text{m}$ avec une épaisseur de $30\mu\text{m}$

La Figure 24 montre la déformation maximale théorique et expérimentale au centre de la membrane en fonction de la pression dans la cavité. Les courbes correspondent à une membrane PDMS avec une épaisseur de $30\mu\text{m}$ fabriquée au LAAS (voir section 5.1 du chapitre IV). Nous pouvons observer une légère différence d'évolution des courbes : les courbes expérimentales obtenues à partir du « Bulge test » (chapitre IV) sont relativement linéaires, alors que la courbe théorique « s'écrase » aux forts ΔP .

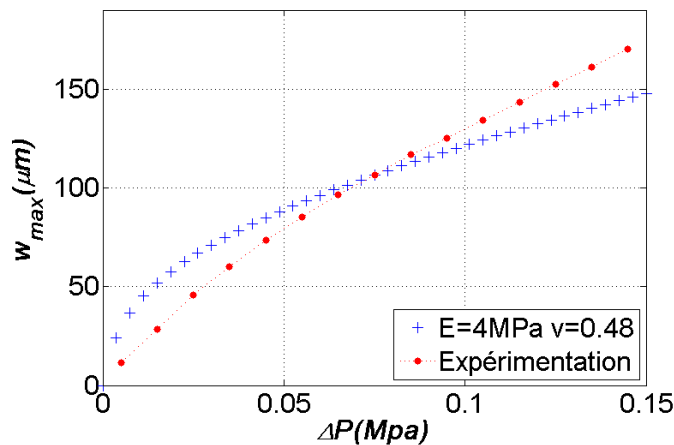


Figure 24. Comparaison entre expérimentation et modélisation pour la déformation maximale de la membrane élastique de $500\mu\text{m} \times 500\mu\text{m}$ en surface

Une possible explication de cette légère différence entre l'allure des deux courbes vient du fait que lorsqu'on caractérise la déformation de la membrane par bulge test, il y a un

décollement du PDMS/Si qui induit une erreur sur la déformation maximale mesurée. (cf. chapitre IV)

Une étude de l'influence de l'incertitude des caractéristiques matériaux sur la déformation de la membrane a été réalisée. En effet, nous avons modélisé la déformation de la membrane soumise à des ΔP compris entre 0 et 0,15MPa en balayant les propriétés du Sylgard 184 dans la gamme trouvée dans la littérature mentionnée dans la section 5.2.4. Les résultats de cette étude sont montrés dans les Figure 25, Figure 26 et Figure 27.

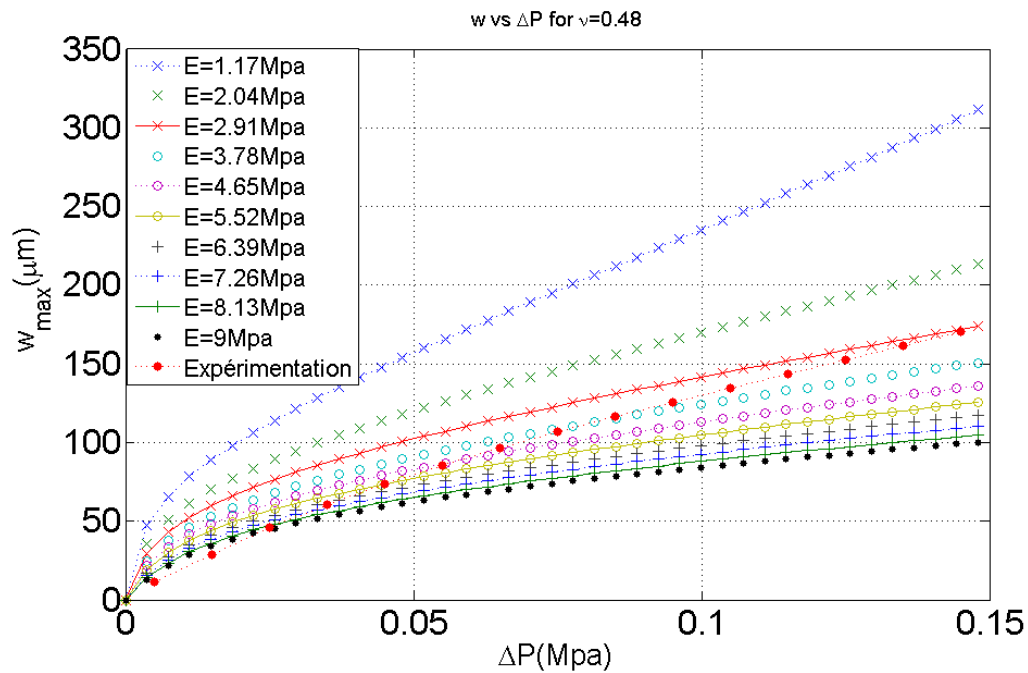


Figure 25. Etude de l'effet du module de Young sur la déformation maximale de la membrane élastique

Cette étude montre que la valeur du module de Young doit être connue avec précision car elle influence grandement la déformation de la membrane.

La valeur qui correspond le mieux à la courbe expérimentale se trouve entre 2,91MPa et 5,52MPa. Ce qui confirme la valeur obtenue par nanoindentation de 4MPa (voir chapitre IV).

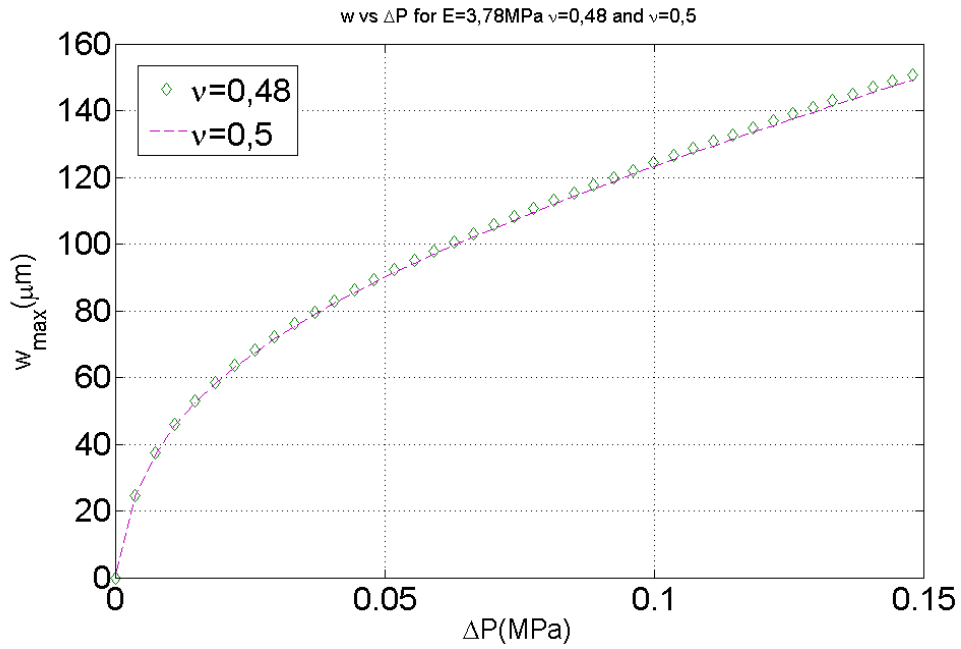


Figure 26. Etude de l'effet du coefficient de Poisson sur la déformation maximale de la membrane élastique avec $E=3,78\text{MPa}$

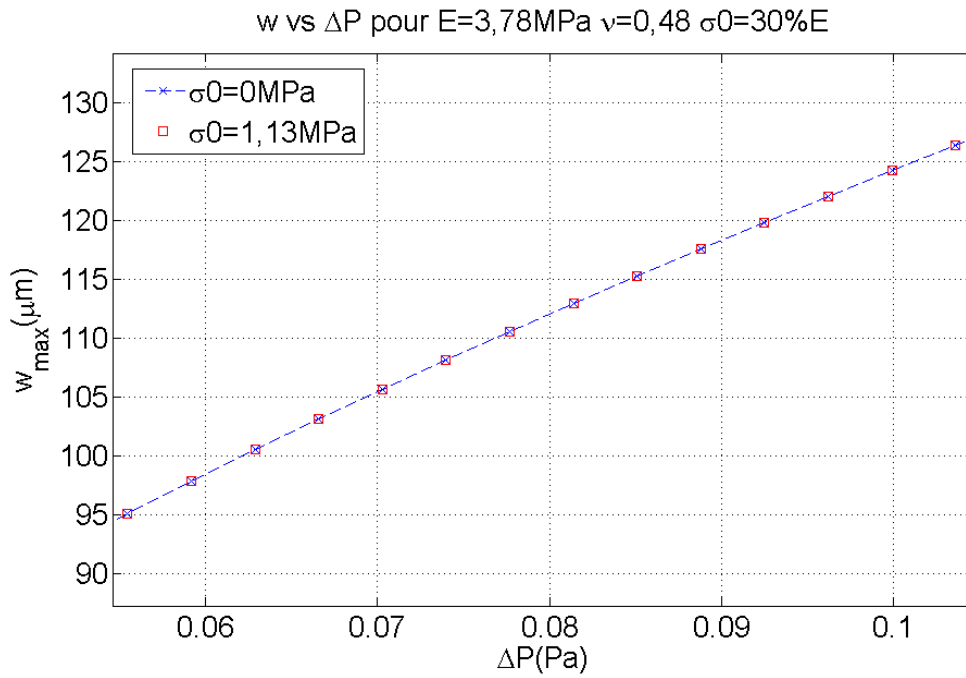


Figure 27. Etude de l'effet de la contrainte initiale sur la déformation maximale de la membrane élastique avec les paramètres $E=3,78\text{MPa}$, $\nu=0,48$

On observe dans les Figure 26 et Figure 27 que l'effet de la contrainte initiale est négligeable sur la déformation de la membrane. L'effet du coefficient de Poisson est très faible aussi (variation $<1,5\%$).

4.5 Modélisation de la décomposition du matériau énergétique et expansion du gaz généré

4.5.1 Modèle et équations

Comme première approche, une structure 2D axisymétrique (Figure 28) est implémentée pour valider le concept avant d'implémenter un modèle complet en 3D.

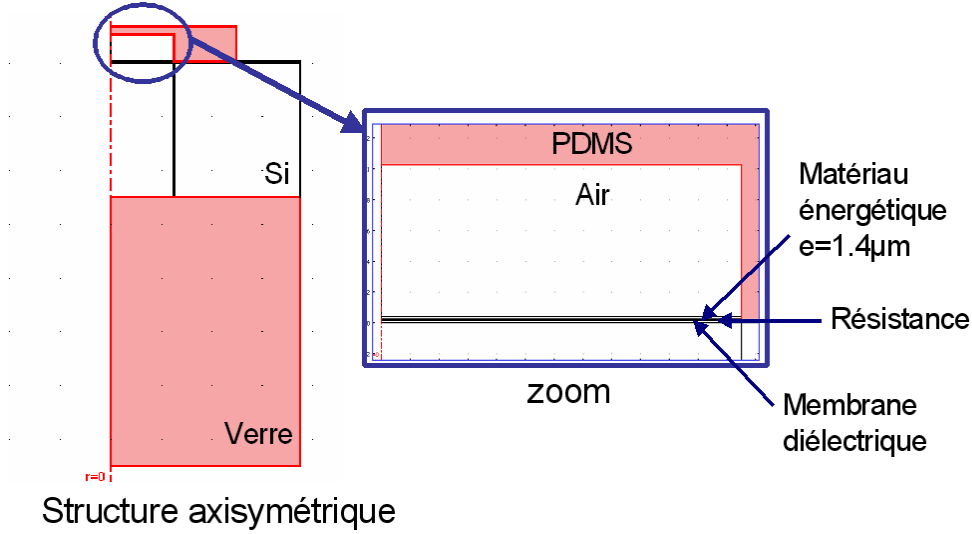


Figure 28. Structure 2D axisymétrique de l'actionneur

La géométrie de la résistance chauffante est différente de celle du modèle 3D. Une calibration du modèle 2D en termes de la tension appliquée et du chauffage obtenu a été réalisée en modifiant la conductivité électrique du matériau résistif. En conservant les dimensions de l'actionneur décrites dans la Figure 6b et Figure 7 et le Tableau 2, la valeur corrigée pour la conductivité électrique pour le polysilicium est de 1580 S/m au lieu de la valeur mesurée 5146,3 S/m à température ambiante (voir Tableau 2).

La quantité de matériau déposé sur la plate-forme chauffante a une épaisseur moyenne de 1,4µm. Nous supposons un dépôt uniforme du matériau. La masse totale déposée est donc égal à 285ng.

La courbe de décomposition du matériau énergétique en fonction de la température est schématisée par la courbe en gras de la Figure 29. Elle suit une loi d'Arrhenius et peut s'écrire:

$$\dot{m}_g(T) = A_s \exp\left(-\frac{\Delta H}{RT_s}\right) \quad (19)$$

Avec :

- T_i la température d'initiation du matériau énergétique
- T_s la température du matériau énergétique solide
- A_s le facteur pré exponentiel dépendant des propriétés du matériau énergétique et du gaz
- ΔH : enthalpie de réaction.

Pour le modèle, nous supposons que toute la masse de matériau énergétique ayant atteint T_i se décompose en gaz (N_2 , O_2 , vapeur d'eau). Ainsi l'équation de décomposition s'écrit simplement :

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

Avec m_s la masse du matériau énergétique à l'état solide et m_g la masse de gaz générée.

Cette simplification du mécanisme de décomposition n'induit pas d'erreur importante car la masse de matériau énergétique à chauffer est faible donc le temps de chauffage à T_i a été calculé à 2ms (avec une puissance de 97mW), temps proche du temps de décomposition chimique.

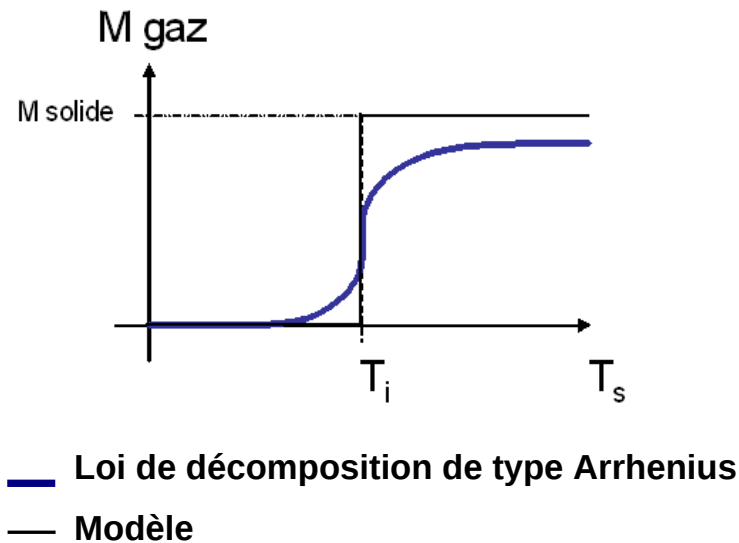


Figure 29. Modèles pour la décomposition d'un matériau énergétique.

La deuxième hypothèse du modèle déjà mentionnée est que le gaz généré est de l'air et son comportement est idéal. Le gaz peut être considéré idéal dans la mesure où la pression est faible, cela se traduit par une interaction faible entre les différentes espèces du gaz (vapeur d'eau, O_2 , N_2).

La masse de gaz (m_g) générée diffuse dans l'air ambiant (à température ambiante et pression atmosphérique) contenu dans la cavité. L'évolution du gaz enfermé dans la cavité suit la loi de Fick [30] :

$$\frac{\partial c}{\partial t} - \nabla \cdot (D \nabla c) = 0 \quad (20)$$

Avec :

c : la concentration des espèces

D : est le coefficient de diffusion. Le coefficient de diffusion dépend de la nature du gaz, de la pression et de la température dans la cavité [30] :

$$D = 435,7 \frac{T^{3/2}}{2p \left(V^{1/3} \right)^2} \sqrt{\frac{2}{M}} \quad (21)$$

V indique le volume molaire et M est la masse molaire, pour l'air $V=0,0299\text{m}^3/\text{mol}$ et $M_{air}=0,0289\text{kg/mol}$.

La convection n'est pas considérée dans cette approche. La pression dans la cavité peut-être directement lié à la concentration, à partir de la relation pour le gaz idéal nous obtenons :

$$P = cRT \quad (22)$$

4.5.2 Implémentation et maillage

Les résultats de l'optimisation du maillage sont montrés sur la Figure 30. Le temps de simulation et la concentration finale dans la cavité sont calculés pour un nombre d'éléments croissant. Le compromis entre le temps de simulation et la précision est trouvé pour le point encerclé sur la Figure 30 donnant un maillage optimal : 12103 éléments de géométrie triangulaire. (Voir la Figure 31).

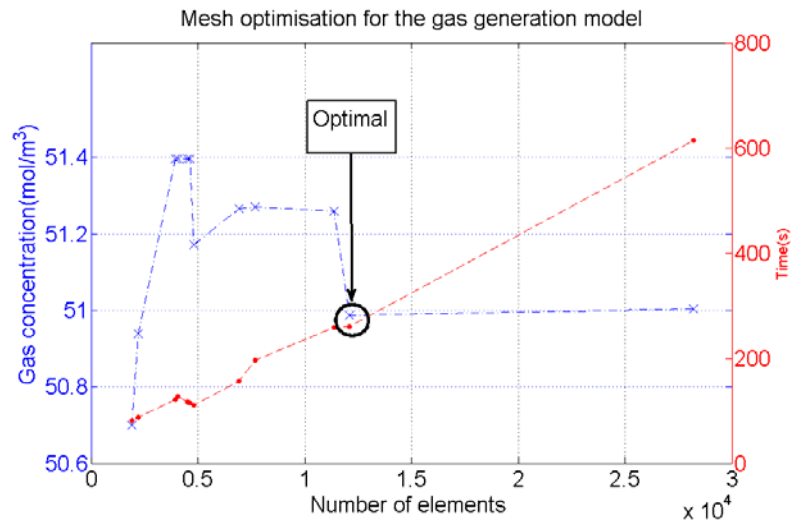


Figure 30. Procédure d'optimisation pour le modèle axisymétrique de l'actionneur

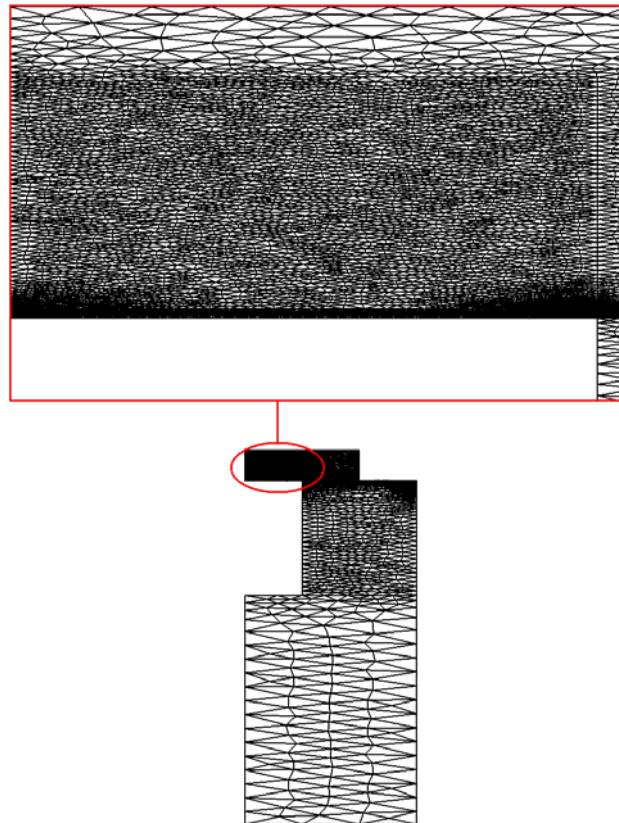


Figure 31. Maillage du modèle 2D axisymétrique pour la génération de gaz en incluant le modèle électrothermique.

4.5.3 Conditions aux limites et de simulation

D'après l'expérimentation, seul la partie du matériau énergétique déposée sur la plateforme chauffante qui atteint la T_i se décompose très rapidement une fois la tension électrique appliquée (voir expérimentations décrites au chapitre IV). Cela nous permet de proposer un

modèle basé sur la décomposition instantanée du matériau énergétique en sachant la quantité de matériau ayant atteint T_i .

Pour évaluer la quantité de matériau qui se décompose, nous appliquons une tension constante aux bornes de la résistance. La masse de matériau énergétique solide ayant atteint T_i à l'état stationnaire est calculée, et donne la masse de gaz généré.

Ensuite, le modèle implementé fournit l'évolution de la concentration du gaz, de la pression et de la température du gaz en fonction du temps.

Les conditions aux limites sont :

- Pression atmosphérique à l'extérieur
- Température ambiante à l'extérieur
- Tension : 6,3V aux bornes de la résistance.

Les conditions initiales sont : l'air de la cavité est à pression atmosphérique et à température ambiante et la concentration de l'air est $c_{air} = 41,44 \text{ mol/m}^3$.

4.5.4 Résultats

L'évolution de la pression, la température et la concentration du gaz sont données en un point de la cavité au niveau de la membrane : le point d'observation (voir Figure 32).

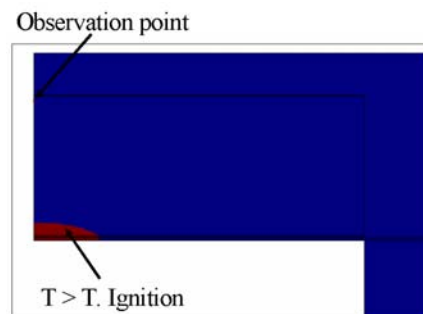


Figure 32. Schéma du modèle et positionnement du point d'observation dans la cavité.

En ce point, la Figure 33 montre l'évolution très rapide (2ms) de la concentration du gaz jusqu'à l'état stationnaire dans la cavité correspondante à une concentration de $51,34 \text{ mol/m}^3$.

Il y a un pic lors de la décomposition du matériau énergétique à 78 mol/m^3 . Le premier palier (0 à 0,2ms) correspond au temps de diffusion du gaz issu du matériau énergétique au point d'observation.

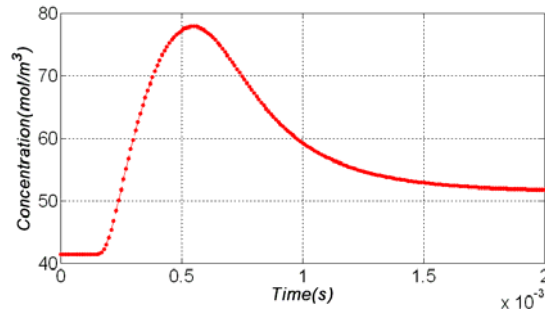


Figure 33. Evolution de la concentration du gaz sur le point d'observation sous la membrane élastique

La Figure 34 montre l'évolution de la température au point d'observation de la cavité après arrêt de l'alimentation en tension : il faut 3,6s pour arriver à l'état stationnaire (température ambiante).

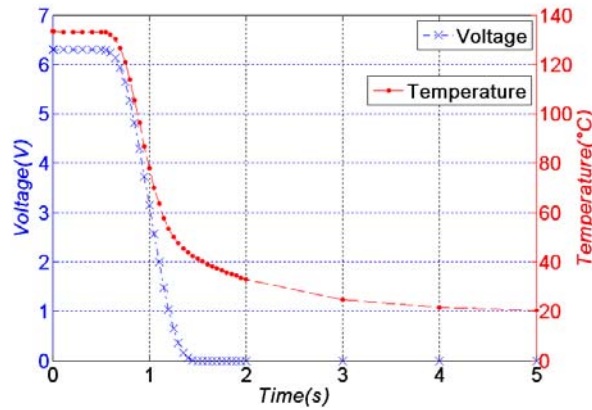


Figure 34. Evolution de la température du gaz sur le point d'observation sous la membrane élastique

La Figure 35 montre l'évolution de la pression au niveau du point d'observation après arrêt de l'alimentation en tension. Après un pic de pression lié à la génération brutale du gaz lorsque $T_s = T_i$, la pression passe de 0,073MPa à 0,025MPa (état stationnaire) en 1,3s.

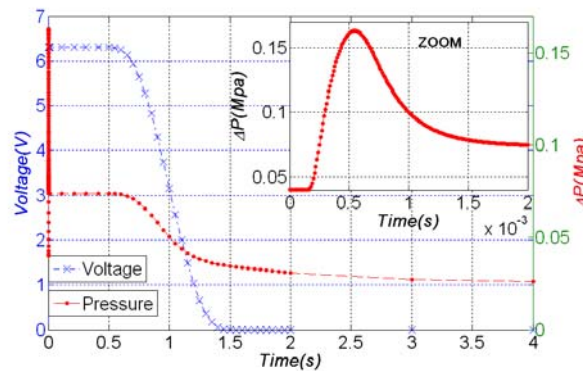


Figure 35. Evolution de la pression du gaz sur le point d'observation sous la membrane élastique

5 Modèle complet de conception

Dans cette section nous décrivons le couplage multiphysique des modèles précédemment présentés. Nous avons procédé en deux étapes :

- tout d'abord, un premier modèle couple la déformation maximale de la membrane et la pression générée dans la cavité avec la puissance électrique appliquée : Modèle de l'actionneur PYRACT.
- Ensuite, un deuxième modèle couple la vitesse du fluide (eau) avec la pression et la déformation de la membrane : Modèle de l'éjecteur complet.

5.1 Modèle de l'actionneur PYRACT

Une régression polynomiale des résultats théoriques du modèle mécanique de déformation de la membrane $500\mu\text{m}\times 500\mu\text{m}$ (voir la section 5.4) montrés dans la Figure 24, nous donne la pression en fonction de la déformation de la membrane comme suit:

$$P = -2.52 \times 10^{-20} w_{max}^4 + 7.51 \times 10^{-16} w_{max}^3 + 6.56 \times 10^{-11} w_{max}^2 + 8.69 \times 10^{-7} w_{max} + 1 \times 10^{-5} \quad (23)$$

Ensuite, le modèle de décomposition du matériau énergétique permet d'obtenir la courbe de pression en fonction de la puissance électrique appliquée et en fonction du masse du matériau énergétique. La Figure 36 montre qu'avec $2,75 \times 10^{-7} \text{cm}^3$ (285ng) de matériau énergétique (1 goutte par procédé disponible au LAAS par capillarité cf Chapitre III), il faut une puissance électrique minimale de 62mW pour déclencher l'actionnement. Cette même courbe montre que la pression maximale générée est de 60kPa et $100\mu\text{m}$ de déformation sous 79mW. Le niveau de pression généré est suffisant pour vidanger 10nl en moins de 0,5s.

La même analyse a été réalisée pour l'actionneur de surface $1\text{mm}\times 1\text{mm}$ (voir Figure 36b). Pour cet actionneur contenant la même quantité de matériau énergétique, une puissance électrique minimale de 74mW est requise pour déclencher l'actionnement. Cet actionneur génère une pression maximale de 24kPa sous une puissance électrique de 79mW. C'est donc insuffisant pour vider 100nl en moins de 5s. Il faudra augmenter la masse de matériau énergétique. (voir section 5.1.1)

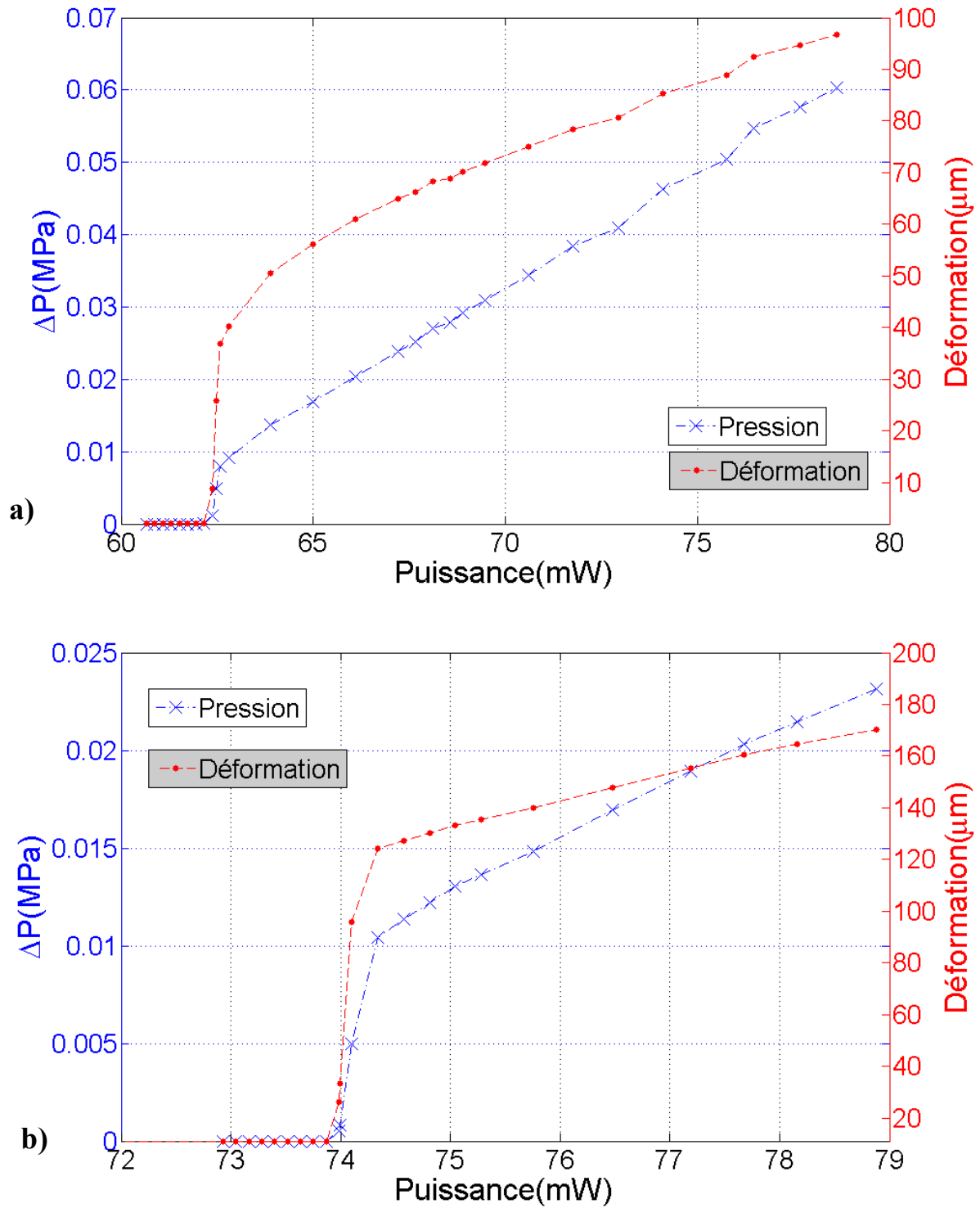


Figure 36. Pression dans la cavité et déformation maximale de la membrane en fonction de la puissance électrique appliquée a) actionneur avec surface de 500µm×500µm b) actionneur avec surface de 1mm×1mm. Volume de matériau énergétique = $2,75 \times 10^{-7} \text{ cm}^3$ (285ng)

Les rapports Surpression/Puissance électrique peuvent atteindre une valeur de $7,5 \times 10^5 \text{ Pa/W}$, ce qui est très performant pour des actionneurs ayant des dimensions sous-millimétriques. Par exemple, ces résultats peuvent être comparés avec ceux obtenus avec un modèle COMSOL d'un microactionneur thermo pneumatique ayant la même structure et les mêmes dimensions que notre dispositif (surface de $500\mu\text{m} \times 500\mu\text{m}$) [43]. Dans ce microactionneur, le chauffage de l'air enfermé dans une cavité élaboré avec un polymère très élastique (PDMS) est utilisé comme principe d'actionnement. Les performances du dispositif sont montrées sur la Figure 37. **Pour atteindre le même niveau d'actionnement ($100\mu\text{m}$) il faut 5 fois plus de puissance électrique (400mW), le rapport Surpression/Puissance électrique obtenu est limité à seulement $1,8 \times 10^5 \text{ Pa/W}$ (4 fois moins que l'actionneur PYRACT).**

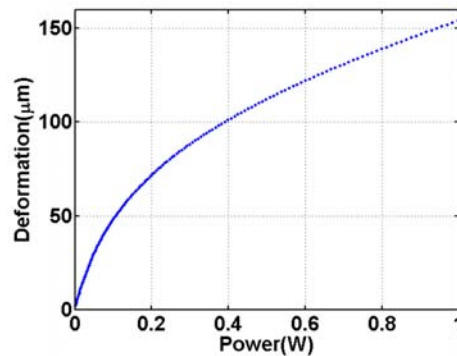


Figure 37. Etude de l'actionnement thermo pneumatique (chauffage air) avec une surface de $500\mu\text{m} \times 500\mu\text{m}$ Déformation maximale de la membrane en fonction de la puissance électrique appliquée sur la plate-forme chauffante d'après [43]

5.1.1 Performances en fonction du volume de matériau énergétique

Nous allons ici étudier les performances des actionneurs PYRACT (ΔP , ω_{max}) en fonction du volume du matériau énergétique (voir Figure 38). Pour cette analyse : 70mW sont appliqué sur l'actionneur de surface $500\mu\text{m} \times 500\mu\text{m}$ et 79mW sur l'actionneur de surface $1\text{mm} \times 1\text{mm}$. Ce sont les puissances maximales théoriques simulées que peuvent supporter les résistances électriques. En pratique (voir chapitre IV) l'actionneur de surface $500\mu\text{m} \times 500\mu\text{m}$ peut supporter 90mW, celui de surface $1\text{mm} \times 1\text{mm}$ supporte jusqu'à 100mW.

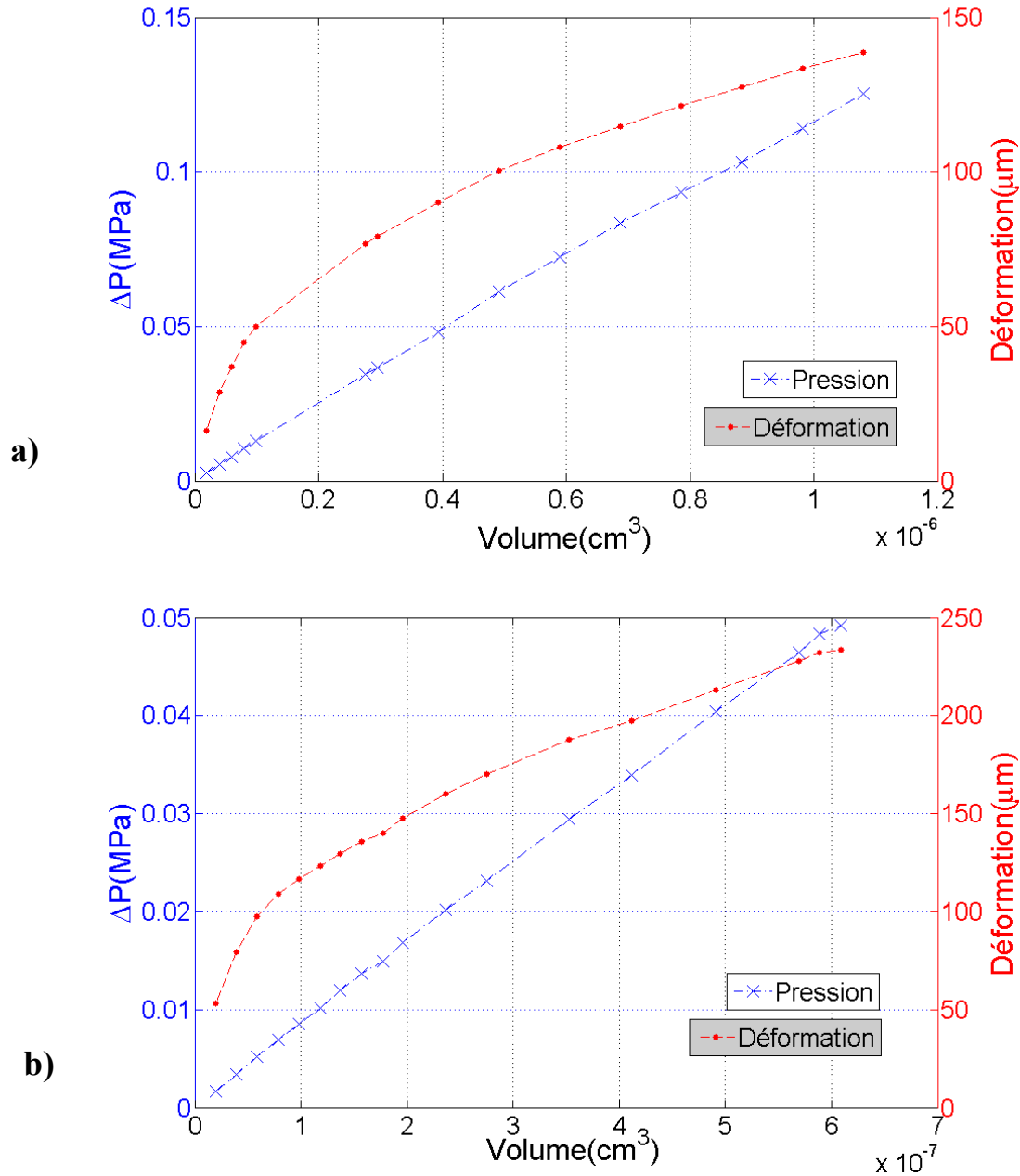


Figure 38. Surpression dans la cavité et déformation maximale de la membrane en fonction de la quantité de matériau énergétique déposé. a) actionneur avec surface de $500\mu\text{m} \times 500\mu\text{m}$. Puissance électrique = 70mW. b) actionneur avec surface de $1\text{mm} \times 1\text{mm}$. . Puissance électrique = 79mW.

Ainsi, il faudra $5,5 \times 10^{-7} \text{cm}^3$ (570ng) sur les deux actionneurs pour atteindre au moins 40kPa de surpression requis par le cahier de charges.

Remarque : Nous avons fixé dans le dimensionnement des démonstrateurs (section 3.2), une hauteur pour les réservoirs de liquide à vider de $40\mu\text{m}$ et $100\mu\text{m}$. Ces valeurs devront être modifiées à $100\mu\text{m}$ et $300\mu\text{m}$ pour tenir compte de la déformation maximale des membranes élastiques.

5.2 Modèle de l'éjecteur complet

Pour modéliser l'éjecteur complet, il faut prendre en compte l'interaction de la déformation de la membrane avec le fluide considéré (ici de l'eau) contenu dans la canalisation.

Pour la modélisation fluidique, nous proposons une géométrie de modèle schématisée sur la Figure 2. Nous plaçons le microactionneur à l'extrémité d'une canalisation, ce qui correspond au démonstrateur.

Pour des questions de convergence et de capacité de mémoire, nous avons modélisé l'interaction fluide/actionneur en 2D.

5.2.1 Modèle et équations

L'interaction fluide-membrane est réalisée en utilisant un maillage mobile (ALE pour Arbitrary Lagrangian-Eulerian) [44] à partir du module proposé par COMSOL pour prendre en compte le mouvement de la membrane (frontière mobile). Cette technique est intermédiaire entre deux méthodes utilisées pour décrire le mouvement d'un matériau :

- la méthode Lagrangienne, avec un maillage qui suit la déformation du matériau, utilisée notamment pour décrire la déformation des matériaux solides.
- La méthode Eulérienne, avec un maillage fixe, utilisée pour des mouvements plus complexes comme celles des fluides, par contre elle n'est pas appropriée dans le cas des frontières mobiles.

La méthode ALE utilise les avantages des deux méthodes en permettant le mouvement des frontières sans que le maillage suive obligatoirement le mouvement du matériau.

La déformation de la membrane suit la loi de déformation non linéaire pour des déformations importantes décrite dans la section 4.4 et le mouvement de l'eau est décrit par les équations de Navier-Stokes :

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} - \nabla \cdot \left[-P\vec{I} + \eta(\nabla \vec{v} + (\nabla \vec{v})^T) \right] + \rho((\vec{v} - \vec{v}_m) \cdot \nabla) \vec{v} &= 0 \\ -\nabla \cdot \vec{v} &= 0 \end{aligned} \quad (24)$$

Avec le $\vec{v} = (v_x, v_y)$ champ de vitesse, $\vec{v}_m = (v_{xm}, v_{ym})$ la vitesse du système de coordonnées, P la pression, $\vec{I}$ la matrice diagonale, η la viscosité dynamique et ρ la densité du fluide.

5.2.2 Implémentation et maillage

La géométrie 2D du démonstrateur modélisé est donnée sur la Figure 39a.

- Actionneur : $L=500\mu\text{m}$
- Epaisseur membrane : $e=30\mu\text{m}$
- Epaisseur mur réservoir : $t=150\mu\text{m}$
- Diamètre canalisation : $20\mu\text{m}$
- Longueur canalisation : 10mm

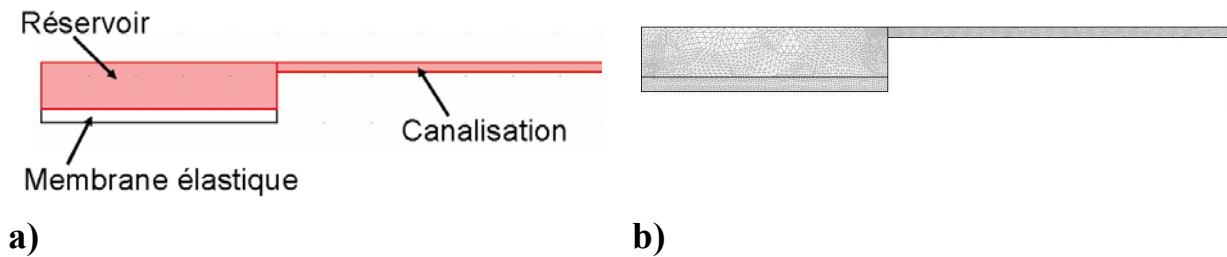


Figure 39. a) Géométrie du modèle d'interaction fluide-structure, b) maillage de la structure

Les résultats de l'optimisation du maillage sont montrés dans la Figure 40, le maillage optimal contient 5601 éléments de géométrie triangulaire (voir Figure 39b).

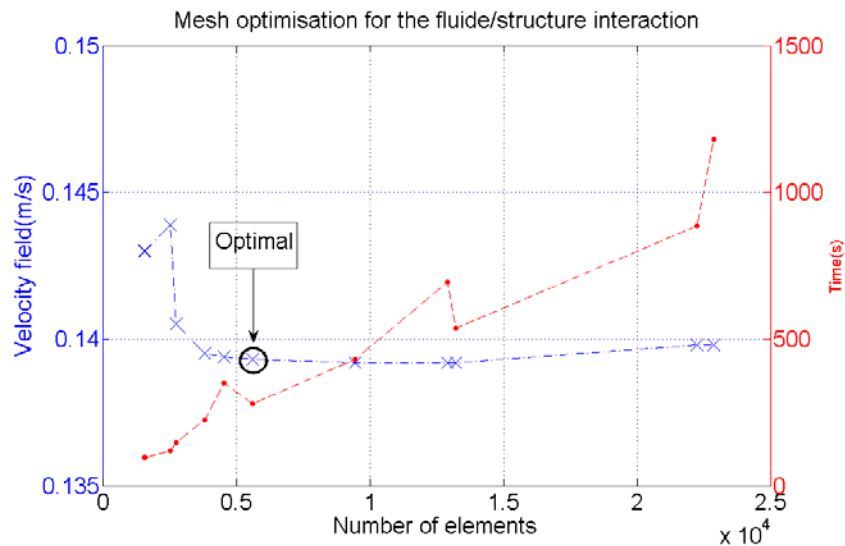


Figure 40. Procédure d'optimisation pour le modèle d'interaction fluide-structure pour l'actionneur de $L=500\mu\text{m}$

5.2.3 Conditions aux limites

Les conditions aux limites sont les suivantes (Figure 42) :

- La membrane est encastree aux bords.

- Un profil de surpression en fonction du temps correspondant à celui issu de la décomposition du matériau énergétique (section 5.1) est appliqué sous la membrane (Figure 41).
- La pression du fluide (P_f) sur la membrane est donnée par l'expression :

$$P_f = \vec{n} \cdot \left[-P\vec{I} + \eta(\nabla\vec{v} + (\nabla\vec{v})^T) \right] \quad (25)$$

Avec $\vec{n}$, le vecteur normal à la frontière. Cette expression tient compte des effets de la pression et des forces visqueuses.

- Une pression nulle est appliquée à la sortie de la canalisation.

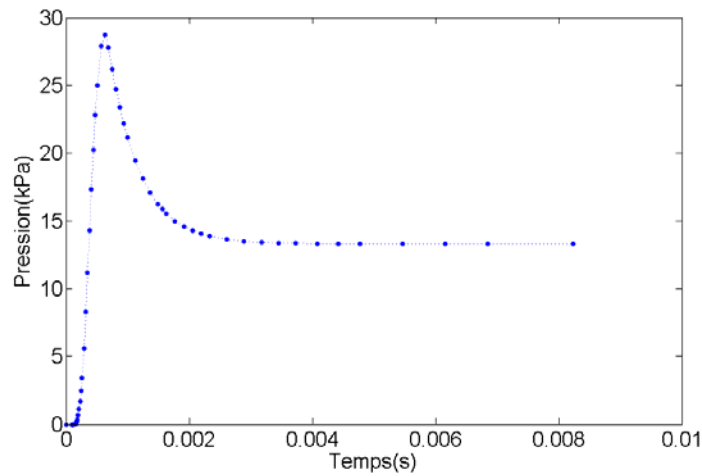


Figure 41. Profil de surpression appliqué sur la membrane de 500 μ m de côté.

- Une condition de vitesse nulle pour le fluide est appliquée sur toutes les surfaces sauf à l'interface fluide/membrane car à cet endroit le fluide et la membrane ont la même vitesse.

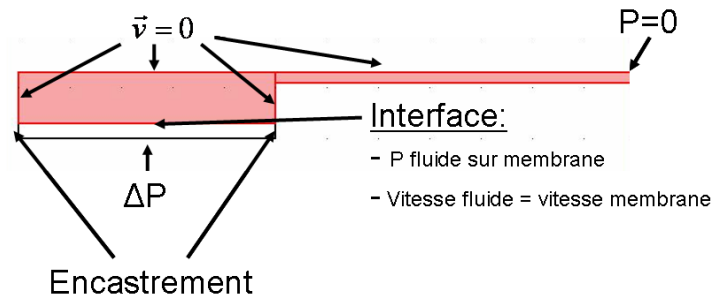


Figure 42. Conditions aux limites pour le modèle d'interaction fluide-structure

5.2.4 Résultats

La Figure 43 donne le volume d'eau éjecté en fonction du volume de matériau énergétique déposé sur la plate-forme chauffante pour les deux actionneurs. Ces figures montrent que

l'actionneur de surface $500\mu\text{m}\times 500\mu\text{m}$ est capable de dispenser de faibles quantités de fluides, entre 7 et 15nL avec des volumes de matériau énergétique compris entre $2,75\times 10^{-7}\text{cm}^3$ (285ng) et $1,08\times 10^{-6}\text{cm}^3$ (1140ng) de matériau énergétique. L'actionneur de surface $1\text{mm}\times 1\text{mm}$ est capable de dispenser des volumes d'eau compris de 70 et 100nL avec des volumes de matériau de $2,75\times 10^{-7}\text{cm}^3$ (285ng) ou de $6,09\times 10^{-7}\text{cm}^3$ (570ng).

Ainsi, pour vider 10nl (fixé par le cahier de charges de la section 2), il faut déposer $7,85\times 10^{-7}\text{cm}^3$ (855ng) de matériau énergétique sur l'actionneur de $L=500\mu\text{m}$, et l'actionner avec une puissance de 70mW. Pour vider 100nl avec l'actionneur de $L=1\text{mm}$, il faut $6,09\times 10^{-7}\text{cm}^3$ (570ng) de matériau et une puissance électrique de 79mW.

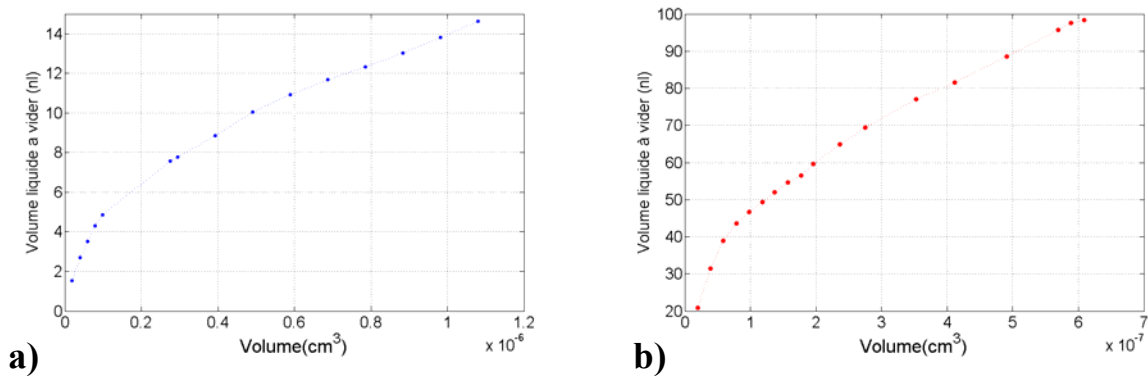


Figure 43. Etude du Volume d'eau en fonction de la quantité de matériau déposé sur la plate-forme chauffante a) actionneur avec surface de $500\mu\text{m}\times 500\mu\text{m}$. Puissance électrique = 70mW b) actionneur avec surface de $1\text{mm}\times 1\text{mm}$. Puissance électrique = 79mW.

Considérons maintenant l'actionneur avec $L=500\mu\text{m}$, contenant $2,75\times 10^{-7}\text{cm}^3$ (285ng) de matériau énergétique et regardons la vitesse de l'eau dans la canalisation.

Le comportement de l'eau est de type laminaire comme le montre la Figure 44 à l'intérieur de la canalisation (nombre de Reynolds de 0,7 maximum).

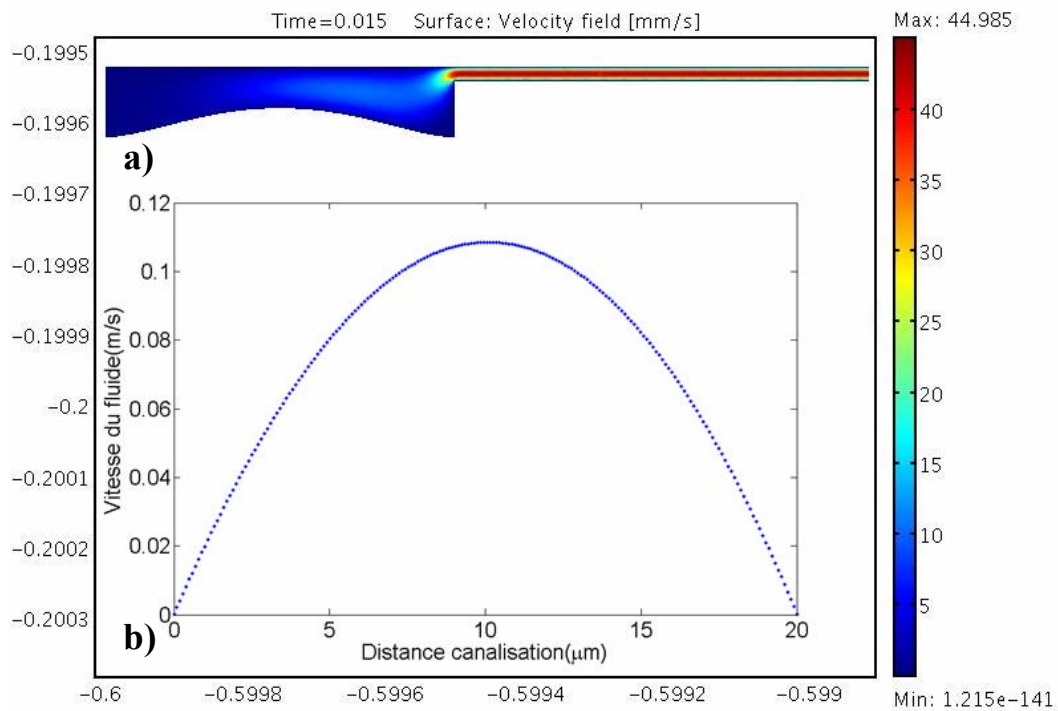


Figure 44. a) Profil de vitesse dans la canalisation. b) Profil de vitesse caractéristique laminaire à l'intérieur de la canalisation

Nous pouvons observer plusieurs phénomènes à partir du modèle :

1. d'abord le pic de surpression dû à la génération brutale de pression par la décomposition du matériau énergétique est très rapide et n'affecte pas la membrane élastique qui suit une dynamique plus lente comme il est montré à la Figure 45.

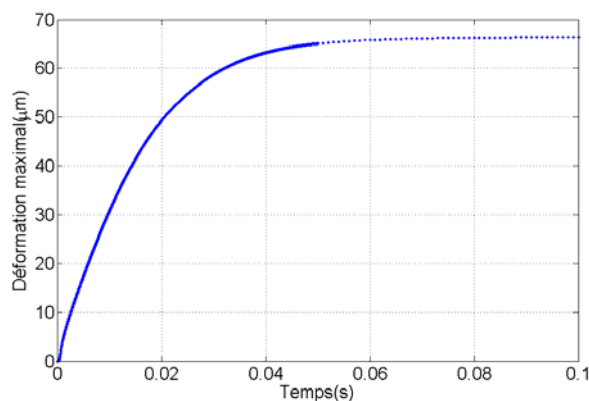


Figure 45. Dynamique de la déformation maximale de la membrane élastique

2. Le débit moyen obtenu par intégration de la vitesse sur la section de la canalisation (Figure 46) permet de calculer que le volume de 10nl est vidangé en 70ms, soit : 7 fois moins du temps, que celui prévu par un débit constant à partir du calcul de Poiseuille.

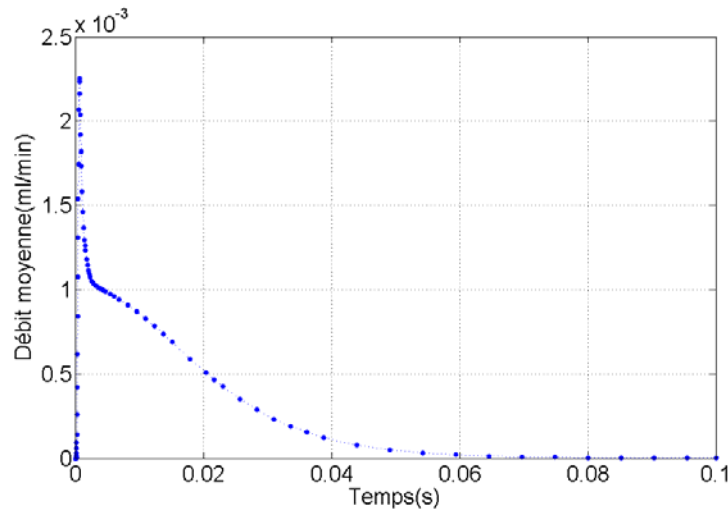


Figure 46. Débit moyenne à l'intérieur de la canalisation

Le même calcul est réalisé pour l'actionneur de $L=1000\mu\text{m}$, dans ce cas la dynamique est beaucoup plus lente et le volume de 100nl est vidangé en 1s, 5 fois moins que prévu par le calcul de Poiseuille.

6 Dimensionnement du démonstrateur

Pour respecter les contraintes de faible encombrement souhaité dans le cahier de charges de l'application, nous avons choisi de réaliser des actionneurs pyrotechniques extrêmement petits. 2 dimensions ont été retenues pour le projet : (voir Figure 47)

- Actionneur 1 : $L=0,5\text{mm}$, $t=100\mu\text{m}$, $e=30\mu\text{m}$
- Actionneur 2 : $L=1\text{mm}$, $t=100\mu\text{m}$, $e=30\mu\text{m}$

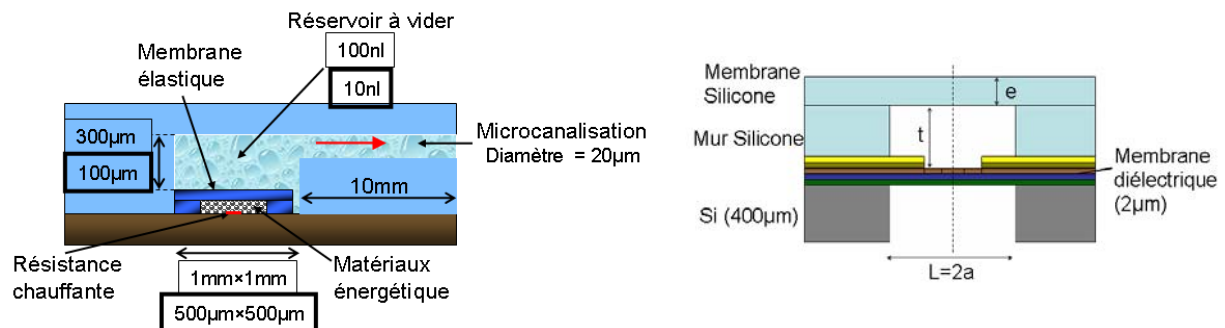


Figure 47. Schéma en coupe du démonstrateur et de l'actionneur PYRACT

Pour chacun de ces actionneurs, nous avons par modélisation aux éléments finis, évalué les performances de l'actionnement (ΔP , ω_{max}) en fonction de la puissance électrique appliquée et en fonction de la quantité de matériau énergétique intégré.

Ainsi, pour vider 10nl (réservoir de $100\mu\text{m}\times 0.5\text{mm}\times 0.5\text{mm}$) dans une canalisation de $20\mu\text{m}\times 20\mu\text{m}$, il faudra appliquer 70mW sur l'actionneur avec $L=0,5\text{mm}$ et contenant $7,85\times 10^{-7}\text{cm}^3$ (855ng) de matériau énergétique ($3\times 285\text{ng}$).

Ou bien pour vider 100nl (réservoir de $300\mu\text{m}\times 1\text{mm}\times 1\text{mm}$), il faudra appliquer 79mW sur l'actionneur avec $L=1\text{mm}$ et contenant $6,09\times 10^{-7}\text{cm}^3$ (570ng) de matériau énergétique ($2\times 285\text{ng}$). D'autre part, nous avons proposé un modèle fluide 2D du système permettant de prédire, en fonction du ΔP et ω_{max} générés par l'actionneur PYRACT, la mise en vitesse de l'eau contenu dans la microcanalisation ayant $20\mu\text{m}$ de diamètre.

Ce deuxième modèle permet de prédire que : pour l'actionneur de $L= 0,5\text{mm}$, contenant $7,85\times 10^{-7}\text{cm}^3$ (855ng) matériau énergétique et sous 70mW, permet d'éjecter un volume de 10nl en 70ms. Le deuxième actionneur de $L= 1\text{mm}$, contenant $6,09\times 10^{-7}\text{cm}^3$ (570ng) de matériau énergétique et sous 79mW, permet d'éjecter 100nl d'eau en 1s.

7 Conclusion

Nous avons réalisé, dans ce chapitre, deux étapes de modélisation multiphysique avec l'outil COMSOL Multiphysics: des modèles partiels « composants » pour chaque partie de l'actionneur PYRACT, puis des modèles globaux du fonctionnement du dispositif (prototypes virtuels).

D'abord, les **modèles de conception « composants »** ont été validés expérimentalement. Ils décrivent le comportement de chaque élément de l'actionneur PYRACT, notamment de :

- la plate-forme chauffante (Figure 48a),
- la membrane élastique (Figure 48b).

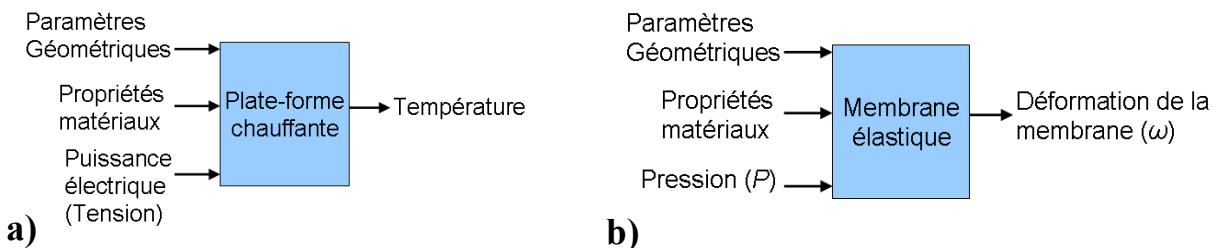


Figure 48. Diagrammes de modèles individuels des composants de l'actionneur PYRACT. a) plate-forme chauffante, b) membrane élastique.

Puis, les **modèles globaux de fonctionnement** ont été bâtis:

- Un modèle de l'actionneur PYRACT décrivant la décomposition du matériau énergétique, qui génère de l'actionnement par surpression (ΔP), qui déforme une

membrane élastique (ω). Ce modèle fait inter-opérer les modèles « composants » du dispositif (plate-forme chauffante, membrane élastique, matériau énergétique) (Figure 49a).

- Un modèle de l'éjecteur intégré complet qui prend en compte l'interaction fluide-structure, entre la membrane élastique de l'actionneur PYRACT et le fluide à déplacer à l'intérieur de la canalisation (Figure 49b).

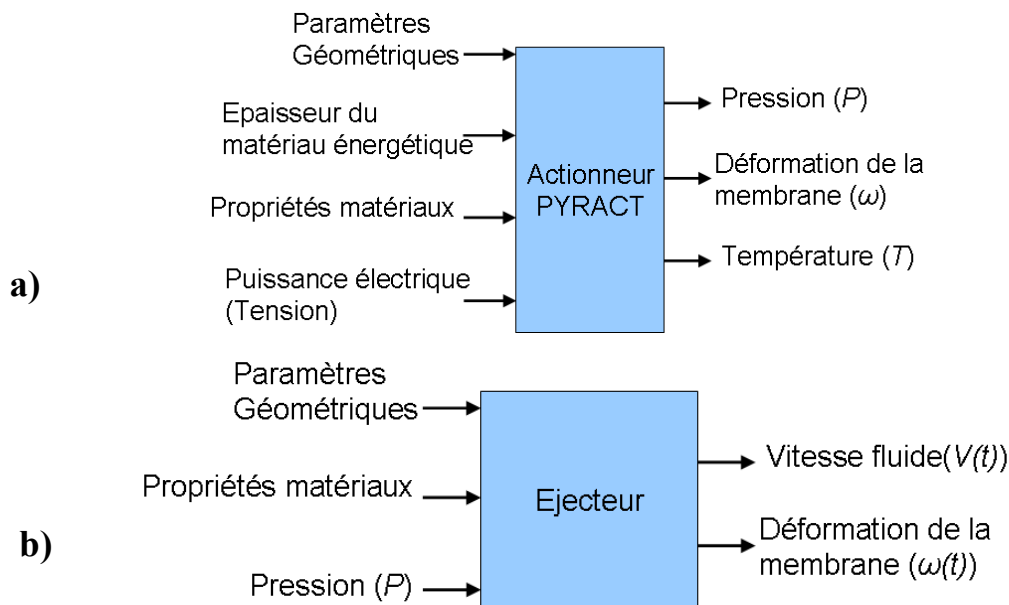


Figure 49. Diagrammes de modèles globaux de fonctionnement. a) l'actionneur PYRACT, b) démonstrateur (couplage fluide-structure)

Ces modèles sont conçus comme des éléments de base d'une **bibliothèque de modèles** qui pourra être enrichie par d'autres modèles de dispositifs destinés à être intégrés dans une base de modèle ouverte « microfluidique » (le code source (script) de notre contribution est inclus en annexe D).

CHAPITRE III

Fabrication du microactionneur PYRACT

1 Introduction

Dans le chapitre II, nous avons présenté le modèle complet de conception de l'actionneur PYRACT basé sur une approche multi-physique. Nous avons ainsi, à partir des contraintes applicatives visées, fixé les dimensions des prototypes démonstrateurs et choisi les matériaux et les technologies de fabrication. Le silicium et les technologies associées ont été retenus pour les éléments actifs, en particulier, la plate-forme chauffante. Pour le reste, des silicones et des procédés collectifs simples comme le laminage et la sérigraphie seront privilégiés pour atteindre les objectifs de faibles coûts requis pour les produits monocoups et jetables.

Nous allons, dans ce troisième chapitre, décrire le procédé de réalisation technologique de l'actionneur PYRACT. Après avoir rappelé les caractéristiques des démonstrateurs et donné les dimensions des échantillons fabriqués, nous détaillerons le procédé de fabrication de chaque partie : la plate-forme chauffante, le réservoir, la membrane. Pour chacun de ces éléments, nous détaillerons les étapes clés des procédés que nous avons mis au point durant la thèse. Nous en soulignerons les difficultés et évaluerons les caractéristiques de mise en œuvre en termes de pourcentage de réussite, de précision atteinte... Nous verrons, au cours de ce chapitre, qu'un des points clé de l'intégration de PYRACT se situe dans l'interfaçage des différents matériaux et dans la maîtrise de l'accrochage des couches des différents matériaux constitutifs.

Nous terminerons le chapitre par les perspectives d'amélioration du procédé, en gardant les objectifs de précision et de faible coût du procédé global.

L'intégration de notre actionneur PYRACT dans une canalisation, bien que très important dans l'aboutissement global de ce projet, n'a pas été réalisée dans le cadre de ma thèse qui privilégie la question de l'actionneur. Nous avons, en cours de mise au point au LAAS, un procédé déjà bien maîtrisé [1] permettant de réaliser des microcanalisations en SU8 et PDMS par laminage sur substrat actif. C'est ce procédé qui sera utilisé à la fin du projet, pour réaliser la micro canalisation au dessus de notre actionneur.

2 Rappel des dimensions et matriçage

Deux tailles d'actionneurs ont été dimensionnées dans le chapitre II (Figure 1).

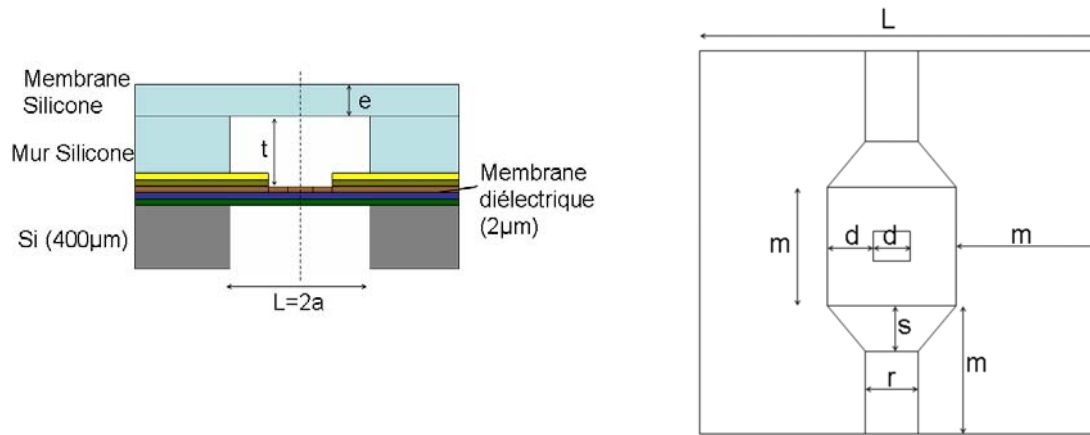


Figure 1. Rappel des dimensions de l'actionneur PYRACT a) Vue en coupe de l'actionneur b) Caractéristiques géométriques de la plate-forme chauffante

Les dimensions pour chacun d'entre eux sont récapitulées dans le Tableau 1.

Paramètre géométrique	Valeur (µm)	Valeur (µm)
	Actionneur 1	Actionneur 2
L	500	1000
m	166	330
r	92	80
d	55	110
s	72	144
a	250	500
e	30	30
t	100	100

Tableau 1. Paramètres géométriques des actionneurs PYRACT

Non critique

Compte tenu de la taille très réduite des actionneurs individuels, nous les fabriquerons en matrice pour en faciliter la manipulation. Ainsi, des matrices de 4×4 actionneurs ont été proposées comme le montre la Figure 2.

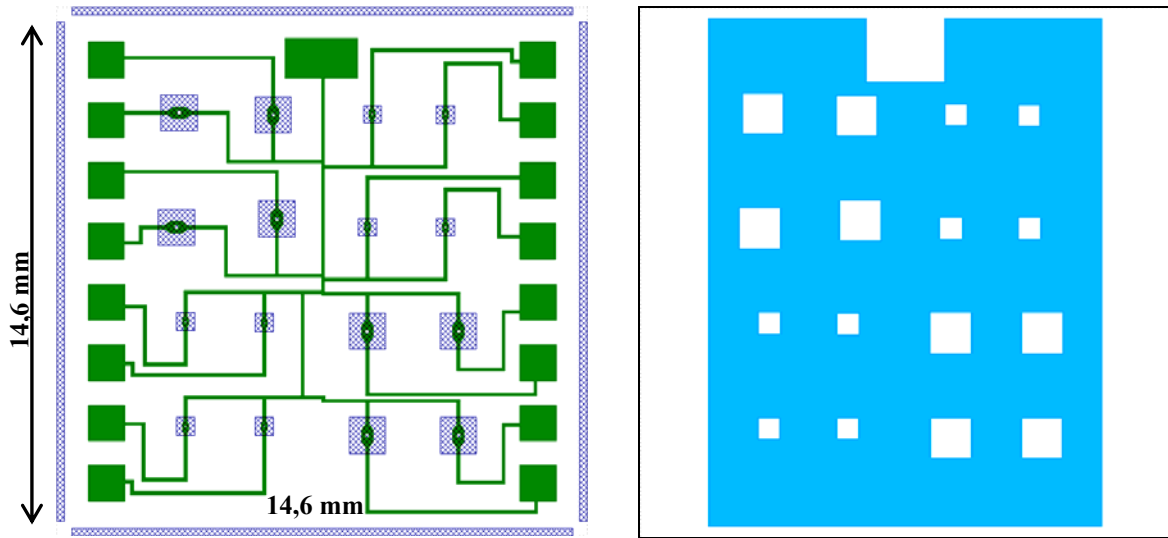


Figure 2. Image de masque d'une matrice d'actionneurs PYRACT. a) Plates-formes chauffantes. b) Murs de réservoirs

La surface totale d'une matrice est $14,6 \times 14,6 \text{ mm}^2$, l'espacement entre deux actionneurs sur une même matrice est de 1,85mm en moyenne.

3 Plate-forme chauffante

Comme il a été mentionné dans la section 4.3 du chapitre II, la plate-forme chauffante, est réalisée à base de Silicium. C'est un élément actif qui pourra à terme s'associer à des fonctions électroniques d'adressage et même une électronique.

3.1 Etapes technologiques de réalisation

Nous partons d'un substrat de Silicium de $400\mu\text{m}$ d'épaisseur, poli double face, d'orientation cristalline (100), dopé P avec une résistivité de $10\text{-}12\Omega\cdot\text{cm}$ (Figure 3a). Le Silicium est d'abord oxydé thermiquement sur $1,4\mu\text{m}$ (SiO_2) dans un four à une température de 1150°C . Ensuite, une couche de $0,6\mu\text{m}$ de Nitrure de Silicium (SiN_x) est déposée par LPCVD (Low Pressure Chemical Vapor Deposition) à une température de 705°C . Cette bicouche diélectrique permet d'obtenir une membrane diélectrique très fine ($2\mu\text{m}$), donc thermiquement isolante et en même temps robuste car la contrainte résiduelle résultante (σ_o) est inférieure à 100MPa [2]. On dépose ensuite par LPCVD à 605°C une couche de polysilicium de $0,5\mu\text{m}$ d'épaisseur (Figure 3b). Ces trois couches minces sont déposées sur les deux faces du substrat en silicium.

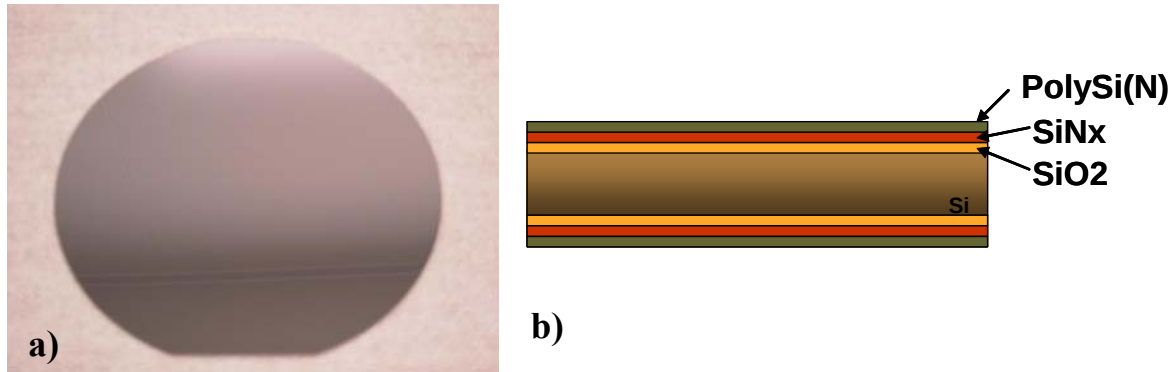


Figure 3. a) Photo d'un substrat de silicium de 4" b) Dépôt de couches fines sur Si.

Des atomes d'Arsenic sont implantés (dopant type N) dans le polysilicium sur la face avant du substrat en silicium avec les paramètres suivants : énergie = 50keV, dose = 2×10^{15} atomes/cm². Pour réparer les défauts du réseau cristallin créés lors de l'implantation et activer les dopants implantés, un recuit final est nécessaire qui sera fait ultérieurement dans le process [3].

Ensuite, par photolithographie puis gravure RIE (Reactive Ion Etching), la résistance est réalisée en utilisant le masque 1 définissant la géométrie de cette résistance (Annexe E). Après la gravure RIE, la résine (2,7μm d'AZ1529) est enlevée avec de l'acétone et si nécessaire, par un plasma d'oxygène (1000mL/min d'oxygène à 800W) pendant 15 minutes. (Figure 4)

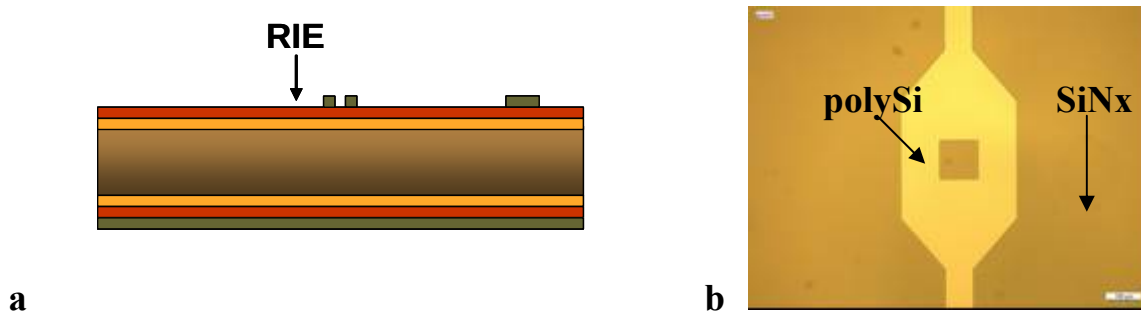


Figure 4. a) Gravure RIE pour élaboration de la résistance chauffante. b) Photo de la réalisation.

Une couche de SiO₂ de 0,8μm est ensuite déposée par PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition) à une température de 300°C. Après une photolithographie, suivant le masque 2 (Annexe E), l'oxyde est gravé chimiquement dans du HF pendant 5 minutes de sorte de ne garder l'oxyde que sur la résistance en polysilicium. La résine est ensuite enlevée comme dans l'étape précédente. (Figure 5).

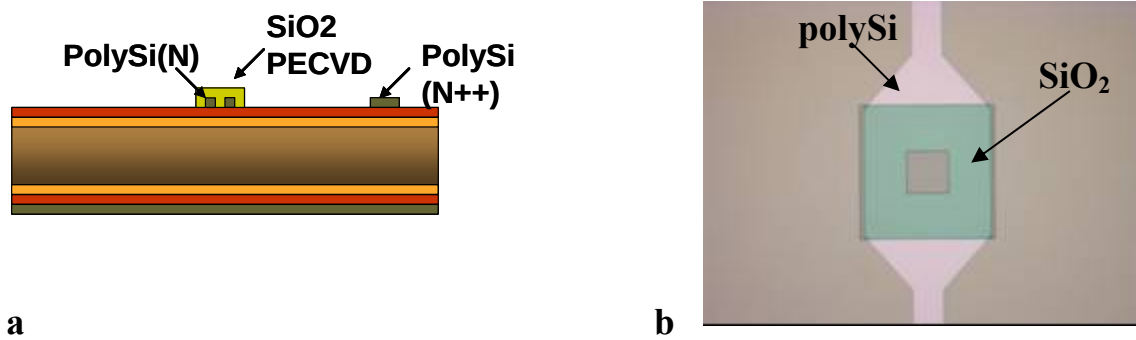


Figure 5. a) Dépôt d'oxyde de protection et diffusion de P. b) Photo de la réalisation.

L'étape suivante est la diffusion, à 950°C , d'atomes de phosphore pour doper fortement le polysilicium (N++), au niveau des pistes électriques et des contacts pour assurer un contact ohmique [3]. La partie centrale de la résistance faiblement dopée à l'Arsenic par implantation n'est pas affectée grâce à la protection de l'oxyde réalisé à l'étape précédente (Figure 5). L'étape de recuit thermique de redistribution des atomes d'Arsenic est incluse dans l'étape de diffusion. La résistivité attendue au niveau des pistes et des contacts est de $5.8 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ [4].

La mesure de la résistivité du polysilicium est de $8,8 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm} \pm 0,66 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ pour le polysilicium dopé au Phosphore par diffusion (50% d'erreur par rapport à la résistivité attendue) et de $2,02 \times 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm} \pm 0,09 \times 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$ pour le polysilicium implanté au Arsenic (5,6% d'erreur par rapport à la résistivité attendue). L'écart entre la résistivité attendue et mesurée du polysilicium dopé Phosphore s'explique par un problème lors du procédé de diffusion (manque d'Azote dans le four, gaz porteur de particules dopantes). Cet écart n'affecte pas le fonctionnement du dispositif car la valeur de la résistance chauffante est fixée par la région implantée en Arsénic dont les caractéristiques sont en bon accord avec les valeurs attendues.

L'étape suivante est la métallisation qui réalise les contacts électriques : $0,2\mu\text{m}$ de Chrome sont déposés par évaporation pour favoriser l'accrochage entre le Poly Silicium et les $0,8\mu\text{m}$ d'Or. Une photolithographie suivie d'un attaque chimique ($\text{KI}+\text{I}_2$, Microform Chromium Etchant) permet de ne garder le métal (Au/Cr) que sur les contacts définis par le masque 4 (Annexe E) (Figure 6). La résine est ensuite enlevée comme dans les étapes précédentes. Un recuit à 250°C pendant 20 minutes permet l'interdiffusion des métaux qui assure l'ohmicité des contacts des résistances.

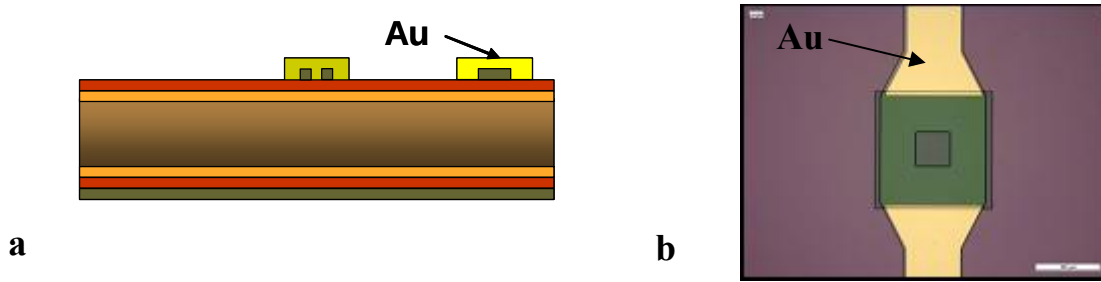


Figure 6. a) Métallisation. b) Photo de la réalisation

A ce stade, les étapes, en face avant, sont finalisées. On peut donc procéder au traitement de la face arrière du substrat : une première étape de RIE permet d'enlever les trois couches minces face arrière de polysilicium, SiNx et SiO₂ (Figure 7).

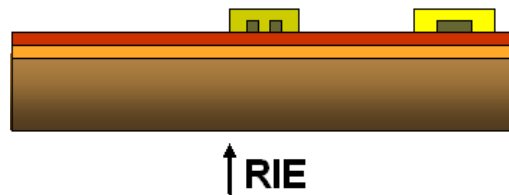


Figure 7. Gravure RIE face arrière

La dernière étape consiste à graver le substrat, face arrière, pour libérer la membrane en SiNx/SiO₂. Pour cela, on réalise une photolithographie avec une résine épaisse positive (AZ4562 de 10 μ m) suivant le masque 6 qui définit la membrane (Annexe E). Le Silicium est gravé par DRIE (Deep Reactive Ion Etching) (Voir Figure 8) au travers du masque de résine. La DRIE permet d'avoir des facteurs de formes de l'ordre de 18 : 540 μ m/30 μ m, profondeur de gravure ($H=540\mu$ m) et largeur de gravure latérale ($L=30\mu$ m) [4]. Il faut environ 2 heures 30 minutes pour graver 400 μ m de silicium.

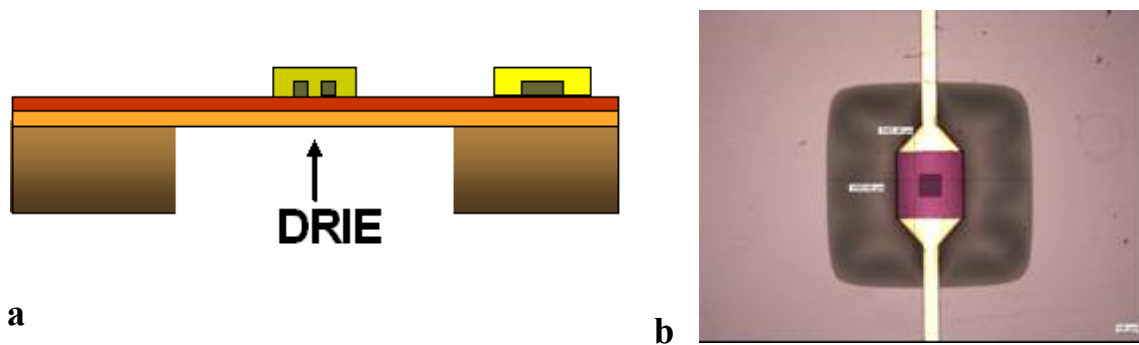


Figure 8. a) Gravure DRIE. b) Photo de la réalisation

3.2 Photos de réalisation

Le pourcentage de réussite dans la réalisation des plates-formes chauffantes est de 95% défini principalement par la tenue mécanique des membranes diélectriques après la gravure profonde (DRIE). La Figure 9 montre les photos de réalisation de ces dispositifs.

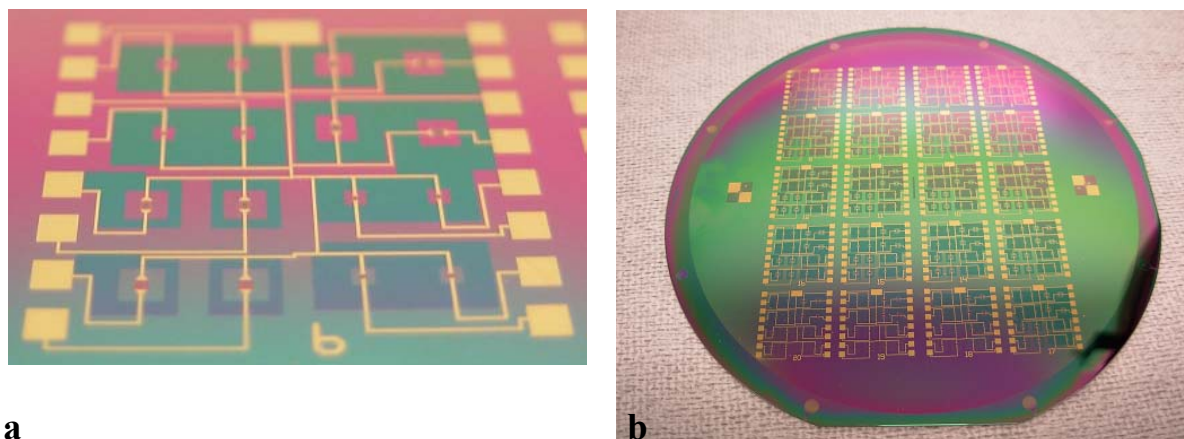


Figure 9. Photos de réalisation a) matrice de plates-formes chauffantes (4×4 éléments) b) substrat de Silicium comportant 20 matrices

4 Les murs du réservoir

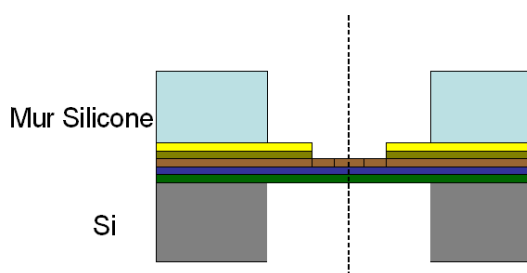


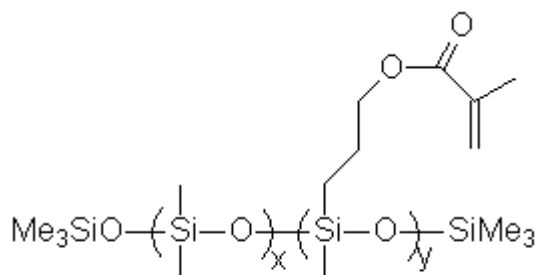
Figure 10. Schéma de la deuxième étape de réalisation, les murs du réservoir

Le mur, réalisé en silicone, sert de paroi au réservoir du matériau énergétique et de support pour la membrane élastique (Figure 10). Les dimensions choisies dans le chapitre II, sont rappelées dans le Tableau 1 et le masque définissant les réservoirs est montré sur la Figure 2b.

Une exigence importante est que les murs en silicone doivent avoir une bonne adhérence avec le substrat Si, SiO₂ ou SiN_x, de même qu'avec la membrane élastique du dessus, pour éviter tout décollement sous l'action de la surpression générée par la décomposition du matériau énergétique. Ainsi, un silicone commercial de chez Gelest a été choisi (voir section 3.1 du Chapitre II) pour faire les murs car il est bas coût et de même nature que celui de la membrane (PDMS) ce qui devrait faciliter l'étape d'accrochage.

De plus, ce silicone référencé RMS083 chez Gelest¹ (voir Figure 11) a une viscosité comprise entre 2000 à 3000 cSt (centistokes) ce qui est suffisant pour réaliser des épaisseurs voisines de 100µm. Par contre ce polymère n'est pas photosensible aux rayons UV. Nous devons donc ajouter un agent de réticulation.

¹ www.gelest.com



RMS 083

Figure 11. Formule chimique du matériau polymère RMS083 de chez Gelest

Pour la réalisation des murs du réservoir deux points durs ont été identifiés qui ont fait l'objet d'une mise au point spécifique, en étroite collaboration avec nos collègues de l'IMRCP:

1. le traitement des surfaces pour assurer l'adhérence des murs du réservoir avec le substrat support,
2. le dépôt et la structuration du silicone pour faire les murs.

4.1 Le traitement de surface pour réaliser des liaisons covalentes

L'objectif d'adhérence entre les différents matériaux du dispositif est au cœur de nos préoccupations. Plusieurs solutions technologiques sont possibles qui ont été explorées par différents équipes, pour accrocher des matériaux polymères sur un support Si, SiO₂ ou verre:

- Duffy et al, de l'équipe de Whitesides à Harvard propose d'oxyder les surfaces par Plasma d'oxygène pour créer des groupes Silanol (Si-OH). Puis il crée par contact conforme des liaisons covalentes [5]. Plus récemment on trouve aussi dans la littérature, Bhagat et al, de l'Université de Cincinnati (Etats-Unis), qui utilisent le même principe pour créer des groupes Silanol en ajoutant un recuit pour améliorer l'adhérence [6].
- Lötters et al, de l'Université de Twente (Pays Bas), utilise un promoteur d'adhérence pour coller un polymère photo réticulable aux UV à un substrat SiO₂ [7].

4.1.1 Procédé de fonctionnalisation

Nous avons choisi, de réaliser des liaisons covalentes qui sont irréversibles entre le substrat et le silicone du mur.

Pour ce faire la surface du substrat est d'abord traitée chimiquement. C'est ce qu'on appelle fonctionnaliser la surface. Ce procédé, a pour but de créer des groupes silanol (Si-OH) en surface du substrat Si ou SiO₂. Ces groupes Si-OH réagissent ensuite avec un promoteur d'adhérence en le fixant sur la surface avec des liaisons covalentes. Ce promoteur d'adhérence, choisi pour avoir des terminaisons réactives avec le silicone RMS083, réagit directement avec le silicone en créant des liaisons covalentes.

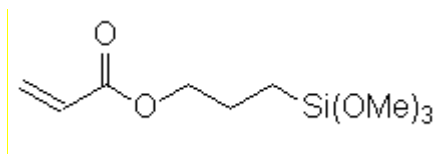


Figure 12. Terminaisons réactives de type acrylate.

Le promoteur d'adhérence acryloxypropyltriméthoxysilane de chez Gelest, avec des terminaisons de type acrylate (voir Figure 12) a été testé.

Le détail du procédé mis au point par nos collègues de l'IMRCP est le suivant :

Nous partons d'un substrat de silicium de 4" de 400µm d'épaisseur et nous faisons croître une couche de SiO₂ (1,4µm) par oxydation thermique sur laquelle nous déposons 0,6µm du SiNx par LPCVD.

Le substrat ainsi préparé est nettoyé à l'acétone, puis lavé dans un bain d'isopropanol sous ultrasons, pendant 10 minutes. Après séchage, il est mis dans un bain de dichlorométhane toujours sous ultrasons, pendant 10 minutes, et finalement séché à l'azote.

L'étape suivante est appelée l'hydroxylation car elle permet de créer des groupes hydroxyles (OH) sur la surface du substrat. Pour cette étape plusieurs méthodes ont été décrites dans la littérature : l'utilisation de bains de H₂O₂/H₂SO₄ (couramment appelé piranha) [8], des bains de KOH/HNO₃ [9] ou par simple exposition du substrat à traiter à un plasma d'oxygène (140W pendant 30 minutes). Ensuite, le substrat est rincé à l'eau puis séché sous vide. Nous avons évalué ces trois méthodes [10]. Le plasma à oxygène donnant des résultats beaucoup plus reproductibles a finalement été retenu. Les bains, comme par exemple l'eau oxygénée, perdent souvent leur concentration avec le temps, par contre le plasma garde toujours les mêmes propriétés.

L'étape terminale consiste à accrocher le promoteur d'adhérence sur le substrat par des liaisons covalentes. Le substrat est placé dans un mélange de toluène (50ml) et du promoteur d'adhérence (2.5ml) sous une atmosphère inerte (argon) (Figure 13) pour éviter des réactions avec l'air. La solution toluène/promoteur est chauffée à 120°C pendant 18 heures. Le substrat est ensuite plongé dans un bain de dichlorométhane CH₂Cl₂ (30ml) sous ultrasons pendant 5

minutes. Cette procédure est renouvelée deux fois avant que le substrat ne soit séché sous vide.



Figure 13. Photo du réacteur sous atmosphère inerte

Le procédé de fonctionnalisation est résumé dans la Figure 14, et la procédure simplifiée est reportée dans l'organigramme suivant :

Etape 1 : nettoyage du substrat (Acétone, isopropanol, dichlorométhane),

Etape 2 : hydroxylation (Plasma Oxygène, 140W, 30 minutes),

Etape 3 : accrochage du promoteur d'adhérence (bain de toluène plus promoteur sous Argon chauffé à 120°C, 18 heures).

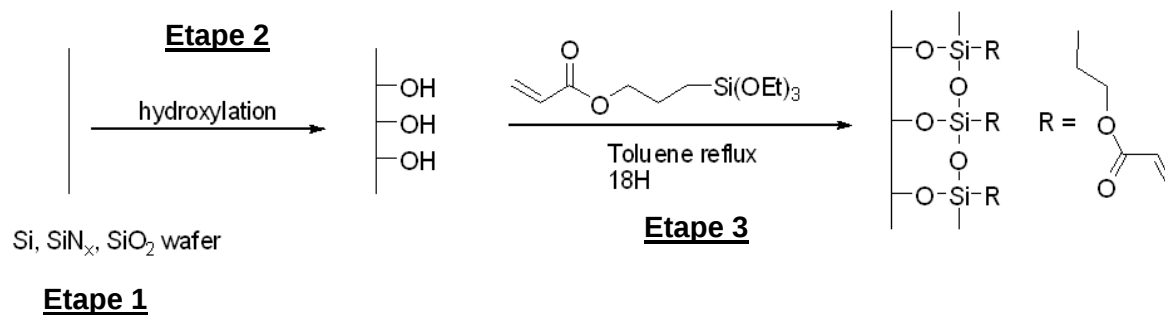


Figure 14. Résumé du procédé de fonctionnalisation de surface

Le procédé de fonctionnalisation décrit a été appliqué sur les différentes couches Si, SiN_x et SiO₂ afin de déterminer expérimentalement le matériau qui adhère le mieux avec le silicone RMS083 [10]. L'évaluation est basée sur la méthode de XPS (X-ray Photoelectron Spectroscopy), permettant d'analyser la composition chimique d'une surface. Des tests

réalisés par le l'équipe de M.-F. Guimon et D. Gonbeau au laboratoire IPREM à Pau ont permis d'établir que le promoteur d'adhérence acryloxypropyltriméthoxysilane a un meilleur accrochage sur les substrats SiO₂ et Si.

4.1.2 Photosensibilisation du silicone RMS083

Pour rendre le silicone photosensible aux rayons UV, nous avons ajouté au silicone un agent de réticulation de chez CIBA. Ce choix a été motivé par deux raisons principales :

- il est liquide donc se mélange facilement avec le silicone,
- il présente un pic d'absorption aux UVs à 370nm ce qui rentre dans le spectre des machines de photolithographie microélectroniques (entre 365nm et 405nm) disponibles au LAAS.

Sa formule chimique est donnée sur la Figure 15. Le mélange mis au point contient 2% d'Irgacure dans le silicone RMS083.

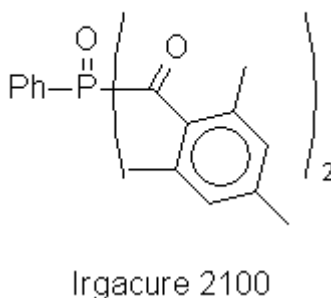


Figure 15. Formule chimique du photo initiateur Irgacure 2100 de chez CIBA

Un grand avantage de cette approche par rapport à celles proposées dans la littérature [7] [11] est la simplicité de sa mise en œuvre : le silicone mélangé avec l'agent de réticulation est utilisable immédiatement après le mélange et aucun recuit supplémentaire n'est nécessaire.

4.1.3 Mise au point du dépôt à la tournette

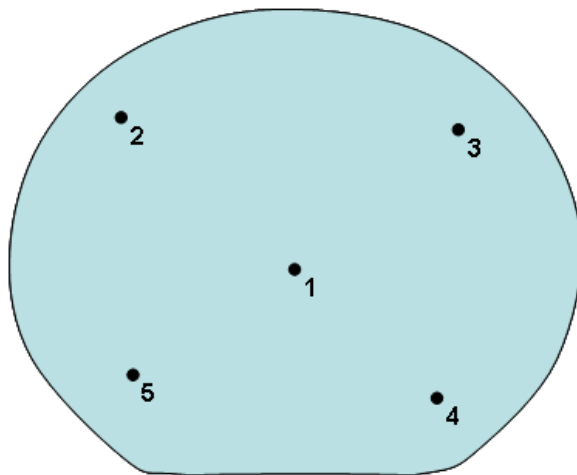
Le silicone RMS083 est mélangé au Irgacure 2100 puis déposé à la tournette sur un substrat 4". Les paramètres de dépôt (accélération, vitesse et temps) ont été mis au point expérimentalement pour obtenir une épaisseur proche de 100μm et uniforme sur toute la surface du substrat 4".

Le tableau ci-dessous donne les principaux résultats de cette mise au point expérimentale pour une réticulation pleine plaque.

Vitesse tournette (tour/min)	Accélération tournette (tour/min.sec)	Temps (sec)	Epaisseur (μm)
250	250	30	304
400	400	30	238
1000	1000	30	70
2000	2000	30	34

Tableau 2. Paramètres étudiés pour déposer le silicone RMS 083 à la tournette

L'uniformité du dépôt est caractérisée en mesurant l'épaisseur de silicone aux 4 coins (point mesure 2, 3, 4, 5) et en la comparant à l'épaisseur prise au centre du substrat.



Point de mesure	Epaisseur du silicone RMS 083 (μm)
1	68,43
2	68,84
3	69,43
4	68,83
5	70,58

Figure 16. Formule chimique du photo initiateur Irgacure 2100 de chez CIBA

Ainsi l'uniformité a été calculée de la façon suivante :

$$\text{Uniformité} = \frac{\text{Max}[(\text{mesure2} - \text{mesure1}), (\text{mesure3} - \text{mesure1}), (\text{mesure4} - \text{mesure1}), (\text{mesure5} - \text{mesure1})]}{\text{mesure1}} \quad (1)$$

En pratique, les paramètres de dépôt donnant une épaisseur de 70μm sont : volume ≈ 5ml, vitesse = 1000 tour/min, accélération = 1000tour/min.sec, temps = 30 secondes. L'uniformité de dépôt mesurée est de 12,6%.

4.1.4 Accrochage du silicone RMS083 sur substrat fonctionnalisé

Pour évaluer l'adhérence du silicone sur le substrat fonctionnalisé avec le promoteur d'adhérence (acryloxypropyltriméthoxysilane), le silicone est déposé à la tournette et réticulé pleine plaque aux UV. Puis les substrats Si et SiO₂ sont mis dans un bain d'hexane (10ml)

sous ultrasons pendant 10 minutes. Ce procédé enlève facilement le silicone s'il y a un défaut d'adhérence.

Les résultats obtenus sur le substrat Si ne sont pas satisfaisants car des défauts d'uniformité d'adhérence sont présents sur le dépôt de silicone (présence de trous de silicone).

Les tests réalisés sur SiO_2 ne présentent pas de défauts d'adhérence. Ce substrat est donc choisi pour le dispositif final.

4.2 Dépôt et structuration du silicone

Pour déposer et structurer le silicone, deux technologies ont été considérées : 1) la sérigraphie au travers d'un masque définissant les cavités et, 2) le dépôt à la tournette suivi d'une structuration par photolithographie.

La sérigraphie est une technologie collective d'impression basée sur l'utilisation d'une pâte avec une certaine viscosité à travers un masque pour reproduire des motifs et des images. Actuellement les masques de sérigraphie ont des maillages très fins en acier ou polyester [12]. Cette technologie a déjà été utilisée au LAAS pour remplir des petites cavités ($<1\text{mm}^2$) avec des matériaux énergétiques pâteux pour des applications spatiales [4], pour réaliser des actionneurs thermiques [13], des plots de pâtes conductrices et de planarisation de dispositifs pour la microfluidique [14] ...

Cette technologie est intéressante, simple, bas coût, facile d'accès et permet de déposer des épaisseurs importantes ($>50\mu\text{m}$) : la maille, la plus précise, nous permet une résolution spatiale de $40\mu\text{m}$ [12]. Des tests ont montré que le silicone ayant des propriétés thixotropiques avait tendance à couler après retrait du masque de sérigraphie et avant sa réticulation. Il faudrait donc prévoir des réservoirs (Figure 17) pour éviter que le silicone ne s'étale où on ne veut pas. Ces inconvénients nous ont dissuadé d'utiliser cette technique, et nous nous sommes tournés vers les procédés plus classiques, en salle blanche : tournette et photo structuration :

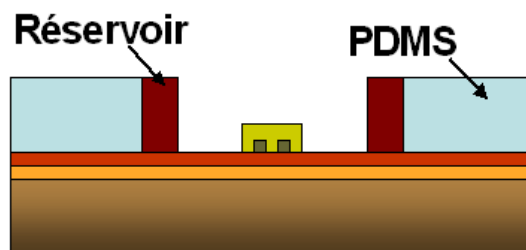


Figure 17. Réservoirs pour éviter le coulage du silicone avant sa réticulation

Le dépôt du silicone à la tournette nous permet de régler l'épaisseur de la couche très librement en fonction des paramètres de la tournette (vitesse, accélération, temps). Ainsi, si la viscosité est bien adaptée, des épaisseurs importantes ($>10\mu\text{m}$) peuvent être obtenues.

Trois points technologiques ont fait l'objet d'un travail attentif :

- traiter les surfaces pour permettre l'accrochage du silicone RMS083 sur le substrat de la plate-forme,
- rendre le silicone RMS083 photo réticulable, et compatible avec le spectre UV et avec la puissance des machines de photolithographie,
- régler les paramètres de dépôt pour obtenir 100 μm d'épaisseur à la tournette.

4.3 Procédé de réalisation du réservoir

La première étape est la fonctionnalisation, suivant le procédé décrit dans les paragraphes précédents (section 4.1), de la surface SiO_2 de la plate-forme chauffante sur laquelle sera réalisé le réservoir (Figure 18).

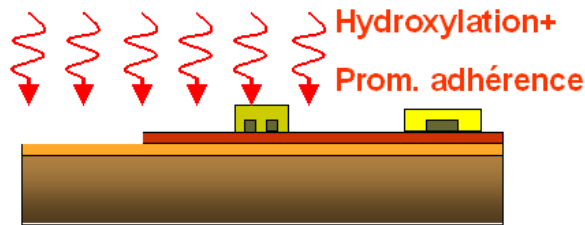


Figure 18. Fonctionnalisation de surface SiO_2

Ensuite, la préparation du silicone plus la photosensibilisation CIBA est déposée pleine plaque à la tournette. (Figure 19)

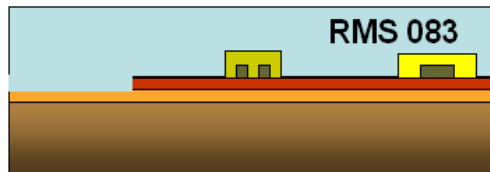


Figure 19. Dépôt du silicone photosensible à la tournette

Par photolithographie (15 minutes sous UV 365nm sous 20mW/cm²) en utilisant le masque 5 (voir Annexe E), les murs du réservoir sont réticulés puis révélés dans un bain d'hexane sous ultrasons 3 minutes. Les zones du silicone insolées ne se dissolvent pas. (Figure 20)

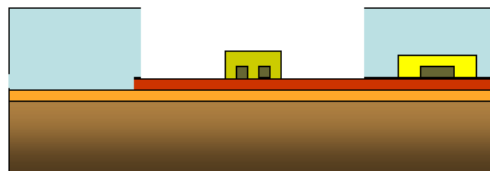
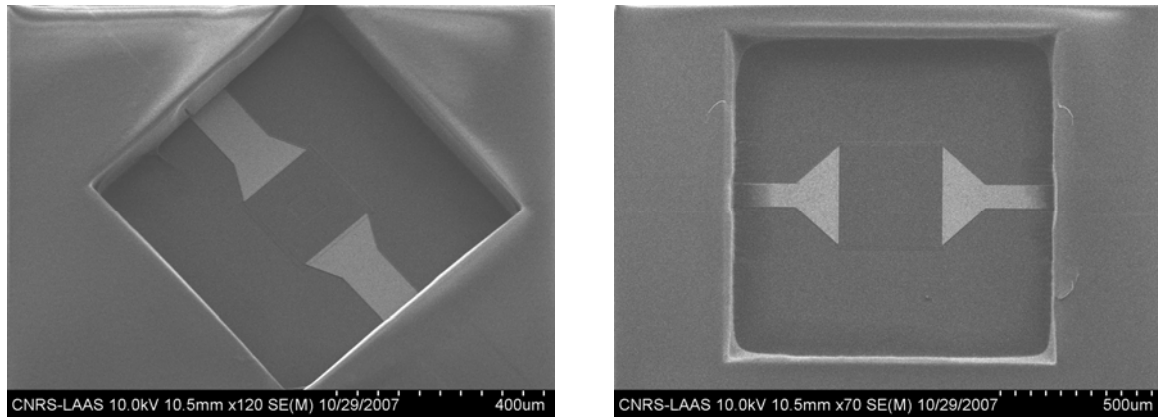


Figure 20. Dépôt du silicone photosensible à la tournette

Nous obtenons finalement des murs de 70 μm d'épaisseur et conformément aux masques. Ils délimitent des cavités de 500 μm ×500 μm et 1000 μm ×1000 μm comme l'illustre la Figure 21 faite par SEM (Scanning Electron Microscopy).



a)

b)

Figure 21. Images SEM de réalisation des structures en polymère type PDMS réticulable aux rayons UV
a) des réservoirs de 500μm d'épaisseur et 70μm en hauteur b) des réservoirs de 1000μm d'épaisseur et 70μm en hauteur

5 Dépôt du matériau énergétique

Le matériau énergétique a été synthétisé par le LCC [15]. Il a fait l'objet d'un dépôt de brevet avec la SNPE pour les applications airbag.

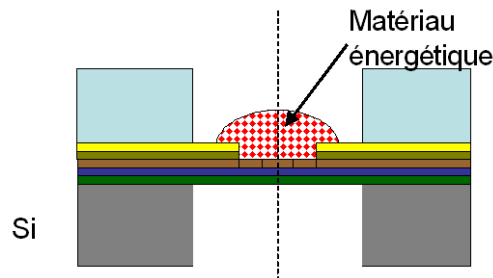


Figure 22. Dépôt du matériau énergétique sur la plate-forme chauffante

5.1 Synthèse

Un composé de type complexe de coordination est utilisé. Ces complexes sont caractérisés par des liaisons covalentes entre des ions métalliques qui se comportent comme un acide de Lewis (capable d'accepter deux électrons et faire une liaison covalente) et une base de Lewis autrement nommée « ligand » qui apporte des électrons pour réaliser cette liaison covalente. Dans ce type de complexes, on trouve les complexes de type Werner avec la formule générale $[Co(NH_3)_x](X)_y$ avec un cation métallique et un anion oxydant ou ligand (X) utilisés pour générer du gaz lors de sa décomposition thermique [15].

L'utilisation de ligand sans carbone, permet la génération de gaz non toxique. Ainsi, pour le projet, X sera du $[Mn(NO_3)_4]^{2-}$.

La synthèse du matériau énergétique se fait par voie aqueuse à l'air et est donc simple et peu coûteuse. Le détail de ce procédé de synthèse est pour l'instant confidentiel. Le matériau énergétique final obtenu ($[Mn(NO_3)_4]_3[Co(NH_3)_6]_2$) se présente sous forme de poudre. Cette poudre est soluble dans l'eau pour former un liquide de viscosité très proche de celle de l'eau.

5.2 Mise au point du dépôt du matériau énergétique sur la membrane diélectrique

Plusieurs techniques de dépôt ont été explorées. Deux sont disponibles au LAAS : la sérigraphie (décrite dans la section 3.2.1) et l'injection pneumatique par capillaire.

La sérigraphie est une option qui requiert des viscosités relativement importantes pour le matériau à déposer et donc peu adaptée à notre matériau qui est soit sous forme de poudre, soit très liquide.

Ayant à disposition un équipement permettant de déposer des gouttes au travers de capillaire sous l'application de faible surpression, nous avons ainsi travaillé avec cette solution. Il s'agit d'un procédé très facile à mettre en œuvre ; il suffit de diluer le matériau énergétique dans de l'eau pour faire une solution à 2,2% (limite de solubilité) avec 27.3mg de matériau énergétique pour 1.25ml d'eau.

Des capillaires en verre avec un diamètre interne de 0,86mm, un diamètre externe de 1.5mm (voir Figure 23a et Figure 23b) et une longueur de 90 mm de chez Narishige Co. sont étirés par chauffage pour obtenir des sections de gouttes entre 100µm et 500µm : environ la taille de la résistance chauffante (voir Figure 23a et Figure 23c). La solution de matériau énergétique entre dans le capillaire par capillarité.

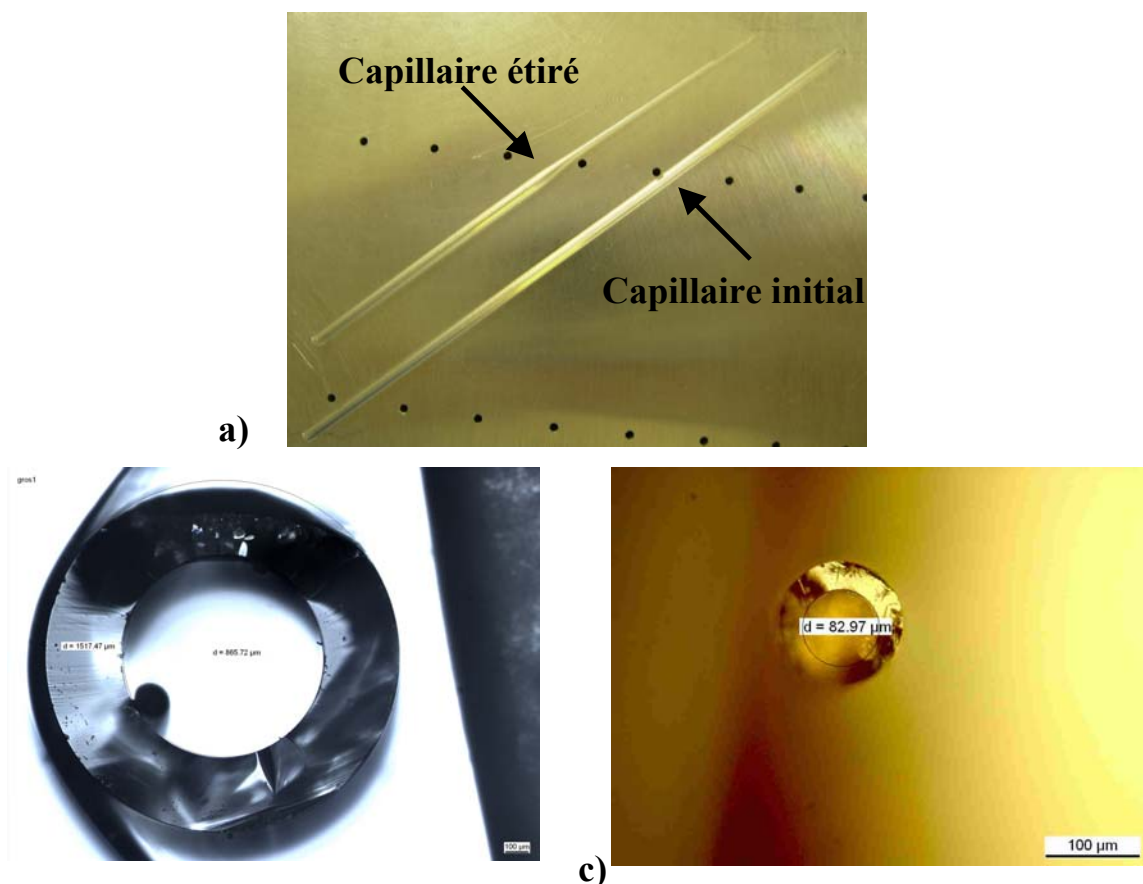


Figure 23. a) Image de la pipette utilisée pour le dépôt de la goutte avant étirement et après étirement, b) coupe du capillaire original (diamètre 860µm), c) coupe du capillaire après étirement (diamètre 83µm)

Pour l'injection des gouttes, nous utilisons une machine d'injection Narishige IM 300 qui nous permet d'appliquer de faibles jets d'azote dans les capillaires manuellement avec une pression contrôlée et régulée de 3 PSI (20,6kPa). Cet équipement est monté sur une machine de report de puces Tresky 3000 qui comporte un microscope permettant de positionner la goutte à 200µm près (voir Figure 24a). Le volume de la goutte déposée avec une surpression de 3 PSI et un capillaire de diamètre intérieur de 550µm est mesuré à $3,5 \times 10^{-13} \text{ m}^3$. Après le dépôt de la goutte, l'eau s'évapore et il reste le matériau énergétique en poudre (voir Figure 24b). La masse du matériau énergétique alors déposé est de 285ng calculée à partir de la concentration de la solution utilisée ($m = c \times V$).

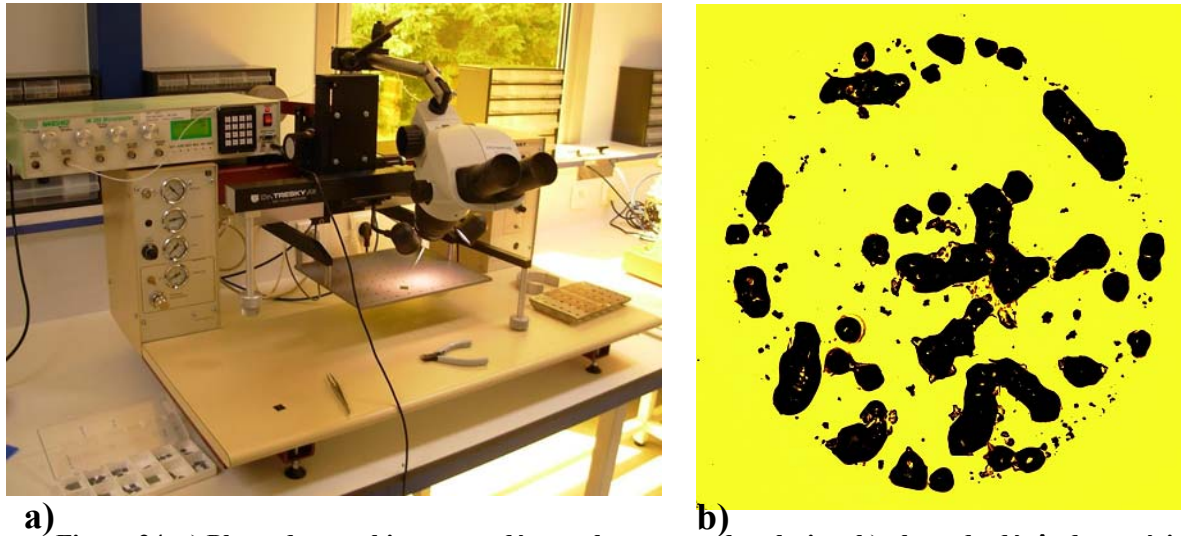


Figure 24. a) Photo des machines pour déposer les gouttes de solution, b) photo du dépôt de matériau énergétique après évaporation de l'eau

Lors de la mise au point du dépôt du matériau énergétique, deux problèmes ont été rencontrés :

1. le positionnement de la goutte et l'étalement de celle-ci lors du dépôt,
2. la reproductibilité des dépôts.

1. Le positionnement de la goutte et l'étalement de celle-ci lors du dépôt

Les premiers tests de dépôt ont été réalisés sur des substrats pleines plaques, recouverts de SiO_2 ou SiNx .

Pour concentrer au maximum la goutte au centre de la résistance, il faut une surface hydrophobe partout ou hydrophile sur la résistance et hydrophobe à côté.

Or, lors des premiers tests de dépôt des gouttes, il a été noté l'étalement de ces dernières (voir Figure 25a).

D'autre part, le positionnement de la goutte étant réalisé manuellement au travers du microscope, certains dépôts sur les petites résistances ne recouvraient pas la résistance totalement (voir Figure 25b).

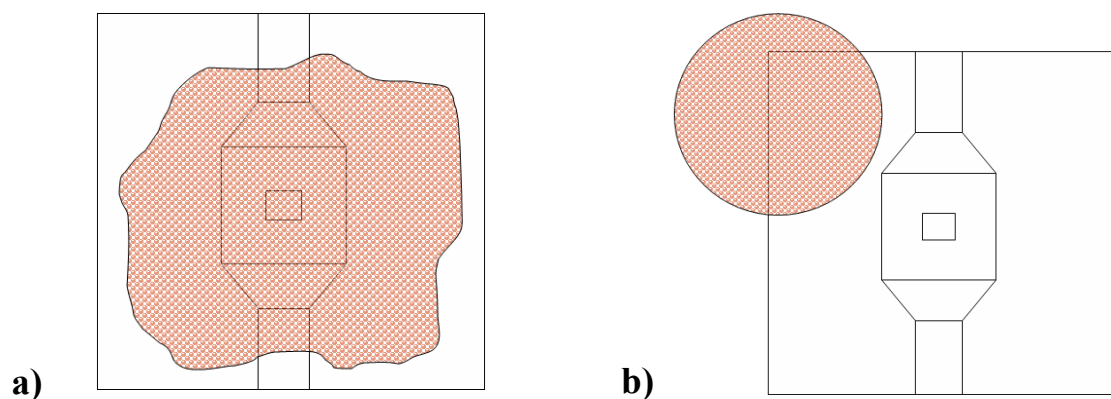


Figure 25. Problèmes rencontrés lors du dépôt du matériau énergétique : a) étalement de la goutte, b) mauvaise centrage de la goutte

Nous avons donc choisi d'utiliser les propriétés hydrophobes/hydrophiles des différentes surfaces pour centrer la goutte sur la résistance.

Le SiNx (couche membrane) et le SiO₂ (couche recouvrant le polysilicium de la résistance) sont hydrophiles. En effet, l'angle de contact mesuré avec l'appareil Digidrop Modèle Fast/60 de chez GBX donne 52° pour le SiO₂ et 43° pour le SiNx.

Après traitement de surface pour assurer l'accrochage du silicone sur les murs, ces deux couches SiO₂ et SiNx deviennent hydrophobes. Les angles de contact mesurés sont alors de 88° pour le SiO₂ et 79° pour le SiNx.

Ainsi lors du dépôt de la goutte, la goutte ne s'étale plus et reste concentrée sur le point de dépôt. (cf photo de la Figure 26)

2. La reproductibilité des dépôts.

Pour évaluer la reproductibilité des dépôts du matériau énergétique, nous avons réalisé une série des 10 dépôts d'une goutte et trois gouttes avec le même capillaire de diamètre 83μm. La mesure du diamètre de la goutte déposée est réalisée après évaporation de l'eau. Les résultats sont montrés dans le Tableau 3 :

Diamètre capillaire (μm)	No. de gouttes déposées	Diamètre de goutte mesuré (μm) (Sur 10 échantillons)
83	1	125±8
	3	155±13

Tableau 3. Etude de reproductibilité des dépôts

L'étude montre qu'en gardant le même capillaire, le volume de la goutte déposée est assez reproductible : 7% d'erreur maximum sur le diamètre de la goutte.

La Figure 26 donne des photos de dépôt de matériau énergétique sur l'initiateur.

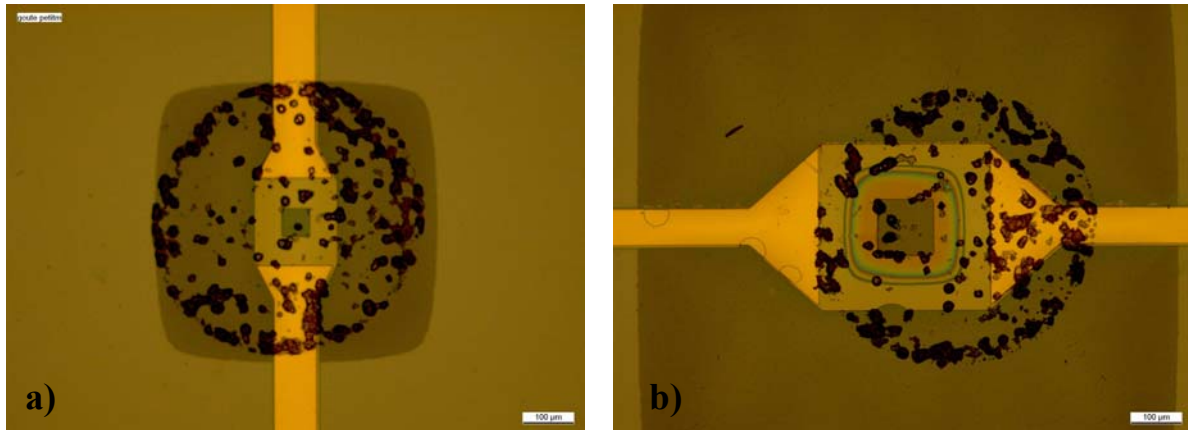


Figure 26. Dépôt de gouttes sur les plates-formes chauffantes a) 500µm×500µm b) 1mm×1mm

6 Membrane élastique

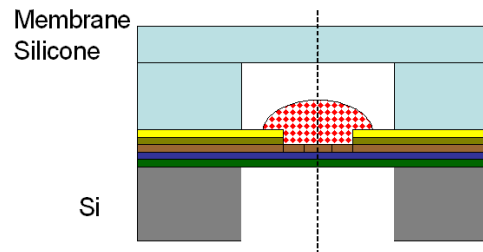


Figure 27. Report de la membrane élastique sur l'actionneur PYRACT

Deux matériaux silicone ont été choisis pour réaliser la membrane :

1. Le Sylgard 184 de chez Dow Corning. Il est très utilisé dans les applications microfluidiques et aussi pour l'encapsulation de matériel électronique due à ses bonnes propriétés diélectriques. Il est en plus transparent. Il est commercialisé par kit composé de 2 parties : le primaire PDMS et l'agent de réticulation. Ces deux composants sont mélangés pendant 3 minutes avec une proportion en masse de 10 pour 1. Le mélange est ensuite dégazé pendant 30 minutes. La réticulation se fait à 65°C pendant 4 heures.
2. Le deuxième produit est la Zipcone TR de chez Gelest ayant des propriétés intéressantes par rapport au Sylgard :
 - Bonne tenue en température : supérieur à 300°C mesurée par TGA (Thermogravimetric Analysis - voir chapitre IV) alors que le Sylgard perd ses caractéristiques élastiques dès 200°C [16].
 - Une bonne conductivité thermique, ce qui peut aider à évacuer la chaleur dégagée lors de la réaction, rapidement et éviter l'éventuel échauffement du liquide à éjecter. Par contre il n'est pas transparent et présente une couleur blanche.

Nous travaillerons avec les deux produits.

6.1 Choix du laminage

Compte tenu du fait qu'à cette étape du procédé d'intégration, les plates-formes chauffantes ont la membrane fine libérée et que le dépôt du matériau énergétique a été réalisé, nous avons choisi de réaliser la membrane séparément du dispositif et de la rapporter sur les murs du réservoir par laminage.

Pour réaliser la membrane, nous utilisons une méthode de laminage développée au LAAS au cours d'une thèse précédente [1] pour empiler des structures souples en SU8 sur substrat flexible en polyester (PET). Le fait d'avoir un substrat flexible permet d'avoir un bon contact entre la membrane reportée et la structure support. A ce stade du procédé, l'adhérence entre la membrane et les murs du réservoir est encore un point important à travailler comme nous allons le voir.

Pour cela, les étapes suivies sont les suivantes :

1. Réalisation de la membrane élastique sur un substrat souple (PET) (Figure 28),



Figure 28. Dépôt du polymère à la tournette sur substrat PET

2. Réticulation en température de la membrane et traitement des surfaces (Figure 29),

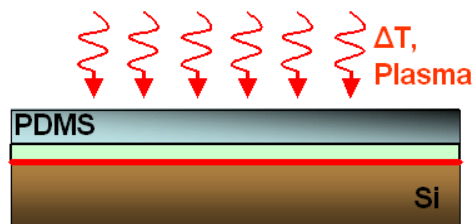


Figure 29. Réticulation en température et traitement de surfaces

3. Report de la membrane sur les murs du réservoir (Figure 30),

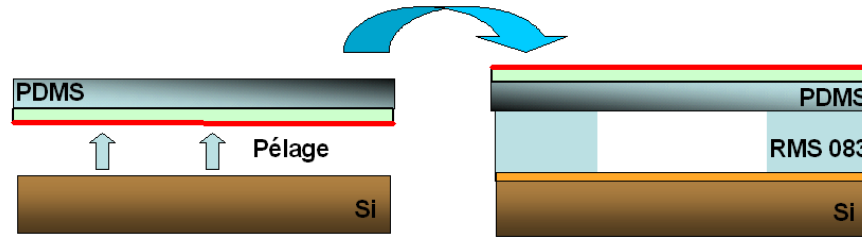


Figure 30. Retrait de membrane silicone/PET et report sur les murs du réservoir

4. Application d'une pression par laminage (Figure 31),

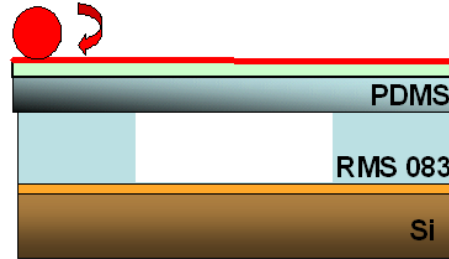


Figure 31. Laminage de la membrane élastique

5. Recuit final et retrait du film PET (Figure 32).

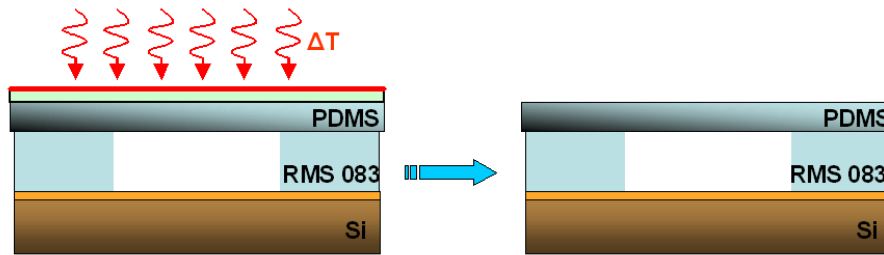


Figure 32. Recuit final et retrait du PET

6.1.1 Réalisation de la membrane élastique sur un substrat souple

Le silicone de la membrane est déposé à la tournette sur un substrat de Silicium/PET. La double couche Silicium/PET est obtenue par laminage d'un PET sur le Silicium avec le lamineur Shipley 350HR (Figure 33) qui contient des rouleaux réglables en vitesse de rotation et température. Nous travaillons à température ambiante et à la vitesse minimale de rotation ($<0,5\text{m/min}$) avec une pression des rouleaux de 2,5Bar (250kPa).



Figure 33. Photo du Lamineur

Ainsi, d'abord un film adhésif double face (Adhesives Research ARClear 8932 de $50\mu\text{m}$) est laminé sur Silicium ($525\mu\text{m}$) (Figure 34).

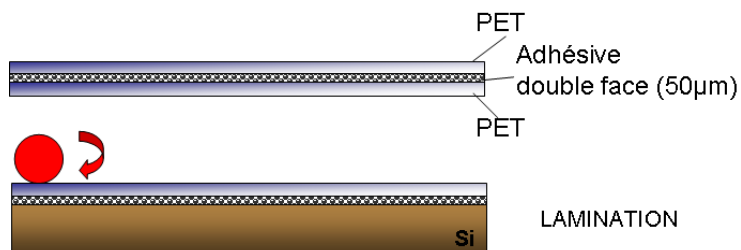


Figure 34. Laminage du film adhésif et couche de protection en PET

La deuxième étape est le retrait par pelage des couches de protection en PET en enlevant les couches de protection en PET (Figure 35).



Figure 35. Retrait de couche de protection en PET

Enfin, sur le film adhésif est laminé un film (ARclear DEV-8796) composé de trois couches: un film PET de protection avec une face intérieure traitée anti-adhérente ($50\mu\text{m}$), un film adhésif ($25\mu\text{m}$), et un film PET ($70\mu\text{m}$) (Figure 36).

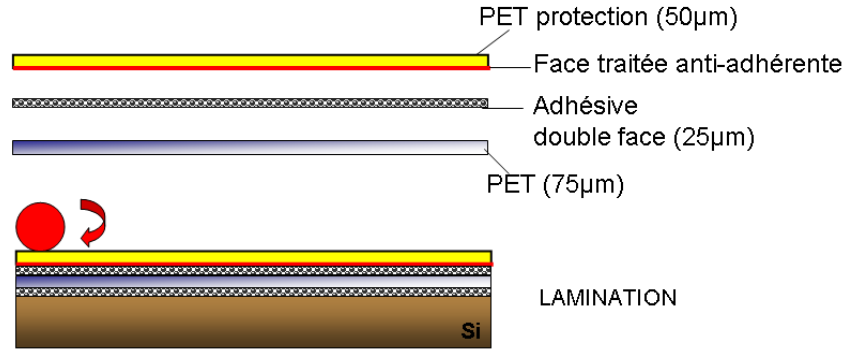


Figure 36. Laminage du film ARclear DEV-8796

Quand le substrat Si/PET est prêt, le silicone de la membrane est déposée à la tournette (Sylgard 184 ou Zipcone TR) (Figure 37).

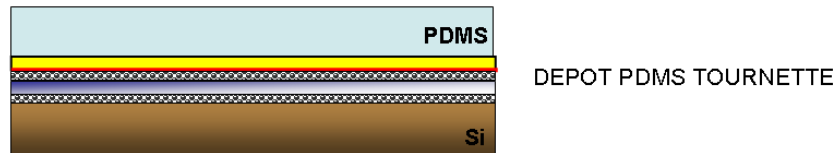


Figure 37. Dépôt du silicone sur le substrat Si/PET

Une étude expérimentale a permis de déterminer les épaisseurs déposées en fonction des paramètres de dépôt (vitesse, accélération, temps) (voir Tableau 4).

Vitesse (tour/min)	Accélération (tour/min/sec)	Temps (sec.)	Epaisseur mesurée (µm)
5000	3000	60	10.7 ± 0.3
4000	3000	30	21.5 ± 1
3000	3000	30	30.7 ± 2.2
2000	3000	30	43.6 ± 1.7

Tableau 4. Etude de l'épaisseur de la couche Sylgard 184 en fonction des paramètres de la tournette

Un recuit de 4 heures à 65°C permet la réticulation du silicone.

La dernière étape pour l'élaboration de la membrane est le pelage des films PET et silicone. (Figure 38). Ainsi le film mince de silicone (Sylgard 184 ou Zipcone TR) est détaché.



Figure 38. Retrait de la membrane en silicone et film PET après recuit

6.1.2 Report de la membrane sur les murs du réservoir par laminage

La membrane est reportée sur le réservoir par laminage (voir Figure 30 et 33). Pour assurer l'adhérence entre le silicone des murs du réservoir et celui de la membrane, deux méthodes ont été testées :

- les silicones (membrane et murs du réservoir) sont traités sous plasma oxygène (200W pendant 10 seg) pour créer des terminaisons Si-OH. Puis les surfaces sont mises en contact conforme par laminage. Les terminaisons Si-OH présentes sur les deux surfaces créent des liaisons covalentes.
- Une réticulation partielle (65°C, 4 min) du silicone de la membrane laisse des terminaisons chimiques Si-vinyl avant le report sur le mur (traité par plasma oxygène à 200W pendant 10 seg). Ceci laisse des terminaisons chimiques Si-OH en surface encore disponibles. Après le report sur le mur, un recuit est fait (100°C pendant 1h) pour activer les liaisons entre les terminaisons chimiques des deux silicones (mur et membrane).

L'adhérence des deux silicones (membrane/réservoir) a été évaluée par pelage et puis caractérisées par bulge test (voir Chapitre IV).

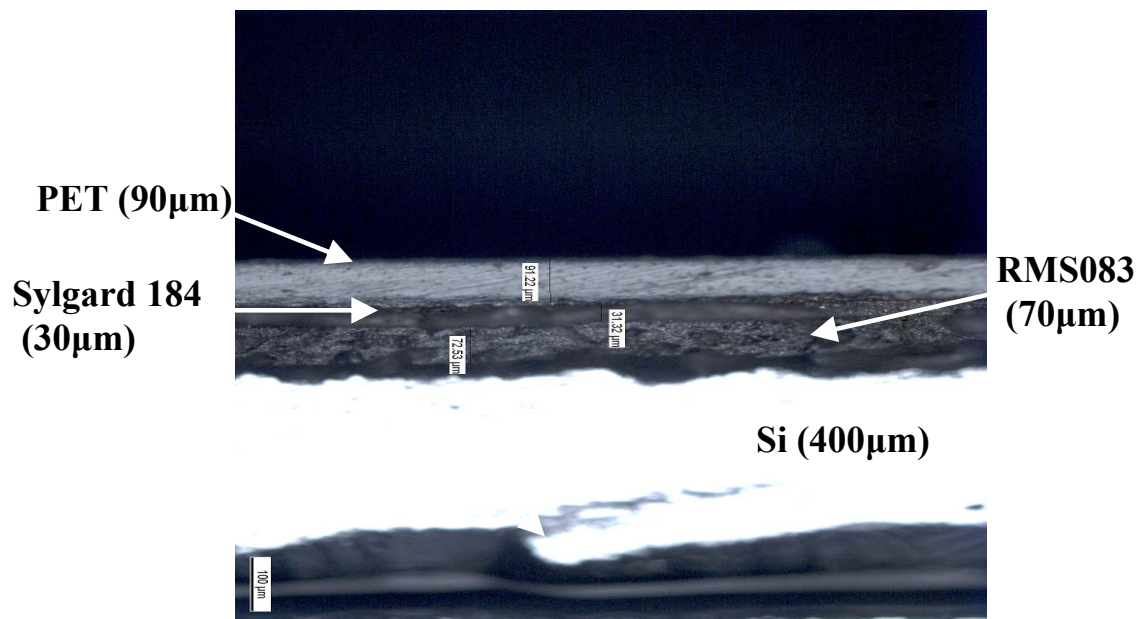


Figure 39. Photo de réalisation. Coupe du laminage avant retrait du film PET

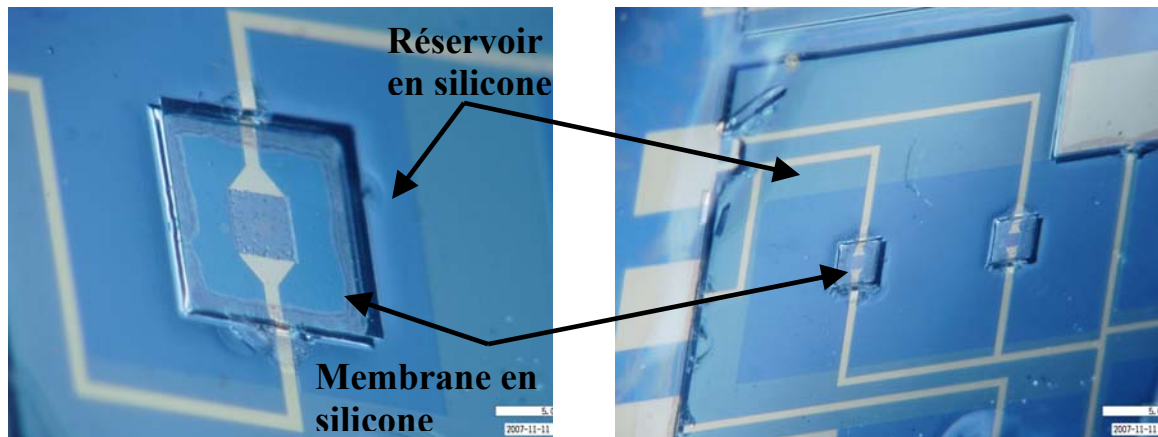
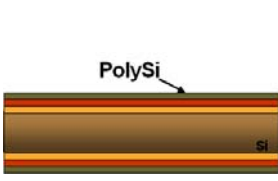
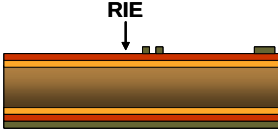
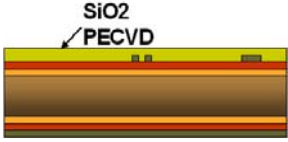
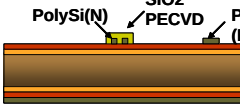
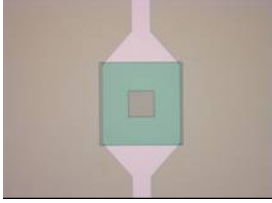
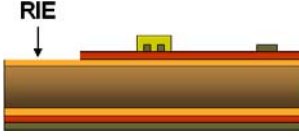
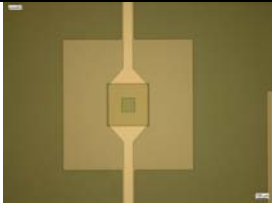
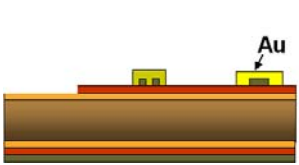
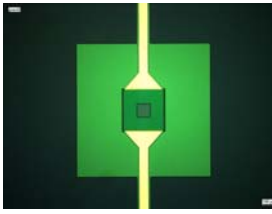
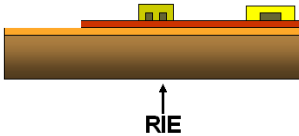
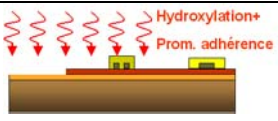
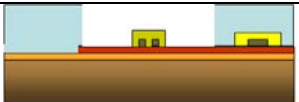
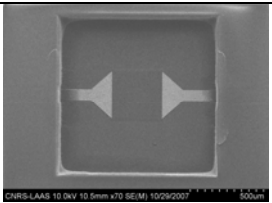


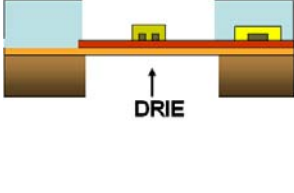
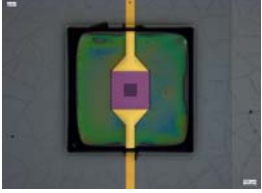
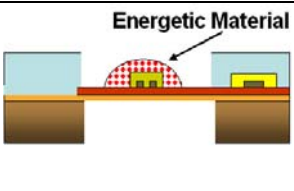
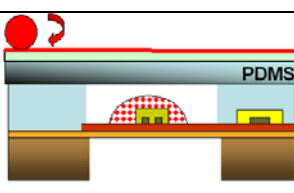
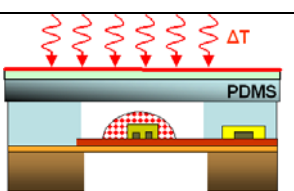
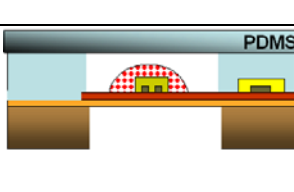
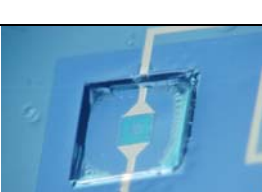
Figure 40. Photo de réalisation de l'actionneur complet. a) actionneur de surface 1000µm×1000µm b) actionneur de surface 500µm×500µm

7 Récapitulatif du procédé d'intégration complet

Dans le tableau suivant nous résumons les étapes du procédé technologique mis au point au LAAS pour réaliser l'actionneur:

Etape	Description	schéma	Photo réalisation	Caractéristique dimensionnelle. Commentaire
1	Oxydation thermique du substrat Si		-----	$e = 1,4\mu\text{m}$ $T = 1150^\circ\text{C}$
2	Dépôt du SiNx (LPCVD)		-----	$e = 0,6\mu\text{m}$ $T = 705^\circ\text{C}$
3	Dépôt du polysilicium (LPCVD)		-----	$e = 0,5\mu\text{m}$ $T = 605^\circ\text{C}$
4	Implantation d'atomes d'Arsenic		-----	Energie = 50keV Dose = $2 \times 10^{15} \text{at/cm}^2$ $\rho = 2,02 \times 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$
5	Gravure du polysilicium (RIE). Réalisation résistance			

6	Dépôt du SiO ₂ (PECVD)		-----	$e = 0,8\mu\text{m}$ $T = 300^\circ\text{C}$ Gravure par HF
7	Diffusion atomes de Phosphore			$T = 950^\circ\text{C}$ $\rho = 8,8 \times 10^{-4} \Omega.\text{cm}$ Recuit de redistribution des atomes d'As
8	Gravure de la couche SiN _x (RIE)			Accès au SiO ₂ pour l'adhérence du silicone
9	Métallisation (Cr/Au)			$e(\text{Cr}) = 0,2\mu\text{m}$ Attaque Microform Chromium Etchant $e(\text{Au}) = 0,8\mu\text{m}$ Attaque KI+I ₂ Recuit $T = 250^\circ\text{C}$, 20min
10	Gravure couches minces face arrière (RIE)		-----	Trois couches gravées : polysilicium, SiN _x et SiO ₂
11	Traitement de surface pour accrochage du mur		-----	Hydroxylation + promoteur d'adhérence (sous Toluene)
12	Dépôt du silicone du mur (RMS 083)		-----	Dépôt à la tournette $v = 1000 \text{ t/min}$, $\text{acc} = 1000 \text{ t/min.sec}$, temps = 30 sec $e = 70\mu\text{m}$
13	Insolation et révélation du mur			$P = 20 \text{ mW/cm}^2$ (365nm, 15min)

14	Libération des membranes diélectriques (DRIE)			
15	Dépôt du matériau énergétique			Dépôt par capillarité
16	Rapport de la membrane élastique (Laminage)		-----	$T = \text{Ambiante},$ $P = 2,5 \text{ Bar}$
17	Recuit final		-----	$T = 65^{\circ}\text{C},$ Temps = 1 heure
18	Pelage du PET			

* * * *

Le rendement de fabrication du dispositif est réduit après l'assemblage de chaque élément constitutif (95% de rendement de fabrication des plates-formes chauffantes), à 80% après la fabrication des murs du réservoir et libération des membranes diélectriques, à 60% après dépôt du matériau énergétique et finalement à 50% après laminage de la membrane élastique.

8 Conclusions et perspectives d'amélioration

Dans ce chapitre, nous avons proposé et mis au point un procédé technologique complet pour la réalisation du micro actionneur PYRACT. Pour ce faire, nous avons utilisé les procédés microsystèmes sur Silicium de fabrication et d'intégration de chacune des parties de l'actionneur (résistance, mur du réservoir, membrane, dépôt du matériau énergétique) en veillant à la compatibilité de chacune des opérations nécessaires.

Les points durs rencontrés ont été essentiellement liés aux problèmes d'accrochage des différents matériaux entre eux et des dépôts des matériaux non commun en microélectronique comme le matériau énergétique et les silicones. Nous avons apporté des réponses à chacun de ces problèmes avec l'appui de la centrale technologique du LAAS et avec le soutien de nos partenaires du IMRCP et du LCC. Des dispositifs ont été fabriqués qui seront caractérisés dans le chapitre qui suit.

Après les dernières améliorations du rendement, nous disposerons donc d'un procédé d'intégration global, validé, robuste et bas coût. Le procédé mis en place est simple. Des améliorations seront apportées. Notamment, le dépôt du matériau énergétique. Avec la méthode de dépôt choisie (l'injection pneumatique au travers de capillaire), il a été noté une difficulté d'alignement de la goutte ($\pm 200\mu\text{m}$) et une reproductibilité du volume déposé insuffisante dépendant du diamètre du capillaire (l'écart dans les diamètres des gouttes est de $\pm 140\mu\text{m}$).

Pour améliorer ce point faible nous recommandons de travailler avec un nouvel équipement de jet d'encre acquis au LAAS récemment. Le jet d'encre est une technologie d'impression par actionnement piézoélectrique qui permet de déposer de façon automatisée, avec une très reproductibilité, des gouttes d'un volume entre 5pl et 0,5nl (avec des buses entre 10 et 80 μm en diamètre) avec une haute précision ($\pm 30\mu\text{m}$) [17]. Cette technologie représente le choix, à notre avis le plus intéressant, pour le dépôt précis et reproductible du matériau énergétique.

Pour améliorer le rendement final de fabrication, nous optimisons le procédé de laminage de la membrane sur les réservoirs.

CHAPITRE IV

Caractérisation et validation des modèles de conception

1 Introduction

Le chapitre précédent a décrit le procédé retenu pour la réalisation technologique de l'actionneur. Ce dernier chapitre sera centré sur la caractérisation des premiers prototypes afin de valider leur bon fonctionnement, en relation avec les modèles proposés au chapitre II.

L'actionneur mettant en jeu plusieurs mécanismes (thermique, mécanique...), et plusieurs composants, nous procéderons en deux étapes. Nous caractériserons d'abord les constituants de l'actionneur indépendamment, et nous terminons par la caractérisation du fonctionnement global de l'actionneur.

Nous commencerons par la caractérisation thermo-mécanique de la plate-forme chauffante. Nous évaluerons expérimentalement la tenue mécanique de la membrane diélectrique qui supporte la résistance et nous mesurerons la réponse thermique de la résistance par imagerie infrarouge.

Ensuite, la température d'initiation, l'enthalpie de décomposition et la quantité de gaz généré lors de la réaction du matériau énergétique seront mesurées.

Les propriétés mécaniques de la membrane élastique, très importantes pour valider le modèle mécanique de sa déformation ont été caractérisées par deux méthodes : le « Bulge test » et la nano indentation.

Finalement, le fonctionnement de l'actionneur PYRACT assemblé sera caractérisé, en mesurant la déformation de la membrane élastique produite par la décomposition du matériau énergétique après application d'une puissance électrique sur la plate-forme chauffante.

2 Caractéristique thermique et mécanique de la plate-forme chauffante

2.1 Tenue en pression de la membrane diélectrique

La membrane diélectrique qui supporte la résistance est fine ($2\mu\text{m}$) et doit supporter la surpression d'actionnement sans se rompre. Ainsi, nous avons caractérisée par le « bulge test » la déformation de la membrane en fonction de la pression (N_2) appliquée jusqu'à la rupture pour les deux types de membrane (voir Figure 1) : $500\mu\text{m} \times 500\mu\text{m}$ et $1\text{mm} \times 1\text{mm}$.

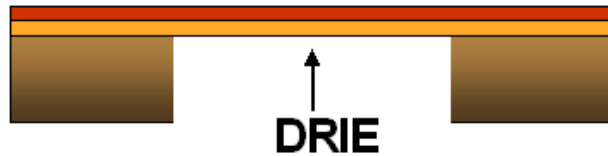


Figure 1. Gravure DRIE pour libérer les membranes diélectriques

2.1.1 Description du banc de mesure

Le principe du test est d'appliquer une pression hydrostatique à la membrane et de mesurer sa pression de rupture. Le dispositif a été mis au point au LAAS lors d'une thèse antérieure avec l'objectif de caractériser les propriétés des membranes des différents matériaux [1]. Il comprend quatre parties (Figure 2) :

- un dispositif de génération et mesure de pression (N_2),
- un support mécanique pour placer les échantillons,
- un profilomètre optique FOGALE ZOOMSURF 3D pour mesurer en temps réel la déformation de la membrane sous la pression,
- un ordinateur pour l'acquisition de données et son analyse.

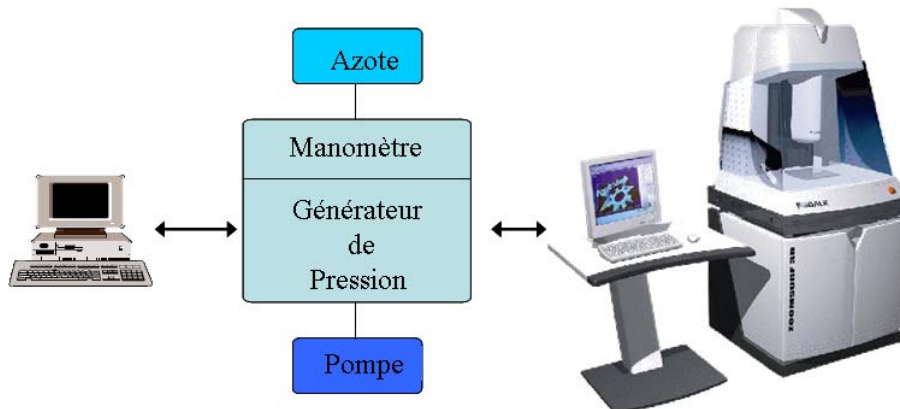


Figure 2. Schéma du dispositif de caractérisation des membranes

a) Générateur du N_2

La pression d'azote est contrôlée par un contrôleur/calibreur de haute précision PPC1 de chez DH Instruments. Il est branché à un moniteur de pression de référence RPM1 de chez DH Instruments. Cet équipement permet de générer une pression entre 0 à 6 Bars avec une stabilisation de ± 0.1 mbar. Le contrôleur est piloté par ordinateur.

b) Le support d'échantillons

Un support a été conçu spécialement pour la mesure de la déflexion des membranes fines diélectriques (Figure 3). Il consiste en une structure métallique avec des cavités pour placer

les échantillons et un couvercle en téflon pour fermer de façon étanche la cavité. Les cavités sont reliées au générateur de pression par des trous circulaires. Pour bien placer les échantillons et pour éliminer des possibles fuites de gaz, on utilise un joint silicone liquide déposé manuellement comme le montre la Figure 3.

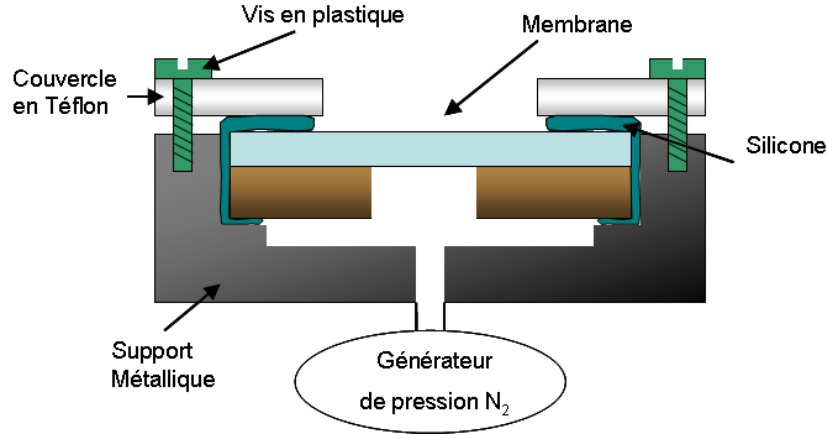


Figure 3. Schéma du support mécanique

2.1.2 Résultats des mesures

La pression appliquée dans la cavité sous la membrane est appliquée jusqu'à que la membrane se brise. Les résultats de ces mesures sur les deux types de membranes sont donnés dans le Tableau 1.

Dimension de membrane SiO ₂ /SiN _x	Tenue en pression (kPa)
500µm×500µm	400
1mm×1mm	200

Tableau 1. Tenue en pression des membranes diélectriques

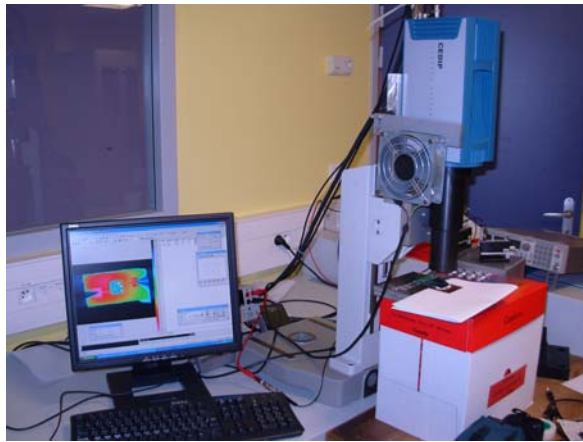
D'après le modèle de conception pour la décomposition du matériau énergétique et de l'actionneur PYRACT dans les sections 4.5.4 et 5.1 du chapitre II, la pression générée par la décomposition du matériau énergétique sera inférieure à ces valeurs de pression. En effet, au maximum pour l'actionneur avec une membrane de 500µm×500µm, la surpression est de 140kPa. Pour l'actionneur avec membrane de 1mm×1mm, cette surpression est de 80kPa. Ainsi les membranes diélectriques ne devraient pas rompre sous l'effet de la décomposition du matériau énergétique.

La déformation maximale de ces membranes diélectriques sous la surpression maximale générée pour chaque actionneur est de 6.6µm (actionneur avec une membrane de 500µm×500µm) et 14µm (actionneur avec une membrane de 1mm×1mm) ce qui équivaut à une variation du volume initial sous la membrane de 2% et 4% respectivement. Ceci indique

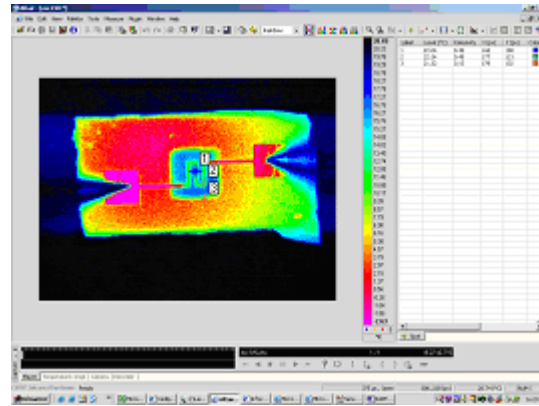
que le fait de négliger la déformation de la membrane diélectrique sur nos modèles induit une erreur négligeable, sur la pression d'actionnement.

2.2 Caractérisation thermique

Nous avons choisi la méthode de caractérisation thermique infrarouge (IR) pour caractériser les plates-formes chauffantes car elle est disponible au laboratoire et simple à mettre en œuvre. Nous utilisons une camera infrarouge de type CEDIP¹ JADE III MW (voir Figure 4). Le principe de mesure est le suivant : la camera capte la quantité de photons IR émises par une surface (la résistance chaude) et, en connaissant la valeur de l'émissivité du matériau (ajustée à température ambiante avant de prendre les mesures), un calcul de la température équivalente est réalisé avec l'aide d'un logiciel spécialisé (ALTAIR de chez CEDIP Infrared Systems). La résolution de notre camera est de 20 μ m (taille du pixel).



a)



b)

Figure 4. a) Photo de la camera Infrarouge CEDIP JADE III MW. b) Image du logiciel ALTAIR

2.2.1 Description du banc de mesure

Les résistances chauffantes sont alimentées en tension (V). Un ampèremètre (I) est mis en série avec l'alimentation et un voltmètre (V_0) en parallèle à la résistance comme schématisé la Figure 5 pour mesurer précisément la puissance d'alimentation $P=V \times I$.

¹ <http://www.cedip-infrared.com>

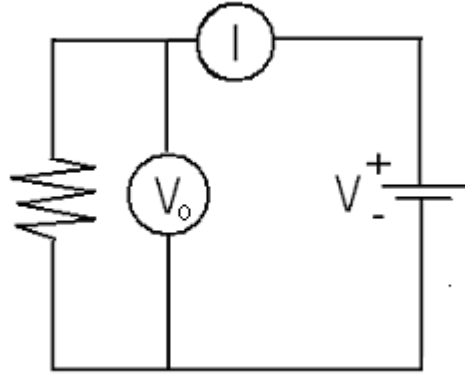


Figure 5. Schéma du circuit pour mesurer la puissance d'alimentation sur la résistance.

Pour chaque consigne de tension V , les mesures du courant et de la température sont faites lorsque le régime permanent est établi. Les paliers sont d'environ 30s.

2.2.2 Résultats des mesures

La Figure 6a représente une image captée par la camera IR. Ainsi, la température maximale sur la plate-forme chauffante en fonction de la puissance électrique appliquée, obtenue sur le point dénommé « point de mesure » sur la Figure 6b, est mesurée pour les deux types de plate-forme : $500\mu\text{m} \times 500\mu\text{m}$ et $1\text{mm} \times 1\text{mm}$.

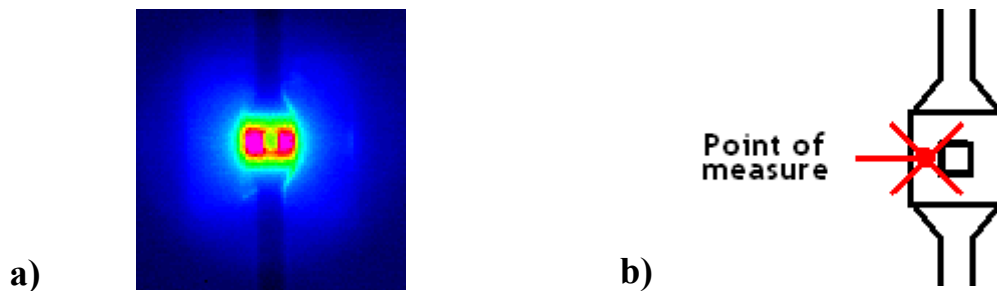


Figure 6. a) Image capté par la camera IR, b) point de mesure de la température maximale sur la plate-forme chauffante

Les résultats sont donnés pour deux résistances pour chaque plate-forme sur les graphes des Figure 7 et 8.

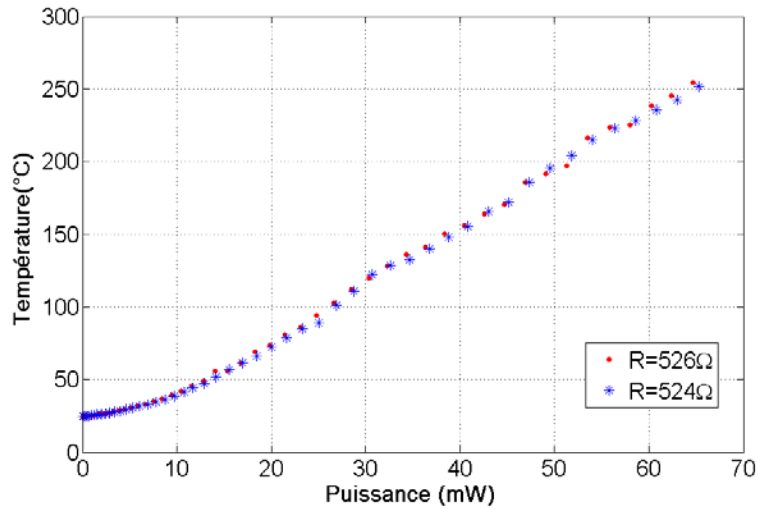


Figure 7. Reproductibilité de chauffage de deux plates-formes chauffantes ayant une membrane diélectrique de surface 1mm×1mm.

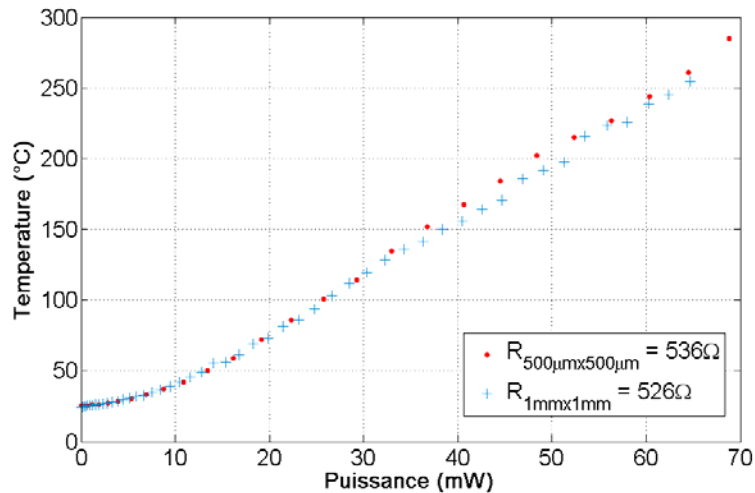


Figure 8. Comparaison du chauffage des plates-formes chauffantes de dimensions 500μm×500μm et 1mm×1mm.

On note que les mesures sont reproductibles puisque l'écart entre deux mesures sur deux résistances différentes est inférieur de 8%. Ces mesures ont servi de validation du modèle thermique présenté au chapitre II. La Figure 15 du chapitre II montre un bon accord entre le modèle et les mesures. Au dessous de 116°C, l'écart est de 33%. Pour des températures supérieures à 116°C, l'écart se réduit à 16%. Cette différence peut être expliquée par la difficulté d'évaluer précisément le coefficient d'émissivité des différents matériaux et donc l'erreur induite sur la température. Le fait que le logiciel calcule la température moyenne sur un pixel peut être aussi une source d'erreur.

3 Caractérisation de la décomposition du matériau énergétique

Dans cette section nous présentons la caractérisation de la réaction de décomposition du matériau énergétique et nous validerons son initiation en couche mince.

Pour caractériser une réaction chimique, plusieurs méthodes sont classiquement utilisées :

1. La mesure par TGA (Thermogravimetric Analysis) qui permet d'accéder au profil de la décomposition du matériau énergétique (% de masse) en fonction de la température.
2. Les mesures de DSC (Differential Scanning Calorimetry) ou TDA (Differential Thermal Analysis), permettant de calculer expérimentalement les énergies de réactions (exothermiques ou endothermiques).
3. Enfin des mesures de XRD (X-Ray Diffraction) ou spectrométrie de masse permettant de déterminer les espèces issues de la décomposition.

Ces trois méthodes seront donc utilisées par notre partenaire LCC pour caractériser la réaction de décomposition du matériau énergétique.

Enfin, afin de vérifier la capacité du matériau énergétique choisi à se décomposer en couche mince, nous procéderons à des essais d'initiation et de décomposition lorsque le matériau énergétique est déposé sur une plate-forme chauffante PYRACT.

1. TGA

Cette méthode de caractérisation consiste à déterminer la variation de masse d'un matériau en fonction de la température. Pour ce faire, le matériau à caractériser est déposé dans un creuset ; sa masse est mesurée précisément pour des températures comprises entre 20°C et 600°C. Elle est utilisée principalement pour mesurer les températures de dégradation de matériaux, le point de décomposition des explosifs, entre autres...

Des mesures de TGA ont été réalisées pour mesurer la perte de masse du matériau énergétique en fonction de la température (de 20°C jusqu'à 600°C) [2]. La Figure 9 montre une décomposition brutale du matériau énergétique lorsque la température atteint 223°C. Cette courbe montre une perte de masse de 66% quand le gaz est libéré. Cela indique qu'il reste après réaction un résidu solide du 34% du matériau énergétique. On note que la réaction est brutale à T_i et que donc notre modèle (pour $T < T_i$: $m_g = 0$, pour $T \geq T_i$: $m_g = m_s$) est correcte au résidu près (voir section 4.5.1 du chapitre II).

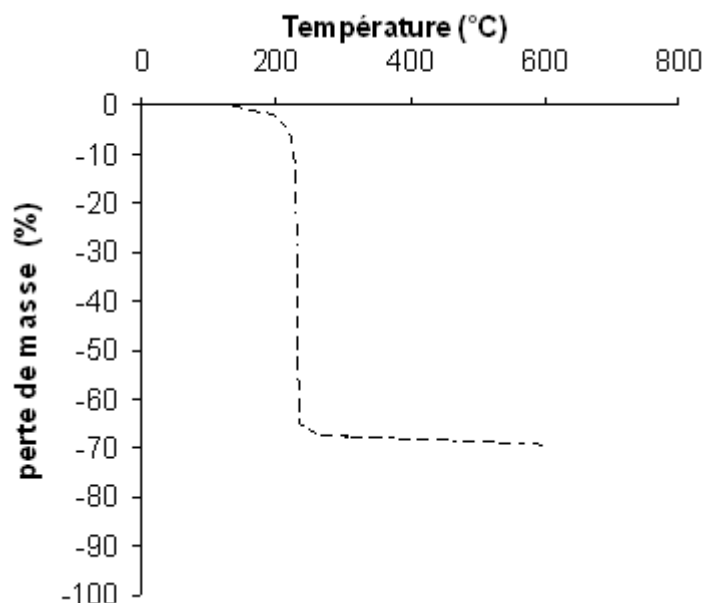


Figure 9. Mesure thermogravimétrique (TGA) pour la décomposition du matériau énergétique.

2. Mesure par DSC

Cette méthode de caractérisation consiste à mesurer la quantité de chaleur nécessaire pour incrémenter la température de deux échantillons : une référence (avec une capacité calorifique connue) et le matériau à caractériser, qui peut subir des transformations physiques exothermiques ou endothermiques avec l'augmentation de la température (changement de phase, décompositions...). Pendant l'expérience, la différence de chaleur fournie sur les deux échantillons pour les maintenir à la même température donne l'information sur la chaleur absorbée ou générée (dans notre cas générée) par l'échantillon à caractériser.

Des mesures de DSC ont été réalisées sur le matériau énergétique pour mesurer l'enthalpie de décomposition (ΔH). Pour ce faire le matériau énergétique est inséré dans un creuset et chauffé jusqu'à 500°C. Les mesures obtenues montrent un pic exothermique à $T=223^{\circ}\text{C}$. Par intégration de ce pic, l'enthalpie de réaction est calculée à 333,5J/g. Ce qui est relativement faible par rapport aux propergols qui ont des enthalpies de réaction entre 0,96 et 1,4kJ/g.

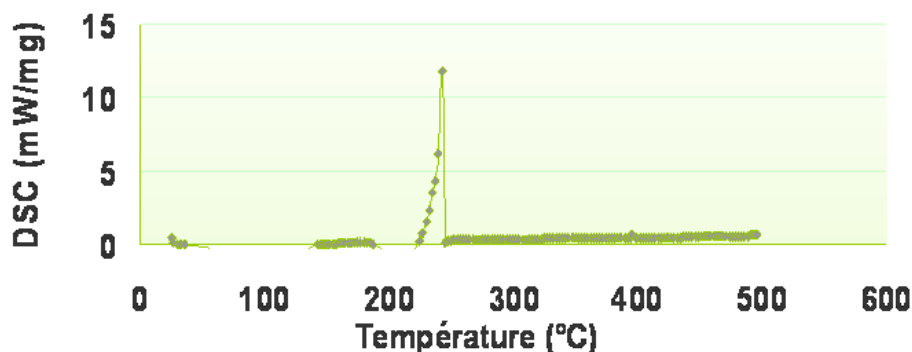


Figure 10. Mesure DSC pour la décomposition du matériau énergétique.

3. Analyse des gaz

Les gaz de décomposition ont été analysés par spectrométrie de masse.

Cette méthode de caractérisation consiste à mesurer le rapport masse/charge des ions qui interagissent avec l'échantillon à mesurer. La trajectoire de ces ions est modifiée par un aimant permanent selon le rapport masse/charge, ce qui permet de connaître la présence de certain type de molécules dans l'échantillon à partir d'un banc de spectres.

Les mesures effectuées sur les gaz de décomposition du matériau énergétique donnent trois rapports de masse/charge : 32, 28 et 18, correspondant aux O_2 , N_2 et vapeur de H_2O respectivement.

Par contre l'analyse des résidus métalliques n'a pas été encore faite mais sera réalisée d'ici la fin du projet par analyse XRD.

4. Initiation sur plate-forme PYRACT

Des études antérieures menées dans le cadre de travail sur la micro propulsion ont montré que certains matériaux énergétiques comme la Nitrocellulose, performants en milieu confiné présentaient des difficultés voire des impossibilités d'allumage en couche mince, à pression atmosphérique. Il est donc important de caractériser l'allumage de notre matériau énergétique en couche mince sur la plate-forme chauffante et à l'ambiante (non confiné). Pour ce faire, nous avons déposé le matériau énergétique (une goutte) suivant la méthode d'injection décrite au chapitre III sur les plates-formes chauffantes fabriquées.

Pour ce test, on utilise une plate-forme chauffante avec une membrane diélectrique de $500\mu m \times 500\mu m$. La plate-forme chauffante a été caractérisée thermiquement par la caméra IR. La courbe d'échauffement T_{max} en fonction de la puissance électrique est donnée sur la Figure 8.

Le premier test consiste à appliquer une tension électrique croissante. Et nous mesurons la quantité de matériau énergétique décomposé pour les différentes puissances correspondantes.

La quantité de matériau décomposé est visible car après dégagement des gaz il reste des résidus noir sur la membrane (voir Figure 11 : les cercles représentent le rayon d'initiation du matériau énergétique). Ces tests montrent qu'il n'y a pas de combustion soutenue du matériau énergétique. En effet, seul le volume du matériau énergétique qui a atteint 223°C se décompose et génère des gaz. Si on arrête le chauffage, la réaction s'arrête.

Nous observons que le matériau énergétique commence à se décomposer quand nous appliquons une puissance de 52mW. Selon les courbes de caractérisation IR, cela correspond à une température proche de 225°C, ce qui correspond à la température d'initiation mesuré du matériau énergétique par ATG et DSC.

225°C est la température d'initiation prise dans le modèle de conception (chapitre II).

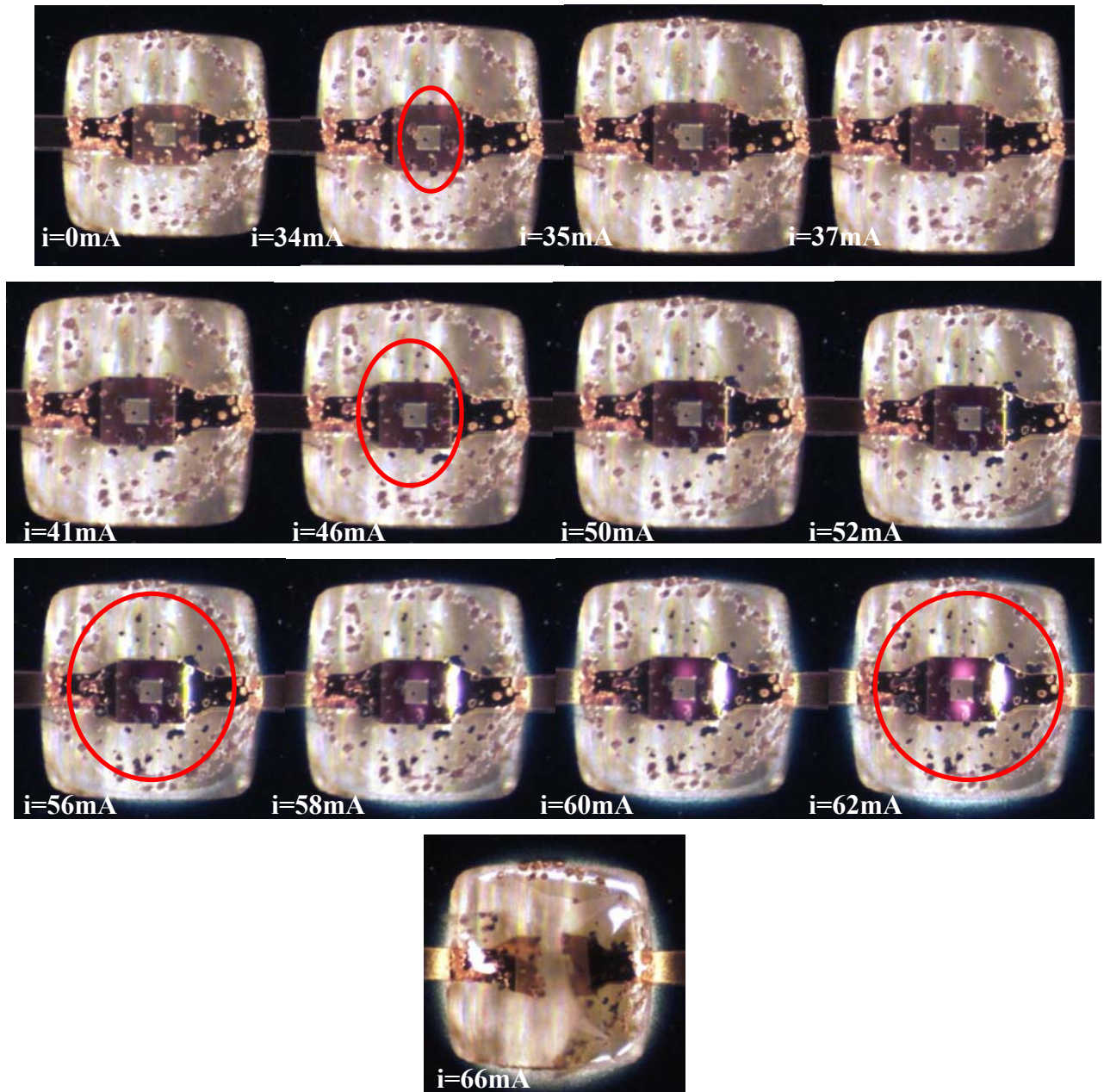
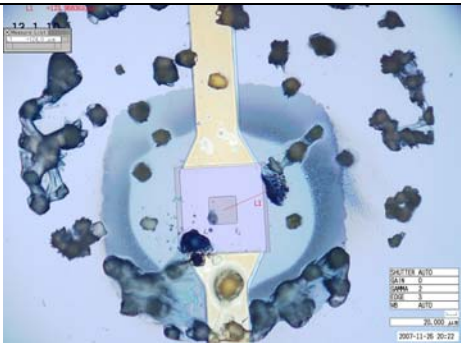
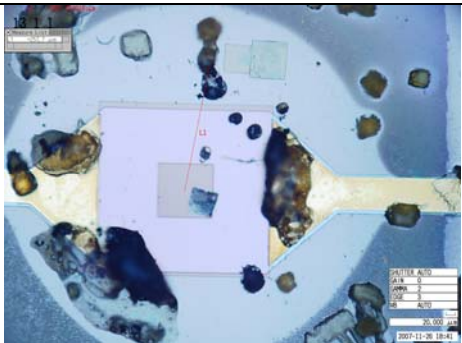
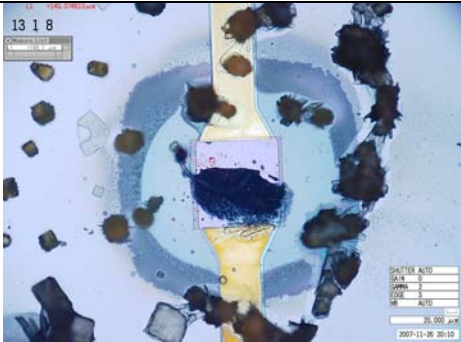
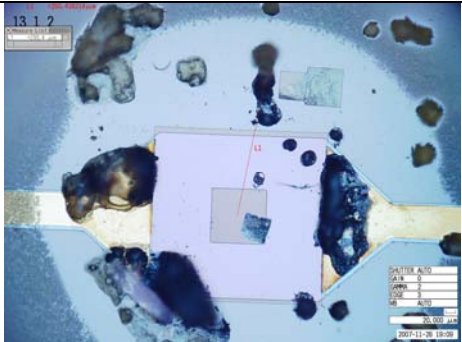
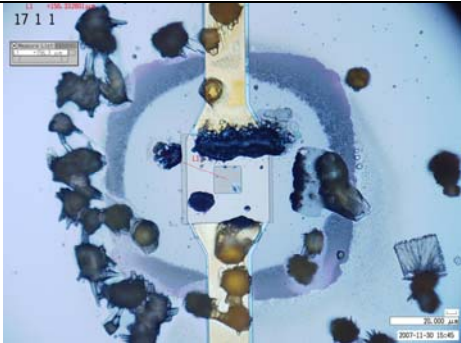
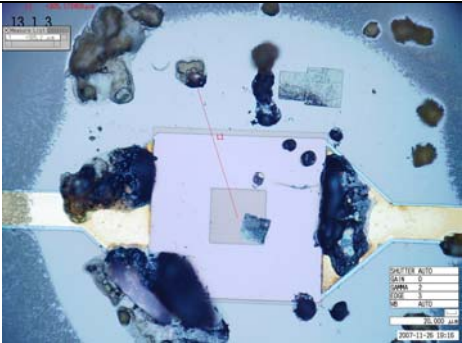


Figure 11. Photos de la décomposition du matériau énergétique en fonction de la puissance électrique (courant appliquée).

Le deuxième test consiste à appliquer un échelon de puissance et à mesurer la masse de matériau énergétique décomposée.

Pour ce faire, le matériau énergétique est déposé (1 gouttes) sur les deux types de plates-formes chauffantes et trois niveaux de puissance sont appliqués à partir du modèle de l'actionneur (voir section 5.1 du chapitre II):

Niveau de puissance (mW)	Diamètre de matériau énergétique brûlé (μm) Plate-forme $L=500\mu\text{m}$	Diamètre de matériau énergétique brûlé (μm) Plate-forme $L=1\text{mm}$
Puissance minimal $L=500\mu\text{m}$ (62mW)	 Expérimentale = 248 Théorique = 211 (erreur 18%)	 Expérimentale = 514 Théorique = Pas d'initiation
Puissance minimal $L=1\text{mm}$ (75mW) Puissance moyenne $L=500\mu\text{m}$ (75mW)	 Expérimentale = 280 Théorique = 271 (erreur 3%)	 Expérimentale = 586 Théorique = 364 (erreur 38%)
Puissance moyenne $L=1\text{mm}$ (85mW)	 Expérimentale = 312 Théorique = 308 (erreur 1%)	 Expérimentale = 610 Théorique = 490 (erreur 20%)

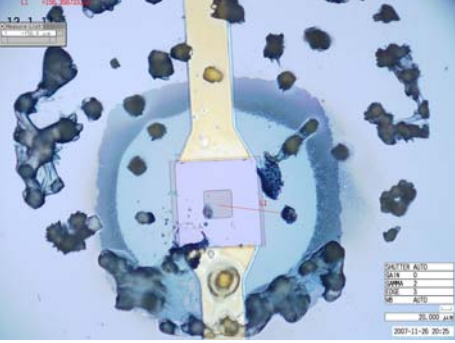
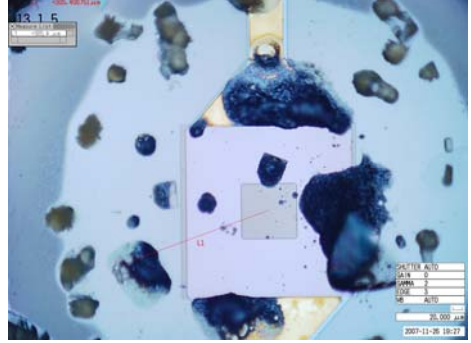
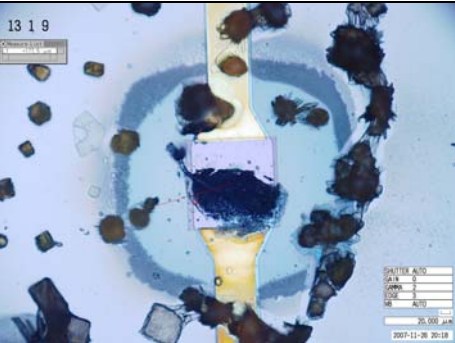
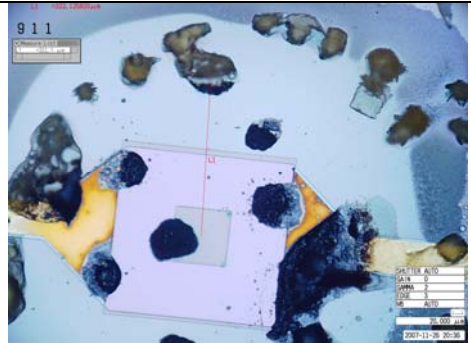
Puissance maximale $L=500\mu\text{m}$ (90mW)	 Expérimentale = 318 Théorique = 332 (erreur 4%)	 Expérimentale = 616 Théorique = 544 (erreur 12%)
Puissance maximale $L=1\text{mm}$ (100mW)	 Expérimentale = 360 Théorique = 346 (erreur 4%)	 Expérimentale = 644 Théorique = 604 (erreur 6%)

Tableau 2. Test de décomposition du matériau énergétique sur les deux plates-formes chauffantes et sous un échelon de puissance

Ces tests montrent une réduction de l'erreur entre la théorie et l'expérimentation quand on augmente la puissance électrique. Avec 100mW nous avons une erreur d'environ 5% sur le rayon d'initiation du matériau énergétique.

Concernant la puissance minimale pour déclencher la décomposition du matériau énergétique, des tests expérimentaux indiquent qu'une puissance minimale de 52mW est nécessaire sur la plate-forme chauffante de $500\mu\text{m} \times 500\mu\text{m}$ (16% d'erreur par rapport au modèle théorique) et 60mW sur la plate-forme de $1\text{mm} \times 1\text{mm}$ (20% d'erreur par rapport au modèle théorique).

4 Caractérisation de la déformation de la membrane élastique

Pour valider le modèle de l'actionneur, il est important de mesurer les propriétés mécaniques du silicone (module de Young et coefficient de Poisson) de la membrane

élastique (Sylgard 184). Pour cela nous utilisons deux méthodes que nous avons à disposition : le « Bulge test » et la nano indentation.

4.1 Propriétés mécaniques du Sylgard 184

Nous pouvons trouver dans la littérature plusieurs méthodes pour caractériser les propriétés élastiques d'un matériau, parmi elles on peut citer la nanoindentation [3]-[5], le test de micro ponts [6], le test en tension [7] et le « Bulge test » [3][7]-[13]. Parmi ces méthodes, le « Bulge test » est le seul qui permet de caractériser le matériau une fois la membrane réalisée. C'est pourquoi nous l'avons choisi. Ensuite, nous avons réalisé des mesures par nanoindentation afin d'avoir une vérification.

4.1.1 Mesure du module de Young et de la contrainte initiale par « Bulge test »

Le bulge test est une méthode assez connue pour caractériser les propriétés élastiques des couches minces. Il s'agit de mesurer la déformation (w) d'une couche mince (typiquement diélectrique) sous l'effet d'une pression appliquée (Figure 12).

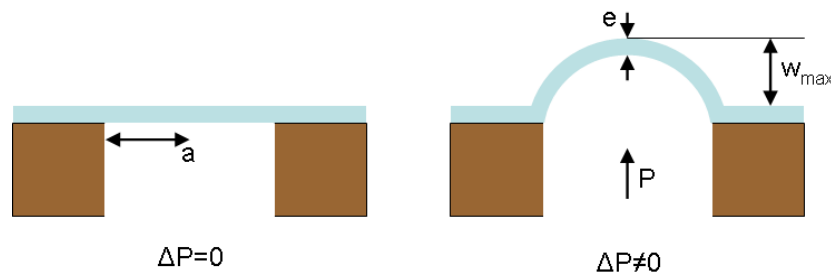


Figure 12. Principe du Bulge test.

Ensuite, à partir de la courbe expérimentale de $w_{max}(\Delta P)$, des calculs permettent de déduire le module de Young (E) et la contrainte initiale (σ_0).

Historiquement, Tabata et *al.*[8] ont utilisé une approche de minimisation d'énergie en considérant la contribution de la contrainte interne en tension, approche décrite par Timoshenko [14] qui a proposé une solution basée sur les premiers harmoniques de la série de Fourier. Ils ont trouvé une relation entre la pression appliquée sur la membrane et sa déformation qui permet de calculer E et σ_0 du matériau. Tabata travaille principalement avec des membranes carrés et rectangulaires.

Plus tard, Pan et *al.* [9] ont proposé un rapport entre la solution analytique de Tabata et des analyses FEM, afin d'apporter des corrections à certain coefficients (voir plus loin).

Finalement Meier-Schneider [12] a proposé une nouvelle solution numérique mieux adaptée aux membranes carrées, en faisant une correction de certains coefficients de l'expression générale de Tabata (équation (1)). La pression appliquée à la membrane en fonction de la déformation maximale de la membrane s'écrit :

$$P_{N_2} = \frac{E}{(1-\nu)} \frac{e^3 w_{max}}{(2a)^4} \left(\frac{C_0}{(1+\nu)} + C_1^* \frac{w_{max}^2}{e^2} \right) + C_2^* \frac{\sigma_0 e w_{max}}{(2a)^2} \quad (1)$$

Le premier terme est lié aux faibles déformations, le deuxième lié aux grandes déformations et le troisième terme est lié à l'état initial de contrainte.

Avec :

- a et e , la demi-longueur latérale et l'épaisseur de la membrane respectivement.
- $C_1^* = 1,36C_1$ et $C_2^* = 1,12C_2$, sont des coefficients de correction calculés à partir des analyses numériques sur des membranes carrés [12][13]. (voir annexe F)

Pour des membranes carrées, C_0 , C_1 , C_2 s'expriment par :

$$C_0 = \frac{1}{12\alpha} \quad [14] \quad (2)$$

$$C_1 = \frac{\pi^6}{2(1+\nu)} \left[\frac{9+2z^2+9z^4}{256} - \left[\frac{(4+z+z^2+4z^3-3z\nu(1+z))^2}{2[81\pi^2(1+z^2)+128z+\nu(128z-9\pi^2(1+z^2))]} \right] \right] \quad [8] \quad (3)$$

$$C_2 = \frac{\pi^4(1+z^2)}{16} \quad [8] \quad (4)$$

Avec :

z , le rapport géométrique de la membrane (a/b)

b , la demi-largeur de la membrane.

α est un coefficient qui dépend de z avec la valeur $1,26 \times 10^{-3}$ [14]. (Voir annexe F)

Il faut noter que la plupart des auteurs ont travaillé avec des membranes très minces ($e < \mu m$). Dans ce cas, la déformation est très importante par rapport à l'épaisseur de la membrane ($w_{max} \gg e$), et on peut simplifier l'équation générale (1) en éliminant le premier terme. Dans notre cas, nous sommes obligés de garder la forme générale de l'équation car l'approximation $w_{max} \gg e$ n'est pas valide sauf à très basse pression (faible déformation).

4.1.2 Description du banc de mesure

Le dispositif utilisé est le même que celui présenté dans la section 2.1.1. Il comprend un générateur de pression (N_2), un support métallique permettant de positionner les échantillons.

La déformation de la membrane est caractérisée par profilomètre optique FOGALE.

Les pressions de N₂ appliquées sont comprises entre 1 et 5Bar.

4.1.3 Résultats et analyses

Nous avons caractérisé des membranes carrées d'épaisseur $\approx 30\mu\text{m}$ et de côté (L) de $500\mu\text{m}$. La Figure 13 illustre le procédé de réalisation des membranes PDMS décrit dans le chapitre II. A la fin du procédé, afin de mesurer la déformation de la membrane au profilomètre optique, une fine couche d'or (quelques Amstrongs) est déposée par flash.

La Figure 14 donne une photo d'une membrane ainsi fabriquée et testée.

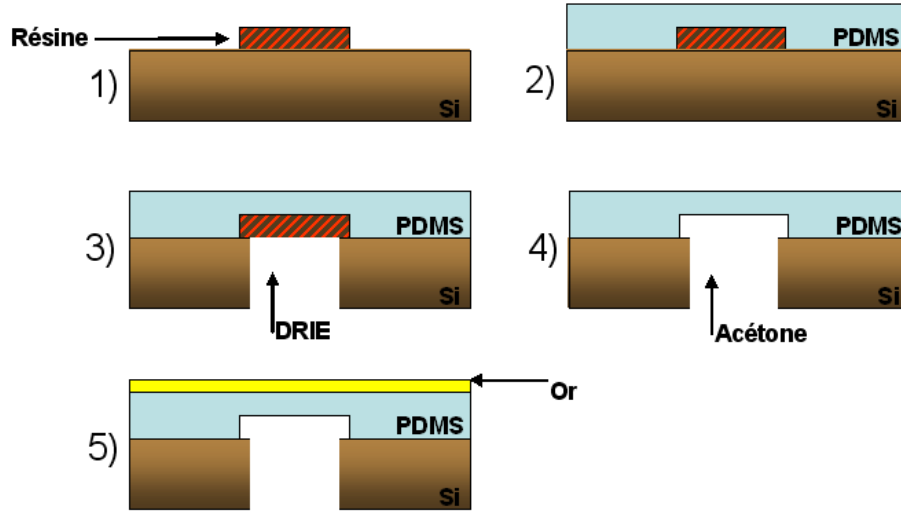


Figure 13. Procédé pour réaliser les échantillons du test mécanique du le matériau polymère pour la membrane élastique

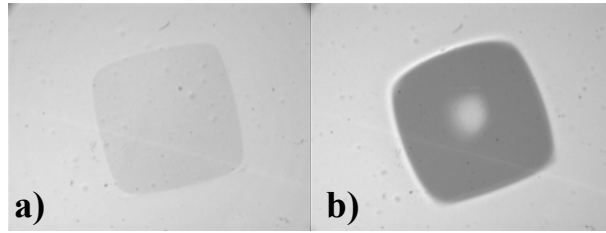


Figure 14. Membrane en silicone de surface $500\mu\text{m}\times 500\mu\text{m}$ (a) sans surpression et (b) sous une surpression de 0.025MPa de N₂

Si on considère que la valeur de la contrainte initiale (σ_0) est assez faible dans un premier temps, la courbe P en fonction de la déformation mesurée (w_{max}) est donnée sur la Figure 15. Nous pouvons distinguer deux régions : une région où $w_{\text{max}} \ll e$ et une région où $w_{\text{max}} \gg e$. Dans le premier cas on peut considérer seulement la partie linéaire de l'équation (1) et ainsi la pente de la courbe expérimentale $w_{\text{max}}(P_{N_2})$ donne E :

$$E = \frac{(2a)^4(1-\nu^2)}{C_0e^3} \cdot \left(\frac{P_{N_2}}{w_{\text{max}}} \right) \quad (5)$$

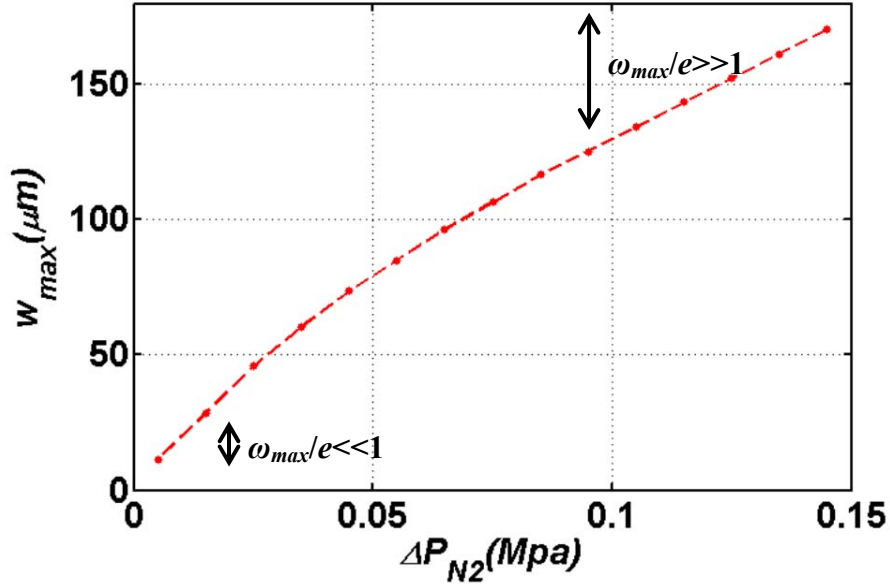


Figure 15. Courbe expérimentale de la déformation d'une membrane en fonction de la pression

Dans la deuxième région ($w_{max} \gg e$), la courbe expérimentale s'écrit :

$$\frac{P_{N_2}}{w_{max}} = \frac{E}{(1-\nu)} \frac{e^3}{a^4} \left(\frac{C_0}{(1+\nu)} + C_1 \frac{w_{max}^2}{e^2} \right) + C_2 \frac{\sigma_0 e}{a^2} \quad (6)$$

Par interpolation, E est calculé suivant l'équation :

$$E = \frac{(1-\nu)a^4}{C_1 e} \cdot \left(\frac{P/w_{max}}{w_{max}^2} \right) \quad (7)$$

Enfin, à partir de l'équation (6) la valeur de la contrainte initiale (σ_0) est déduite comme suit:

$$\sigma_0 = \frac{a^2}{C_2 e} \left(B^* - \frac{A^* C_0 e^2}{C_1 (1+\nu)} \right) \quad (8)$$

Le Tableau 3 donne les résultats des calculs du module de Young du PDMS à partir des caractérisations. En gras, sous les dimensions des membranes, est noté le traitement de surface qu'a subi le support Si ou SiO₂ pour permettre l'adhérence entre le silicone et le substrat :

- Plasma d'oxygène (600W pendant 30 secondes). Malgré ce traitement de surface, la membrane se décolle du substrat à partir d'une surpression de 0,025MPa, ce qui affecte la valeur du module de Young.
- Hydrosilation (création de terminaisons Si-H en surface) à partir d'un bain de 0,5%HF, 1%HCL et de l'eau DI pendant 1 minute pour un substrat de Si oxydé (SiO₂). Après ce traitement de surface, les membranes se décollent toujours, mais à une surpression plus importante et proche de 0,04MPa.

Caractéristiques des membranes	E (Mpa) Calculé avec Eq.(5) Approximation $w_{max} \ll e$	E (Mpa) Calculé avec Eq.(7) Approximation $w_{max} \gg e$	σ_0 (Mpa) Calculé avec Eq. (8) Approximation $w_{max} \gg e$
$L=500\mu\text{m}$, $e=35\mu\text{m}$, Plasma O₂	11,6	0,24	0,37
$L=500\mu\text{m}$, $e=35,8\mu\text{m}$, Si-H	6,55	0,31	0,29

Tableau 3. Résultats des calculs E et σ_0 à partir de courbe du bulge test

Nous remarquons que :

- Le décollement de la membrane du substrat aux faibles pressions rend l'approximation ($w_{max} \gg e$) non adaptée au calcul de E . En effet, une valeur du E trop faible est obtenue : 0,24-0,31MPa, par rapport à la littérature (0,3-9MPa) et à la valeur espérée par modélisation (2,91-5,52MPa). (voir section 4.4.4 chapitre II). Par contre, les valeurs calculées pour la contrainte initiale sont dans la gamme trouvée dans la littérature : 0,045-1,35MPa en prenant $\sigma_0=0.15E$.
- L'équation (5), calculant E à partir de l'approximation aux faibles déformations ($w_{max} \ll e$) semble plus appropriée car, à ces niveaux de pression la membrane ne s'est pas encore décollée. La valeur du module de Young obtenue s'approche de la valeur attendue : 11,6MPa et 6,55MPa en fonction du traitement de surface.

En conséquence, nous voyons bien qu'une variation même faible des paramètres géométriques de la membrane (longueur et épaisseur) engendre un écart important sur le module de Young. Cette erreur est donnée dans l'équation (9). Ainsi une variation de $10\mu\text{m}$ sur la longueur de la membrane de surface $500\mu\text{m} \times 500\mu\text{m}$ induit une erreur de presque 8% sur la valeur de E .

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{\Delta(P_{N2}/w_{\max})}{(P_{N2}/w_{\max})} + 4 \frac{\Delta a}{a} + 3 \frac{\Delta e}{e} + \frac{\Delta C_0}{C_0} \quad (9)$$

C'est pourquoi nous avons souhaité utiliser une deuxième méthode de caractérisation du module de Young du silicone pour valider ces premiers résultats expérimentaux.

Nous avons choisi la nanoindentation, car un équipement est disponible au CNES, site proche du LAAS.

4.1.4 Mesure du module de Young par nanoindentation

La nano indentation est une méthode classique pour caractériser les propriétés mécaniques des matériaux (module de Young et la dureté plastique) [3]-[5]. Une force contrôlée est appliquée par une pointe en diamant sur le matériau à caractériser comme le montre la Figure 16. Dans cette méthode, le matériau PDMS est déposé pleine plaque.

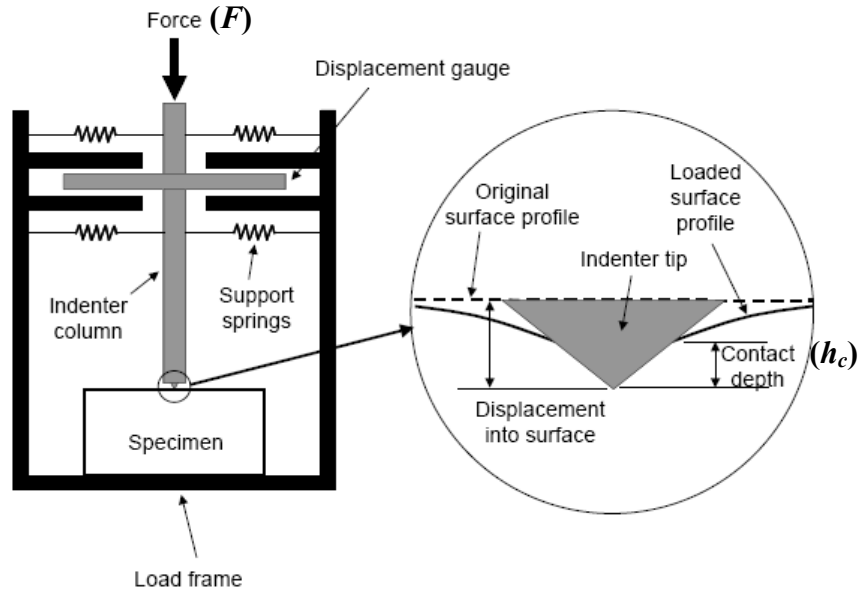


Figure 16. Schéma du mécanisme de nano indentation à partir de [5]

La mesure de la profondeur d'indentation (h_c) en fonction de la force appliquée (F) sur la pointe permet de calculer le module réduit de Young (E_r) par l'expression :

$$E_r = \frac{\sqrt{\pi}}{2\sqrt{A}} \left(\frac{dF}{dh_c} \right) \quad (10)$$

Avec A la surface de contact entre l'indenteur et le matériau à tester. Une pointe de type Berkovich [3] est utilisée pour les tests. Pour ce type de pointe la surface de contact s'exprime en fonction de la profondeur d'indentation comme suit:

$$A = 24.5h_c^2 + 170h_c + 94.89h_c^{1/2} + 94.89h_c^{1/4} [3] \quad (11)$$

Puis le module réduit de Young nous permet de calculer le module de Young (E) à partir du coefficient de Poisson (ν) du matériau et des propriétés mécaniques de l'indenteur (E_i, ν_i) par l'expression :

$$\frac{1}{E_r} = \frac{1-\nu^2}{E} + \frac{1-\nu_i^2}{E_i} \quad (12)$$

Une épaisseur de 50 μ m de silicone (Sylgard 184) est déposée à la tournette sur un substrat de Silicium (400 μ m). Des échantillons de 2 $\times$ 2cm² sont découpés. Les courbes de nanoindentation obtenues sont données sur les Figure 17 et 19.

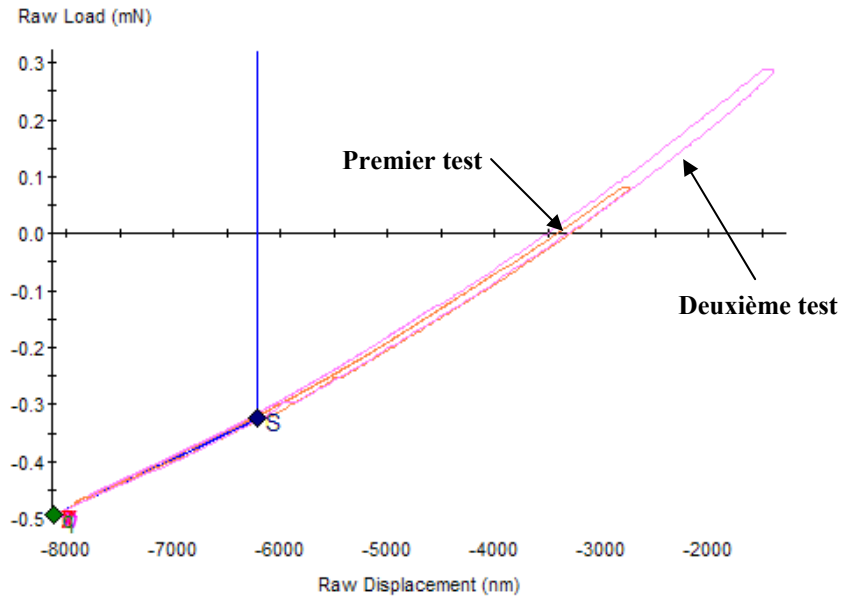


Figure 17. Retour élastique du silicone. Charge appliquée (ordonnée) en fonction du déplacement de l'indenteur dans le silicone (abscisse). (Test réalisé par la société NovaMEMS)

Le retour élastique du silicone sur deux échantillons est illustré sur la Figure 17 : elle montre la charge appliquée sur la pointe en fonction du déplacement de la pointe dans le silicone. Les courbes de charge et décharge sont très similaires pour les deux tests. Ceci indique un comportement élastique dans le domaine mesuré (de 3 à 5 μ m de profondeur d'indentation).

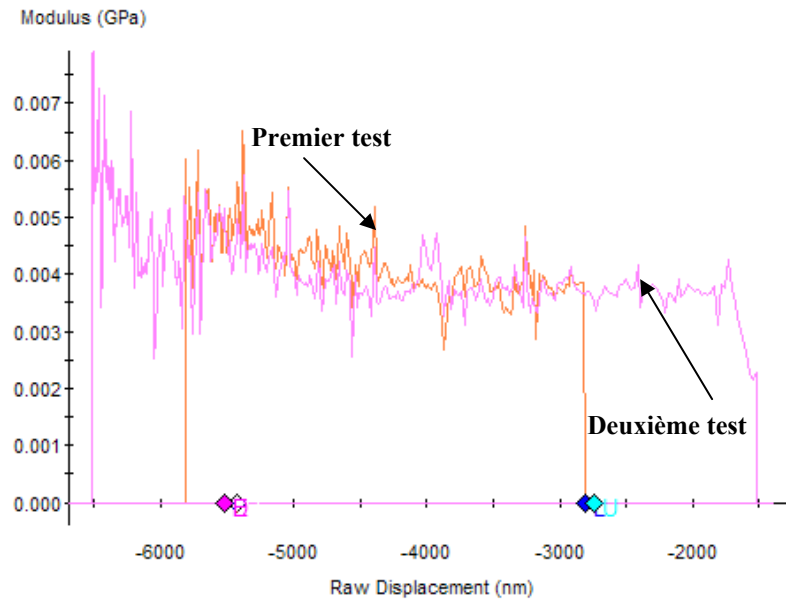


Figure 18. Calcul du module de Young (ordonnée) en fonction du déplacement de l'indenteur dans le silicone (abscisse) par nano indentation. (Test réalisé par la société NovaMEMS)

A partir de ces courbes, le module de Young calculé est de 4MPa (voir Figure 18), donc dans la gamme des valeurs de la littérature (0,3-9MPa). Cette valeur a donc été prise pour le modèle de l'actionneur PYRACT du chapitre II.

5 Test de la structure multicouche avant intégration

Il est important de valider la tenue mécanique de l'assemblage et du collage des différentes couches de silicone entre-elles sous l'effet de la pression.

En effet, un décollement d'une des couches (schéma Figure 19) entraînerait une défaillance du fonctionnement de l'actionneur ou une non conformité avec les prédictions théoriques.

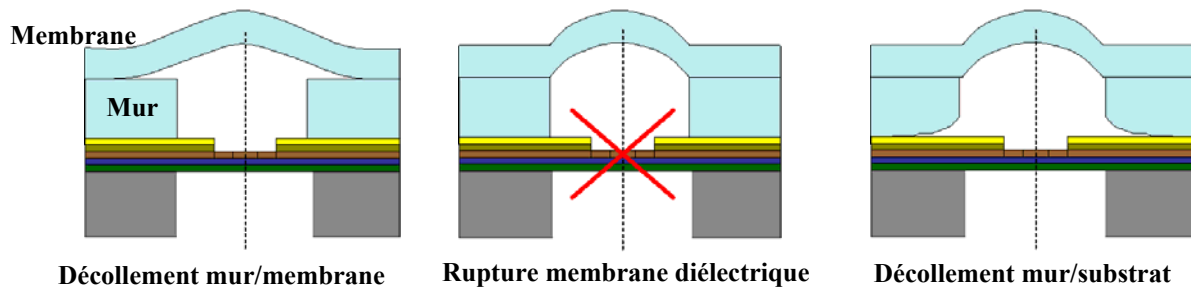


Figure 19. Défaillance d'assemblage possible

Nous avons déjà vu que la rupture de la membrane diélectrique a lieu à partir de 0,4MPa pour les petits membranes ($L=500\mu\text{m}$) et 0,2MPa pour les grandes ($L=1000\mu\text{m}$). Reste à valider l'adhérence des couches silicone sur le substrat et entre-elles. C'est l'objectif de la caractérisation que nous allons présenter.

5.1 Préparation des échantillons

Nous avons fabriqué les murs du réservoir et la membrane comme décrit dans le chapitre III, sur une plaque 4" de Si oxydée.

Le Si est percé par DRIE de sorte de réaliser la membrane suivant les dimensions choisies : $500\mu\text{m}\times 500\mu\text{m}$ et $1\text{mm}\times 1\text{mm}$. La Figure 20 résume le procédé.

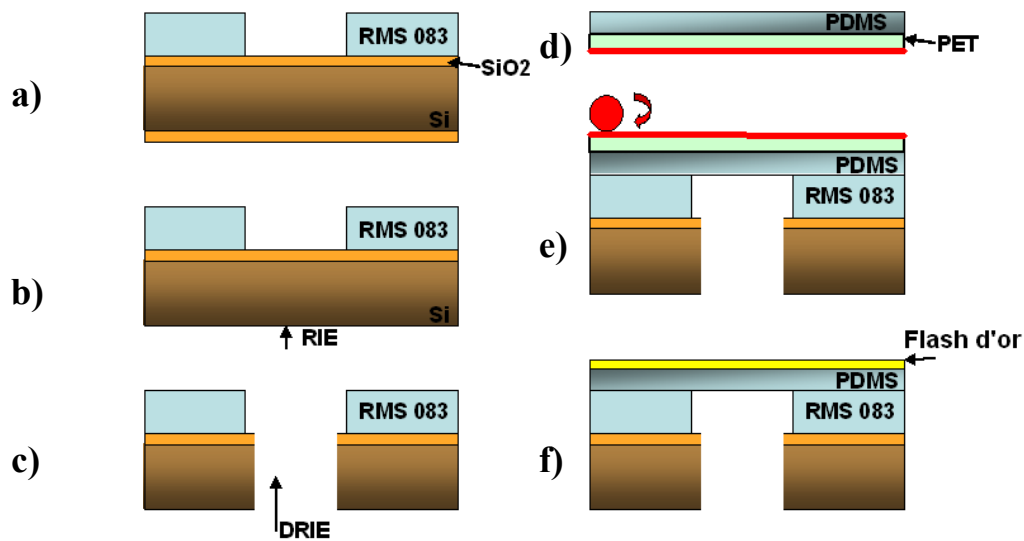


Figure 20. Procédé pour réaliser les échantillons du test d'adhérence entre les matériaux polymères du mur et membrane élastique

La Figure 21 montre des photos de réalisation.

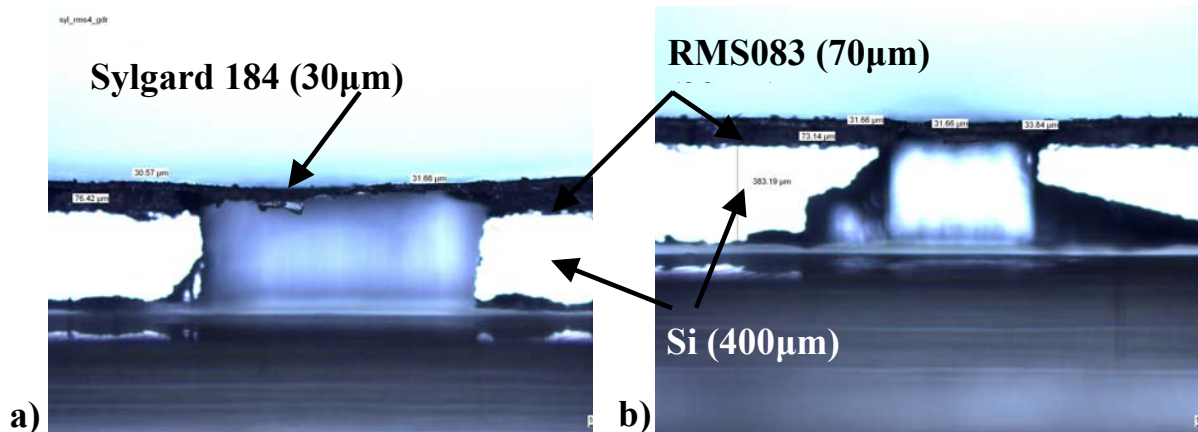


Figure 21. Photos de réalisation. Image en coupe de la structure a) membrane de $1000\mu\text{m}\times 1000\mu\text{m}$. b) membrane de $500\mu\text{m}\times 500\mu\text{m}$.

5.2 Résultats

Nous avons caractérisé l'adhérence de la membrane sur les murs du réservoir en appliquant une surpression sous la membrane et en mesurant la pression à laquelle la membrane se décolle. Deux types d'échantillons ont été caractérisés : (1) des échantillons ayant subi un traitement de surface par plasma et (2) des échantillons sur lesquels le silicone de la membrane a été réticulé partiellement avant report par laminage.

5.2.1 Echantillons traités par plasma

Pour ces échantillons, le mur du réservoir (RMS083) et la membrane élastique (Sylgard 184) sont mis dans un plasma oxygène à 200W pendant 10 secondes, puis la membrane est reportée sur le réservoir par laminage.

Les tests réalisés montrent que les membranes de surface $500\mu\text{m} \times 500\mu\text{m}$ commencent à se décoller à une surpression proche à 0,08MPa et puis les membranes se rompent à une surpression de 0,12MPa. Cette tenue en pression est suffisante pour assurer la vidange de 10nl de liquide dans une canalisation de $20\mu\text{m}$ de diamètre : $\approx 0,065\text{MPa}$, selon le modèle (cf. section 5.2, chapitre II) avec une déformation de la membrane proche de $100\mu\text{m}$. Par contre, elles ne pourront pas supporter la pression maximale (0,14MPa) prévue par le modèle.

Les membranes de $1\text{mm} \times 1\text{mm}$ commencent à se décoller à une surpression proche à 0,047MPa et puis les membranes se rompent à une surpression de 0.062MPa. Cette tenue en pression est suffisante pour assurer la vidange de 100nl de liquide dans une canalisation de $20\mu\text{m}$ de diamètre : $\approx 0,049\text{MPa}$, selon le modèle (section 5.2, chapitre II) avec une déformation de la membrane proche de $233\mu\text{m}$. Par contre, là encore elles ne pourront pas supporter la pression maximale prévue pour cet actionneur par le modèle du chapitre II (0,08MPa).

5.2.2 Echantillons ayant la membrane réticulée partiellement

Pour ces échantillons, le mur du réservoir (RMS083) est soumis à un plasma oxygène pendant 10 secondes à 200W et la membrane élastique (Sylgard 184) est partiellement réticulée en température à 65°C pendant 4 minutes. Après le report de la membrane par laminage, l'ensemble est recuit à 100°C pendant 1 heure pour terminer la réticulation.

Les tests en pression réalisés montrent que les membranes de surface $500\mu\text{m}\times 500\mu\text{m}$ commencent à se décoller à une surpression proche à $0,035\text{MPa}$ et puis les membranes se rompent à une surpression de $0,065\text{MPa}$.

Les membranes de $1\text{mm}\times 1\text{mm}$ commencent à se décoller sous une surpression proche de $0,02\text{MPa}$ et les membranes se rompent sous une surpression de $0,05\text{MPa}$.

5.2.3 Résumé

Traitement de surface	Plasma		Réticulation partielle	
Taille de membrane	$500\mu\text{m}\times 500\mu\text{m}$	$1\text{mm}\times 1\text{mm}$	$500\mu\text{m}\times 500\mu\text{m}$	$1\text{mm}\times 1\text{mm}$
Pression de décollement de la membrane	$0,08\text{MPa}$	$0,047\text{MPa}$	$0,035\text{MPa}$	$0,02\text{MPa}$
Pression de rupture de la membrane	$0,12\text{Mpa}$	$0,062\text{Mpa}$	$0,65\text{Mpa}$	$0,05\text{Mpa}$
Reproductibilité	30%	30%	80%	80%

Tableau 4. Récapitulation des résultats de tenue en pression de la structure multicouche avant intégration

En conclusion, les caractérisations montrent que les échantillons traités sous plasma O_2 ont des comportements non reproductibles. Nous retiendrons donc pour les échantillons finaux la méthode de réticulation partielle même si sa tenue en pression est moins forte par rapport à la méthode par plasma.

C'est un point qui devra être amélioré dans les mois à venir.

6 Test de l'actionneur complet

Pour tester le fonctionnement de l'actionneur PYRACT, Samuel Suhard et moi même assemblons des dispositifs complets. Puis nous appliquons une puissance électrique et nous mesurons la déformation de la membrane élastique par profilométrie optique. A partir de la déformation de la membrane, il est facile de remonter à la pression dans la cavité générée par la décomposition du matériau énergétique parce qu'on a déjà caractérisé le comportement de la membrane sous pression.

Une puissance électrique de 100mW (puissance maximale) est appliquée sur les plateformes chauffantes de surface $1\text{mm}\times 1\text{mm}$ sur lesquelles deux gouttes de matériau énergétique (570ng) ont été déposées. Cette puissance assure que la totalité du matériau énergétique se

décompose. La Figure 23 montre la déformation de la membrane à l'état stationnaire. La déformation maximale mesurée est de $100\mu\text{m}$, permettant la vidange de 40nl d'eau ce qui est très inférieure aux attentes : $227\mu\text{m}$.

Remarque : le rendement de la réaction est de 66%. Ainsi, il faut réduire la surpression calculée dans la cavité de 46kPa à 30kPa (section 5.1.1 du chapitre II). Avec cette correction, nous obtenons donc une déformation maximale théorique de $187\mu\text{m}$, ce qui fait une erreur de 47% (voir Figure 22).

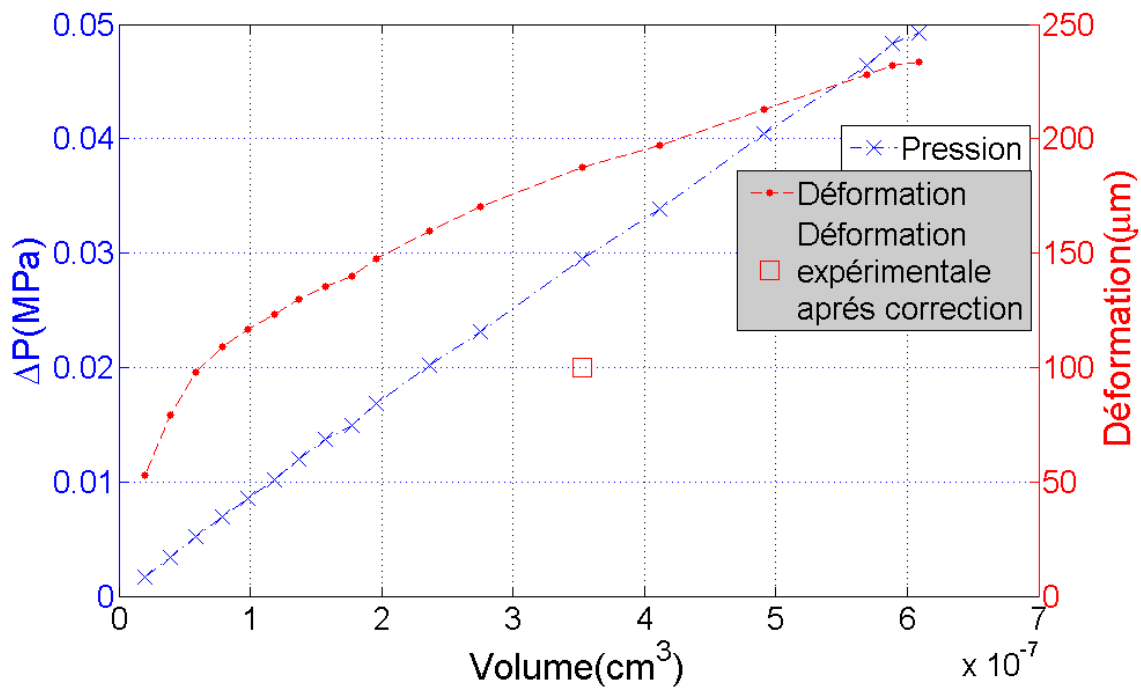


Figure 22. Résultats théoriques de la performance de l'actionneur PYRACT de $1\text{mm} \times 1\text{mm}$ en fonction de la quantité de matériau énergétique déposé. Comparaison avec le résultat expérimental

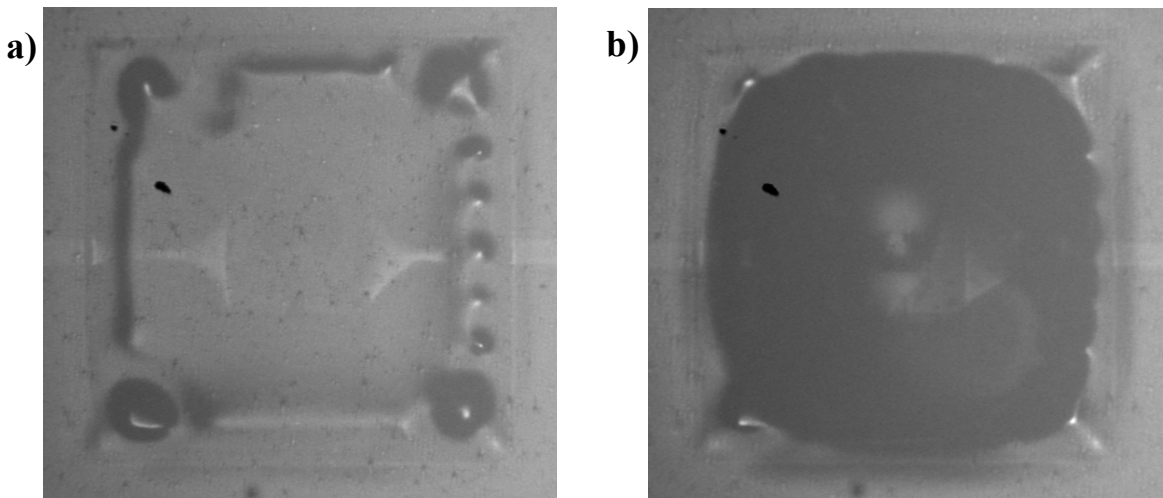


Figure 23. Photos de caractérisation de l'actionneur PYRACT a) membrane de $1\text{mm} \times 1\text{mm}$ avant l'actionnement. b) Membrane de $1\text{mm} \times 1\text{mm}$ après l'actionnement.

Pour l'actionneur de surface $500\mu\text{m} \times 500\mu\text{m}$, trois gouttes (855ng) ont été déposées. Nous appliquons la puissance maximale (90mW) et nous mesurons la déformation de la membrane à l'état stationnaire (cf. Figure 25). La déformation maximale mesurée est de $46\mu\text{m}$ (permettant la vidange de 5nl du liquide), alors que la déformation prévue par le modèle est de $117\mu\text{m}$.

Là encore, en corrigeant la surpression calculée avec un facteur de 0,66, la déformation de la membrane théorique passe à $97\mu\text{m}$, ce qui fait une erreur de 52%. (voir Figure 24)

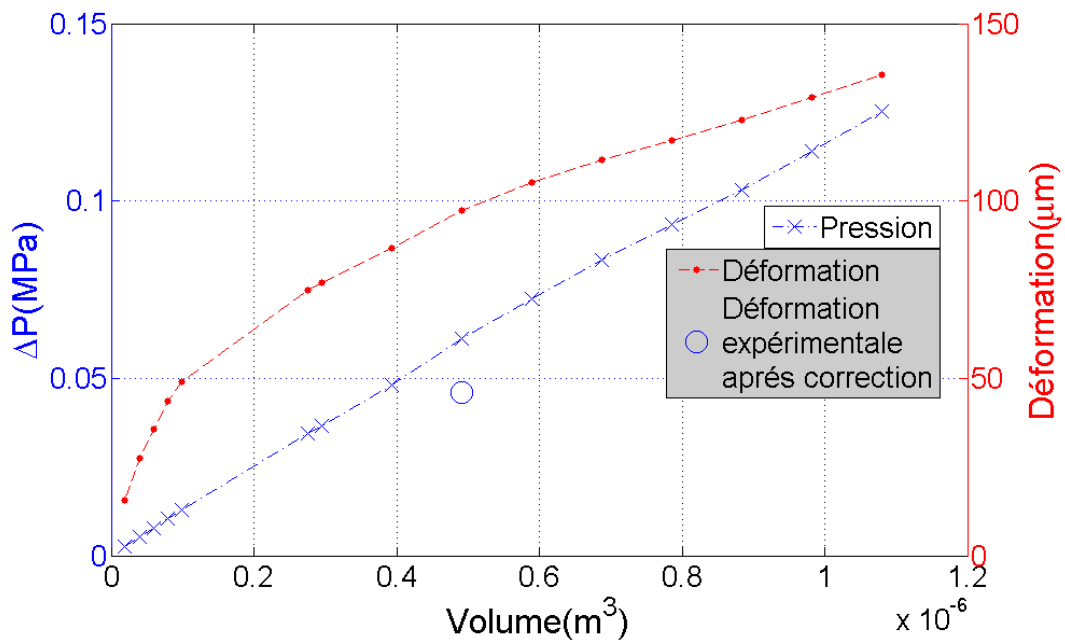


Figure 24. Résultats théoriques de la performance de l'actionneur PYRACT de $500\mu\text{m} \times 500\mu\text{m}$ en fonction de la quantité de matériau énergétique déposé. Comparaison avec le résultat expérimental

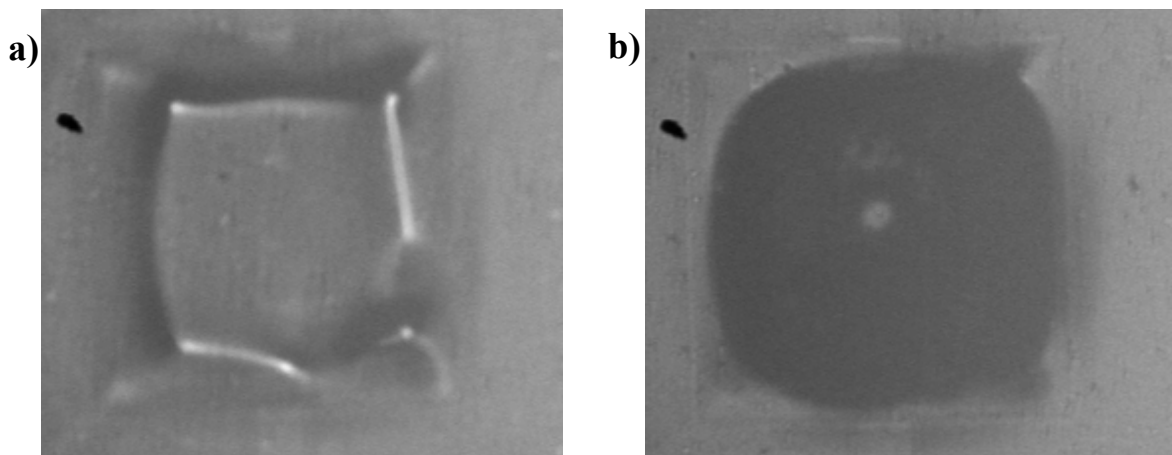


Figure 25. Photos de caractérisation de l'actionneur PYRACT par profilométrie optique a) membrane de $500\mu\text{m} \times 500\mu\text{m}$ avant l'actionnement b) Membrane de $500\mu\text{m} \times 500\mu\text{m}$ après l'actionnement.

* * * *

Lors du test, nous observons aussi le dégonflement rapide de la membrane lorsqu'on arrête le chauffage. Ce qui témoigne de la porosité de la membrane en silicone. C'est un point qui devrait être amélioré avec l'utilisation d'un silicone en cours de mise au point par l'IMRCP moins poreux que le Sylgard 184.

Une remarque :

la mesure par profilométrie optique est une méthode lente : plus de 1 minute pour mesurer une marche de plus de 100 μ m. Nous ne pouvons donc pas observer avec cette méthode les possibles déformations transitoires de la génération du gaz. Par contre, nous pouvons avec ce test démontrer la faisabilité de réalisation et fonctionnement de l'actionneur PYRACT.

7 Conclusions

Ce chapitre a rapporté la caractérisation de chaque partie du dispositif PYRACT:

La plate-forme chauffante : sa bonne tenue mécanique entre 200kPa (pour la membrane de $L=1\text{mm}$) et 400kPa (pour la membrane de $L=500\mu\text{m}$) permet d'assurer un bon fonctionnement dans la gamme de pressions générées par la décomposition du matériau énergétique. Son comportement thermique (température en fonction de la puissance électrique) a été caractérisé par imagerie infrarouge. Ces mesures valident le modèle de conception élaboré dans le chapitre II. Il faut 52mW pour déclencher la décomposition du matériau énergétique et donc l'actionnement.

Le matériau énergétique : sa décomposition a été caractérisée par des analyses TGA et DSC. 66% de matériau énergétique solide se décompose en produisant du O_2 , N_2 et H_2O lorsque la température atteint 223°C. L'enthalpie de décomposition (ΔH) a été mesurée à 333,5J/g. Des tests d'initiation du matériau énergétique sur la plate-forme chauffante ont été réalisés et montrent qu'il faut 52mW pour initier le matériau énergétique sur l'actionneur de $500\mu\text{m} \times 500\mu\text{m}$ et 60mW pour initier le matériau énergétique sur l'actionneur de $1\text{mm} \times 1\text{mm}$.

La membrane élastique : ses caractéristiques mécaniques ont été mesurées par nano indentation et par le « bulge test ». Les résultats sont cohérents avec ceux publiés dans la littérature.

Finalement le dispositif complet a été caractérisé pour valider une bonne tenue en pression de l'assemblage et aussi pour obtenir ses performances d'actionnement : déformation de la membrane élastique en fonction de la puissance électrique appliquée. Les résultats expérimentaux valident le principe d'actionnement à partir du chauffage d'un matériau énergétique. Il y a bien gonflement de la membrane sous l'effet des gaz de décomposition : les déformations obtenues diffèrent néanmoins des prédictions théoriques de 50% environ.

Evidemment les simplifications réalisées dans les modèles peuvent expliquer ces différences entre prédiction et caractérisation. A l'avenir, nous allons affiner nos modèles pour améliorer l'accord des résultats.

D'autre part, la porosité de la membrane élastique en silicone affecte le fonctionnement du dispositif : c'est aussi un aspect qui doit être inclus dans la modélisation. Et dans le même temps, un matériau élastique moins poreux doit être formulé.

Conclusion générale

Le travail développé pendant ces trois années de thèse a porté sur la conception, la simulation et la réalisation d'un microactionneur puissant intégrable dans une canalisation microfluidique de très petite dimension. Il s'agit de répondre aux besoins de miniaturisation, d'intégration poussée et de biocompatibilité requis par les systèmes microfluidiques appliqués au génie biologique et médical et visant des produits portables et jetables.

L'objectif opérationnel est de manipuler de très faibles volumes de fluide (entre 10nl et 100nl). Le microactionneur proposé consiste en une plate-forme chauffante sur laquelle nous déposons une très fine couche de matériau énergétique, le tout étant enfermé par une membrane élastomère très élastique, réalisant l'étanchéité entre le gaz dégagé par le matériau énergétique et le fluide à actionner.

Le principe d'actionnement est très simple : lorsque le matériau énergétique, chauffé par effet Joule atteint la température de décomposition exothermique (225°C), il génère un gaz biocompatible (N_2 , H_2O , O_2) qui fait croître la pression sous la membrane élastique. La déformation de la membrane qui en résulte permet d'actionner le fluide dans une canalisation.

Pour la réalisation de ce travail, nous nous sommes appuyés sur la collaboration et l'expérience de deux laboratoires : le LCC, pour la conception et fabrication du matériau énergétique, et l'IMRCP, pour la conception et mise au point des matériaux polymères. La réalisation de la plate-forme chauffante et l'intégration du dispositif final ont été réalisés dans la centrale de technologie du LAAS.

Notre travail a porté sur trois aspects essentiels :

- D'abord, la conception et le développement de modèles fonctionnels qui prennent en compte les différents phénomènes multiphysiques dans le fonctionnement de l'actionneur, pour obtenir une prédiction réaliste du comportement réel.
- La définition, l'élaboration et la mise en œuvre de nouveaux matériaux : énergétiques et polymères, adaptés à l'obtention d'objets de petites dimensions et compatibles avec les technologies microsystèmes existantes.
- Enfin, l'intégration de ces différents principes et différents matériaux dans un dispositif compact contraint par les exigences d'une filière microfluidique en cours de définition au LAAS.

Dans le premier chapitre, nous avons montré, à partir d'une étude bibliographique sur l'actionnement de fluides dans le domaine de la microfluidique, qu'il n'existe pas de solution unique applicable à toutes les applications microfluidiques. Si on se situe dans le cas d'applications portables et jetables, une exigence forte est la disponibilité d'une option puissante, compacte et peu coûteuse en termes économiques et énergétiques. Une solution émergente a consisté en l'utilisation de la décomposition d'un matériau énergétique particulier, générateur de gaz, actionné par effet Joule. Cette approche permet une réduction importante des niveaux de consommation, de puissance et d'encombrement.

Dans le deuxième chapitre, nous avons développé une démarche complète de conception d'un dispositif original, respectant le cahier de charges des applications. Nous avons retenu deux dimensions d'actionneurs (voir Figure 1) :

- Actionneur 1 : $L = 0,5\text{mm}$, $t = 100\mu\text{m}$, $e = 30\mu\text{m}$
- Actionneur 2 : $L = 1\text{mm}$, $t = 100\mu\text{m}$, $e = 30\mu\text{m}$

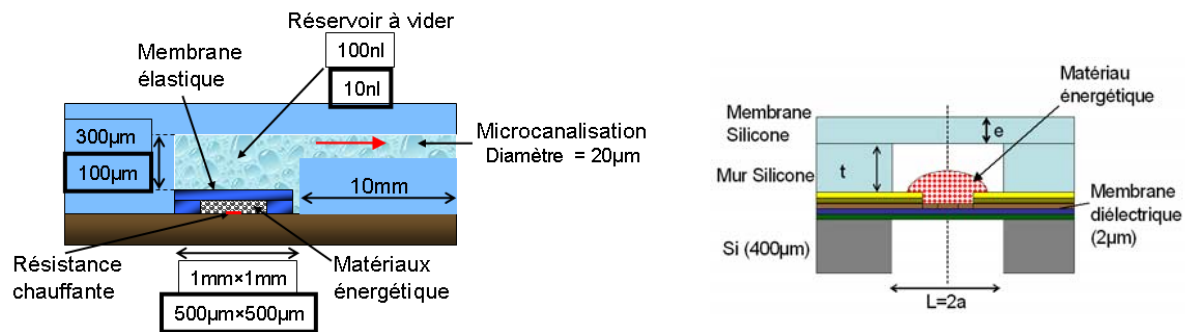


Figure 1. Schéma en coupe de l'éjecteur et de l'actionneur PYRACT

Dans cette étape de conception, nous avons utilisé la modélisation par éléments finis, avec le logiciel COMSOL Multiphysics. Nous avons aussi pu prédire les caractéristiques de l'actionneur en termes de surpression dans la cavité en silicone, et les déformations de la membrane élastique en fonction de la puissance électrique appliquée et de la quantité de matériau énergétique déposée sur la plate-forme chauffante. Nous avons construit un modèle multiphysique indispensable pour prendre en compte les interactions de tous les phénomènes impliqués dans l'actionnement et disposer aussi d'un modèle de conception prédictif réaliste (prototype virtuel).

Nos résultats de simulation indiquent que :

- pour vider 10nl (réservoir de $100\mu\text{m} \times 0,5\text{mm} \times 0,5\text{mm}$) dans une canalisation de $20\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$ en 70ms, il faudra appliquer 75,5mW sur l'actionneur avec $L = 0,5\text{mm}$ et

contenant $8,25 \times 10^{-7} \text{cm}^3$ (855ng) de matériau énergétique (avec l'injecteur par capillaire, il s'agit de 3 gouttes contenant 285ng de matériau énergétique).

- pour vider 100nl (réservoir de $300 \mu\text{m} \times 1 \text{mm} \times 1 \text{mm}$) en 1s, il faudra appliquer 87mW sur l'actionneur avec $L=1 \text{mm}$ et contenant $5,5 \times 10^{-7} \text{cm}^3$ (570ng) de matériau énergétique (l'équivalent à déposer 2 gouttes contenant 285ng de matériau énergétique).

Sont donc disponibles plusieurs modèles multiphysiques décrivant les différents composants de l'actionneur (plate-forme chauffante, membrane élastique), les modèles globaux de fonctionnement (actionneur complet PYRACT et les modèles d'interaction de l'actionneur avec le fluide de la canalisation). Ces modèles et les codes sources (script) feront partie d'une bibliothèque de modèles COMSOL pour la microfluidique et les microactionneurs en général et pourront être récupérés pour s'intégrer à des modèles de systèmes fluidiques plus complexes ou tout simplement, comme exemple de base de modélisation pour les futures générations de microactionneurs fluidiques.

Dans le chapitre trois, nous avons présenté les technologies et les opérations de réalisation de l'actionneur PYRACT :

- préparation et application du matériau énergétique, en respectant les exigences d'adaptation aux très petites dimensions et de la biocompatibilité pour un actionnement pneumatique précis et contrôlable,
- la préparation du polymère pour la réalisation des murs du réservoir, répondant aux exigences de compatibilité avec les technologies microsystemes,
- l'élaboration de membranes élastiques de faibles épaisseurs en adaptant des procédés classiques de laminage,
- l'élément résistif placé sur la plate-forme chauffante, en utilisant des procédés microsystemes sur Silicium déjà mis au point antérieurement.

Ensuite, nous avons mis en œuvre des procédés d'assemblage pour chacune des parties de l'actionneur (la plate-forme chauffante, les murs du réservoir, la membrane élastique et le dépôt du matériau énergétique). Le procédé complet est relativement complexe puisqu'il utilise 6 masques de photolithographie.

Le traitement des surfaces est apparu comme un verrou très important et très délicat à contrôler dans l'intégration technologique de ces éléments. Ainsi, l'accroche du mur du réservoir sur la plate-forme chauffante a fait l'objet des travaux intéressants pour les suppressions visées. Des améliorations potentielles sont proposées pour l'accroche de la membrane élastique sur le mur du réservoir, en même temps que des améliorations du procédé de dépôt du matériau énergétique.

Le pourcentage de réussite de fabrication des plates-formes chauffantes est de 95%, l'assemblage de chaque élément constitutif fait décroître le pourcentage de réussite du dispositif final à 80%, après la fabrication des murs du réservoir et libération des membranes diélectriques, à 60% après dépôt du matériau énergétique due à la méthode utilisée qui n'est pas collective (injection pneumatique par capillaire) et finalement à 50% après laminage de la membrane élastique.

Pour améliorer ces rendements, des améliorations sont proposées notamment concernant le dépôt précis et reproductible du matériau énergétique (méthode de jet d'encre), la compatibilité d'élaboration du mur des réservoirs avec l'étape de libération des membranes diélectriques (DRIE) et finalement le traitement de surface pour améliorer l'adhérence entre la membrane élastique et les murs du réservoir.

L'étape suivante et finale du projet PYRACT sera l'intégration de ces microactionneurs dans des canalisations microfluidiques pour définir une filière opérationnelle de fabrication de systèmes.

Le chapitre quatre pour objectif la validation expérimentale de chaque élément constitutif de l'actionneur PYRACT :

- la plate-forme chauffante. Sa tenue mécanique et son fonctionnement thermique sont parfaitement comparables aux modèles de conception.
- Le matériau énergétique, montre un comportement de décomposition satisfaisant pour générer les niveaux d'actionnement visés à faible puissance électrique.
- La faisabilité de la membrane élastique est démontrée, avec des propriétés mécaniques qui remplissent les spécifications de forte déformation pour une faible pression appliquée.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous avons validé la bonne tenue mécanique (adhérence entre différents matériaux de la structure), avec des résultats très satisfaisants pour les niveaux de pression requis par les spécifications. Ces premiers résultats pourront être améliorés pour avoir une adhérence plus reproductible et homogène notamment entre la membrane élastique et les murs du réservoir.

Dans la dernière partie du chapitre, nous avons commencé de valider le fonctionnement global du prototype d'actionneur PYRACT, en mesurant la déformation de la membrane élastique, en fonction de la puissance appliquée sur la plate-forme chauffante, nous trouvons :

- pour l'actionneur avec $L=1\text{mm}$ et une puissance électrique de 100mW, une déformation maximale de 100 μm est mesurée correspondant à un volume de fluide vidangé de 44nl.

- Pour l'actionneur avec $L=500\mu\text{m}$ et une puissance électrique de 90mW une déformation maximale de $46\mu\text{m}$ est mesurée correspondant à un volume de fluide vidangé de 5nl.

Ces caractérisations montrent la faisabilité du concept, l'élaboration et fonctionnement. Par contre ces premiers résultats sont cohérents avec la modélisation à mieux que 50%. L'écart est dû principalement à trois aspects :

- des simplifications réalisées dans la modélisation, notamment sur la décomposition du matériau énergétique (décomposition du matériau à 100% et modèle 2D). Des améliorations de ces modèles sont encore possibles pour les rendre encore plus fiables et réalistes.
- Un autre aspect essentiel que conditionne le bon fonctionnement du dispositif est la porosité de la membrane élastique. Pour la suite du projet et pour avoir un actionneur plus performant, une nouvelle formulation d'un matériau élastique moins poreux doit être trouvée.
- La méthode de caractérisation (profilométrie optique) n'est pas adaptée pour mesurer les fortes déformations transitoires du prototype final qui ne sont pas conservées due à la porosité de la membrane. Une autre méthode de mesure doit être trouvée pour caractériser cette déformation initiale dans l'étape suivante du projet PYRACT.

L'ensemble des travaux que nous avons présentés répondent à la problématique d'un dispositif microfluidique portable et jetable, qui consomme peu d'énergie avec des caractéristiques d'une forte puissance d'actionnement. Un premier prototype a été réalisé qui démontre la faisabilité du concept. Néanmoins des améliorations sont à envisager sur deux axes :

- la modélisation, en développant des modèles encore plus réalistes concernant notamment la décomposition partielle du matériau énergétique (résidus post-décomposition), puis la modélisation 3D de l'actionneur pour corriger les possibles simplifications du modèle 2D.
- L'intégration technologique, notamment concernant l'étape du dépôt du matériau énergétique, en passant d'une technologie « manuelle » vers une injection complètement automatisée par « jet d'encre ».

La formulation et intégration d'un matériau élastique moins poreux que le Sylgard 184 mais qui conserve les bonnes propriétés élastiques de ce dernier.

Nous montrons dans ce travail la faisabilité d'actionneurs miniaturisés et puissants pour la microfluidique, avec un besoin énergétique d'initiation très faible, en définissant une intégration hétérogène dont nous avons résolu les principaux verrous technologiques. Au niveau conception, nous laissons une première bibliothèque des modèles multiphysiques comprenant les différents éléments constitutifs de l'actionneur et toutes les interactions physiques mises en jeu : en l'état, nous avons une prédiction efficace des performances avant la réalisation technologique des éléments composant l'actionneur PYRACT, par contre des améliorations sont envisageables sur le modèle global de l'actionneur.

Pour les prochaines études consacrées à l'actionnement fluide, il conviendra de parfaire nos solutions, mais l'étape essentielle à venir est la mise en œuvre de ce type d'actionneurs sur des biopuces et laboratoires sur puces comportant tout les autres fonctionnalités utiles de test et de diagnostic.

ANNEXES

ANNEXE A : Tableau comparatif des technologies d'actionnement pour la microfluidique

Type d'actionnement/référence	Volume approx. (mm ³)	Déformation membrane (mm)	surface membrane ou de l'actionneur approx. (mm ²)	Back pressure/ (pression générée) (Pa)	Débit (ml/min)	Tension appliquée (V)	Puissance appliquée (W)	Volume déplacé monocoup (ul)	Dimensions canalisation Large(L)xHauteur (H)xLong (l)
Piezoelectriques:									
[45] Van Lintel et al, 1988	4100	----	156,25	24k	0,0006	125	-----	0,21	-----
[46] Andersson et al, 2001	0,848	----	28,27	----	0,0023	97	-----	-----	-----
[47] Schabmueller et al 2002	120	0,006	32	1k	1,5	190	-----	-----	3mm (L)
[48] Micropumps Data Sheet www.thinxs.co	2634	----	507	55k	9,2	5	0,25	-----	1mm (L)
[49] Li al 2000	3300	0,008	10,18	304k	3	1200			
Electrostatique:									
[51] Zengerle al, 1995	98	0,05	2,89	29k	0,16	200			
[52] Richter et al, 1998	-----	-----	-----	-----	0,26	-----	-----	0,085	-----
[54] Xie et al, 2004	0,0012	-----	0,031	1,6k	0,0017	140	-----	-----	100umx5umx24mm
Electromagnetique:									
[55] Dario et al, 1996	2500	0,5	254,46	5,5k	0,78	14			
[56] Bohm et al, 1999	1000	0,75	100	10k (5k)	2,1	5			
[57] Gorbounov et al, 2003	-----	0,2	36	-----	-----	6	-----	0,002-0,04	
Pneumatique:									
[83] Unger et al, 2000	0,0005	-----	0,05	(100k - externe)	0,00014	-----	-----	-----	100umx10um (LxH)
[85] Meng et al, 2000	19,6	-----	49	5,9k	3,5	-----	-----	-----	-----
[86] Grover et al, 2003	0,0003	-----	118,85	75k (40k externe)	0,0156	-----	-----	-----	40-300um (L)
[87] Berg et al, 2003	-----	-----	21,2	138k (externe)	0,006		-----	-----	100um (L)

Type d'actionnement/référence	Volume approx. (mm ³)	Déformation membrane (mm)	surface membrane ou de l'actionneur approx. (mm ²)	Back pressure/ (pression générée) (Pa)	Débit (ml/min)	Tension appliquée (V)	Puissance appliquée (W)	Volume déplacé monocoup (ul)	Dimensions canalisation Large(L)xHauteur (H)xLong (l)
Thermopneumatique:									
[58] Jeong et al, 2000	7,36	0,1	16	-----	0,014	8	-----	-----	700umx200umx18mm
[60] Wego et al, 2001	780	0,35	78,54	12k (10k)			1	10	-----
[61] Yoon et al, 2001	72	----	----	0,1k	0,006	10	----	----	
[62] Tsai et al, 2002	----	----	0,7854	(0,38k)	0,0045	20	0,5	----	300um (L)
[63] Zimmermann et al, 2004	----	----	----	(16k)	0,009	20	0,18	----	250um (L)
[64] Yoo et al, 2005	8,37	----	9,62	----	0,00157	60	0,1		
[59] Grosjean et al, 2002	8,1	0,218	15,64	----	0,0017	2	0,31	----	125umx40um (LxH)
Alliages à mémoire de forme:									
[65] Makino et al, 2001	280	0,09	25	(100k - externe)	0,0048	----	16	0,4	500um (L)
[66] Benard et al, 1998	560	0,08	135	(0,52k)	0,05	0,5	0,63	----	----
Réservoir de gaz:									
[88] Hong et al, 2002	----	----	----	22,7k	----	0,7	80uWh		
[89] Hong et al, 2007	0,021		7,56	(27,8k)	----	0,2	0,04		
Changement de phase:									
[90] Boden et al, 2005	750	----	3,14	----	0,000074	2			
[91] Cooney et al, 2004	1,3	3	3848,46	(45k)	0,0014	9	0,2		75-100um (L)
[92] Roxhed et al, 2004	14,31	----	70,88	----			0,85	101	
[93] Samel et al, 2007	----	----	9	100k	0,0009	1,5	0,85	0,024	----
Matériau énergétique:									
[99] Norton and Minor, 2006	0,0075	----	1,825	(500k)	----		6500		
[100] Hong et al, 2003	----	----	6,25	(3,5k)	----	0,5	180mW-sec		100umx50umx70mm
[101] Han et al, 2006	7,69	----	4	(6,5k)	----	----	5,16		
Divers:									
[96] Choi et al, 2004	----	----	4	(10k)	0,3	9			
[95] Ramirez-Garcia et al, 2007	0,6	0,05	180	2,5k	0,096	3	0,069		

Type d'actionnement/référence	Volume approx. (mm ³)	Déformation membrane (mm)	surface membrane ou de l'actionneur approx. (mm ²)	Back pressure/ (pression générée) (Pa)	Débit (ml/min)	Tension appliquée (V)	Puissance appliquée (W)	Volume déplacé monocoup (ul)	Dimensions canalisation Large(L)xHauteur (H)xLong (l)
Onde acoustique									
[51] Luginbuhl et al, 1997	0,032		16		0,000255	6	----	----	500umx9cm (Lxl)
EHD									
[67] Fuhret et al, 1994	----	----	0,15	----	0,002	40	----	----	
[68] Richter et al, 1991	10	----	----	0,43k	14	600	----	----	
[69] Ahn et al, 1998	----	----	----	0,25k	0,04	100	----	----	3mmx100umx30mm
[70] Darabi et al, 2001	----	----	250	(0,25k)	----	150	----	----	----
[71] Darabi et al, 2002	640	----	608	(0,7k)	----	300	----	----	3mmx200um (Lxl)
MHD									
[72] Jang et al, 2000	48	----	120	(0,17k)	0,063	60	----	----	2mm (L)
[73] Lemoff et al, 2000							----	----	800umx20mm (Lxl)
Electroosmose									
[76] Yao et al, 2003			192	(130k)	33	100	----	----	----
[74] Zeng et al, 2001	----	----	28,6	(2000k)	0,0036	2000	----	----	500um (L)
[75] Takamura et al, 2001	----	----	----	5k		40	----	----	
[77] Yairi et al, 2007		----	100	(550k)	500	100	----	----	1umx1umx30um
Capillarité									
[80] Yun et al, 2002	----	----	94,08	(0,8k)	0,07	2,3	0,00017	0,21	----
[78] Jun et al, 1998	----	----		(0,8k)	5,00E-07	24	0,058		4um (L)
[79] Darhuber et al, 2003	20,16	----	28,8	----	----	5,7	0,027	----	----
[81] Lee et al, 2000	----	----	8	----	----	2,8	0,0001		500umx100umx2mm
[82] Lee et al, 2002	----	----	2000	(3,5k)	----	1		0,005-0,05	400umx10um (LxH)

ANNEXE B : Modélisation de l'actionneur PYRACT de taille 1mm×1mm

L'objectif de cette annexe est de donner plus de détail sur les modèles de conception de l'actionneur PYRACT avec une membrane diélectrique de 1mm×1mm. Nous allons reprendre chaque élément constitutif de l'actionneur : la plate-forme chauffante, la membrane élastique, le modèle de décomposition du matériau énergétique, et le modèle de l'éjecteur complet avec interaction avec le fluide à l'intérieur de la canalisation. Les modèles mathématiques, géométries et les conditions aux limites sont les mêmes que celles de l'actionneur de taille 500µm×500µm présenté dans le chapitre II. Nous allons présenter dans cette annexe l'optimisation du maillage et les résultats obtenus pour cette taille d'actionneur.

1 La plate-forme chauffante

1.1 Implémentation et maillage

Une image d'un quart de la structure de la plate-forme chauffante est montrée dans la Figure 1. La température sur la plate-forme est donnée en état stationnaire pour les conditions suivantes :

Tension appliquée : 7V

Puissance électrique : 91mW

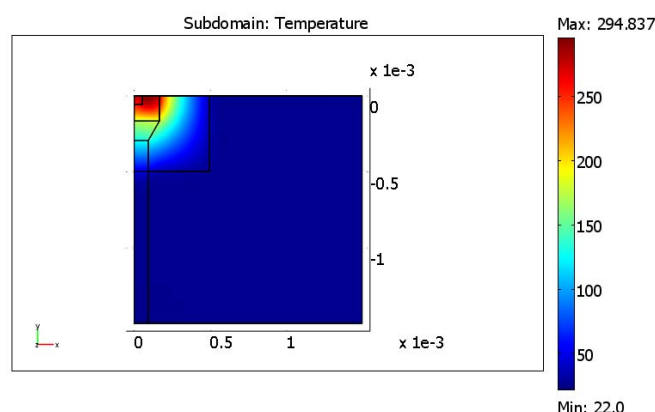


Figure 1. Distribution de température pour une plate-forme chauffante avec une membrane diélectrique de 1mm×1mm

La Figure 2 illustre la procédure d'optimisation pour la plate-forme chauffante avec comme condition une tension électrique de 7V. La température maximale sur la résistance et le temps de simulation sont comparés à chaque étape de raffinement de maillage.

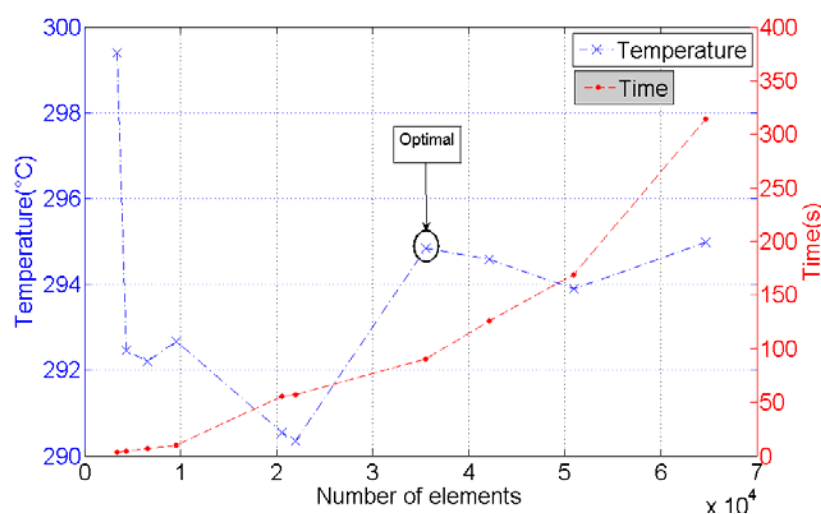


Figure 2. Procédure d'optimisation pour le modèle de la plate-forme chauffante

Pour la plate-forme chauffante, le maillage optimal compte 35534 éléments tétraédriques et prismes.

1.1.1 Résultats et validation expérimentale

Un modèle multiphysique tenant compte de l'effet de la température sur la conductivité électrique du polysilicium est réalisé, les résultats de simulation pour la température maximale sont comparés à ceux obtenus par expérimentation IR comme est illustré dans les Figure 3 et 4.

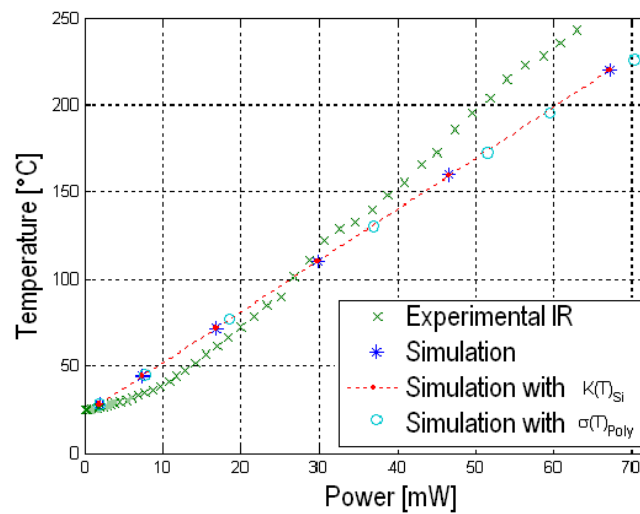


Figure 3. Température maximale sur la plate-forme chauffante en fonction de la puissance électrique

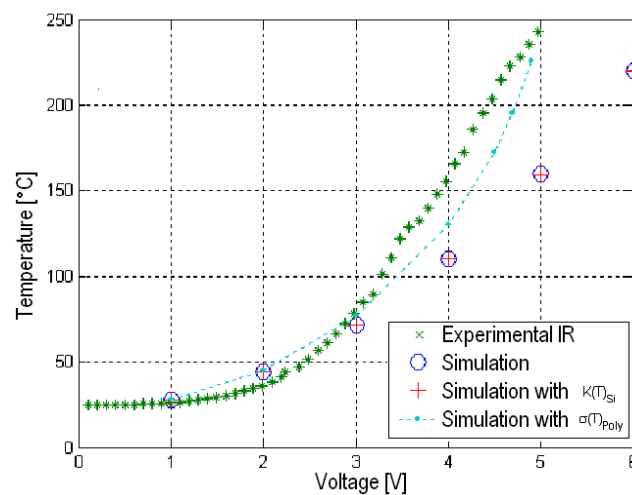


Figure 4. Température maximale sur la plate-forme chauffante en fonction de la tension électrique

2 L'expansion de la membrane élastique

2.1 Implémentation et maillage

Une image d'un quart de la structure pour la structure de la membrane élastique est montrée dans la Figure 5. Les paramètres considérés pour le matériau silicone (Sylgard 184) sont : $E=4\text{MPa}$; $\nu=0,48$; $\sigma_o=0$. La déformation (w) de la membrane est donnée en état stationnaire pour la condition suivante : pression appliquée sous la membrane = 0.04MPa

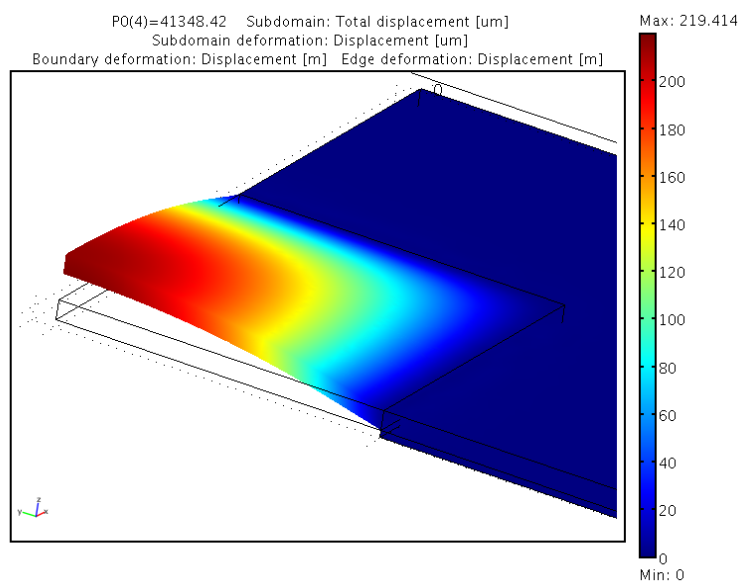


Figure 5. Déformation de la membrane élastique de 1mm×1mm avec une épaisseur de 30µm

Le procédé d'optimisation de maillage en regardant la déformation maximale au centre de la membrane est montré sur la Figure 6. Le maillage optimal comporte 7264 éléments tétraédriques.

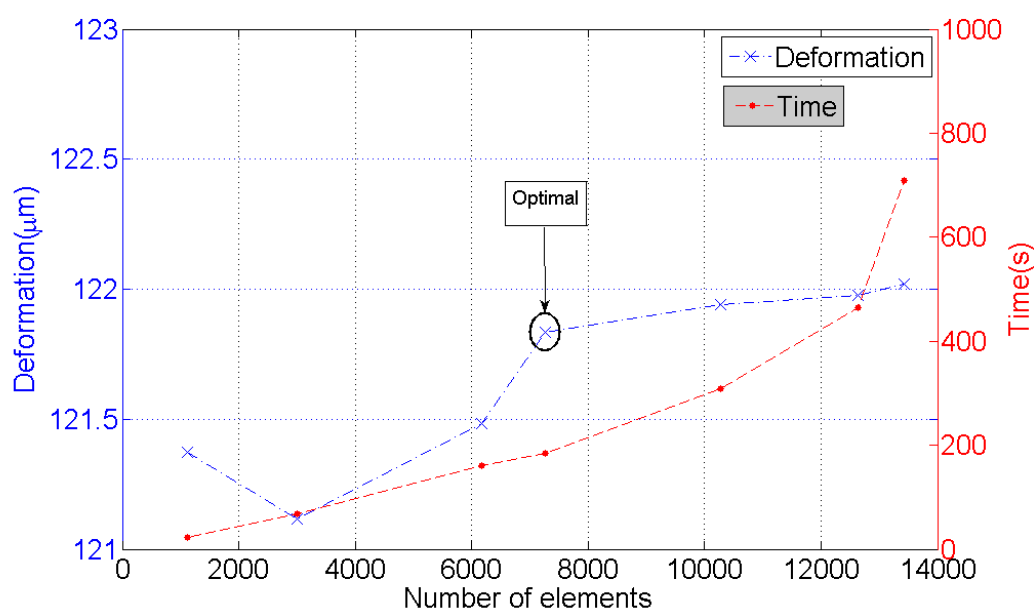


Figure 6. Procédure d'optimisation pour le modèle de la membrane élastique

2.2 Résultats de simulation

La Figure 7 montre les résultats de simulation pour la déformation maximale de la membrane en fonction de la pression. Pour l'expérimentation, on a été limité par le système de mesure (profilomètre optique) et la résolution de la pression du gaz (N_2) appliquée sous la membrane.

Ainsi les déformations maximales mesurables sont de $150\mu\text{m}$. Nous pouvons néanmoins observer un bon accord entre le modèle et l'expérimentation.

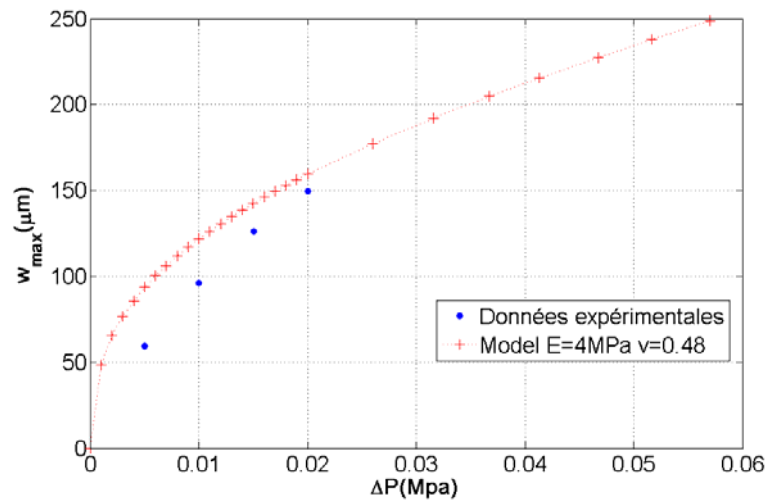


Figure 7. Comparaison entre expérimentation et modélisation pour la déformation maximale de la membrane élastique

3 La décomposition du matériau énergétique et expansion du gaz généré

3.1 Implémentation et maillage

Une image de la structure axisymétrique pour ce modèle est illustrée dans la Figure 8. Le procédé d'optimisation du maillage pour la concentration finale dans la cavité et le temps de simulation en fonction du nombre d'éléments est donné pour une puissance électrique appliquée de 79mW dans la Figure 9. Le maillage optimal comporte 22176 éléments de géométrie triangulaire.

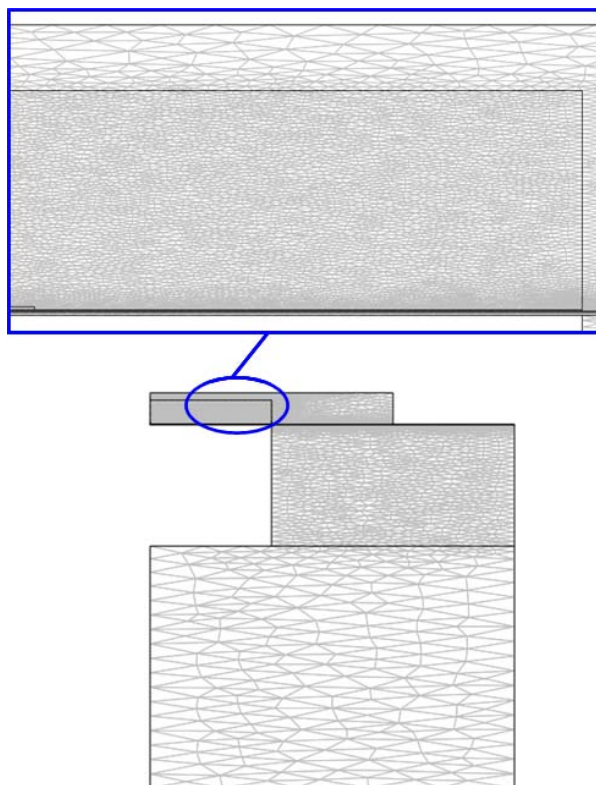


Figure 8. Maillage du modèle 2D axisymétrique pour la génération de gaz en incluant le modèle électrothermique.

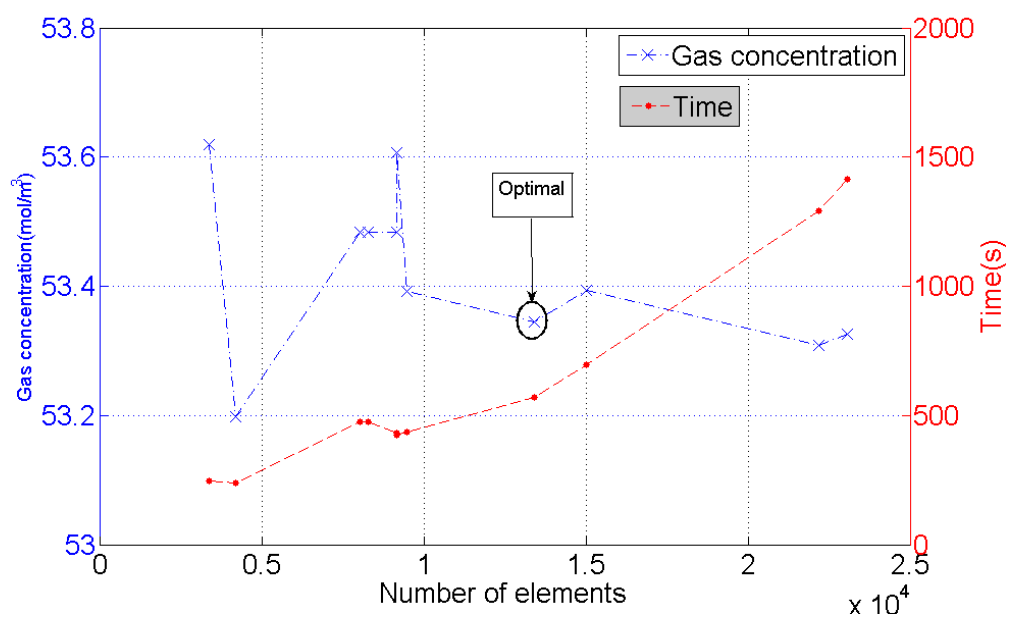


Figure 9. Procédure d'optimisation pour le modèle axisymétrique de l'actionneur
Résultats et validation expérimentale

3.2 Résultats de simulation

Comme dans le cas de l'actionneur avec une membrane de $500\mu\text{m} \times 500\mu\text{m}$. Nous avons observé l'évolution de la pression, la température et la concentration du gaz dans un point de la cavité au niveau de la membrane : le point d'observation de la Figure 10.

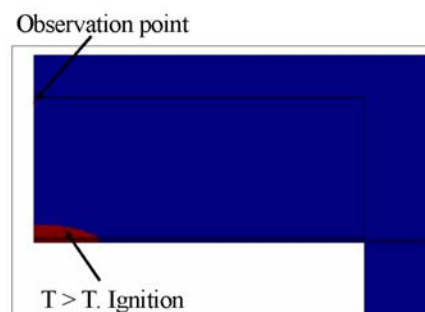


Figure 10. Schéma du modèle et positionnement du point d'observation dans la cavité.

En ce point, la Figure 11 montre l'évolution très rapide (5ms par rapport au 2ms de l'actionneur de $500\mu\text{m} \times 500\mu\text{m}$) de la concentration du gaz jusqu'à l'état stationnaire dans la cavité correspondante à une concentration de $49,8 \text{ mol/m}^3$.

Il y a un pic lors de la décomposition du matériau énergétique à $162,2 \text{ mol/m}^3$. Le premier palier (0 à 0,2ms) correspond au temps de diffusion du gaz issu du matériau énergétique au point d'observation.

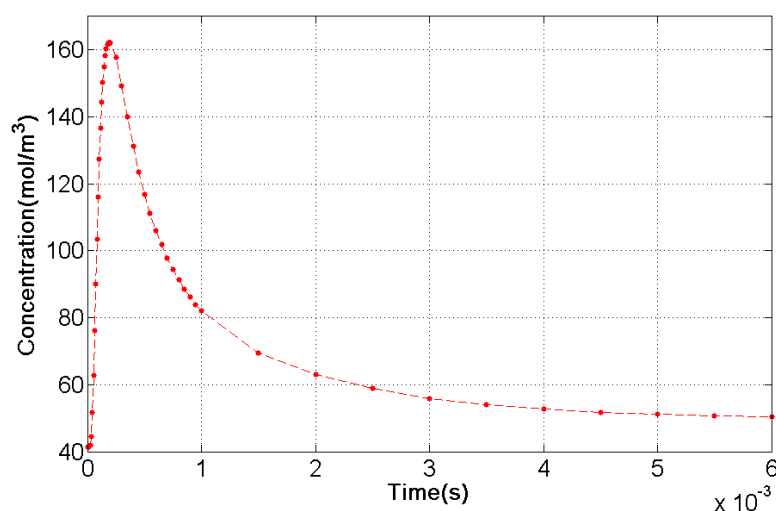


Figure 11. Evolution de la concentration du gaz sur le point d'observation sous la membrane élastique

La Figure 12 montre l'évolution de la température au point d'observation de la cavité après arrêt de l'alimentation en tension : il faut 3,6s pour arriver à l'état stationnaire (température ambiante).

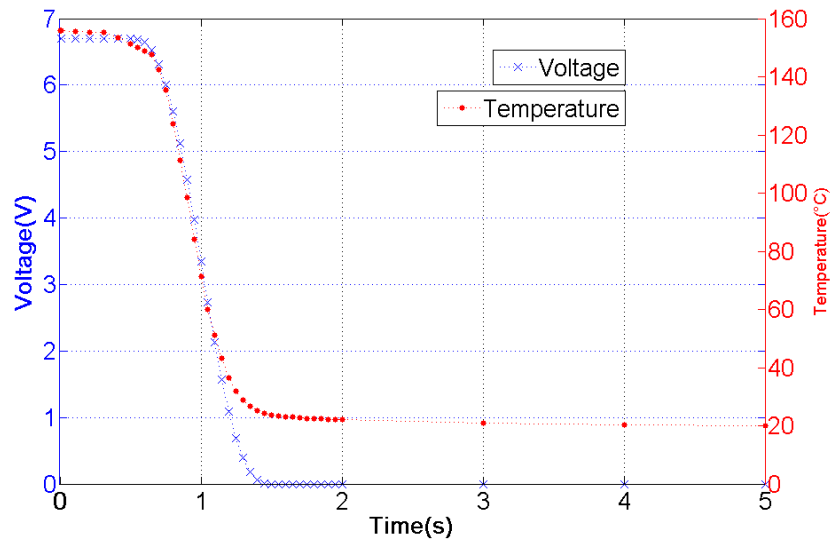


Figure 12. Evolution de la température du gaz sur le point d'observation sous la membrane élastique

La Figure 13 montre l'évolution de la pression au niveau du point d'observation après arrêt de l'alimentation en tension. Après un pic de pression lié à la génération brutale du gaz lorsque $T_s = T_i$, la pression passe de 0,076MPa à 0,02MPa (état stationnaire) en 1,3s.

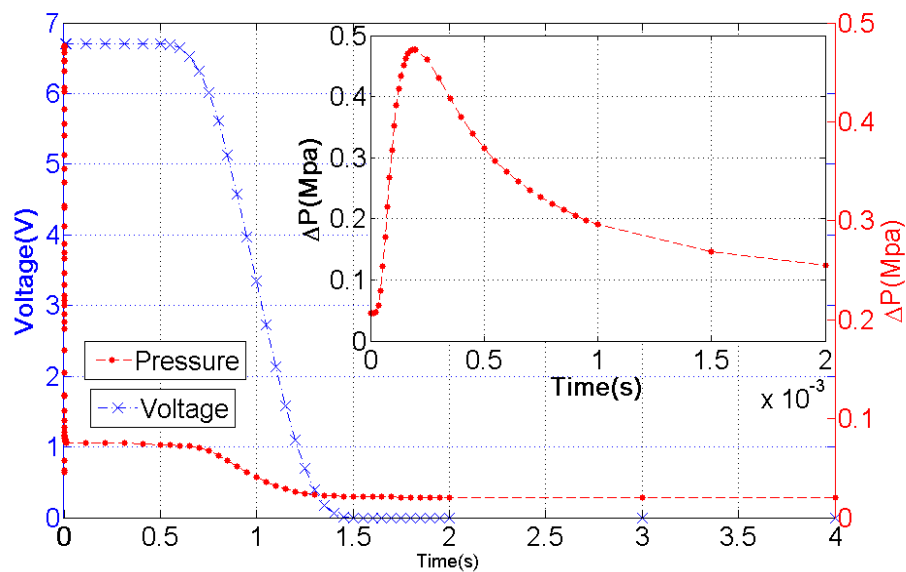


Figure 13. Evolution de la pression du gaz sur le point d'observation sous la membrane élastique

4 Modèle de l'éjecteur complet

4.1 Implémentation et maillage

La géométrie 2D de l'éjecteur est montrée dans la Figure 14 avec les paramètres géométriques suivants :

- Membrane plate-forme : $L=1\text{mm}$
- Epaisseur membrane élastique: $e=30\mu\text{m}$
- Epaisseur mur réservoir : $t=300\mu\text{m}$
- Diamètre canalisation : $20\mu\text{m}$
- Longueur canalisation : 10mm

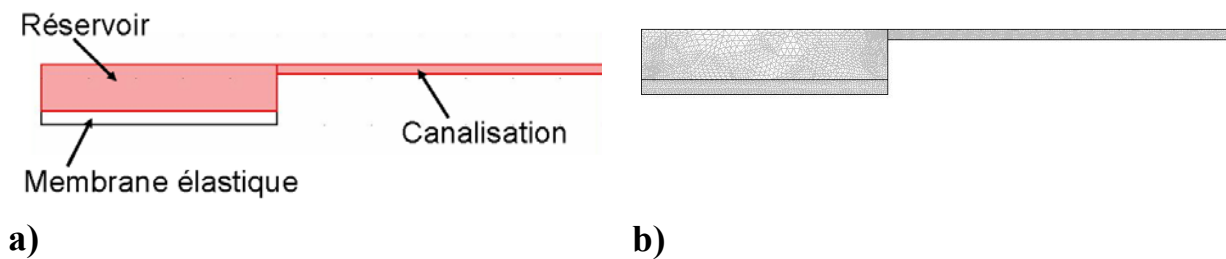


Figure 14. a) Géométrie du modèle d'interaction fluide-structure, b) maillage de la structure

Les résultats de l'optimisation du maillage sont montrés dans la Figure 15, le maillage optimal contient 6046 éléments de géométrie triangulaire (voir Figure 14b).

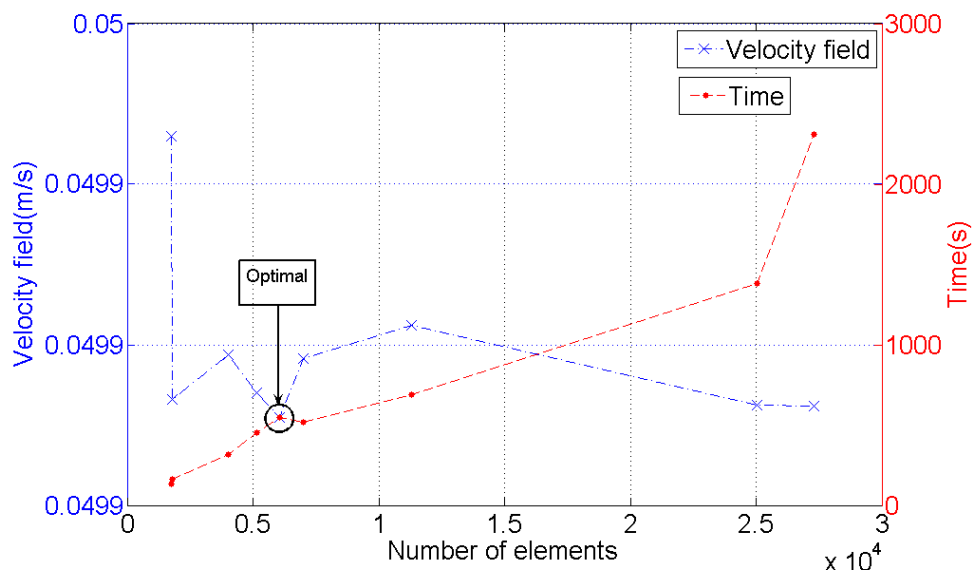


Figure 15. Procédure d'optimisation pour le modèle d'interaction fluide-structure pour l'actionneur de $L=1\text{mm}$

4.2 Résultats de simulation

Le profil de surpression appliqué sous la membrane est montré dans la Figure 16.

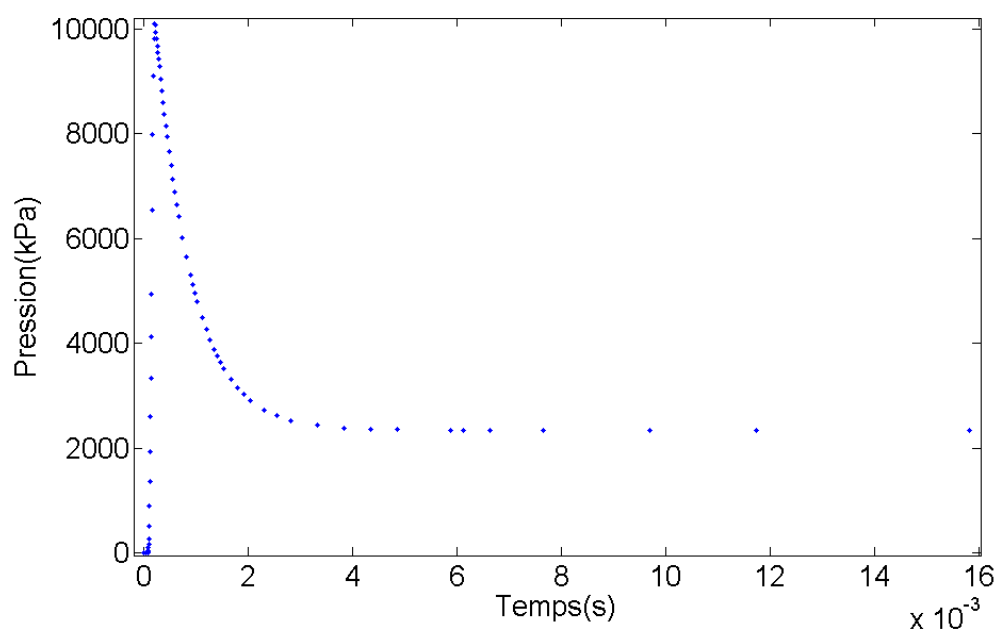


Figure 16. Profil de surpression appliqué sur la membrane de 1mm de côté.

Comme dans le cas de la membrane de $L=500\mu\text{m}$, le comportement de l'eau est de type laminaire comme le montre la Figure 17 à l'intérieur de la canalisation (nombre de Reynolds de 0,47 maximum).

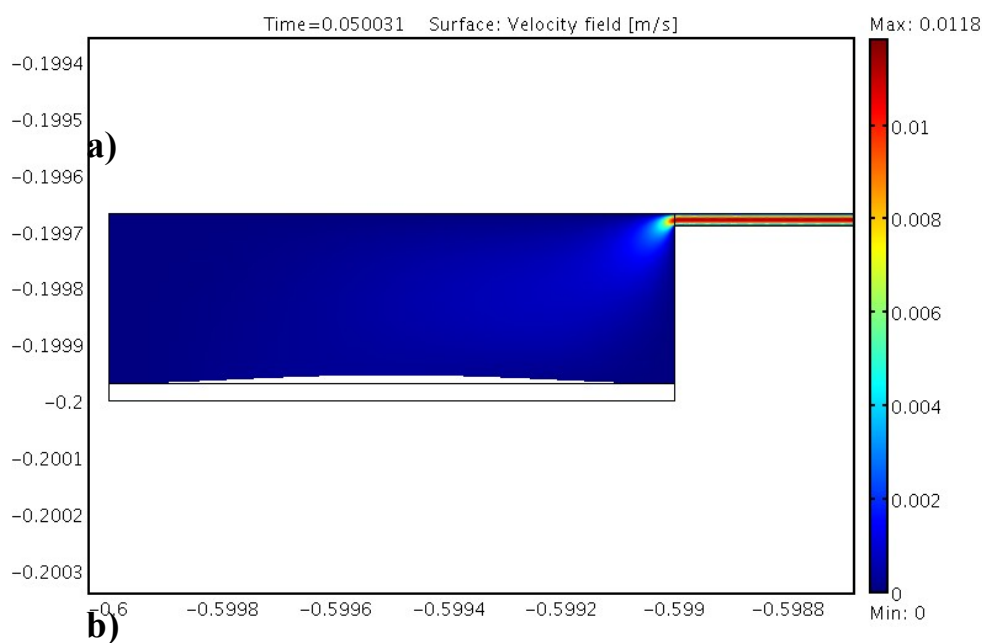


Figure 17. a) Profil de vitesse dans la canalisation

La Figure 18 donne la dynamique lente de déformation par rapport à la génération rapide de surpression à partir de la décomposition du matériau énergétique de la membrane soumise à la surpression générée par la décomposition du matériau énergétique.

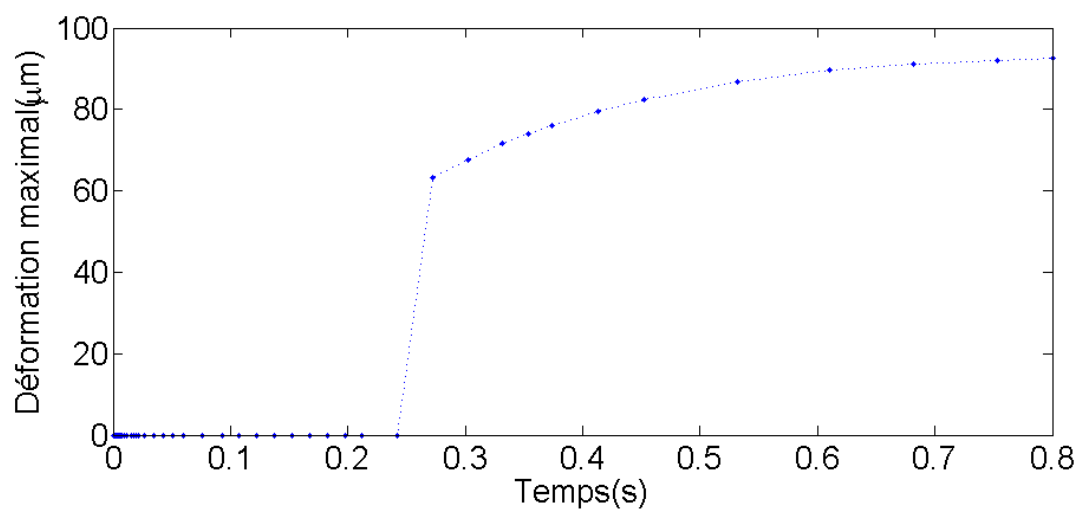


Figure 18. Dynamique de la déformation maximale de la membrane élastique

Le débit moyen obtenu par intégration de la vitesse sur la section de la canalisation (Figure 19) permet de calculer que le volume de 100nl est vidangé en 1s, soit : 5 fois moins du temps, que celui prévu par un débit constant à partir du calcul de Poiseuille (voir chapitre II).

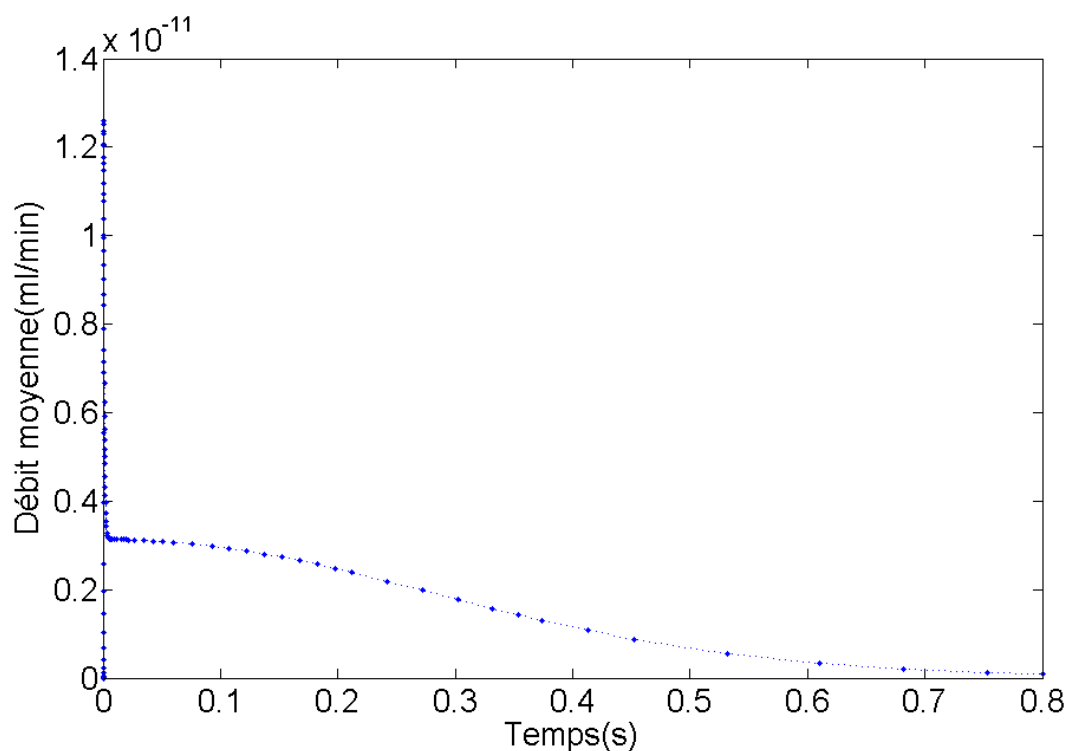


Figure 19. Débit moyen à l'intérieur de la canalisation

ANNEXE C : Caractérisation électrique de la plate-forme chauffante

Cette annexe concerne la caractérisation thermo-électrique de la plate-forme chauffante.

Pour perfectionner le modèle théorique de la plate-forme chauffante (section 4.3 chapitre II), nous devons considérer la variation de la résistivité du polysilicium en fonction de la température. Pour cela nous utilisons une étuve pour chauffer l'élément résistif et nous mesurons la variation de la résistance avec un multimètre numérique. La température juste sur la résistance est mesurée par un thermocouple type K (voir Figure 20).

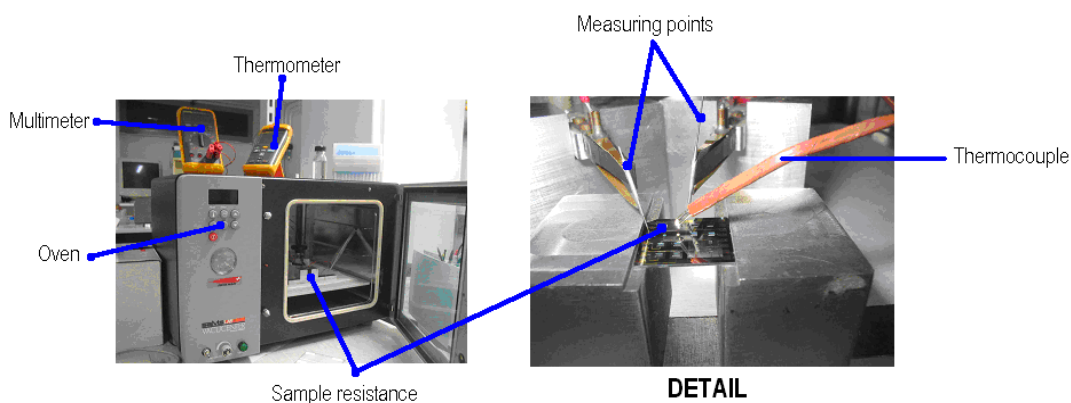


Figure 20. Image du montage pour mesurer la variation de la résistivité du polysilicium en fonction de la température

Plusieurs facteurs d'erreur doivent être considérés. L'étuve a une dynamique très lente, nous devons donc attendre un temps suffisant pour avoir une température homogène à l'intérieur. Ainsi la température mesurée est celle du polysilicium.

La gamme de température explorée est de 21°C à 80°C, au-delà, les fils n'étant pas prévus pour les hautes températures risquent de s'abîmer. Pour les températures supérieures à 80°C, nous avons extrapolé la courbe.

La courbe de variation d'une résistance en polysilicium en fonction de la température est montrée dans Figure 21. A partir de cette mesure, l'expression de la conductivité en fonction de la température peut être calculée comme suit :

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

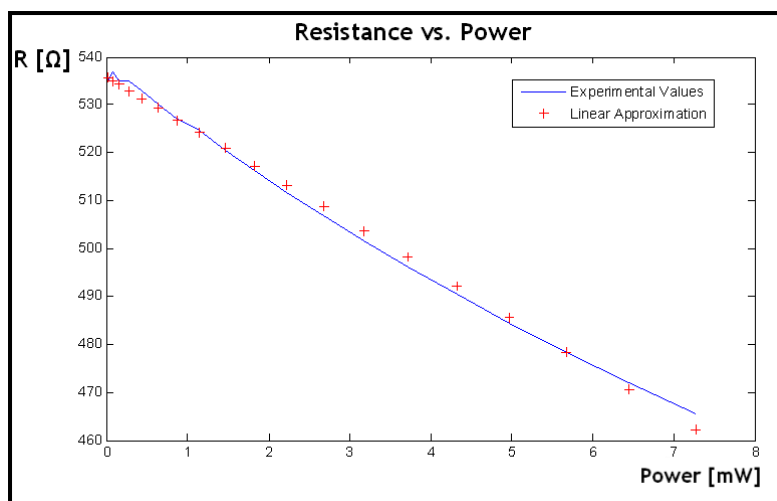


Figure 21. Variation mesuré de la variation de la résistance en polysilicium en fonction de la température

ANNEXE D : Script des modèles COMSOL de l'actionneur PYRACT

Dans cette annexe nous présentons les scripts des modèles de conception globaux de l'actionneur PYRACT développés sous COMSOL. Ces scripts peuvent être utilisés pour réaliser l'optimisation de différents paramètres du dispositif ou peuvent être utilisés comme sous-systèmes de systèmes plus complexes par exemple.

Nous commençons par décrire deux modèles individuels : celui de la plate-forme chauffante et celui de la membrane élastique.

Puis nous présenterons deux modèles de fonctionnement globaux du dispositif : l'actionneur PYRACT et le modèle de l'éjecteur complet avec l'interaction fluide-structure.

1 Plate-forme chauffante

Le diagramme de la Figure 22 illustre les différents paramètres du modèle.

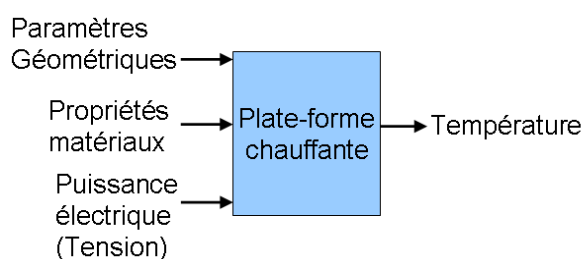


Figure 22. Diagramme de la plate-forme chauffante

1.2 Paramètres d'entrée

Comme paramètres d'entrée nous avons d'abord les paramètres géométriques de la plate-forme chauffante, illustrés dans la Figure 23.

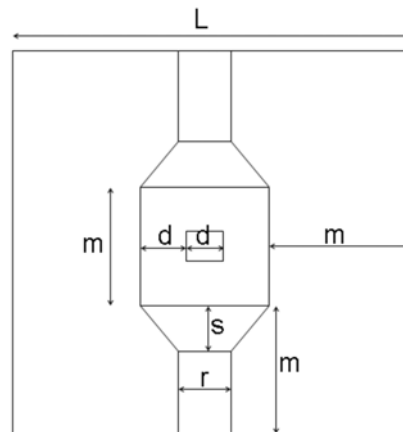


Figure 23. Caractéristiques géométriques de la plate-forme chauffante

La tension électrique appliquée sur la plate-forme est un vecteur (*Tension*). Cette variable est déclarée dans la routine principale (voir section 1.5.1).

Les propriétés de matériaux (La conductivité électrique (σ), la conductivité thermique (k), la capacité calorifique (C_p) et la masse volumique (ρ)) sont rentrés directement dans le script de COMSOL (voir **LIBRARY MATERIAL** dans le script). Ces propriétés sont décrites dans la section 4.2 du chapitre II.

1.3 Paramètres de sortie

Les paramètres de sortie du module de la plate-forme chauffante sont la température maximale et la puissance consommée, ces deux variables sont enregistrées en forme de vecteur [*Temperature_max(i) Puissance(i)*].

1.4 Script

Pour utiliser le script suivante sur COMSOL Multiphysics, il suffit d'enregistrer les deux codes suivantes avec une extension .m (par exemple : lance_plate_forme.m, plate_forme.m), puis dans le menu *File* du logiciel, lancer *COMSOL Script*.

Avant de commencer il faut ajouter le chemin des directoires du logiciel, pour introduire le dossier ou ils sont enregistré les scripts, ceci avec la commande (par exemple):

```
path('E:\Gustavo\Fichiers_COMSOL\ ', path)
```

Puis pour lancer la simulation il suffit d'appeler la routine principale que j'appelle dans ce cas «lance_plate_forme» (par exemple taper : C)>> lance_plate_forme). Cette routine est décrite dans la section suivante.

1.4.1 Fonction de déclaration de variables

Avant de lancer la simulation, nous devons définir une routine de déclaration de variables (routine principale), cette routine principale fera l'appel à la sous routine du script de COMSOL proprement dite.

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Déclaration de paramètres géométriques%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

L=500e-6;
d=55e-6;
r=92e-6;
m=166e-6;
s=72e-6;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Déclaration de tension%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

Tension = [4 4.5]

% appel du modèle de la plate_forme chauffante

for i=1:length(Tension)
    [Temperature_max(i) Puissance(i)]=plate_forme(Tension(i),L,d,r,m,s)
end
```

1.4.2 Script COMSOL

```
% COMSOL Multiphysics Model M-file
% Generated by COMSOL 3.3 (COMSOL 3.3.0.405, $Date: 2006/08/31 18:03:47 $)

function [Temperature_max, Puissance]=plate_forme(Tension,L,d,r,m,s)

flclear fem

% COMSOL version
clear vrsn
vrsn.name = 'COMSOL 3.3';
vrsn.ext = '';
vrsn.major = 0;
vrsn.build = 405;
vrsn.rcs = '$Name: $';
vrsn.date = '$Date: 2006/08/31 18:03:47 $';
fem.version = vrsn;

% Geometry
g1=rect2(0.2,0.2,'base','corner','pos',[0,-0.2]);
g2=rect2(d/2,d/2,'base','corner','pos',{'0','-0.2'},'rot','0');
g3=rect2(1.0E-4,7.74999999999804E-5,'base','corner','pos',[0,-0.20005]);
g4=rect2(L/2,L/2,'base','corner','pos',{'0','-0.20005'},'rot','0');
g5=rect2(d/2,d/2,'base','corner','pos',{'0','0'},'rot','0');
g4=move(g4,[2.499999999999984E-5,2.499999999997247E-5]);
```

```

g6=rect2(L/2,L/2,'base','corner','pos',{'0','0'},'rot','0');
g7=rect2(7.25E-5,1.0E-4,'base','corner','pos',[d/2,0]);
g8=rect2(1.0E-4,1.0E-4,'base','corner','pos',[0,0]);
g9=rect2(m/2,m/2,'base','corner','pos',{'0','0'},'rot','0');
g10=rect2(1.0E-4,1.17E-4,'base','corner','pos',[0,m/2]);
g11=rect2(r/2,s,'base','corner','pos',{'0',num2str(m/2)},'rot','0');
g12=rect2(1.0E-4,1.45E-4,'base','corner','pos',[0,m/2+s]);
g13=rect2(r/2,L/2-s-
m/2,'base','corner','pos',{'0',num2str(m/2+s)},'rot','0');
g14=rect2(4.0E-4,4.0E-4,'base','corner','pos',[0,0]);
g15=rect2(L*3/2,L*3/2,'base','corner','pos',{'0','0'},'rot','0');
g16=rect2(1.0E-4,5.5E-4,'base','corner','pos',[0,L/2]);
g17=rect2(r/2,L,'base','corner','pos',{'0',num2str(L/2)},'rot','0');
carr={curve2([r/2,m/2],[m/2+s,m/2],[1,1]), ...
      curve2([m/2,r/2],[m/2,m/2],[1,1]), ...
      curve2([r/2,r/2],[m/2,m/2+s],[1,1])};
g18=geomcoerce('solid',carr);
g19=geomcomp({g11,g18},'ns',{'g11','g18'},'sf','g11+g18','edge','none');
g20=geomdel(g19);
[g21]=geomcopy({g6});
[g22]=geomcopy({g21});
g22=move(g22,[0,0]);
g24=geomcomp({g15,g6},'ns',{'g15','g6'},'sf','g15-g6','edge','none');
[g25]=geomcopy({g17});
[g26]=geomcopy({g25});
g26=move(g26,[0,0]);
g27=geomcomp({g24,g17},'ns',{'g24','g17'},'sf','g24-g17','edge','none');
[g28]=geomcopy({g5});
[g29]=geomcopy({g28});
g29=move(g29,[0,0]);
g30=geomcomp({g9,g29},'ns',{'g9','g29'},'sf','g9-g29','edge','none');
g35=geomcomp({g5,g13,g20,g30},'ns',{'g5','g13','g20','g30'},'sf','g5+g13+g2
0+g30','edge','none');
garr=split(g35);
[g36,g37,g38,g39]=deal(garr{:});
g40=geomcomp({g36,g37,g38,g39},'ns',{'g36','g37','g38','g39'},'sf','g36+g37
+g38+g39','edge','none');
[g41]=geomcopy({g22});
[g44]=geomcopy({g40});
[g45]=geomcopy({g44});
g45=move(g45,[0,0]);
g46=geomcomp({g22,g40},'ns',{'g22','g40'},'sf','g22-g40','edge','none');
garr=split(g45);
[g47,g48,g49,g50]=deal(garr{:});

```

```

% Using multiple geometries
flclear xfem
% Keep global fields
fields={'functions','xmesh','globalexp','const','version'};
for ii=1:length(fields)
    if isfield(fem,fields{ii})
        xfem.(fields{ii})=fem.(fields{ii});
        fem=rmfield(fem,fields{ii});
    end
end
if isfield(fem,'sol')
    fem=rmfield(fem,'sol');
end
xfem.fem{1}=fem;

```

```

% Geometry 1

```

```

g57=extrude(g26,'distance',[1000e-
6],'scale',[1;1],'displ',[0;0],'twist',[0],'face','none','wrkpln',[0 1 0;0
0 1;0 0 0]);
g58=extrude(g27,'distance',[1000e-
6],'scale',[1;1],'displ',[0;0],'twist',[0],'face','none','wrkpln',[0 1 0;0
0 1;0 0 0]);
g59=extrude(g46,'distance',[1000e-
6],'scale',[1;1],'displ',[0;0],'twist',[0],'face','none','wrkpln',[0 1 0;0
0 1;0 0 0]);
g60=extrude(g47,'distance',[1000e-
6],'scale',[1;1],'displ',[0;0],'twist',[0],'face','none','wrkpln',[0 1 0;0
0 1;0 0 0]);
g61=extrude(g48,'distance',[1000e-
6],'scale',[1;1],'displ',[0;0],'twist',[0],'face','none','wrkpln',[0 1 0;0
0 1;0 0 0]);
g62=extrude(g49,'distance',[1000e-
6],'scale',[1;1],'displ',[0;0],'twist',[0],'face','none','wrkpln',[0 1 0;0
0 1;0 0 0]);
g63=extrude(g50,'distance',[1000e-
6],'scale',[1;1],'displ',[0;0],'twist',[0],'face','none','wrkpln',[0 1 0;0
0 1;0 0 0]);

% Geometry 2
g64=geomcomp({g57,g58,g59,g60,g61,g62,g63},'ns',{g57,'g58','g59','g60','g
61','g62','g63'],'sf','g57+g58+g59+g60+g61+g62+g63','face','none','edge','a
ll');
g65=geomdel(g64);

% Geometry 1
g66=extrude(g26,'distance',[400e-
6],'scale',[1;1],'displ',[0;0],'twist',[0],'face','none','wrkpln',[0 0.0010
0;0 0 0.0010;0.0010 0.0010 0.0010]);
g67=extrude(g27,'distance',[400e-
6],'scale',[1;1],'displ',[0;0],'twist',[0],'face','none','wrkpln',[0 0.0010
0;0 0 0.0010;0.0010 0.0010 0.0010]);

% Geometry 2
g68=geomcomp({g66,g67},'ns',{g66,'g67'],'sf','g66+g67','face','none','edg
e','all');
g69=geomdel(g68);

% Geometry 1
fem=xfem.fem{1};

% Analyzed geometry
clear s
s.objs={g26,g27,g46,g47,g48,g49,g50};
s.name={'R2','C03','C02','C04','C05','C06','C07'};
s.tags={'g26','g27','g46','g47','g48','g49','g50'};

fem.draw=struct('s',s);
fem.geom=geomcsg(fem);

% Initialize mesh for geometry 1
fem.mesh=meshinit(fem,...
    'hauto',6,...
    'hgradsub',[1,1.3,2,1.3],...
    'hmaxsub',[1,0.00002,2,0.00002]);
xfem.fem{1}=fem;

% Extrude mesh for geometry 1

```

```

fem=meshextrude(xfem.fem{1}, ...
    'elextlayers',[0 1],[0 1],[0 1],[0 1],[0 1], ...
    'distance',[1.4e-6 2e-6 2.5e-6 2.7e-6 3.5e-6], ...
    'scale',[(1)*ones(1,5);(1)*ones(1,5)], ...
    'displ',[(0)*ones(1,5);(0)*ones(1,5)], ...
    'twist',[(0)*ones(1,5)], ...
    'face','none', ...
    'wrkpln',[0 0.0014 0;0 0 0.0014;0.0014 0.0014 0.0014]);
xfem.fem{3}=fem;

% Geometry 2
flclear fem

% Analyzed geometry
clear s
s.objs={g65,g69};
s.name={'C02','C03'};
s.tags={'g65','g69'};

fem.draw=struct('s',s);
fem.geom=geomcsg(fem);

% Initialize mesh for geometry 2
fem.mesh=meshinit(fem, ...
    'hauto',5, ...
    'hgradsub',[2,1.45], ...
    'hmaxsub',[2,0.00009]);

% Constants
xfem.const = {'V0',Tension, ...
    'Ta','22', ...
    'h0','0', ...
    'h1','0', ...
    'sigma_poly','1.724e5', ...
    'sigma_Cr','7.3e6', ...
    'sigma_Au','4.4e7', ...
    'sigma_poly_imp','4742.6'};
xfem.fem{2}=fem;

% (Default values are not included)

fem=xfem.fem{1};
fem.frame = {'ref'};
fem.border = 1;
clear units;
units.basesystem = 'SI';
fem.units = units;
xfem.fem{1} = fem;

fem=xfem.fem{2};

% Application mode 1
clear appl
appl.mode.class = 'HeatTransfer';
appl.assignsuffix = '_ht';
clear prop
prop.analysis='static';
appl.prop = prop;
clear bnd
bnd.type = {'q0','cont','T'};
bnd.T0 = {0,0,'Ta'};

```

```

bnd.ind = [1,1,3,1,1,3,1,1,3,1,1,3,1,1,3,1,1,2,1,1,1,1,3,1,3,1,2,1,1,1, ...
    1,1,1,1,1,1];
appl.bnd = bnd;
clear equ
equ.k = {'mat2_k', 'mat8_k'};
equ.init = 'Ta';
equ.rho = {'mat2_rho', 'mat8_rho'};
equ.C = {'mat2_C', 'mat8_C'};
equ.ind = [1,2];
appl.equ = equ;
fem.appl{1} = appl;
fem.frame = {'ref'};
fem.border = 1;
fem.outform = 'general';
clear units;
units.basesystem = 'SI';
fem.units = units;

% Coupling variable elements
clear elemcpl
% Point constraint variables (used for periodic conditions)
clear elem
elem.elem = 'elpconstr';
elem.g = {'2'};
clear bnd
bnd.constr = {'ipconstr1-(T)'};
bnd.cpoints = {'2'};
bnd.ind = {'19', '28'};
elem.geomdim = {{}, {}, bnd, {}};
elemcpl{1} = elem;
fem.elemcpl = elemcpl;
xfem.fem{2} = fem;

fem=xfem.fem{3};

% Application mode 1
clear appl
appl.mode.class = 'HeatTransfer';
appl.assignsuffix = '_ht';
clear prop
prop.analysis='static';
appl.prop = prop;
clear bnd
bnd.type = {'q0', 'cont', 'q', 'q', 'T'};
bnd.h = {0,0, 'h0', 'h1', 0};
bnd.T0 = {0,0,0,0, 'Ta'};
bnd.Tinf = {0,0, 'Ta', 'Ta', 0};
bnd.ind = [1,1,3,1,1,2,2,2,4,2,2,2,2,2,2,1,2,3,1,2,2,1,1,2,2,2,4,2,2, ...
    2,2,1,2,3,1,2,2,1,2,2,1,1,2,1,1,2,4,1,2,3,1,2,2,1,2,2,1,2,2,1,2,2,4,1, ...
    ...
    2,1,1,2,2,1,2,2,1,2,2,1,2,2,4,1,1,1,1,5,2,1,2,1,1,1,2,2,2,2,2,2,1,1, ...
    ...
    2,2,3,2,2,2,1,1,4,1,1,2,1,1,2,2,2,2,1,2,2,2,1,2,4,1,2,2,1,2,2,2,1,1,2, ...
    ...
    2,2,2,1,2,1,1,2,2,2,2,2,2,1,2,1,2,2,2,2,2,2,1,1,2,2,2];
appl.bnd = bnd;
clear equ
equ.k = {'mat6_k', 'mat7_k', 400, 'mat5_k', 'mat4_k', 'mat3_k', 'mat1_k'};
equ.init = 'Ta';
equ.rho = {'mat6_rho', 'mat7_rho', 8700, 'mat5_rho', 'mat4_rho', 'mat3_rho', ...
    'mat1_rho'};

```

```

equ.C = {'mat6_C', 'mat7_C', 385, 'mat5_C', 'mat4_C', 'mat3_C', 'mat1_C'};
equ.Q =
{0,0,0, 'sigma_poly_imp_T*(Vx^2+Vy^2+Vz^2)', 'sigma_poly*(Vx^2+Vy^2+Vz^2)',
...
'sigma_Cr*(Vx^2+Vy^2+Vz^2)', 'sigma_Au*(Vx^2+Vy^2+Vz^2)'};
equ.usage = {1,1,0,1,1,1,1};
equ.ind = [1,2,3,3,3,1,2,4,3,3,1,2,5,6,7,1,2,5,6,7,1,2,5,6,7,1,2,3,3,3, ...
1,2,3,3,3];
appl.equ = equ;
fem.appl{1} = appl;

% Application mode 2
clear appl
appl.mode.class = 'ConductiveMediaDC';
appl.assignsuffix = '_dc';
clear prop
clear weakconstr
weakconstr.value = 'off';
weakconstr.dim = {'lm2'};
prop.weakconstr = weakconstr;
appl.prop = prop;
clear bnd
bnd.V0 = {0,0,0, 'V0/2', 'V0'};
bnd.type = {'V0', 'cont', 'nJ0', 'V', 'V'};
bnd.ind = [1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,2,1,1,2,1,1,2,1,1,2,1,3,3,3,1,2,3,1,2, ...
2,1,1,2,1,1,2,1,3,2,3,3,3,2,3,3,2,3,1,2,1,1,2,1,3,2,3,3,2,2,3,2,2,3,1,
...
2,1,1,2,1,3,2,3,3,2,2,3,2,2,5,1,1,3,3,3,2,1,2,1,3,4,2,1,2,1,2,2,2,3,3,
...
2,2,1,2,2,1,3,3,1,3,3,2,3,3,2,1,2,2,1,2,2,1,3,1,2,3,2,1,3,2,2,1,1,1,1,
...
1,1,2,1,2,1,3,1,2,1,2,1,2,1,2,1,1,1,2,1,2,1,1,1,1,1,1];
appl.bnd = bnd;
clear equ
equ.sigma = {5.99e7, 'mat5_sigma', 'mat4_sigma', 'mat3_sigma', 5.99e7};
equ.usage = {0,1,1,1,1};
equ.ind = [1,1,1,1,1,1,1,2,1,1,1,1,3,4,5,1,1,3,4,5,1,1,3,4,5,1,1,1,1,1, ...
1,1,1,1,1];
appl.equ = equ;
fem.appl{2} = appl;
fem.border = 1;
fem.outform = 'general';
clear units;
units.basesystem = 'SI';
fem.units = units;

% Subdomain settings
clear equ
equ.ind = [1,1,1,1,1,1,1,2,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1, ...
1,1,1,1,1];
equ.dim = {'T', 'V'};

% Subdomain expressions
equ.expr = {'sigma_poly_imp_T', {'', 'sigma_poly_imp/(1-0.0021*(T-Ta))'}};
fem.equ = equ;

% Coupling variable elements
clear elemcpl
% Extrusion coupling variables
clear elem
elem.elem = 'elcplextr';

```

```

elem.g = {'2','3'};
src = cell(1,2);
src{1} = {};
clear bnd
bnd.expr = {{{}, 'T'}};
bnd.map = {{'1','1'}};
bnd.ind = {{'1','2','3','4','5','6','7','8','9','10','11','12','13', ...
'14','15','16','17','18','19','20','21','22','23','24','25','26','27',
...
'28','29','30','31','32','33','34','35','36','37','38','39','40','41',
...
'42','43','44','45','46','47','48','49','50','51','52','53','54','55',
...
'56','57','58','59','60','61','62','63','64','65','66','68','69','70',
...
'71','72','73','74','75','76','77','78','79','80','81','82','83','84',
...
'85','86','87','88','89','90','91','92','93','94','95','96','97','98',
...
'99','100','101','102','103','104','105','106','107','108','109','110',
...
'111','112','113','114','115','116','117','118','120','121','122','123',
...
'124','125','126','127','128','129','130','131','132','133','134','135',
...
'136','137','138','139','140','141','142','143','144','145','146','147',
...
'148','149','150','151','152','153','154','155','156','157','158','159',
...
'160','161','162'}, {'67','119'}};
src{2} = {{}, {}, bnd, {}};
elem.src = src;
geomdim = cell(1,2);
clear bnd
bnd.map = {{{}, '1'}};
bnd.ind = {{'1','2','3','4','5','6','7','8','9','10','11','12','13', ...
'14','15','16','17','18','20','21','22','23','24','25','26','27','29',
...
'30','31','32','33','34','35','36'}, {'19','28'}};
geomdim{1} = {{}, {}, bnd, {}};
geomdim{2} = {};
elem.geomdim = geomdim;
elem.var = {'ipconstr1'};
map = cell(1,1);
clear submap
submap.type = 'unit';
map{1} = submap;
elem.map = map;
elemcpl{1} = elem;
fem.elemcpl = elemcpl;
xfem.fem{3} = fem;

% LIBRARY MATERIAL
clear lib
lib.mat{1}.name='Or';
lib.mat{1}.varname='mat1';
lib.mat{1}.variables.sigma='4.4e7';
lib.mat{1}.variables.k='297';
lib.mat{1}.variables.rho='19300';
lib.mat{1}.variables.C='128.7';
lib.mat{2}.name='Glass (verre)';

```

```

lib.mat{2}.varname='mat2';
lib.mat{2}.variables.sigma='1e-8';
lib.mat{2}.variables.k='1.4226';
lib.mat{2}.variables.rho='2150';
lib.mat{2}.variables.C='835';
lib.mat{3}.name='Cr';
lib.mat{3}.varname='mat3';
lib.mat{3}.variables.sigma='7.3e6';
lib.mat{3}.variables.k='93.7';
lib.mat{3}.variables.rho='7150';
lib.mat{3}.variables.C='449';
lib.mat{4}.name='PolySi diffused';
lib.mat{4}.varname='mat4';
lib.mat{4}.variables.sigma='1.724e5';
lib.mat{4}.variables.k='100';
lib.mat{4}.variables.rho='2328';
lib.mat{4}.variables.C='700';
lib.mat{5}.name='PolySi implanté';
lib.mat{5}.varname='mat5';
lib.mat{5}.variables.sigma='5746.6';
lib.mat{5}.variables.k='100';
lib.mat{5}.variables.rho='2328';
lib.mat{5}.variables.C='700';
lib.mat{6}.name='SiO2';
lib.mat{6}.varname='mat6';
lib.mat{6}.variables.sigma='1e-8';
lib.mat{6}.variables.k='1.4';
lib.mat{6}.variables.rho='2270';
lib.mat{6}.variables.C='1000';
lib.mat{7}.name='SiNx';
lib.mat{7}.varname='mat7';
lib.mat{7}.variables.sigma='1e-8';
lib.mat{7}.variables.k='49';
lib.mat{7}.variables.rho='2270';
lib.mat{7}.variables.C='1000';
lib.mat{8}.name='Si';
lib.mat{8}.varname='mat8';
lib.mat{8}.variables.sigma='2e-5';
lib.mat{8}.variables.k='100';
lib.mat{8}.variables.rho='2328';
lib.mat{8}.variables.C='702';

xfem.lib = lib;

% Multiphysics
xfem=multiphysics(xfem);

% COMSOL Multiphysics Model M-file
% Generated by COMSOL 3.3 (COMSOL 3.3.0.405, $Date: 2006/08/31 18:03:47 $)

% (Default values are not included)

fem=xfem.fem{1};
fem.frame = {'ref'};
fem.border = 1;
clear units;
units.basesystem = 'SI';
fem.units = units;
xfem.fem{1} = fem;

```

```

fem=xfem.fem{2};

% Application mode 1
clear appl
appl.mode.class = 'HeatTransfer';
appl.assignsuffix = '_ht';
clear prop
prop.analysis='static';
appl.prop = prop;
clear bnd
bnd.type = {'q0', 'cont', 'T'};
bnd.T0 = {0,0, 'Ta'};
bnd.ind = [1,1,3,1,1,3,1,1,3,1,1,3,1,1,2,1,1,1,1,3,1,3,1,2,1,1,1, ...
    1,1,1,1,1,1];
appl.bnd = bnd;
clear equ
equ.k = {'mat2_k', 'mat8_k'};
equ.init = 'Ta';
equ.rho = {'mat2_rho', 'mat8_rho'};
equ.C = {'mat2_C', 'mat8_C'};
equ.ind = [1,2];
appl.equ = equ;
fem.appl{1} = appl;
fem.frame = {'ref'};
fem.border = 1;
fem.outform = 'general';
clear units;
units.basesystem = 'SI';
fem.units = units;

% Coupling variable elements
clear elemcpl
% Point constraint variables (used for periodic conditions)
clear elem
elem.elem = 'elpconstr';
elem.g = {'2'};
clear bnd
bnd.constr = {'ipconstr1-(T)'};
bnd.cpoints = {'2'};
bnd.ind = {'19', '28'};
elem.geomdim = {{}, {}, bnd, {}};
elemcpl{1} = elem;
fem.elemcpl = elemcpl;
xfem.fem{2} = fem;

fem=xfem.fem{3};

% Application mode 1
clear appl
appl.mode.class = 'HeatTransfer';
appl.assignsuffix = '_ht';
clear prop
prop.analysis='static';
appl.prop = prop;
clear bnd
bnd.type = {'q0', 'cont', 'q', 'q', 'T'};
bnd.h = {0,0, 'h0', 'h1', 0};
bnd.T0 = {0,0,0,0, 'Ta'};
bnd.Tinf = {0,0, 'Ta', 'Ta', 0};
bnd.ind = [1,1,3,1,1,2,2,2,4,2,2,2,2,2,2,1,2,3,1,2,2,1,1,2,2,2,4,2,2, ...

```

```

    2,2,1,2,3,1,2,2,1,2,2,1,1,2,1,1,2,4,1,2,3,1,2,2,1,2,2,1,2,2,1,2,2,4,1,
...
    2,1,1,2,2,1,2,2,1,2,2,1,2,2,4,1,1,1,1,5,2,1,2,1,1,1,2,2,2,2,2,2,2,1,1,
...
    2,2,3,2,2,2,1,1,4,1,1,2,1,1,2,2,2,2,1,2,2,2,1,2,4,1,2,2,1,2,2,2,1,1,2,
...
    2,2,2,1,2,1,1,2,2,2,2,2,2,1,2,1,2,2,2,2,2,2,1,1,2,2,2];
appl.bnd = bnd;
clear equ
equ.k = {'mat6_k', 'mat7_k', 400, 'mat5_k', 'mat4_k', 'mat3_k', 'mat1_k'};
equ.init = 'Ta';
equ.rho = {'mat6_rho', 'mat7_rho', 8700, 'mat5_rho', 'mat4_rho', 'mat3_rho', ...
    'mat1_rho'};
equ.C = {'mat6_C', 'mat7_C', 385, 'mat5_C', 'mat4_C', 'mat3_C', 'mat1_C'};
equ.Q =
{0,0,0, 'sigma_poly_imp_T*(Vx^2+Vy^2+Vz^2)', 'sigma_poly*(Vx^2+Vy^2+Vz^2)',
...
    'sigma_Cr*(Vx^2+Vy^2+Vz^2)', 'sigma_Au*(Vx^2+Vy^2+Vz^2)'};
equ.usage = {1,1,0,1,1,1,1};
equ.ind = [1,2,3,3,3,1,2,4,3,3,1,2,5,6,7,1,2,5,6,7,1,2,5,6,7,1,2,3,3,3, ...
    1,2,3,3,3];
appl.equ = equ;
fem.appl{1} = appl;

% Application mode 2
clear appl
appl.mode.class = 'ConductiveMediaDC';
appl.assignsuffix = '_dc';
clear prop
clear weakconstr
weakconstr.value = 'off';
weakconstr.dim = {'lm2'};
prop.weakconstr = weakconstr;
appl.prop = prop;
clear bnd
bnd.V0 = {0,0,0, 'V0/2', 'V0'};
bnd.type = {'V0', 'cont', 'nJ0', 'V', 'V'};
bnd.ind = [1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,2,1,1,2,1,1,2,1,1,2,1,3,3,3,1,2,3,1,2, ...
    2,1,1,2,1,1,2,1,3,2,3,3,3,2,3,3,2,3,1,2,1,1,2,1,3,2,3,3,2,2,3,2,2,3,1,
...
    2,1,1,2,1,3,2,3,3,2,2,3,2,2,5,1,1,3,3,3,2,1,2,1,3,4,2,1,2,1,2,2,2,3,3,
...
    2,2,1,2,2,1,3,3,1,3,3,2,3,3,2,1,2,2,1,2,2,1,3,1,2,3,2,1,3,2,2,1,1,1,1,
...
    1,1,2,1,2,1,3,1,2,1,2,1,2,1,2,1,1,1,2,1,2,1,1,1,1,1,1];
appl.bnd = bnd;
clear equ
equ.sigma = {5.99e7, 'mat5_sigma', 'mat4_sigma', 'mat3_sigma', 5.99e7};
equ.usage = {0,1,1,1,1};
equ.ind = [1,1,1,1,1,1,1,2,1,1,1,1,3,4,5,1,1,3,4,5,1,1,3,4,5,1,1,1,1,1, ...
    1,1,1,1,1];
appl.equ = equ;
fem.appl{2} = appl;
fem.border = 1;
fem.outform = 'general';
clear units;
units.basesystem = 'SI';
fem.units = units;

% Subdomain settings
clear equ

```



```

elemcpl{1} = elem;
fem.elemcpl = elemcpl;
xfem.fem{3} = fem;

% Library materials
clear lib
lib.mat{1}.name='Or';
lib.mat{1}.varname='mat1';
lib.mat{1}.variables.sigma='4.4e7';
lib.mat{1}.variables.k='297';
lib.mat{1}.variables.rho='19300';
lib.mat{1}.variables.C='128.7';
lib.mat{2}.name='Glass (verre)';
lib.mat{2}.varname='mat2';
lib.mat{2}.variables.sigma='1e-8';
lib.mat{2}.variables.k='1.4226';
lib.mat{2}.variables.rho='2150';
lib.mat{2}.variables.C='835';
lib.mat{3}.name='Cr';
lib.mat{3}.varname='mat3';
lib.mat{3}.variables.sigma='7.3e6';
lib.mat{3}.variables.k='93.7';
lib.mat{3}.variables.rho='7150';
lib.mat{3}.variables.C='449';
lib.mat{4}.name='PolySi diffused';
lib.mat{4}.varname='mat4';
lib.mat{4}.variables.sigma='1.724e5';
lib.mat{4}.variables.k='100';
lib.mat{4}.variables.rho='2328';
lib.mat{4}.variables.C='700';
lib.mat{5}.name='PolySi implanté';
lib.mat{5}.varname='mat5';
lib.mat{5}.variables.sigma='5746.6';
lib.mat{5}.variables.k='100';
lib.mat{5}.variables.rho='2328';
lib.mat{5}.variables.C='700';
lib.mat{6}.name='SiO2';
lib.mat{6}.varname='mat6';
lib.mat{6}.variables.sigma='1e-8';
lib.mat{6}.variables.k='1.4';
lib.mat{6}.variables.rho='2270';
lib.mat{6}.variables.C='1000';
lib.mat{7}.name='SiNx';
lib.mat{7}.varname='mat7';
lib.mat{7}.variables.sigma='1e-8';
lib.mat{7}.variables.k='49';
lib.mat{7}.variables.rho='2270';
lib.mat{7}.variables.C='1000';
lib.mat{8}.name='Si';
lib.mat{8}.varname='mat8';
lib.mat{8}.variables.sigma='2e-5';
lib.mat{8}.variables.k='100';
lib.mat{8}.variables.rho='2328';
lib.mat{8}.variables.C='702';

xfem.lib = lib;

% Multiphysics
xfem=multiphysics(xfem);

```

```

% Extend mesh
xfem.xmesh=meshextend(xfem);

% Solve problem
xfem.sol=femstatic(xfem, ...
    'solcomp',{'V'}, ...
    'outcomp',{'T','V'}, ...
    'linsolver','spooles');

% Save current fem structure for restart purposes
fem0=xfem;

% (Default values are not included)

fem=xfem.fem{1};
fem.frame = {'ref'};
fem.border = 1;
clear units;
units.basesystem = 'SI';
fem.units = units;
xfem.fem{1} = fem;

fem=xfem.fem{2};

% Application mode 1
clear appl
appl.mode.class = 'HeatTransfer';
appl.assignsuffix = '_ht';
clear prop
prop.analysis='static';
appl.prop = prop;
clear bnd
bnd.type = {'q0','cont','T'};
bnd.T0 = {0,0,'Ta'};
bnd.ind = [1,1,3,1,1,3,1,1,3,1,1,3,1,1,2,1,1,1,1,3,1,3,1,2,1,1,1, ...
    1,1,1,1,1,1];
appl.bnd = bnd;
clear equ
equ.k = {'mat2_k','mat8_k'};
equ.init = 'Ta';
equ.rho = {'mat2_rho','mat8_rho'};
equ.C = {'mat2_C','mat8_C'};
equ.ind = [1,2];
appl.equ = equ;
fem.appl{1} = appl;
fem.frame = {'ref'};
fem.border = 1;
fem.outform = 'general';
clear units;
units.basesystem = 'SI';
fem.units = units;

% Coupling variable elements
clear elemcpl
% Point constraint variables (used for periodic conditions)
clear elem
elem.elem = 'elpconstr';
elem.g = {'2'};
clear bnd
bnd.constr = {'ipconstr1-(T)'};

```

```

bnd.cpoints = {'2'};
bnd.ind = {'19', '28'};
elem.geomdim = {{}, {}, bnd, {}};
elemcpl{1} = elem;
fem.elemcpl = elemcpl;
xfem.fem{2} = fem;

fem=xfem.fem{3};

% Application mode 1
clear appl
appl.mode.class = 'HeatTransfer';
appl.assignsuffix = '_ht';
clear prop
prop.analysis='static';
appl.prop = prop;
clear bnd
bnd.type = {'q0', 'cont', 'q', 'q', 'T'};
bnd.h = {0, 0, 'h0', 'h1', 0};
bnd.T0 = {0, 0, 0, 0, 'Ta'};
bnd.Tinf = {0, 0, 'Ta', 'Ta', 0};
bnd.ind = [1, 1, 3, 1, 1, 2, 2, 2, 4, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 1, 2, 3, 1, 2, 2, 1, 1, 2, 2, 2, 4, 2, 2, ...
    2, 2, 1, 2, 3, 1, 2, 2, 1, 2, 2, 1, 1, 2, 1, 1, 2, 4, 1, 2, 3, 1, 2, 2, 1, 2, 2, 1, 2, 2, 1, 2, 2, 4, 1, ...
    ...
    2, 1, 1, 2, 2, 1, 2, 2, 1, 2, 2, 1, 2, 2, 4, 1, 1, 1, 1, 5, 2, 1, 2, 1, 1, 1, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 1, 1, ...
    ...
    2, 2, 3, 2, 2, 2, 1, 1, 4, 1, 1, 2, 1, 1, 2, 2, 2, 2, 1, 2, 2, 2, 1, 2, 4, 1, 2, 2, 1, 2, 2, 2, 1, 1, 2, ...
    ...
    2, 2, 2, 1, 2, 1, 1, 2, 2, 2, 2, 2, 1, 2, 1, 2, 2, 2, 2, 2, 1, 1, 2, 2, 2];
appl.bnd = bnd;
clear equ
equ.k = {'mat6_k', 'mat7_k', 400, 'mat5_k', 'mat4_k', 'mat3_k', 'mat1_k'};
equ.init = 'Ta';
equ.rho = {'mat6_rho', 'mat7_rho', 8700, 'mat5_rho', 'mat4_rho', 'mat3_rho', ...
    'mat1_rho'};
equ.C = {'mat6_C', 'mat7_C', 385, 'mat5_C', 'mat4_C', 'mat3_C', 'mat1_C'};
equ.Q =
{0, 0, 0, 'sigma_poly_imp_T*(Vx^2+Vy^2+Vz^2)', 'sigma_poly*(Vx^2+Vy^2+Vz^2)', ...
    'sigma_Cr*(Vx^2+Vy^2+Vz^2)', 'sigma_Au*(Vx^2+Vy^2+Vz^2)'};
equ.usage = {1, 1, 0, 1, 1, 1, 1};
equ.ind = [1, 2, 3, 3, 3, 1, 2, 4, 3, 3, 1, 2, 5, 6, 7, 1, 2, 5, 6, 7, 1, 2, 5, 6, 7, 1, 2, 3, 3, 3, ...
    1, 2, 3, 3, 3];
appl.equ = equ;
fem.appl{1} = appl;

% Application mode 2
clear appl
appl.mode.class = 'ConductiveMediaDC';
appl.assignsuffix = '_dc';
clear prop
clear weakconstr
weakconstr.value = 'off';
weakconstr.dim = {'lm2'};
prop.weakconstr = weakconstr;
appl.prop = prop;
clear bnd
bnd.V0 = {0, 0, 0, 'V0/2', 'V0'};
bnd.type = {'V0', 'cont', 'nJ0', 'V', 'V'};
bnd.ind = [1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 2, 1, 1, 2, 1, 1, 2, 1, 1, 2, 1, 3, 3, 3, 1, 2, 3, 1, 2, ...

```

```

    2,1,1,2,1,1,2,1,3,2,3,3,3,2,3,3,2,3,1,2,1,1,2,1,3,2,3,3,2,2,3,2,2,3,1,
...
    2,1,1,2,1,3,2,3,3,2,2,3,2,2,5,1,1,3,3,3,2,1,2,1,3,4,2,1,2,1,2,2,2,3,3,
...
    2,2,1,2,2,1,3,3,1,3,3,2,3,3,2,1,2,2,1,2,2,1,3,1,2,3,2,1,3,2,2,1,1,1,1,
...
    1,1,2,1,2,1,3,1,2,1,2,1,2,1,2,1,1,1,2,1,2,1,1,1,1,1,1];
appl.bnd = bnd;
clear equ
equ.sigma = {5.99e7, 'mat5_sigma', 'mat4_sigma', 'mat3_sigma', 5.99e7};
equ.usage = {0,1,1,1,1};
equ.ind = [1,1,1,1,1,1,1,2,1,1,1,1,3,4,5,1,1,3,4,5,1,1,3,4,5,1,1,1,1,1, ...
    1,1,1,1,1];
appl.equ = equ;
fem.appl{2} = appl;
fem.border = 1;
fem.outform = 'general';
clear units;
units.basesystem = 'SI';
fem.units = units;

% Subdomain settings
clear equ
equ.ind = [1,1,1,1,1,1,1,2,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1, ...
    1,1,1,1,1];
equ.dim = {'T', 'V'};

% Subdomain expressions
equ.expr = {'sigma_poly_imp_T', {'', 'sigma_poly_imp/(1-0.0021*(T-Ta))'}};
fem.equ = equ;

% Coupling variable elements
clear elemcpl
% Extrusion coupling variables
clear elem
elem.elem = 'elcplextr';
elem.g = {'2', '3'};
src = cell(1,2);
src{1} = {};
clear bnd
bnd.expr = {{{}}, 'T'}};
bnd.map = {{{'1', '1'}}};
bnd.ind = {{{'1', '2', '3', '4', '5', '6', '7', '8', '9', '10', '11', '12', '13', ...
    '14', '15', '16', '17', '18', '19', '20', '21', '22', '23', '24', '25', '26', '27',
...
    '28', '29', '30', '31', '32', '33', '34', '35', '36', '37', '38', '39', '40', '41',
...
    '42', '43', '44', '45', '46', '47', '48', '49', '50', '51', '52', '53', '54', '55',
...
    '56', '57', '58', '59', '60', '61', '62', '63', '64', '65', '66', '68', '69', '70',
...
    '71', '72', '73', '74', '75', '76', '77', '78', '79', '80', '81', '82', '83', '84',
...
    '85', '86', '87', '88', '89', '90', '91', '92', '93', '94', '95', '96', '97', '98',
...
    '99', '100', '101', '102', '103', '104', '105', '106', '107', '108', '109', '110',
...
    '111', '112', '113', '114', '115', '116', '117', '118', '120', '121', '122', '123',
...
    '124', '125', '126', '127', '128', '129', '130', '131', '132', '133', '134', '135',
...

```

```

    '136','137','138','139','140','141','142','143','144','145','146','147',
    ...
    '148','149','150','151','152','153','154','155','156','157','158','159',
    ...
    '160','161','162'},{'67','119'}];
src{2} = {{},{},bnd,{{}};
elem.src = src;
geomdim = cell(1,2);
clear bnd
bnd.map = {{},{},'1'}];
bnd.ind = {{'1','2','3','4','5','6','7','8','9','10','11','12','13', ...
    '14','15','16','17','18','20','21','22','23','24','25','26','27','29',
    ...
    '30','31','32','33','34','35','36'},{'19','28'}];
geomdim{1} = {{},{},bnd,{{}};
geomdim{2} = {};
elem.geomdim = geomdim;
elem.var = {'ipconstr1'};
map = cell(1,1);
clear submap
submap.type = 'unit';
map{1} = submap;
elem.map = map;
elemcpl{1} = elem;
fem.elemcpl = elemcpl;
xfem.fem{3} = fem;

% Library materials
clear lib
lib.mat{1}.name='Or';
lib.mat{1}.varname='mat1';
lib.mat{1}.variables.sigma='4.4e7';
lib.mat{1}.variables.k='297';
lib.mat{1}.variables.rho='19300';
lib.mat{1}.variables.C='128.7';
lib.mat{2}.name='Glass (verre)';
lib.mat{2}.varname='mat2';
lib.mat{2}.variables.sigma='1e-8';
lib.mat{2}.variables.k='1.4226';
lib.mat{2}.variables.rho='2150';
lib.mat{2}.variables.C='835';
lib.mat{3}.name='Cr';
lib.mat{3}.varname='mat3';
lib.mat{3}.variables.sigma='7.3e6';
lib.mat{3}.variables.k='93.7';
lib.mat{3}.variables.rho='7150';
lib.mat{3}.variables.C='449';
lib.mat{4}.name='PolySi diffused';
lib.mat{4}.varname='mat4';
lib.mat{4}.variables.sigma='1.724e5';
lib.mat{4}.variables.k='100';
lib.mat{4}.variables.rho='2328';
lib.mat{4}.variables.C='700';
lib.mat{5}.name='PolySi implanté';
lib.mat{5}.varname='mat5';
lib.mat{5}.variables.sigma='5746.6';
lib.mat{5}.variables.k='100';
lib.mat{5}.variables.rho='2328';
lib.mat{5}.variables.C='700';
lib.mat{6}.name='SiO2';
lib.mat{6}.varname='mat6';

```

```

lib.mat{6}.variables.sigma='1e-8';
lib.mat{6}.variables.k='1.4';
lib.mat{6}.variables.rho='2270';
lib.mat{6}.variables.C='1000';
lib.mat{7}.name='SiNx';
lib.mat{7}.varname='mat7';
lib.mat{7}.variables.sigma='1e-8';
lib.mat{7}.variables.k='49';
lib.mat{7}.variables.rho='2270';
lib.mat{7}.variables.C='1000';
lib.mat{8}.name='Si';
lib.mat{8}.varname='mat8';
lib.mat{8}.variables.sigma='2e-5';
lib.mat{8}.variables.k='100';
lib.mat{8}.variables.rho='2328';
lib.mat{8}.variables.C='702';

xfem.lib = lib;

% Multiphysics
xfem=multiphysics(xfem);

% Extend mesh
xfem.xmesh=mesnextend(xfem);

% Solve problem
xfem.sol=femstatic(xfem, ...
    'init', fem0.sol, ...
    'u', fem0.sol, ...
    'solcomp', {'T'}, ...
    'outcomp', {'T', 'V'}, ...
    'linsolver', 'spooles');

% Save current fem structure for restart purposes
fem0=xfem;

% Plot solution
postplot(xfem, ...
    'tetdata', {'T', 'cont', 'internal', 'unit', 'K'}, ...
    'tetmap', 'jet(1024)', ...
    'tetkeep', 1, ...
    'tetkeeptype', 'random', ...
    'maxminsub', {'T', 'unit', 'K'}, ...
    'title', 'Subdomain: Temperature [K]    Subdomain marker:
Temperature [K]', ...
    'geomnum', [3], ...

    'sdl', {[1, 2, 6, 7, 8, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 31, 32]
}, ...
    'grid', 'on', ...
    'campos', [-0.00351554171320338, -
0.0052446569300257295, 0.006468980477917694], ...
    'camtarget', [5.077973728513538E-4, 5.999506551436209E-
4, 0.0012705566898732524], ...

    'camup', [0.35398578344339765, 0.4736193647948576, 0.8064606390960933], ...
    'camva', 5.262308388939866);

% Integrate
Puissance=postint(xfem, '4*1000*sigma_poly_imp_T*(Vx^2+Vy^2+Vz^2)', ...

```

```

'unit','', ...
'dl',[8], ...
'geomnum',3);

% Integrate
Temperature_max=postint(xfem,'T', ...
    'unit','K', ...
    'dl',[40], ...
    'edim',0, ...
    'geomnum',3);

```

2 Membrane élastique

Le diagramme de la Figure 24 illustre les différents paramètres du modèle.

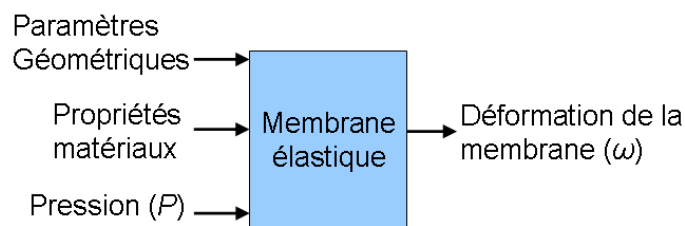


Figure 24. Diagrammes de la membrane élastique.

2.1 Paramètres d'entrée

Comme paramètres d'entrée nous avons :

- Les paramètres géométriques de la membrane élastique : l'épaisseur (e) et la largeur (L).
- Les propriétés du matériau silicone : le module de Young (E), le coefficient de Poisson (ν) et la masse volumique (R).
- La pression appliquée sous la membrane est un vecteur (*Pression*). Cette variable est déclarée dans la routine principale.

2.2 Paramètres de sortie

Le seul paramètre de sortie du module de la membrane élastique est la déformation maximale, enregistrée en forme de vecteur [*Deformation_max(i)*].

2.3 Script

Comme dans le cas de la plate-forme chauffante. Après enregistrer les codes sources en format .m (lance_membrane.m et membrane.m par exemple), il faut lancer sur *COMSOL Script* la commande pour appeler la routine principale (écrire le nom du fichier .m, « lance_membrane » par exemple). N'oubliez pas de changer l'acheminement vers le code source dans le *path* de COMSOL.

2.3.1 Fonction de déclaration de variables

Cette routine principale définit les paramètres d'entrée/sortie et puis fait l'appel à la sous routine COMSOL.

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Déclaration de paramètres géométriques%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

e=30e-6; %épaisseur de la membrane
L=500e-6; %longueur de la membrane

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Déclaration de paramètres matériau%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

E=4e6; %Module de Young (Pa)
v=0.48; %Coefficient de Poisson
R=965; %Densité (kg/m^3)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Déclaration de pression%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

Pression = [5e3]% Pa

% appel du modèle de la membrane élastique

for i=1:length(Pression)
    [Deformation_max(i)]=membrane(Pression(i),e,l,E,v,R)
end
```

2.3.2 Script COMSOL

```
% COMSOL Multiphysics Model M-file
% Generated by COMSOL 3.3 (COMSOL 3.3.0.405, $Date: 2006/08/31 18:03:47 $)

function [Deformation_max]=membrane(Pression,e,l,E,v,R)

flclear fem

% COMSOL version
clear vrsn
vrsn.name = 'COMSOL 3.3';
vrsn.ext = '';
vrsn.major = 0;
vrsn.build = 405;
vrsn.rcs = '$Name: $';
vrsn.date = '$Date: 2006/08/31 18:03:47 $';
fem.version = vrsn;

% Constants
fem.const = {'epaisseur','30e-6', ...
    'longueur','500e-6'};
```

```

% Constants
fem.const = {'epaisseur','30e-6', ...
    'longueur','500e-6'};

% Constants
fem.const = {};

% Geometry
g1=block3(L/2,L/2,e,'base','corner','pos',{'0','0','0'},'axis',{'0','0','1'},'rot','0');

% Analyzed geometry
clear s
s.objs={g1};
s.name={'BLK1'};
s.tags={'g1'};

fem.draw=struct('s',s);
fem.geom=geomcsg(fem);

% Constants
fem.const = {'P0','0.005e6'};

% Constants
fem.const = {'P0',Pression    };

% Initialize mesh
fem.mesh=meshinit(fem, ...
    'hauto',7, ...

'hmaxfac',[1,0.000015,2,0.000015,3,0.000015,4,0.000015,5,0.000015,6,0.000015], ...
    'hgradfac',[1,1,2,1,3,1,4,1,5,1,6,1]);

% (Default values are not included)

% Application mode 1
clear appl
appl.mode.class = 'SmeSolid3';
appl.module = 'SME';
appl.shape =
{'shlag(2,'u'),'shlag(2,'v'),'shlag(2,'w'),'shlag(1,'p')'};
appl.gporder = 4;
appl.cporder = 2;
appl.assignsuffix = '_smsld';
clear prop
prop.largedef='on';
appl.prop = prop;
clear bnd
bnd.Hx = {0,0,1,0,0};
bnd.constrcond = {'free','fixed','displacement','displacement','free'};
bnd.Hy = {0,0,0,1,0};
bnd.Fz = {0,0,0,0,'P0'};
bnd.ind = [3,2,5,1,4,2];
appl.bnd = bnd;
clear equ
equ.rho = R;
equ.materialmodel = 'hyper';
equ.mu = E/(2*(1+v));

```

```

equ.mixedform = 1;
equ.kappa = E/(3*(1-2*v));
equ.ind = [1];
appl.equ = equ;
fem.appl{1} = appl;
fem.frame = {'ref'};
fem.border = 1;
clear units;
units.basesystem = 'SI';
fem.units = units;

% Multiphysics
fem=multiphysics(fem);

% Extend mesh
fem.xmesh=mesextend(fem);

% Solve problem
fem.sol=femstatic(fem, ...
    'solcomp',{'w','u','p','v'}, ...
    'outcomp',{'w','u','p','v'}, ...
    'linsolver','spooles');

% Save current fem structure for restart purposes
fem0=fem;

% Plot solution
postplot(fem, ...
    'tetdata',{'disp_smsld','cont','internal','unit','um'}, ...
    'tetmap','jet(1024)', ...
    'tetkeep',1, ...
    'tetkeeptype','random', ...
    'deformsub',{'u','v','w'}, ...
    'title','Subdomain: Total displacement [um]   Deformation:
Displacement [m]', ...
    'grid','on', ...
    'campos',[0.00173684488221051,5.934941469794054E-
4,5.894298302904102E-4], ...
    'camtarget',[1.250000059371814E-4,1.250000059371814E-
4,1.4999999621068127E-5], ...
    'camup',[-
0.3816452824321751,0.2091146274646464,0.9003432406463591], ...
    'camva',6.45354142519414);

% Integrate
Deformation_max=postint(fem,'disp_smsld', ...
    'unit','um', ...
    'dl',[4], ...
    'edim',0);

```

3 L'actionneur PYRACT

Le diagramme de la Figure 25 illustre les différents paramètres du modèle.

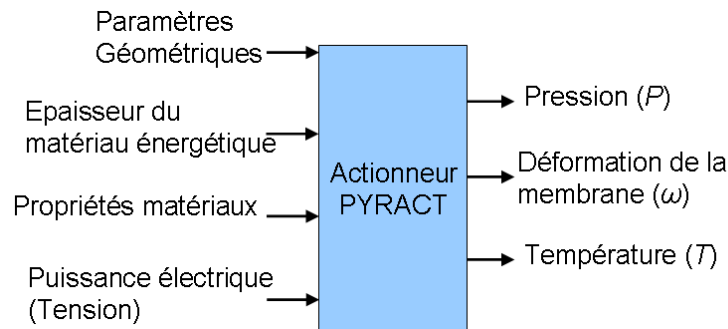


Figure 25. Diagrammes de modèles globaux de fonctionnement de l'actionneur PYRACT

3.1 Paramètres d'entrée

Comme paramètres d'entrée nous avons :

- Les paramètres géométriques de l'actionneur :
D'abord nous avons le choix entre le deux type d'actionneur (variable *PYRO*) ($L=500\mu\text{m}$ et $L=1000\mu\text{m}$), puis l'épaisseur de la membrane élastique (e_{membrane}), l'épaisseur du matériau énergétique (e_{ME}), l'épaisseur du mur des réservoirs (e_{mur}) et finalement la largeur de la cavité du réservoir (L_{cavite}). Le volume du matériau énergétique déposé est calculé connaissant le rayon de la goutte déposé (typiquement $250\mu\text{m}$).
Pour ce dernier paramètre (L_{cavite}), la condition d'être supérieur à la dimension caractéristique de l'actionneur choisi s'impose ($500\mu\text{m}$ ou $1000\mu\text{m}$).
- Les propriétés de matériaux (La conductivité électrique (σ), la conductivité thermique (k), la capacité calorifique (C_p) et la masse volumique (ρ)) sont rentrés directement dans le script de COMSOL (voir ***LIBRARY MATERIAL*** dans le script). Ces propriétés sont décrites dans la section 4.2 du chapitre II.
- La tension électrique appliquée sur la plate-forme est un vecteur (*Tension*).

3.2 Paramètres de sortie

Les paramètres de sortie sont : La pression (*Pressure_point*), la déformation maximale de la membrane (*Deformation_max*) et la température (*Temperature_point*). Ces variables sont évalués en fonction du temps (*temps_reel*) dans le point d'observation juste en dessous de la membrane élastique (Figure 26). Chaque une de ces variables est présenté comme une matrice de $n \times m$ avec $n=202$ (nombre de divisions du pas de temps) et m =nombre de valeurs de tension à évaluer. Pour l'évaluation de la déformation de la membrane une régression polynomiale est réalisée à partir des résultats du modèle individuelle de la membrane élastique. Comme dans les modèles précédents, apres enregistrer les codes sources en

format .m (lance_PYRACT.m et PYRACT_end.m par exemple), il faut lancer sur *COMSOL Script* la commande pour appeler la routine principale (écrire le nom du fichier .m, « lance_PYRACT » par exemple). N'oubliez pas de changer l'acheminement vers le code source dans le *path* de COMSOL.

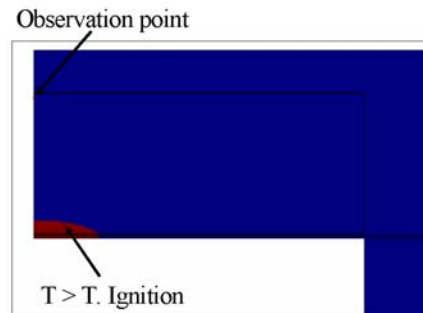


Figure 26. Schéma du modèle et positionnement du point d'observation dans la cavité.

3.3 Script

3.3.1 Fonction de déclaration de variables

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Déclaration de paramètres géométriques%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

PYRO=500;%choix de dimension de l'initiateur 500 ou 1000
e_membrane=30e-6;%m
e_ME=1.4e-6;%m
e_mur=100e-6;%m
L_cavite=500e-6;%m >= dimension caracteristique de l'actionneur (500um ou
1000um)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
%Déclaration de tension et temperature d'initiation du matériau
énergétique%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
Tension= [4 4.5];
Temp_init=498;%K

r=250e-6;%rayon du dépôt du matériau énergétique
Vol_ME=e_ME*(pi*(r^2))/ 1e-6;%cm^3

%Appel du modèle de la plate_forme chauffante
for i=1:length(Tension)
    i
    [temps_reel(1:202,i),Temperature_point(1:202,i),Pressure_point(1:202,i),Def
    ormation_max(1:202,i)]=PYRACT_end(Tension(i),e_membrane,Vol_ME,e_mur,L_cavi
    te,Temp_init,PYRO);
end;
```

3.3.2 Script COMSOL

```
% COMSOL Multiphysics Model M-file
% Generated by COMSOL 3.3 (COMSOL 3.3.0.405, $Date: 2006/08/31 18:03:47 $)
```

```

function
[temps_reel, Temperature_point, Pressure_point, Deformation_max]=PYRACT_end(Te
nsion,e,Vol_ME,h,L,Temp_init,PYRO)

%choix de la géométrie selon l'actionneur PYRACT
if (PYRO==1000)
    a=55e-6;
    b=390e-6;
    c=500e-6;
else
    a=25e-6;
    b=200e-6;
    c=250e-6;
end

%Calcul de l'épaisseur du matériau énergétique à partir du volume
r=250e-6;
m=Vol_ME*1e-6/(pi*(r^2));

flclear fem

% COMSOL version
clear vrsn
vrsn.name = 'COMSOL 3.3';
vrsn.ext = '';
vrsn.major = 0;
vrsn.build = 405;
vrsn.rcs = '$Name: $';
vrsn.date = '$Date: 2006/08/31 18:03:47 $';
fem.version = vrsn;

% Geometry
g1=rect2(0.8,1,'base','corner','pos',[0,0]);
g2=rect2('1.5e-3','1000e-6','base','corner','pos',{'0','0'},'rot','0');
g3=rect2(L+L/2,'0.0010','base','corner','pos',{'0','0'},'rot','0');
g4=rect2(3.5E-4,4.0E-4,'base','corner','pos',[4.0E-4,0.0010]);
g5=rect2(L+L/2-c,'400e-
6','base','corner','pos',{num2str(c),'0.0010'},'rot','0');
%g5=move(g5,[-2.5E-4,-2.1684043449710089E-19]);
%g5=move(g5,[1.0000000000000005E-4,2.1684043449710089E-19]);
g6=rect2(7.5E-4,1.0E-4,'base','corner','pos',[0,0.0014]);
g7=rect2(L+L/2,'1.4e-6','base','corner','pos',{'0','0.0014'},'rot','0');
g8=rect2(7.5E-4,4.86E-5,'base','corner','pos',[0,0.0014014]);
g9=rect2(L+L/2,'0.6e-6','base','corner','pos',{'0','0.0014014'},'rot','0');
g10=rect2(1.0E-5,2.999999999999996E-6,'base','corner','pos',[0,0.001402]);
g11=rect2(a,'0.5e-6','base','corner','pos',{'0','0.001402'},'rot','0');
g12=rect2(2.0E-5,2.999999999999975E-6,'base','corner','pos',[2.5E-
5,0.001402]);
g13=rect2(b,'0.5e-
6','base','corner','pos',{num2str(a),'0.001402'},'rot','0');
g14=rect2(2.5E-5,5.000000000000066E-7,'base','corner','pos',[2.25E-
4,0.001402]);
g15=rect2(a+L/2-c,'0.5e-
6','base','corner','pos',{num2str(a+b),'0.001402'},'rot','0');
g16=rect2(8.0E-6,1.49999999999977E-6,'base','corner','pos',[0,0.0014025]);
g17=rect2(L/2,m,'base','corner','pos',{'0','0.0014025'},'rot','0');
g18=rect2(2.6E-4,5.54999999999998E-5,'base','corner','pos',[0,0.0014045]);
g19=rect2(L/2,h-
m,'base','corner','pos',{'0',num2str(0.0014025+m)},'rot','0');

```

```

g20=rect2(2.5E-4,1.025E-4,'base','corner','pos',[2.5E-4,0.0014]);
g20=move(g20,[0,2.00000000000002655E-6]);
g21=rect2(L/2,h+0.5e-
6,'base','corner','pos',{num2str(L/2),'0.001402'},'rot','0');
g22=rect2(5.0E-4,4.75E-5,'base','corner','pos',[0,0.0015025]);
g23=rect2(L,e,'base','corner','pos',{'0',num2str(0.001402+h+0.5e-
6)},'rot','0');

% Analyzed geometry
clear s
s.objs={g3,g5,g7,g9,g11,g13,g15,g17,g19,g21,g23};
s.name={'R1','R2','R3','R4','R5','R6','R7','R8','R9','R10','R11'};
s.tags={'g3','g5','g7','g9','g11','g13','g15','g17','g19','g21', ...
'g23'};

fem.draw=struct('s',s);
fem.geom=geomcsg(fem);

% Initialize mesh
fem.mesh=meshinit(fem, ...
'hauto',5, ...
'hpnt',20, ...
'yscale',5.0, ...

'hgradsub',[1,1.3,2,1.1,3,1.1,4,1.1,5,1.1,6,1.1,7,1.3,9,1.1,10,1.3,11,1.3],
...

'hmaxsub',[1,0.0003,2,0.0001,3,0.0001,4,0.000005,5,0.00001,6,0.00001,7,0.00
01,9,0.000005,10,0.0001,11,0.0001]);

% Constants
fem.const = {'T_amb','295', ...
'V0','Tension', ...
'h0','60', ...
'h1','125', ...
'sigma_poly','1.724e5', ...
'sigma_Au','4.4e7', ...
'sigma_poly_imp','4742.6/3', ...
'C0','41.44', ...
'C1_init','18346.66', ...
'M_air','29e-3', ...
'p_atm','1e5', ...
'P1','84e5', ...
'R','8.31', ...
'T_heat','594', ...
'C4','82', ...
'T_init',Temp_init};

% Constants
fem.const = {'T_amb','295', ...
'V0','Tension', ...
'h0','60', ...
'h1','125', ...
'sigma_poly','1.724e5', ...
'sigma_Au','4.4e7', ...
'sigma_poly_imp','4742.6/3', ...
'C0','41.44', ...
'C1_init','18346.66', ...

```

```

'M_air','29e-3', ...
'p_atm','1e5', ...
'P1','84e5', ...
'R','8.31', ...
'T_heat','594', ...
'C4','82', ...
'T_init',Temp_init};

% Constants
fem.const = {'T_amb','295', ...
'V0',' Tension, ...
'h0','60*0', ...
'h1','125*0', ...
'sigma_poly','1.724e5', ...
'sigma_Au','4.4e7', ...
'sigma_poly_imp','4742.6/3', ...
'C0','41.44', ...
'C1_init','18346.66', ...
'M_air','29e-3', ...
'p_atm','1e5', ...
'P1','84e5', ...
'R','8.31', ...
'T_heat','594', ...
'C4','82', ...
'T_init','498'};

% (Default values are not included)

% Application mode 1
clear appl
appl.mode.class = 'HeatTransfer';
appl.mode.type = 'axi';
appl.assignsuffix = '_ht';
clear prop
prop.analysis='static';
appl.prop = prop;
clear bnd
bnd.type = {'q0','cont','ax','q','q','T'};
bnd.h = {0,0,0,'h1','h0',0};
bnd.T0 = {0,0,0,0,0,'T_amb'};
bnd.Tinf = {0,0,0,'T_amb','T_amb',0};
bnd.ind = [3,6,1,3,5,3,2,3,2,3,2,3,2,4,2,2,2,2,2,1,2,2,2,2,2,2, ...
4,4,4,1,1,1,1];
appl.bnd = bnd;
clear equ
equ.k = {'mat4_k','mat8_k','mat9_k','mat6_k','mat2_k','mat10_k','mat3_k',
...
'mat7_k','mat11_k'};
equ.init = 'T_CI';
equ.rho =
{'mat4_rho','mat8_rho','mat9_rho','mat6_rho','mat2_rho','mat10_rho', ...
'mat3_rho','mat7_rho','mat11_rho'};
equ.C = {'mat4_C','mat8_C','mat9_C','mat6_C','mat2_C','mat10_C','mat3_C',
...
'mat7_C','mat11_C'};
equ.Q = {0,0,0,'sigma_poly*(Vr^2+Vz^2)',0,0,0,'sigma_poly_imp*(Vr^2+Vz^2)',
...
0};
equ.ind = [1,2,3,4,5,6,7,8,4,9,7];
appl.equ = equ;
fem.appl{1} = appl;

```

```

% Application mode 2
clear appl
appl.mode.class = 'ConductiveMediaDC';
appl.mode.type = 'axi';
appl.assignsuffix = '_dc';
clear prop
clear weakconstr
weakconstr.value = 'off';
weakconstr.dim = {'lm2'};
prop.weakconstr = weakconstr;
appl.prop = prop;
clear bnd
bnd.V0 = {0,0,0,0,'Va'};
bnd.type = {'V0','cont','nJ0','ax','V'};
bnd.ind = [1,1,1,1,1,1,2,4,3,1,1,1,2,1,2,1,2,3,3,2,3,5,1,2,2,3,2,2,2,2, ...
1,1,1,1,1,1,1];
appl.bnd = bnd;
clear equ
equ.sigma = {5.99e7,'mat6_sigma','mat7_sigma'};
equ.usage = {0,1,1};
equ.ind = [1,1,1,2,1,1,1,3,2,1,1];
appl.equ = equ;
fem.appl{2} = appl;

% Application mode 3
clear appl
appl.mode.class = 'Diffusion';
appl.mode.type = 'axi';
appl.module = 'CHEM';
appl.assignsuffix = '_chdi';
clear prop
prop.analysis='static';
clear weakconstr
weakconstr.value = 'off';
weakconstr.dim = {'lm3'};
prop.weakconstr = weakconstr;
appl.prop = prop;
clear bnd
bnd.type = {'cont','N0','ax'};
bnd.ind = [1,1,1,1,1,1,1,1,1,3,2,3,1,1,2,1,1,1,2,1,1,2,1,1,1,1,1,1,2,2,1, ...
1,1,1,1,1,1,1];
appl.bnd = bnd;
clear equ
equ.D = {1,'D_p1','D_p1'};
equ.init = {0,'C1','C0'};
equ.usage = {0,1,1};
equ.ind = [1,1,1,1,2,3,1,1,1,1,1];
appl.equ = equ;
fem.appl{3} = appl;
fem.sdim = {'r','z'};
fem.frame = {'ref'};
fem.border = 1;
fem.outform = 'general';
clear units;
units.basesystem = 'SI';
fem.units = units;

% Scalar expressions
fem.expr = {'p','c*R*T', ...
'rho_air','p_atm*M_air/(R*T)', ...

```

```

'Cp_air', '-4.0644e-015*T^5 +1.4182e-010*T^4 -4.6263e-007*T^3 +
0.00049795*T^2 + 0.016374*T + 1006.3', ...
'k_air', '6.1428e-018*T^5 -3.657e-014*T^4 + 8.9256e-011*T^3 -1.1151e-
007*T^2 + 0.00012336*T -0.0025518', ...
'rho_air1', 'p*M_air/(R*T)', ...
'Va1', '(V0)*flc2hs(t+1,0.1)-(V0)*flc2hs(t-1,0.5)', ...
'C1', 'C1_init*(T>=T_init)+C0*(T<T_init)', ...
'T1', 'T', ...
'T_CI', 'T_amb*(1-temp)+T1*(temp)', ...
'D', '0.0001*2.9744*(T^(3/2))/p', ...
'D1', '0.01*1.15e-5', ...
'D2', '0.09', ...
'D_T', '0.0001*2.9744*(T^(3/2))/(2e5)', ...
'D_p', '0.0001*2.9744*(406.85^(3/2))/p', ...
'Dgas', '0.0001*4.3756e-10*(T^(3/2))/p', ...
'temp', '0', ...
'Va', 'V0', ...
'D_p1', 'D1+D_p*flc2hs(t-1.5e-4,1e-4)'};

```

```
% Descriptions
```

```
clear descr
```

```
descr.const= {'V0','Applied tension (V)','T_amb','Ambient temperature
(K)','h1','convection coeff over the memb.','h0','convection coeff under
the memb.'};
```

```
fem.descr = descr;
```

```
% Library materials
```

```
clear lib
```

```
lib.mat{1}.name='Or';
```

```
lib.mat{1}.varname='mat1';
```

```
lib.mat{1}.variables.sigma='4.4e7';
```

```
lib.mat{1}.variables.k='297';
```

```
lib.mat{1}.variables.rho='19300';
```

```
lib.mat{1}.variables.C='128.7';
```

```
lib.mat{2}.name='Air gus';
```

```
lib.mat{2}.varname='mat10';
```

```
lib.mat{2}.variables.k='k_air';
```

```
lib.mat{2}.variables.rho='rho_air';
```

```
lib.mat{2}.variables.C='Cp_air';
```

```
lib.mat{3}.name='Si';
```

```
lib.mat{3}.varname='mat11';
```

```
lib.mat{3}.variables.sigma='2e-5';
```

```
lib.mat{3}.variables.k='100';
```

```
lib.mat{3}.variables.rho='2328';
```

```
lib.mat{3}.variables.C='702';
```

```
lib.mat{4}.name='Propergol';
```

```
lib.mat{4}.varname='mat2';
```

```
lib.mat{4}.variables.sigma='0';
```

```
lib.mat{4}.variables.k='0.15';
```

```
lib.mat{4}.variables.rho='1500';
```

```
lib.mat{4}.variables.C='1850';
```

```
lib.mat{5}.name='PDMS';
```

```
lib.mat{5}.varname='mat3';
```

```
lib.mat{5}.variables.sigma='2.5e-14';
```

```
lib.mat{5}.variables.k='0.15';
```

```
lib.mat{5}.variables.rho='965';
```

```
lib.mat{5}.variables.C='1200';
```

```
lib.mat{5}.variables.nu='0.45';
```

```
lib.mat{5}.variables.alpha='1.2e-5';
```

```
lib.mat{5}.variables.E='1.81e5';
```

```

lib.mat{6}.name='Glass (verre)';
lib.mat{6}.varname='mat4';
lib.mat{6}.variables.sigma='1e-8';
lib.mat{6}.variables.k='1.4226';
lib.mat{6}.variables.rho='2150';
lib.mat{6}.variables.C='835';
lib.mat{7}.name='Cr';
lib.mat{7}.varname='mat5';
lib.mat{7}.variables.sigma='7.3e6';
lib.mat{7}.variables.k='93.7';
lib.mat{7}.variables.rho='7150';
lib.mat{7}.variables.C='449';
lib.mat{8}.name='PolySi diffused';
lib.mat{8}.varname='mat6';
lib.mat{8}.variables.sigma='1.724e5';
lib.mat{8}.variables.k='100';
lib.mat{8}.variables.rho='2328';
lib.mat{8}.variables.C='700';
lib.mat{9}.name='PolySi implanté';
lib.mat{9}.varname='mat7';
lib.mat{9}.variables.sigma='5746.6';
lib.mat{9}.variables.k='100';
lib.mat{9}.variables.rho='2328';
lib.mat{9}.variables.C='700';
lib.mat{10}.name='SiO2';
lib.mat{10}.varname='mat8';
lib.mat{10}.variables.sigma='1e-8';
lib.mat{10}.variables.k='1.4';
lib.mat{10}.variables.rho='2270';
lib.mat{10}.variables.C='1000';
lib.mat{11}.name='SiNx';
lib.mat{11}.varname='mat9';
lib.mat{11}.variables.sigma='1e-8';
lib.mat{11}.variables.k='49';
lib.mat{11}.variables.rho='2270';
lib.mat{11}.variables.C='1000';

fem.lib = lib;

% Multiphysics
fem=multiphysics(fem);

% Extend mesh
fem.xmesh=mesextend(fem);

% Solve problem
fem.sol=femstatic(fem, ...
    'solcomp',{'T','V'}, ...
    'outcomp',{'c','T','V'});

% Save current fem structure for restart purposes
fem0=fem;

% Plot solution
postplot(fem, ...
    'tridata',{'T','cont','internal','unit','K'}, ...
    'trimap','jet(1024)', ...
    'title','Surface: Temperature [K]', ...

```

```

        'axis',[2.19767910867088E-4,2.547885122123697E-
4,0.0013924560691304538,0.0014135325408783006,-1,1]);

% Store solution
fem1 = fem0;

% (Default values are not included)

% Application mode 1
clear appl
appl.mode.class = 'HeatTransfer';
appl.mode.type = 'axi';
appl.assignsuffix = '_ht';
clear prop
prop.analysis='static';
appl.prop = prop;
clear bnd
bnd.type = {'q0','cont','ax','q','q','T'};
bnd.h = {0,0,0,'h1','h0',0};
bnd.T0 = {0,0,0,0,0,'T_amb'};
bnd.Tinf = {0,0,0,'T_amb','T_amb',0};
bnd.ind = [3,6,1,3,5,3,2,3,2,3,2,3,2,4,2,2,2,2,2,1,2,2,2,2,2,2, ...
4,4,4,1,1,1,1];
appl.bnd = bnd;
clear equ
equ.k = {'mat4_k','mat8_k','mat9_k','mat6_k','mat2_k','mat10_k','mat3_k',
...
'mat7_k','mat11_k'};
equ.init = 'T_CI';
equ.rho =
{'mat4_rho','mat8_rho','mat9_rho','mat6_rho','mat2_rho','mat10_rho', ...
'mat3_rho','mat7_rho','mat11_rho'};
equ.C = {'mat4_C','mat8_C','mat9_C','mat6_C','mat2_C','mat10_C','mat3_C',
...
'mat7_C','mat11_C'};
equ.Q = {0,0,0,'sigma_poly*(Vr^2+Vz^2)',0,0,0,'sigma_poly_imp*(Vr^2+Vz^2)',
...
0};
equ.ind = [1,2,3,4,5,6,7,8,4,9,7];
appl.equ = equ;
fem.appl{1} = appl;

% Application mode 2
clear appl
appl.mode.class = 'ConductiveMediaDC';
appl.mode.type = 'axi';
appl.assignsuffix = '_dc';
clear prop
clear weakconstr
weakconstr.value = 'off';
weakconstr.dim = {'lm2'};
prop.weakconstr = weakconstr;
appl.prop = prop;
clear bnd
bnd.V0 = {0,0,0,0,'Va1'};
bnd.type = {'V0','cont','nJ0','ax','V'};
bnd.ind = [1,1,1,1,1,1,2,4,3,1,1,1,2,1,2,1,2,3,3,2,3,5,1,2,2,3,2,2,2,2, ...
1,1,1,1,1,1,1];
appl.bnd = bnd;
clear equ
equ.sigma = {5.99e7,'mat6_sigma','mat7_sigma'};

```

```

equ.usage = {0,1,1};
equ.ind = [1,1,1,2,1,1,1,3,2,1,1];
appl.equ = equ;
fem.appl{2} = appl;

% Application mode 3
clear appl
appl.mode.class = 'Diffusion';
appl.mode.type = 'axi';
appl.module = 'CHEM';
appl.assignsuffix = '_chdi';
clear prop
clear weakconstr
weakconstr.value = 'off';
weakconstr.dim = {'lm3'};
prop.weakconstr = weakconstr;
appl.prop = prop;
clear bnd
bnd.type = {'cont','N0','ax'};
bnd.ind = [1,1,1,1,1,1,1,1,1,3,2,3,1,1,2,1,1,1,2,1,1,2,1,1,1,1,1,2,2,1, ...
1,1,1,1,1,1,1];
appl.bnd = bnd;
clear equ
equ.D = {1,'D_p1','D_p1'};
equ.init = {0,'C1','C0'};
equ.usage = {0,1,1};
equ.ind = [1,1,1,1,2,3,1,1,1,1,1];
appl.equ = equ;
fem.appl{3} = appl;
fem.sdim = {'r','z'};
fem.frame = {'ref'};
fem.border = 1;
fem.outform = 'general';
clear units;
units.basesystem = 'SI';
fem.units = units;

% Scalar expressions
fem.expr = {'p','c*R*T', ...
'rho_air','p_atm*M_air/(R*T)', ...
'Cp_air','-4.0644e-015*T^5 +1.4182e-010*T^4 -4.6263e-007*T^3 +
0.00049795*T^2 + 0.016374*T + 1006.3', ...
'k_air','6.1428e-018*T^5 -3.657e-014*T^4 + 8.9256e-011*T^3 -1.1151e-
007*T^2 + 0.00012336*T -0.0025518', ...
'rho_air1','p*M_air/(R*T)', ...
'Va1','(V0)*flc2hs(t+1,0.1)-(V0)*flc2hs(t-1,0.5)', ...
'C1','C1_init*(T>=T_init)+C0*(T<T_init)', ...
'T1','T', ...
'T_CI','T_amb*(1-temp)+T1*(temp)', ...
'D','0.0001*2.9744*(T^(3/2))/p', ...
'D1','0.01*1.15e-5', ...
'D2','0.09', ...
'D_T','0.0001*2.9744*(T^(3/2))/(2e5)', ...
'D_p','0.0001*2.9744*(406.85^(3/2))/p', ...
'Dgas','0.0001*4.3756e-10*(T^(3/2))/p', ...
'temp','1', ...
'Va','V0', ...
'D_p1','D1+D_p*flc2hs(t-1.5e-4,1e-4)'};

% Descriptions
clear descr

```

```
descr.const= {'V0','Applied tension (V)','T_amb','Ambient temperature
(K)','h1','convection coeff over the memb.','h0','convection coeff under
the memb.'};
fem.descr = descr;
```

```
% Library materials
clear lib
lib.mat{1}.name='Or';
lib.mat{1}.varname='mat1';
lib.mat{1}.variables.sigma='4.4e7';
lib.mat{1}.variables.k='297';
lib.mat{1}.variables.rho='19300';
lib.mat{1}.variables.C='128.7';
lib.mat{2}.name='Air gus';
lib.mat{2}.varname='mat10';
lib.mat{2}.variables.k='k_air';
lib.mat{2}.variables.rho='rho_air';
lib.mat{2}.variables.C='Cp_air';
lib.mat{3}.name='Si';
lib.mat{3}.varname='mat11';
lib.mat{3}.variables.sigma='2e-5';
lib.mat{3}.variables.k='100';
lib.mat{3}.variables.rho='2328';
lib.mat{3}.variables.C='702';
lib.mat{4}.name='Propergol';
lib.mat{4}.varname='mat2';
lib.mat{4}.variables.sigma='0';
lib.mat{4}.variables.k='0.15';
lib.mat{4}.variables.rho='1500';
lib.mat{4}.variables.C='1850';
lib.mat{5}.name='PDMS';
lib.mat{5}.varname='mat3';
lib.mat{5}.variables.sigma='2.5e-14';
lib.mat{5}.variables.k='0.15';
lib.mat{5}.variables.rho='965';
lib.mat{5}.variables.C='1200';
lib.mat{5}.variables.nu='0.45';
lib.mat{5}.variables.alpha='1.2e-5';
lib.mat{5}.variables.E='1.81e5';
lib.mat{6}.name='Glass (verre)';
lib.mat{6}.varname='mat4';
lib.mat{6}.variables.sigma='1e-8';
lib.mat{6}.variables.k='1.4226';
lib.mat{6}.variables.rho='2150';
lib.mat{6}.variables.C='835';
lib.mat{7}.name='Cr';
lib.mat{7}.varname='mat5';
lib.mat{7}.variables.sigma='7.3e6';
lib.mat{7}.variables.k='93.7';
lib.mat{7}.variables.rho='7150';
lib.mat{7}.variables.C='449';
lib.mat{8}.name='PolySi diffused';
lib.mat{8}.varname='mat6';
lib.mat{8}.variables.sigma='1.724e5';
lib.mat{8}.variables.k='100';
lib.mat{8}.variables.rho='2328';
lib.mat{8}.variables.C='700';
lib.mat{9}.name='PolySi implanté';
lib.mat{9}.varname='mat7';
lib.mat{9}.variables.sigma='5746.6';
lib.mat{9}.variables.k='100';
```

```

lib.mat{9}.variables.rho='2328';
lib.mat{9}.variables.C='700';
lib.mat{10}.name='SiO2';
lib.mat{10}.varname='mat8';
lib.mat{10}.variables.sigma='1e-8';
lib.mat{10}.variables.k='1.4';
lib.mat{10}.variables.rho='2270';
lib.mat{10}.variables.C='1000';
lib.mat{11}.name='SiNx';
lib.mat{11}.varname='mat9';
lib.mat{11}.variables.sigma='1e-8';
lib.mat{11}.variables.k='49';
lib.mat{11}.variables.rho='2270';
lib.mat{11}.variables.C='1000';

fem.lib = lib;

% Multiphysics
fem=multiphysics(fem);

% Extend mesh
fem.xmesh=mesextend(fem);

% Evaluate initial value using stored solution
init = asseminit(fem,'u',fem1.sol);

% Solve problem
fem.sol=femtime(fem, ...
    'init',init, ...
    'u',fem1.sol, ...
    'solcomp',{'c','T','V'}, ...
    'outcomp',{'c','T','V'}, ...
    'tlist',[0:0.5e-7:0.5e-5,0.5e-5:0.1e-4:2e-4, 2e-4:0.5e-
4:1e-3, 1e-3:0.5e-3:0.012,0.012:0.1:0.5, 0.5:0.05:2, 2:1:10], ...
    'tout','tlist', ...
    'tsteps','strict');

% Save current fem structure for restart purposes
fem0=fem;

temp=1:1:202;%variable interne pour parcourir les solutions transientes

temps_reel=[0:0.5e-7:0.5e-5,0.5e-5:0.1e-4:2e-4, 2e-4:0.5e-4:1e-3, 1.5e-
3:0.5e-3:0.012,0.112:0.1:0.5, 0.5:0.05:2, 3:1:9];

for i=1:length(temp)

% Integrate
Temperature_point(i)=postint(fem,'T', ...
    'unit','K', ...
    'dl',[8], ...
    'edim',0, ...
    'solnum',i);

% Integrate
Pressure_point(i)=postint(fem,'p', ...
    'unit','K*mol/m^3', ...
    'dl',[8], ...
    'edim',0, ...

```

```

        'solnum',i);
Pr=Pressure_point(i)/1e6; %conversion vers MPa.

%calcule deformation de la membrane
%pas compter les premiers valeurs de déformation, la membrane ne suit pas
le transient forte de pression

if (PYR0==1000)% Déformation pour la membrane de 1000umx1000um
%Coefficients:
    p1 = 1.2155e+013
    p2 = -2.6458e+012
    p3 = 2.3278e+011
    p4 = -1.0613e+010
    p5 = 2.6761e+008
    p6 = -3.7207e+006
    p7 = 30123
    p8 = 11.187
    Deformation_max(i)=p1*Pr^7 + p2*Pr^6 + p3*Pr^5 + p4*Pr^4 + p5*Pr^3 +
    p6*Pr^2 + p7*Pr + p8;

else % Déformation pour la membrane de 500umx500um
%Coefficients:
    p1 = 5.608e+009;
    p2 = -3.2538e+009;
    p3 = 7.6595e+008;
    p4 = -9.4015e+007;
    p5 = 6.4529e+006;
    p6 = -2.496e+005;
    p7 = 5969.4;
    p8 = 2.0977;
    Deformation_max(i)=p1*Pr^7 + p2*Pr^6 + p3*Pr^5 + p4*Pr^4 + p5*Pr^3 +
    p6*Pr^2 + p7*Pr + p8;

end

end;

```

4 Ejecteur

Le diagramme de la Figure 27 illustre les différents paramètres du modèle.

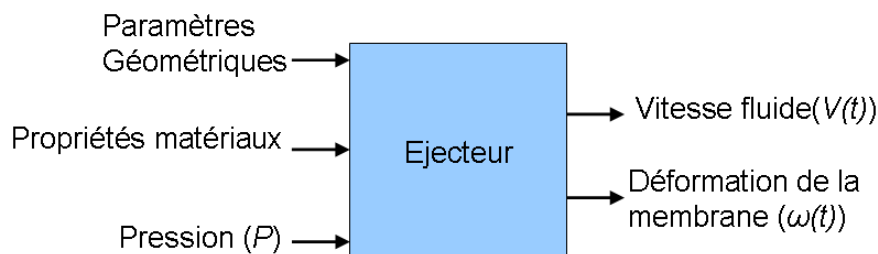


Figure 27. Diagrammes de modèles globaux de fonctionnement de l'éjecteur (couplage fluide-structure)

4.1 Paramètres d'entrée

Comme paramètres d'entrée nous avons :

- Les paramètres géométriques de l'actionneur :

L'épaisseur de la membrane élastique ($e_membrane$), le longueur de la membrane ($L_membrane$), l'hauteur de la cavité (e_cavite), le profondeur de la canalisation (p_canal) et finalement la longueur de la canalisation (L_canal).

- Les propriétés du matériau silicone : le module de Young (E), le coefficient de Poisson (ν) et la masse volumique (R).
- Les propriétés du fluide à vidanger : la masse volumique (Rl) et la viscosité dynamique (miu).
- La pression appliquée sur la membrane : celle-ci est construite à partir de fonctions mathématiques pour être le plus semblable à la pression générée par la décomposition du matériau énergétique et ajusté au modèle 2D, par exemple pour l'actionneur de $L=500\mu m$ sous une puissance de 70mW nous avons l'expression générale:

$$P = Kte1 * Temp1a * (Temp4a + Kte2) / Kte3$$

$$Temp1a = flc2hs(t - t0, dt0)$$

$$Temp4a = exp(-t/t1)$$

Avec « flc2hs » la fonction échelon et « exp » la fonction exponentielle et les paramètres suivants :

$$Kte1 = 28.7e3$$

$$Kte2 = 0.2$$

$$Kte3 = 0.4955$$

$$t0 = 4.3e-4$$

$$dt0 = 3e-4$$

$$t1 = 0.5e-3$$

Pour l'actionneur de $L=1mm$ nous avons les paramètres :

$$Kte1 = 10.12e3$$

$$Kte2 = 0.22$$

$$Kte3 = 0.9525$$

$$t0 = 1.5e-4$$

$$dt0 = 0.75e-4$$

$$t1 = 0.7e-3$$

4.2 Paramètres de sortie

Les paramètres de sortie sont la déformation maximale de la membrane élastique, enregistrée en forme de vecteur [$deformation_max$] et puis la vitesse maximale au centre de la canalisation [$vitesse$]. Ces variables sont évalués en fonction du temps ($temps_reel$).

4.3 Script

Comme dans le cas de la plate-forme chauffante. Après enregistrer les codes sources en format .m (lance_ejecteur.m et ejecteur.m par exemple), il faut lancer sur *COMSOL Script* la commande pour appeler la routine principale (écrire le nom du fichier .m, « lance_ejecteur » par exemple). N'oubliez pas de changer l'acheminement vers le code source dans le *path* de COMSOL.

4.3.1 Fonction de déclaration de variables

Cette routine principale définit les paramètres d'entrée/sortie et puis fait l'appel à la sous routine COMSOL.

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Déclaration de paramètres géométriques%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

L_membrane=500e-6;%longueur membrane
e_membrane=30e-6;%m
e_cavite=130e-6;%m
p_canal=20e-6;%m
L_canal=1e-2;%m

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Déclaration de paramètres matériaux %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%matériau polymère
Young=4e6; %Module de Young (Pa)
Poisson=0.48; %Coefficient de Poisson
Dens=965; %Densité (kg/m^3)

%fluide dans la canalisation
Dens_flu=1e3;%Densité (kg/m^3)
miu=1e-3;%viscosité dynamique (Pa.s)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Déclaration de paramètres de fonction de pression %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

Kte1=28.7e3;
Kte2=0.23;
Kte3=0.4955;

t0=4.3e-4;
dt0=3e-4;
t1=0.5e-3;

%Appel du modèle de l'ejecteur
ejecteur2(L_membrane,e_membrane,e_cavite,p_canal,L_canal,Young,Poisson,Dens
,Dens_flu,miu,Kte1,Kte2,Kte3,t0,dt0,t1);

end;
```

4.3.2 Script COMSOL

```
% COMSOL Multiphysics Model M-file
% Generated by COMSOL 3.3 (COMSOL 3.3.0.405, $Date: 2006/08/31 18:03:47 $)
% Some geometry objects are stored in a separate file.
% The name of this file is given by the variable 'flbinaryfile'.

function
ejecteur(L,e,c,a,n,Young,Poisson,Dens,Dens_flu,miu,Kte1,Kte2,Kte3,t0,dt0,t1
)

flclear fem

% COMSOL version
clear vrsn
vrsn.name = 'COMSOL 3.3';
vrsn.ext = '';
vrsn.major = 0;
vrsn.build = 405;
vrsn.rcs = '$Name: $';
vrsn.date = '$Date: 2006/08/31 18:03:47 $';
fem.version = vrsn;

% Geometry
g7=rect2(L,e,'base','corner','pos',[0,0]);
g8=rect2(L,c,'base','corner','pos',[0,e]);
g10=rect2(n,a,'base','corner','pos',[L,e+c-a]);

% Analyzed geometry
clear s
s.objs={g7,g8,g10};
s.name={'R4','R5','R6'};
s.tags={'g7','g8','g10'};

fem.draw=struct('s',s);
fem.geom=geomcsg(fem);

% Initialize mesh
fem.mesh=meshinit(fem, ...
    'hauto',5, ...
    'hgradsub',[1,1], ...
    'hmaxsub',[1,0.000005]);

% Refine mesh
fem.mesh=meshrefine(fem, ...
    'mcase',0, ...
    'boxcoord',[3.60497296165455E-4 8.798023175854346E-4
8.705168401727537E-5 2.184208660063704E-4], ...
    'rmethod','regular');

% (Default values are not included)

% Application mode 1
clear appl
appl.mode.class = 'SmePlaneStrain';
appl.sdim = {'X','Y','Z'};
appl.module = 'MEMS';
appl.shape = {'shlag(2,'u'),'shlag(2,'v'),'shlag(1,'p')'};
```

```

appl.gporder = 4;
appl.cporder = 2;
appl.assignsuffix = '_smpn';
clear prop
prop.analysis='time';
prop.largedef='on';
appl.prop = prop;
clear bnd
bnd.Fx = {'-lm5*dvol_ale/dvol',0,'-lm5*dvol_ale/dvol',0,0};
bnd.constrcond = {'free','free','free','free','fixed'};
bnd.name = {'Fluid load','','','',''};
bnd.Fy = {'-lm6*dvol_ale/dvol',0,'-lm6*dvol_ale/dvol','P',0};
bnd.ind = [5,4,2,3,2,5,2,2,2,2,2];
appl.bnd = bnd;
clear equ
equ.rho = {960,7850,7850,7850};
equ.shape = {[1;2;3],[1;2],[1;2],[1;2]};
equ.materialmodel = {'hyper','iso','iso','iso'};
equ.name = {'','','Fluid domain','Solid domain'};
equ.mu = {1.3514e6,8e5,8e5,8e5};
equ.mixedform = {1,0,0,0};
equ.usage = {1,0,0,1};
equ.kappa = {33.33e6,1e10,1e10,1e10};
equ.thickness = {500e-6,1,1,1};
equ.ind = [1,2,2];
appl.equ = equ;
fem.appl{1} = appl;

% Application mode 2
clear appl
appl.mode.class = 'MovingMesh';
appl.sdim = {'X','Y','Z'};
appl.shape =
{'shlag(2,'lm3'),'shlag(2,'lm4'),'shlag(2,'x'),'shlag(2,'y)'};
appl.gporder = {40,4};
appl.cporder = 2;
appl.assignsuffix = '_ale';
clear prop
prop.smoothing='winslow';
prop.analysis='transient';
clear weakconstr
weakconstr.value = 'non-ideal';
weakconstr.dim = {'lm3','lm4'};
prop.weakconstr = weakconstr;
appl.prop = prop;
clear bnd
bnd.defflag = {{0;0},{1;1},{1;1},{1;1},{1;1}};
bnd.deform = {{0;0},{0;0},{'u';'v'},{'u';'v'},{0;0}};
bnd.wcshape = [1;2];
bnd.name = {'','','','Structural displacement','Fixed'};
bnd.ind = [1,1,2,3,2,1,2,1,2,2,2];
appl.bnd = bnd;
clear equ
equ.gporder = 2;
equ.physexpr = {{'u';'v'},{0;0},{0;0},{'u';'v'}};
equ.type = {'phys','free','free','phys'};
equ.shape = [3;4];
equ.name = {'','','Fluid domain','Solid domain'};
equ.ind = [1,2,2];
appl.equ = equ;
fem.appl{2} = appl;

```

```

% Application mode 3
clear appl
appl.mode.class = 'GeneralLaminarFlow';
appl.dim = {'u2', 'v2', 'p2', 'nxw', 'nyw'};
appl.module = 'MEMS';
appl.shape =
{'shlag(2, 'lm5')', 'shlag(2, 'lm6')', 'shlag(2, 'u2')', 'shlag(2, 'v2')',
'shlag(1, 'p2')'};
appl.gporder = {40, 4, 2};
appl.cporder = {2, 1};
appl.assignsuffix = '_mmglf';
clear prop
prop.nisot='Off';
clear weakconstr
weakconstr.value = 'non-ideal';
weakconstr.dim = {'lm5', 'lm6'};
prop.weakconstr = weakconstr;
appl.prop = prop;
clear bnd
bnd.name = {'', '', '', '', 'Structural velocity'};
bnd.type = {'noslip', 'uv', 'neutral', 'out', 'uv'};
bnd.wcgporder = 1;
bnd.wcshape = [1; 2];
bnd.v0 = {0, 'vt', 0, 0, 'vt'};
bnd.u0 = {0, 'ut', 0, 0, 'ut'};
bnd.ind = [1, 1, 1, 2, 1, 1, 1, 3, 1, 1, 4];
appl.bnd = bnd;
clear equ
equ.shape = [3; 4; 5];
equ.cporder = {{1; 1; 2}};
equ.usage = {0, 1, 1, 1, 0};
equ.name = {'', '', '', 'Fluid domain', 'Solid domain'};
equ.gporder = {{2; 2; 3}};
equ.thickness = {1, 500e-6, 20e-6, 1, 1};
equ.ind = [1, 2, 3];
appl.equ = equ;
fem.appl{3} = appl;
fem.sdim = {'X', 'Y'}, {'x', 'y'};
fem.frame = {'ref', 'ale'};
fem.border = 1;
clear units;
units.basesystem = 'SI';
fem.units = units;

% Multiphysics
fem=multiphysics(fem);
% COMSOL Multiphysics Model M-file
% Generated by COMSOL 3.3 (COMSOL 3.3.0.405, $Date: 2006/08/31 18:03:47 $)
% Some geometry objects are stored in a separate file.
% The name of this file is given by the variable 'flbinaryfile'.

% Constants
fem.const = {'Young', '4e6', ...
    'Poisson', '0.48', ...
    'Dens', '965'};

% Constants
fem.const = {'Young', '4e6', ...
    'Poisson', '0.48', ...

```

```

    'Dens','965'};

% Constants
fem.const = {'Young','4e6', ...
    'Poisson','0.48', ...
    'Dens','965', ...
    'Kte1','28.7e3', ...
    'Kte2','0.23', ...
    'Kte3','0.4955', ...
    't0','4.3e-4', ...
    'dt0','3e-4', ...
    't1','0.5e-3'};

% Constants
fem.const = {'Young','4e6', ...
    'Poisson','0.48', ...
    'Dens','965', ...
    'Kte1','28.7e3', ...
    'Kte2','0.23', ...
    'Kte3','0.4955', ...
    't0','4.3e-4', ...
    'dt0','3e-4', ...
    't1','0.5e-3'};

% Constants
fem.const = {'Young','4e6', ...
    'Poisson','0.48', ...
    'Dens','965', ...
    'Kte1','28.7e3', ...
    'Kte2','0.23', ...
    'Kte3','0.4955', ...
    't0','4.3e-4', ...
    'dt0','3e-4', ...
    't1','0.5e-3', ...
    'Dens_flu','1e3', ...
    'miu','1e-3', ...
    'L_membrane','500e-6', ...
    'p_canal','20e-6'};

% Constants
fem.const = {'Young',Young, ...
    'Poisson',Poisson, ...
    'Dens',Dens, ...
    'Kte1',Kte1, ...
    'Kte2',Kte2, ...
    'Kte3',Kte3, ...
    't0',t0, ...
    'dt0',dt0, ...
    't1',t1, ...
    'Dens_flu',Dens_flu, ...
    'miu',miu, ...
    'L_membrane',L, ...
    'p_canal',a};

% (Default values are not included)

% Application mode 1
clear appl
appl.mode.class = 'SmePlaneStrain';
appl.sdim = {'X','Y','Z'};
appl.module = 'MEMS';

```

```

appl.shape = {'shlag(2, 'u')', 'shlag(2, 'v')', 'shlag(1, 'p')'};
appl.gporder = 4;
appl.cporder = 2;
appl.assignsuffix = '_smpn';
clear prop
prop.analysis='time';
prop.largedef='on';
appl.prop = prop;
clear bnd
bnd.Fx = {'-lm5*dvol_ale/dvol', 0, '-lm5*dvol_ale/dvol', 0, 0};
bnd.constrcond = {'free', 'free', 'free', 'free', 'fixed'};
bnd.name = {'Fluid load', '', '', '', ''};
bnd.Fy = {'-lm6*dvol_ale/dvol', 0, '-lm6*dvol_ale/dvol', 'P', 0};
bnd.ind = [5, 4, 2, 3, 2, 5, 2, 2, 2, 2, 2];
appl.bnd = bnd;
clear equ
equ.rho = {'Dens', 7850, 7850, 7850};
equ.shape = {[1;2;3], [1;2], [1;2], [1;2]};
equ.materialmodel = {'hyper', 'iso', 'iso', 'iso'};
equ.name = {'', '', 'Fluid domain', 'Solid domain'};
equ.mu = {'Young/(2*(1+Poisson))', 8e5, 8e5, 8e5};
equ.mixedform = {1, 0, 0, 0};
equ.usage = {1, 0, 0, 1};
equ.kappa = {'Young/(3*(1-2*Poisson))', 1e10, 1e10, 1e10};
equ.thickness = {500e-6, 1, 1, 1};
equ.ind = [1, 2, 2];
appl.equ = equ;
fem.appl{1} = appl;

% Application mode 2
clear appl
appl.mode.class = 'MovingMesh';
appl.sdim = {'X', 'Y', 'Z'};
appl.shape =
{'shlag(2, 'lm3')', 'shlag(2, 'lm4')', 'shlag(2, 'x')', 'shlag(2, 'y')'};
appl.gporder = {40, 4};
appl.cporder = 2;
appl.assignsuffix = '_ale';
clear prop
prop.smoothing='winslow';
prop.analysis='transient';
clear weakconstr
weakconstr.value = 'non-ideal';
weakconstr.dim = {'lm3', 'lm4'};
prop.weakconstr = weakconstr;
appl.prop = prop;
clear bnd
bnd.defflag = {{0;0}, {1;1}, {1;1}, {1;1}, {1;1}};
bnd.deform = {{0;0}, {0;0}, {'u'; 'v'}, {'u'; 'v'}, {0;0}};
bnd.wcshape = [1;2];
bnd.name = {'', '', '', 'Structural displacement', 'Fixed'};
bnd.ind = [1, 1, 2, 3, 2, 1, 2, 1, 2, 2, 2];
appl.bnd = bnd;
clear equ
equ.gporder = 2;
equ.physexpr = {{'u'; 'v'}, {0;0}, {0;0}, {'u'; 'v'}};
equ.type = {'phys', 'free', 'free', 'phys'};
equ.shape = [3;4];
equ.name = {'', '', 'Fluid domain', 'Solid domain'};
equ.ind = [1, 2, 2];
appl.equ = equ;

```

```

fem.appl{2} = appl;

% Application mode 3
clear appl
appl.mode.class = 'GeneralLaminarFlow';
appl.dim = {'u2', 'v2', 'p2', 'nxw', 'nyw'};
appl.module = 'MEMS';
appl.shape =
{'shlag(2, 'lm5')', 'shlag(2, 'lm6')', 'shlag(2, 'u2')', 'shlag(2, 'v2')',
'shlag(1, 'p2')'};
appl.gporder = {40, 4, 2};
appl.cporder = {2, 1};
appl.assignsuffix = '_mmglf';
clear prop
prop.nisot='Off';
clear weakconstr
weakconstr.value = 'non-ideal';
weakconstr.dim = {'lm5', 'lm6'};
prop.weakconstr = weakconstr;
appl.prop = prop;
clear bnd
bnd.name = {'', '', '', 'Structural velocity'};
bnd.type = {'noslip', 'uv', 'neutral', 'out', 'uv'};
bnd.wcgporder = 1;
bnd.wcshape = [1; 2];
bnd.v0 = {0, 'vt', 0, 0, 'vt'};
bnd.u0 = {0, 'ut', 0, 0, 'ut'};
bnd.ind = [1, 1, 1, 2, 1, 1, 1, 3, 1, 1, 4];
appl.bnd = bnd;
clear equ
equ.shape = [3; 4; 5];
equ.cporder = {{1; 1; 2}};
equ.usage = {0, 1, 1, 1, 0};
equ.name = {'', '', 'Fluid domain', 'Solid domain'};
equ.rho = {1e3, 'Dens_flu', 'Dens_flu', 1e3, 1e3};
equ.eta = {1e-3, 'miu', 'miu', 1e-3, 1e-3};
equ.gporder = {{2; 2; 3}};
equ.thickness = {1, 'L_membrane', 'p_canal', 1, 1};
equ.ind = [1, 2, 3];
appl.equ = equ;
fem.appl{3} = appl;
fem.sdim = {{'X', 'Y'}, {'x', 'y'}};
fem.frame = {'ref', 'ale'};
fem.border = 1;
clear units;
units.basesystem = 'SI';
fem.units = units;

% Scalar expressions
fem.expr = {'Temp1', 'flc2hs(t-t0,dt0)', ...
'Temp2', 'exp(-t/t1)', ...
'P', 'Kte1*Temp1*(Temp2+Kte2)/Kte3'};

% Multiphysics
fem=multiphysics(fem);

% COMSOL Multiphysics Model M-file
% Generated by COMSOL 3.3a (COMSOL 3.3.0.511, $Date: 2007/02/02 19:05:58 $)
% Some geometry objects are stored in a separate file.
% The name of this file is given by the variable 'flbinaryfile'.

```

```

% COMSOL version
clear vrsn
vrsn.name = 'COMSOL 3.3';
vrsn.ext = 'a';
vrsn.major = 0;
vrsn.build = 511;
vrsn.rcs = '$Name: $';
vrsn.date = '$Date: 2007/02/02 19:05:58 $';
fem.version = vrsn;

% (Default values are not included)

% Application mode 1
clear appl
appl.mode.class = 'SmePlaneStrain';
appl.sdim = {'X','Y','Z'};
appl.module = 'MEMS';
appl.shape = {'shlag(2, 'u')', 'shlag(2, 'v')', 'shlag(1, 'p')'};
appl.gporder = 4;
appl.cporder = 2;
appl.assignsuffix = '_smpn';
clear prop
prop.analysis='time';
prop.largedef='on';
appl.prop = prop;
clear bnd
bnd.Fx = {'-lm5*dvol_ale/dvol',0,'-lm5*dvol_ale/dvol',0,0};
bnd.constrcond = {'free','free','free','free','fixed'};
bnd.name = {'Fluid load','','','',''};
bnd.Fy = {'-lm6*dvol_ale/dvol',0,'-lm6*dvol_ale/dvol','P',0};
bnd.ind = [5,4,2,3,2,5,2,2,2,2,2];
appl.bnd = bnd;
clear equ
equ.dr = 1;
equ.rho = {'Dens',7850,7850,7850};
equ.Shard = '2.0e10/(1-2.0e10/2.0e11)*epe_smpn';
equ.shape = {[1;2;3],[1;2],[1;2],[1;2]};
equ.materialmodel = {'hyper','iso','iso','iso'};
equ.name = {'','','Fluid domain','Solid domain'};
equ.userPML = {{0;0}};
equ.mu = {'Young/(2*(1+Poisson))',8e5,8e5,8e5};
equ.mixedform = {1,0,0,0};
equ.dy = 1;
equ.dx = 1;
equ.usage = {1,0,0,1};
equ.kappa = {'Young/(3*(1-2*Poisson))',1e10,1e10,1e10};
equ.thickness = {L,1,1,1};
equ.R0 = 1;
equ.ind = [1,2,2];
appl.equ = equ;
fem.appl{1} = appl;

% Application mode 2
clear appl
appl.mode.class = 'MovingMesh';
appl.sdim = {'X','Y','Z'};
appl.shape = {'shlag(2, 'lm3')', 'shlag(2, 'lm4')', 'shlag(2, 'x')', 'shlag(2, 'y')'};
appl.gporder = {40,4};
appl.cporder = 2;

```

```

appl.assignsuffix = '_ale';
clear prop
prop.smoothing='winslow';
prop.analysis='transient';
clear weakconstr
weakconstr.value = 'non-ideal';
weakconstr.dim = {'lm3', 'lm4'};
prop.weakconstr = weakconstr;
appl.prop = prop;
clear bnd
bnd.defflag = {{0;0},{1;1},{1;1},{1;1},{1;1}};
bnd.deform = {{0;0},{0;0},{'u';'v'},{'u';'v'},{0;0}};
bnd.wcshape = [1;2];
bnd.name = {'','','','Structural displacement','Fixed'};
bnd.ind = [1,1,2,3,2,1,2,1,2,2,2];
appl.bnd = bnd;
clear equ
equ.gporder = 2;
equ.physexpr = {'u';'v'},{0;0},{0;0},{'u';'v'};
equ.type = {'phys','free','free','phys'};
equ.shape = [3;4];
equ.name = {'','','Fluid domain','Solid domain'};
equ.ind = [1,2,2];
appl.equ = equ;
fem.appl{2} = appl;

% Application mode 3
clear appl
appl.mode.class = 'GeneralLaminarFlow';
appl.dim = {'u2','v2','p2','phi','nxw','nyw'};
appl.module = 'MEMS';
appl.shape =
{'shlag(2,'lm5'),'shlag(2,'lm6'),'shlag(2,'u2'),'shlag(2,'v2)',
'shlag(1,'p2')'};
appl.gporder = {40,4,2};
appl.cporder = {2,1};
appl.assignsuffix = '_mmglf';
clear prop
prop.nisot='Off';
clear weakconstr
weakconstr.value = 'non-ideal';
weakconstr.dim = {'lm5','lm6','lmphi'};
prop.weakconstr = weakconstr;
appl.prop = prop;
clear bnd
bnd.name = {'','','','Structural velocity'};
bnd.type = {'noslip','uv','neutral','out','uv'};
bnd.wcgporder = 1;
bnd.wcshape = [1;2];
bnd.v0 = {0,'vt',0,0,'vt'};
bnd.u0 = {0,'ut',0,0,'ut'};
bnd.ind = [1,1,1,2,1,1,1,3,1,1,4];
appl.bnd = bnd;
clear equ
equ.shape = [3;4;5];
equ.cporder = {{1;1;2}};
equ.usage = {0,1,1,1,0};
equ.name = {'','','','Fluid domain','Solid domain'};
equ.rho = {1e3,'Dens_flu','Dens_flu',1e3,1e3};
equ.eta = {1e-3,'miu','miu',1e-3,1e-3};
equ.gporder = {{2;2;3}};

```

```

equ.thickness = {1, 'L_membrane', 'p_canal', 1, 1};
equ.ind = [1, 2, 3];
appl.equ = equ;
fem.appl{3} = appl;
fem.sdim = {'X', 'Y'}, {'x', 'y'};
fem.frame = {'ref', 'ale'};
fem.border = 1;
clear units;
units.basesystem = 'SI';
fem.units = units;

% Scalar expressions
fem.expr = {'Temp1', 'flc2hs(t-t0,dt0)', ...
    'Temp2', 'exp(-t/t1)', ...
    'P', 'Kte1*Temp1*(Temp2+Kte2)/Kte3'};

% Multiphysics
fem=multiphysics(fem);

% Extend mesh
fem.xmesh=mesextend(fem, ...
    'linshape', []);

% Solve problem
fem.sol=femtime(fem, ...

'solcomp',{'lm5','u2','lm3','u','y','p2','v2','p','lm4','x','lm6','v'}, ...

'outcomp',{'lm5','u2','lm3','u','y','p','p2','v2','x','lm4','v','lm6'}, ...
    'tlist',[0:0.5e-4:0.0512], ...
    'tout','tlist');

% Save current fem structure for restart purposes
fem0=fem;

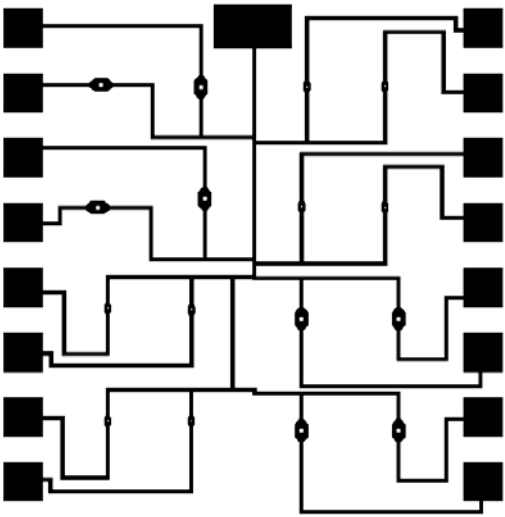
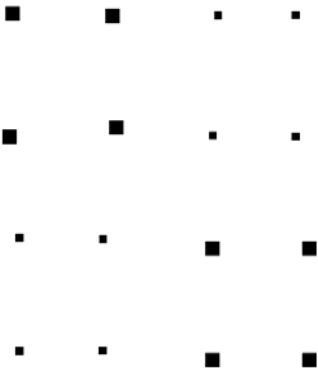
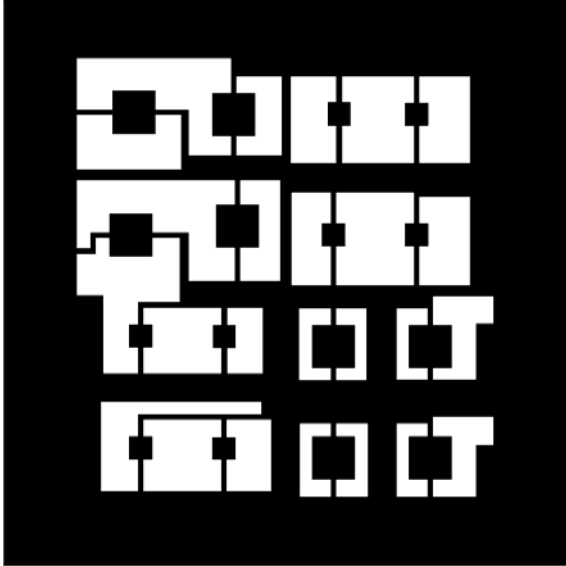
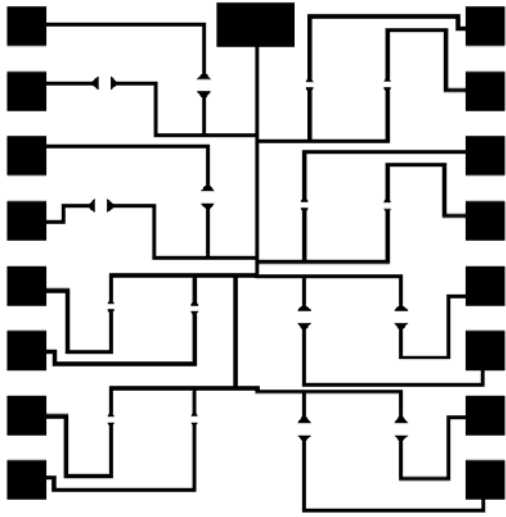
% Plot solution
postplot(fem, ...
    'tridata',{'U_mmglf','cont','internal','unit','m/s'}, ...
    'trimap','jet(1024)', ...
    'solnum','end', ...
    'title','Time=0.0512    Surface: Champ de vitesses [m/s]', ...
    'axis',[-0.0016347036832223077,0.012183187369917907,-
0.00489720803032722,0.005077208033055995,-1,1]);

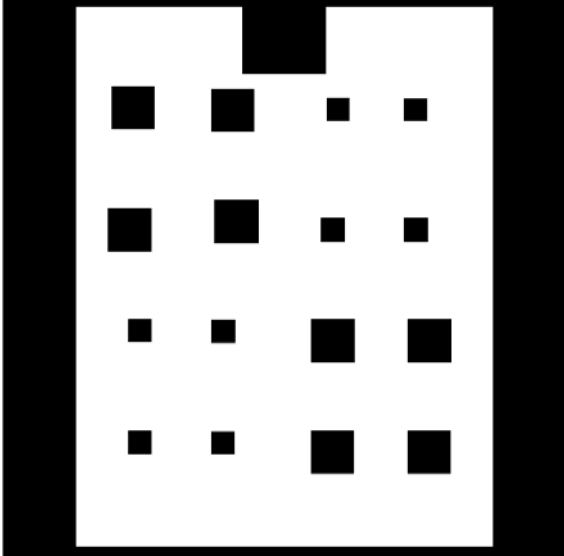
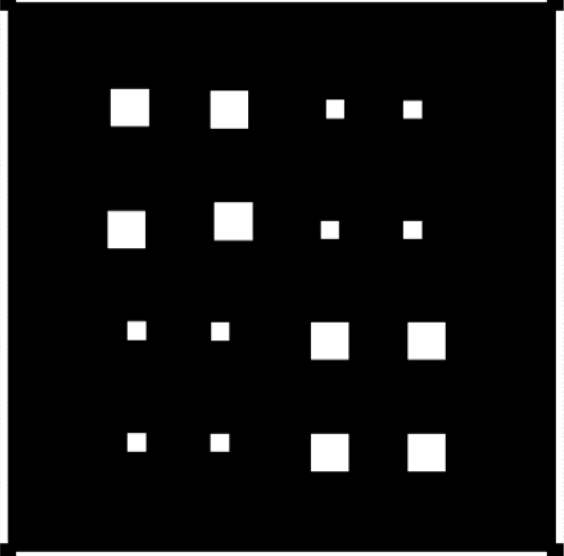
pause;
% Plot in cross-section or along domain
postcrossplot(fem,0,[L/2;e], ...
    'pointdata',{'disp_smpn','unit','um'}, ...
    'frame','ref', ...
    'title','D?placement total [um]', ...
    'axislabel',{'Temps','D?placement total [um]'});

pause;
% Plot in cross-section or along domain
postcrossplot(fem,0,[L+n/2;e+c-a/2], ...
    'pointdata',{'U_mmglf','unit','mm/s'}, ...
    'frame','ref', ...
    'title','Champ de vitesses [mm/s]', ...
    'axislabel',{'Temps','Champ de vitesses [mm/s]'});

```

ANNEXE E: Masques pour la réalisation technologique de l'actionneur PYRACT

	
Masque 1 : Définition des résistances (attaque polysilicium)	Masque 2 : Oxyde (SiO_2) de protection (Attaque SiO_2 PECVD)
	
Masque 3 : Gravure RIE de SiN_x pour arriver au SiO_2	Masque 4 : Définition de pistes et contacts (Attaque Au/Cr)

	
Masque 5 : Définition des murs de réservoir en silicone (RMS 083)	Masque 6 : Gravure profonde (DRIE) pour libération des membranes diélectriques

ANNEXE F : Détail du calcul du module de Young à partir des courbes de « bulge test »

L'expression générale de la pression appliquée sous la membrane élastique en fonction de sa déformation maximale au centre de la membrane est donné par :

$$P_{N_2} = \frac{E}{(1-\nu)} \frac{e^3 w_{max}}{(2a)^4} \left(\frac{C_0}{(1+\nu)} + C_1^* \frac{w_{max}^2}{e^2} \right) + C_2^* \frac{\sigma_0 e w_{max}}{(2a)^2} \quad (2)$$

Avec a et e , la demi-longueur latérale et l'épaisseur de la membrane respectivement.

Les coefficients de correction s'expriment : $C_1^* = K_1 \cdot C_1$ et $C_2^* = K_2 \cdot C_2$, à partir des analyses numériques sur des membranes carrées [1][2].

Pour de membranes carrées, C_0 , C_1 , C_2 s'expriment:

$$C_0 = \frac{1}{12\alpha} \quad [3] \quad (3)$$

$$C_1 = \frac{\pi^6}{2(1+\nu)} \left[\frac{9+2z^2+9z^4}{256} - \left[\frac{(4+z+z^2+4z^3-3z\nu(1+z))^2}{2[81\pi^2(1+z^2)+128z+\nu(128z-9\pi^2(1+z^2))]} \right] \right] \quad [4] \quad (4)$$

$$C_2 = \frac{\pi^4(1+z^2)}{16} \quad [4] \quad (5)$$

Avec :

z , le rapport géométrique de la membrane (a/b)

b , la demi-largeur de la membrane.

Les coefficients K_1 et K_2 sont dépendants du coefficient de Poisson (ν), de la déformation maximale de la membrane (w_{max}) et de son épaisseur (e) comme suit [1] :

$$K_1 = (A_0 - A_1\nu) - (A_2 - A_3\nu) \exp\left(-A_4 \frac{w_{max}}{e}\right) + (A_5 - A_6e) \exp\left(-A_7 \frac{w_{max}}{e}\right) \quad (6)$$

$$K_2 = \text{constante} \quad (7)$$

Dans les tables suivantes on peut trouver les différentes constantes en fonction du rapport de géométrie.

α	$n=1/z=b/a$
$1,26 \times 10^{-3}$	1
$2,2 \times 10^{-3}$	1.5
$2,54 \times 10^{-3}$	2
$2,6 \times 10^{-3}$	∞

Table 1. Coefficient du terme lié aux petites déformations en fonction de la géométrie [3]

$n=1/z$	A_0	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	$A_6 (\mu\text{m})^{-1}$	A_7
1	1,41	0,292	1,64	1,466	1,4	0,173	$2,35 \times 10^{-3}$	0,1
2	1,61	0,292	2,6	2	2,1	0,165	5×10^{-4}	0,15
4	1,95	0,292	2,8	5,33	2,5	0,165	5×10^{-4}	0,15

Table 2. Coefficients de correction liés aux grandes déformations des membranes en fonction de la géométrie [1]

$n=1/m$	1	2	4	∞
K_2	1,12	1,15	1,24	1,31

Table 3. Coefficient de correction lié au état initial de contrainte dans les membranes en fonction de la géométrie [1]

Dans notre cas on utilise considère des membranes carrées ($n=z=1$). Dans ce cas, $\alpha = 1,26 \times 10^{-3}$, $K_2 = 1,12$, concernant le coefficient K_I la valeur moyenne est prise dans la gamme de déformation mesurée, la valeur obtenue est de 1,36.

ANNEXE G : Publications

Revue internationale avec comité de lecture

- **ARDILA RODRIGUEZ G.A., ROSSI C., ZHANG K.**
Multi-physics system modeling of a pneumatic micro actuator
Sensors and Actuators A : Physical. **Sous-presse.**
ISSN : 0924-4247
Rapport LAAS N° 07032

- **ZHANG K., ROSSI C., TENAILLEAU C., ALPHONSE P., ARDILA RODRIGUEZ G.A.**
Development of a nano Al/CuO based energetic material on silicon substrate
Applied Physics Letters, Vol.91, N°11, pp.113117-1-113117-3, Septembre 2007
Rapport LAAS N° 07427

- **ARDILA RODRIGUEZ G.A., ROSSI C., ESTEVE D.**
Design, fabrication and operation of a wireless and miniature ignition system
Sensors and Actuators A: Physical, Volume 126, Issue 1, 26 Janvier 2006, Pages 201-210
ISSN : 0924-424

- **CAMACHO A.S., GUTIERREZ R.M., ARDILA RODRIGUEZ G.A.**
Intersubband transitions in quantum wells as sources of Thz radiation
Microelectronics Journal, Volume 36, Issue 10, Octobre 2005, Pages 922-927
ISSN : 0026-269

Conférences internationales avec comité de lecture et actes publiés

- **ARDILA RODRIGUEZ G.A., ROSSI C.**
Multiphysic modelling of a microactuator based on the decomposition of an energetic material: application to microfluidic
EUROSIME 2007, Londres, Grande-Bretagne, 15-18 Avril 2007 – **Communication Orale (Keynote Presentation)**
ISBN : 1-4244-1106-8
Rapport LAAS N° 04613

Conférences nationales avec comité de lecture et actes publiés

- **ARDILA RODRIGUEZ G.A., ROSSI C., CURTIDOR J.**
First step in the numerical modeling of a micro/nano actuator based on energetic material for microfluidic application
Microfluidics 2006, 3^{ème} Congrès Français de Microfluidique, Toulouse, France, 12-14 Décembre – **Communication Orale**
ISBN : 2-906831-66-2
Rapport LAAS N° 06480
- **ARDILA RODRIGUEZ G.A., ROSSI C., ESTEVE D., CONEDERA V., GRANIER H.**
Développement d'une micro-source de pression pour des applications microfluidiques
JNRDM 2006, 9^{èmes} Journées Nationales du Réseau Doctorale en Microélectronique, Rennes, France, 10-12 Mai 2006 – **Communication Orale**
ISBN : 978-2-9527172-0-5
Rapport LAAS N° 06063

Conférences nationales avec comité de lecture sans actes publiés

- **ARDILA RODRIGUEZ G.A., ROSSI C.**
Conception d'un micro actionneur à base de matériau énergétique pour des applications microfluidiques : approche multi-physiques

Réunion du groupe de travail « Conception, test, fiabilité et packaging » du GDR MNS Montpellier (LIRMM), France, 31 Mai et 1 Juin 2007 – **Communication Orale**

- CAZARRE A., ROSSI C., **ARDILA RODRIGUEZ G.A.**, PONS P., PERROU D., TOUNSI P., HABRA W.

Introduction à la modélisation multi physique (Environnement COMSOL MULTIPHYSICS)

CNFM 2006, 9èmes Journées pédagogiques, Saint-Malo, France, 22-24 Novembre – **Poster**

Conférences locales avec comité de lecture sans actes publiés

- **ARDILA RODRIGUEZ G.A.**

Première étape dans la modélisation d'une micro-source de pression pour des applications microfluidiques

Journée Annuelle de l'Ecole Doctorale Génie Electrique, Electronique, Télécommunications (GEET) 2007, Toulouse, France, 8 Mars– **Communication Orale**
Rapport LAAS N° 07033

BIBLIOGRAPHIE

Introduction générale

- [1] D. Esteve, C. Rossi, Akheyar Technologies for dimensional mastering in biomedical microsystems, 18th IEEE Engineering in Medicine and Biology Society Conference, Amsterdam, 31 Octobre- 3 Novembre 1996.
- [2] C. Rossi, B. Larangot et al, Final characterizations of milimeter scale pyrotechnical microthrusters, *Sensors and Actuators A*, Vol. 121, N°2, Juin 2005, pp. 508-514.

CHAPITRE I : L'actionnement en microfluidique. Etat de l'art et problématique

- [1] R. P. Feynman, , There's Plenty of Room at the Bottom, *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 1, No. 1, 1992, pp. 60-66.
- [2] A Härtl, J Franz and R Vogt, Application of an electronic accelerometer for a single point sensing airbag electronic control unit, *Sensors Expo Proc.* Chicago, IL, USA (1–3 Oct., 1991), pp. 204.
- [3] L.-S. Fan et al, IC-processed electrostatic micro-motors, *Electron Devices Meeting*, 1988. IEDM '88, San Francisco, CA, USA, USA, pp. 666-669.
- [4] A. Manz, N. Graber, H. M. Widmer, Miniaturized total chemical analysis. systems: a novel concept for chemical. sensing, *Sens. Actuators B*, 1990, pp. 244-248.
- [5] K. W. Oh and C. H Ahn, TOPICAL REVIEW: A review of microvalves, *J. Micromech. Microeng.* Vol. 16, 2006, R13–R39.
- [6] D. J. Laser and J. G. Santiago, A review of micropumps, *J. Micromech. Microeng.* Vol. 14, 2004, R35–R64.
- [7] N.-T. Nguyen and Z. Wu, Micromixers—a review, *J. Micromech. Microeng.* , Vol. 15, 2005, R1–R16.
- [8] Whitesides G. M., The origins and the future of microfluidics, *Nature*, Vol. 442, 2006, pp. 368-373.
- [9] S. P. Pacheco et al., Design of low actuation voltage RF MEMS switch, *Microwave Symposium Digest.*, 2000 IEEE MTT-S International, Vol.1, 2000, pp. 165-168.

-
- [10] P. Ditrich, K. Tachikawa and A. Manz, Micro Total Analysis Systems. Latest Advancements and Trends, *Anal. Chem.*, Vol. 78, 2006, pp. 3887-3908.
- [11] P. Tabeling, *Introduction à la microfluidique*, Ed. Belin, Paris, 2003
- [12] N.-T. Nguyen and S. T. Wereley, *Fundamentals and Applications of Microfluidics*, Ed. Artech House, 2002.
- [13] S. Jacobson, R. Hergenroder, A. Moore, J. Ramsey, Precolumn Reactions with Electrophoretic Analysis Integrated on a Microchip, *Anal. Chem.*, Vol. 66, 1994, pp. 4127-4132.
- [14] M. Burns et al, An Integrated Nanoliter DNA Analysis Device, *Science*, Vol. 282, 1998, 484-487.
- [15] <http://www.abbottdiabetescare.com/>
- [16] <http://www.abbottpointofcare.com/istat/>
- [17] M. J. Felton, Lab on Chip: Poised on the brink, *Anal. Chem.*, 2003, pp. 505-508.
- [18] S. K. Deo et al, Responsive Drug delivery systems, *Anal. Chem.*, 2003, pp. 207-213.
- [19] Evans, J.D., Liepmann, D. and Pisano, A.P. (1997) "Planar Laminar Mixer", MEMS97 (The Tenth Annual International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems), January 26-30, 1997, Nagoya, Japan, pp. 96-101.
- [20] D. Esteve, *BARMINT. Basic Research for Microsystems Integration*, Cepadues Editions, 1997, 266p
- [21] D. Esteve, J. Tasselli and A. M. Gue, MICROMED II: système miniaturisé d'administration de médicaments in vivo, Programme Microsystèmes du CNRS-MICROMED II, Octobre 1999, 170p. Rapport LAAS No99425
- [22] <http://www.affymetrix.com/>
- [23] T. Phou, Conception et réalisation d'un micro-injecteur matriciel pour la fonctionnalisation des biopuces, Doctorat de l'Université Paul Sabatier, Toulouse, 26 Mai 2003, Rapport LAAS No03246.
- [24] D. Jugieu, Conception et réalisation d'une matrice de microéjecteur thermique adressable individuellement pour la fonctionnalisation de biopuce, Doctorat de l'Institut National Polytechnique, Toulouse, 15 Mars 2005, Rapport LAAS No05139.
- [25] P. Belaubre, Conception et réalisation d'un micro-système robotisé de dépôt de produits biologiques par micro-leviers en silicium pour l'élaboration de biopuces, Doctorat de l'Institut National des Sciences Appliquées, Toulouse, 19 Décembre 2003, Rapport LAAS No03609.

- [26] F. Rachedi, Microreactor for VOC treatment by catalytic oxidation over platinum, 1st International Congress on Green Process Engineering, Toulouse (France), 24-26 Avril 2007.
- [27] S. Charlot et al, Development of a 3D hybrid Si/polymer technology for integrating active Si chips in microfluidic systems, 10th International Conference on Miniaturized Systems for Chemistry and Life Sciences (uTAS'2006), Tokyo (Japon), 5-9 Novembre 2006, pp.188-190.
- [28] P. Abgrall, Microtechnologies polymères pour les laboratoires sur puces, Doctorat de l'Université Paul Sabatier, Toulouse, 7 Février 2006, Rapport LAAS No06107.
- [29] S. Mias, J. Sudor et H. Camon, Thermo-activated nano-material for use in optical devices, SPIE Europe. Microtechnologies for the New Millenium 2007. Smart Sensors, Actuators and MEMS, Maspalomas (Espagne), 2-4 Mai 2007, 6p.
- [30] C. Rossi , Conception et réalisation d'un système de réhydratation pour patch transdermique à partir de micro actionneurs pyrotechniques, Doctorat de l'Institut National des Sciences Appliquées, Toulouse, 18 Décembre 1997, Rapport LAAS No97520.
- [31] B. Larangot, Conception, fabrication et caractérisation de matrices de micropropulseurs pyrotechniques sur silicium, Doctorat de l'Université Paul Sabatier, Toulouse, 23 Janvier 2004, Rapport LAAS No 04049.
- [32] A. Chaalane et al., The formulation and testing of new solid propellant mixture (DB+x%BP) for a new MEMS-based microthruster, Sensors and Actuators A, Vol.138, N°1, Juillet 2007, pp.161-166.
- [33] M. P. Vidal et al., Smart drug delivery system based on pyrotechnical actuation, SPIE Microtechnologies for the New Millennium 2003, Maspalomas (Espagne), Mai 2003, pp. 19-21.
- [34] P. Pennarun, Conception et intégration d'un micro-initiateur sécurisé sur silicium à base de micro-interrupteurs pyrotechniques, Doctorat de l'Institut National des Sciences Appliquées, Toulouse, 23 Octobre 2006, Rapport LAAS No06717.
- [35] D. Esteve and C. Rossi, Conception d'une "amorce intelligente" par couplage magnétique HF et compatible douille 9 mm. Réalisation d'une maquette de validation de concept, Rapport LAAS No03309, Contrat SMART INIT, Juin 2003, 25p.
- [36] W. H. Ko, Trends and frontiers of MEMS, Sensors and Actuators A, Vol.136, 2007, pp. 62-67.

- [37] P. Woias, Micropumps – past, progress and future prospects, *Sensors and Actuators B*, Vol. 105, Issue 1, 14 February 2005, Pages 28-38.
- [38] N.-T. Nguyen et al, MEMS-micropumps: A review, *Transactions of the ASME. J. Fluids Eng.* Vol. 124, 2002, pp. 384–392.
- [39] K. L. Drake et al., Performance of planar multisite microprobes in recording extracellular single-unit intracortical activity, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, Vol. 35, No. 9, Sep 1988, pp. 719-732.
- [40] M. W. Li et al, Design and Characterization of Poly(dimethylsiloxane)-Based Valves for Interfacing Continuous-Flow Sampling to Microchip Electrophoresis, *Anal. Chem.*, Vol. 78, 2006, pp. 1042-1051.
- [41] H. M. Xia et al, Chaotic micromixers using two-layer crossing channels to exhibit fast mixing at low Reynolds numbers, *Lab Chip*, Vol. 5, 2005, pp. 748-755.
- [42] C. Simonnet and A. Groisman, Chaotic Mixing in a Steady Flow in a Microchannel, *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 94, 2005, 134501.
- [43] M. Grumann et al, Batch-mode mixing on centrifugal microfluidic platforms, *Lab Chip*, Vol. 5, 2005, pp. 560-565.
- [44] J. G. Smits, Piezoelectric Micropump with Three Valves Working Peristaltically, *Sensors and Actuators A*, Vol. 21, 1990, pp. 203-206.
- [45] H T G van Lintel et al, A piezoelectric micropump based on micromachining of silicon, *Sensors Actuators*, Vol. 15, 1988, pp. 153–67.
- [46] H. Andersson et al, A valve-less diffuser micropump for microfluidic analytical systems, *Sensors Actuators B*, Vol. 72, 2001, pp. 259–65.
- [47] C. G. J. Schabmueller et al, Self-aligning gas/liquid micropump, *J. Micromech. Microeng.* Vol. 12, 2002, pp. 420–4.
- [48] Micropumps Datasheet Data Sheet www.thinxxs.com
- [49] H. Q. Li et al, A high frequency high flow rate piezoelectrically driven MEMS micropump, *Proc. 2000 Solid-State Sensor and Actuator Workshop (Hilton Head, SC)*, 2000.
- [50] P. Luginbuhl et al., Microfabricated lamb wave device based on PZT sol-gel thin film for mechanical transport of solid particles and liquids, *J. Microelectromech. Syst.*, Vol. 6, 1997, pp. 337–46.
- [51] R. Zengerle et al., A bidirectional silicon micropump, *Sensors Actuators A*, Vol. 50, 1995, pp. 81–6.

- [52] M. Richter, R. Linnemann and P. Woias, Robust design of gas and liquid micropumps Sensors Actuators A, Vol. 68, 1998, pp. 480–6.
- [53] Z. Sbiaa, Etude et réalisation d'une micropompe et de microvalves intégrées tout silicium, Doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, 30 Janvier 1997, Rapport LAAS No97033.
- [54] J. Xie et al., Surface micromachined electrostatically actuated micro peristaltic pump, Lab on a Chip, Vol. 4, 2004, pp. 495-501.
- [55] P. Dario, N. Croce, M. C. Carrozza and G. Varallo, A fluid handling system for a chemical microanalyzer, J. Micromech. Microeng., Vol. 6, 1996, pp. 95–8.
- [56] S. Bohm, W. Olthuis and P. Bergveld, A plastic micropump constructed with conventional techniques and materials, Sensors Actuators A, Vol. 77, 1999, pp. 223–8.
- [57] V. Gorbounov, A Nanoinjector for Microanalysis, Anal. Chem., Vol. 75 , No.15, 2003, pp. 3919 -3923.
- [58] O. C. Jeong and S. S. Yang, Fabrication and test of a thermopneumatic micropump with a corrugated p+ diaphragm Sensors Actuators A, Vol. 83, 2000, pp. 249–55.
- [59] C. Grosjean, A thermopneumatic microfluidic system, The Fifteenth IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, 2002, Las Vegas, NV, USA, pp. 24-27.
- [60] A. Wego and L. Pagel, A self-filling micropump based on PCB technology, Sensors Actuators A, Vol. 88, 2001, 220–6.
- [61] H. J. Yoon, W. Y. Sim and S. S. Yang, The fabrication and test of a phase-change micropump, Proc. ASME Int. Mechanical Engineering Congress and Exposition (New York), 2001.
- [62] J. H. Tsai and L. Lin, A thermal-bubble-actuated micronozzle-diffuser pump, J. Microelectromech. Syst., Vol. 11, 2002, pp. 665–71.
- [63] S. Zimmermann, J. A. Frank, D. Liepmann and A. P. Pisano, A planar micropump utilizing thermopneumatic actuation and in-plane flap valves, Proc. 17th IEEE Int. Conf. on Micro Electro Mechanical Systems (Maastricht, The Netherlands), 2004.
- [64] J.-C. Yoo et al., Thermopneumatic-actuated PDMS microvalve and micropump integrated with the same fabrication process, The 13th International Conference on TRANSDUCERS '05, pp. 664- 667.

- [65] E. Makino et al., Fabrication of TiNi shape memory micropump, *Sensors and Actuators A*, Vol. 88, No. 3, 5 January 2001, pp. 256-262.
- [66] W. L. Benard et al., Thin-film shape-memory alloy actuated micropumps, *J. Microelectromech. Syst.*, Vol. 7, 1998, pp. 245-51.
- [67] G. Fuhr et al., Traveling wave-driven microfabricated electrohydrodynamic pumps for liquids, *J. Micromech. Microeng.* 4, 1994, pp. 217-26.
- [68] A. Richter et al., A micromachined electrohydrodynamic (EHD) pump *Sensors Actuators A*, Vol. 29, 1991, pp. 159-68.
- [69] S. H. Ahn and Y. K. Kim, Fabrication and experiment of a planar micro ion drag pump *Sensors Actuators A*, Vol. 70, 1998, pp. 1-5
- [70] J. Darabi, M. M. Ohadi and D. DeVoe, An electrohydrodynamic polarization micropump for electronic cooling, *J. Microelectromech. Syst.*, Vol. 10, 2001, pp. 98-106.
- [71] J. Darabi, M. Rada, M. Ohadi and J. Lawler, Design, fabrication and testing of an electrohydrodynamic ion-drag micropump, *J. Microelectromech. Syst.*, Vol. 11, 2002, pp. 684-690.
- [72] J. S. Jang and S. S. Lee, Theoretical and experimental study of MHD (magnetohydrodynamic) micropump, *Sensors Actuators A*, Vol. 80, 2000, pp. 84-9.
- [73] A. V. Lemoff and A. P. Lee, An AC magnetohydrodynamic micropump, *Sensors Actuators B*, Vol. 63, 2000, Vol. pp. 178-85.
- [74] S. L. Zeng, C. H. Chen, J. C. Mikkelsen and J. G. Santiago, Fabrication and characterization of electroosmotic micropumps, *Sensors Actuators B*, Vol. 79, 2001, pp. 107-14.
- [75] Y. Takamura, H. Onada, H. Inokuchi, S. Adachi, A. Oki, Y. Horiike, Low-Voltage Electroosmotic Pump and its Application to on-chip Linear Stepping Pneumatic Pressure Source, *Proc. MicroTAS '01*, 2001, pp.230.
- [76] S. H. Yao et al, Porous glass electroosmotic pumps: design and experiments, *J. Colloid Interface Sci.*, Vol. 268, 2003, pp. 143-53.
- [77] M. Yairi and C. Richter, Massively parallel microfluidic pump, *Sensors and Actuators A*, Vol. 137, No. 2, 4 July 2007, pp. 350-356.
- [78] T. K. Jun and C.-J. Kim, Valveless pumping using traversing vapor bubbles in microchannels, *J. Appl. Phys.*, Vol. 83, 1998, 5658.

- [79] A.A. Darhuber et al., Thermocapillary actuation of droplets on chemically patterned surfaces by programmable microheater arrays, *J. Microelectromech. Syst.*, Vol. 12, 2003, pp. 873- 879.
- [80] K.-S. Yun et al, A surface-tension driven micropump for low-voltage and low-power operations, *J. Microelectromech. Syst.*, Vol. 11, 2002, pp. 454–61.
- [81] J. Lee and C. J. Kim, Surface-tension-driven microactuation based on continuous electrowetting, *J. Microelectromech. Syst.*, Vol. 9, 2000, pp. 171–80.
- [82] J. Lee et al, Electrowetting and electrowetting-on-dielectric for microscale liquid handling *Sensors Actuators A*, Vol. 95, 2002, pp. 259–68.
- [83] M. A. Unger et al, Monolithic Microfabricated Valves and Pumps by Multilayer Soft Lithography, *Science* 7, Vol. 288. No. 5463, April 2000, pp. 113-116.
- [84] T. Thorsen et al, Microfluidic Large-Scale Integration, *Science* 18, Vol. 298, No. 5593, October 2002, pp. 580-584.
- [85] E. Meng, X.-Q. Wang, H. Mak and Y.-C. Tai, A check-valved silicone diaphragm pump *Proc. MEMS 2000: 13th Annual Int. Conf. on Micro Electro Mechanical Systems* (Miyazaki, Japan), 2000, pp 62–7.
- [86] W. H. Grover, A. M. Skelley, C. N. Liu, E. T. Lagally and R. A. Mathies, Monolithic membrane valves and diaphragm pumps for practical large-scale integration into glass microfluidic devices, *Sensors Actuators B*, Vol. 89, 2003, pp. 315–23.
- [87] J. M. Berg et al., A two-stage discrete peristaltic micropump, *Sensors Actuators A*, Vol. 104, 2003, pp. 6–10.
- [88] C.-C. Hong et al., Disposable air-bursting detonators as an alternative on-chip power source, *Proceedings, IEEE micro electro mechanical systems, MEMS 2002, Las Vegas NV*, 20-24 January 2002, pp. 240-243.
- [89] C.-C. Hong et al., An on-chip air-bursting detonator for driving fluids on disposable lab-on-a-chip systems, *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 17, 2007, pp. 410–417.
- [90] R. Boden et al., A polymeric paraffin micropump with active valves for high-pressure microfluidics, *The 13th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems*, 2005. *TRANSDUCERS '05*, Vol. 1, 5-9 June 2005, pp. 201- 204
- [91] C. G. Cooney and B. C. Towe, A thermopneumatic dispensing micropump, *Sensors and Actuators A*, Vol. 116, No. 3, 29 October 2004, pp. 519-524.

- [92] N. Roxhed, Low cost device for precise microliter range liquid dispensing, . 17th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, 2004 (MEMS), pp. 326- 329.
- [93] B. Samel et al., A Thermally Responsive PDMS Composite and Its Microfluidic Applications, J. Microelectromech. Syst., Vol. 16, 2007, pp. 50-57.
- [94] B. Samel et al., A disposable lab-on-a-chip platform with embedded fluid actuators for active nanoliter liquid handling, Biomedical Microdevices, Vo. 9, No. 1, février 2007, pp. 61-67.
- [95] S. Ramírez-García and D. Diamond, Biomimetic, low power pumps based on soft actuators, Sensors and Actuators A, Vol. 135, No. 1, 30 March 2007, pp. 229-235.
- [96] Y. H. Choi et al., A micropump operating with chemically produced oxygen gas, Sensors and Actuators A, Vol. 111, No. 1, 1 March 2004, pp. 8-13.
- [97] C. Rossi, La micropyrotechnie sur silicium et l'intégration microsystèmes, Habilitation à Diriger des Recherches, Université Paul Sabatier, Toulouse, 13 Mars 2006, 155p, Rapport LAAS No06167.
- [98] E.T. Carlen and C.H. Mastrangelo, Electrothermally activated paraffin microactuators, J. Microelectromech. Syst., Vol. 11, 2002, pp. 165-174.
- [99] A. A. Norton and M. A. Minor, Pneumatic microactuator powered by the deflagration of sodium azide, J. Microelectromech. Syst., Vol. 15, 2006, pp. 344-354.
- [100] C.-C. Hong et al., A functional on-chip pressure generator using solid chemical propellant for disposable lab-on-a-chip, IEEE The Sixteenth Annual International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, 2003. MEMS-03 Kyoto, pp. 16-19.
- [101] J. Han et al., A disposable on-chip pressure actuator using IR-Induced thermolysis for sample transport, The 10th International Conference on Miniaturized Systems for Chemistry and Life Sciences (μ TAS2006), November 5-9, 2006, Tokyo, Japan, pp. 588-590.
- [102] G. A. Ardila Rodríguez et al., Design, fabrication and operation of a wireless and miniature ignition system, Sensors and Actuators A, Vol. 126, No. 1, 26 January 2006, pp. 201-210.

CHAPITRE II : Conception de l'actionneur PYRACT

- [1] T. M. Squires et S. R. Quake, Microfluidics : Fluid physics at the nanoliter scale, Reviews of Modern Physics, Vol. 77, 2005, pp. 977.

- [2] S. Colin, *Microfluidique*, Ed. Lavoisier, 2004
- [3] P. Abgrall, Microtechnologies polymères pour les laboratoires sur puces, Doctorat de l'Université Paul Sabatier, Toulouse, 7 Février 2006, Rapport LAAS No06107.
- [4] M. Anduze, Etude expérimentale et numérique de microécoulements liquides dans les microsystèmes fluidiques, Thèse de l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 2000.
- [5] P. Tabeling, *Introduction à la microfluidique*, Ed. Belin, Paris, 2003.
- [6] H.-S. Noh, Parylene micromolding, a rapid and low-cost fabrication method for parylene microchannel, *Sensors and Actuators B*, Vol. 102, No. 1, 1 September 2004, pp. 78-85.
- [7] M. A. Unger et al, Monolithic Microfabricated Valves and Pumps by Multilayer Soft Lithography, *Science* 7, Vol. 288. No. 5463, April 2000, pp. 113-116.
- [8] Dow Corning Sylgard® 184. <http://www.dowcorning.com/applications/search/products/Details.aspx?prod=01064291&type=PROD>.
- [9] C. Rossi, D. Estève and C. Mingués, Pyrotechnic actuator: a new generation of Si integrated actuator, *Sensors and Actuators A: Physical*, Volume 74, Issues 1-3, 20 April 1999, pp 211-215.
- [10] K.L. Zhang, S.K. Chou, S. S. Ang, Development of a solid propellant microthruster with chamber and nozzle etched on a wafer surface, *J. Micromech. Microeng.* 14, 2004, pp 785-792.
- [11] P.Q. Pham, D. Briand, C. Rossi, N.F. De Rooij, Downscaling of solid propellant pyrotechnical, 12th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS'2003), Boston (USA), 8-12 Juin 2003, Vol.2, pp.1423-1426.
- [12] D. W. Youngner, S.T. Lu, E. Choueiri, J.B. Neidert, R. E. BlackIII, K. J. Graham, D. Fahey, R. Lucas, X. Zhu, MEMS Megapixel Micro-thruster arrays for small satellite StationKeeping, 14th Annual/USU Conference on Small satellite, 2000.
- [13] L. Menon et al, Ignition studies of Al/FeO₃ energetic nanocomposites, *Applied Physics letters*, Vol 84, N°23.
- [14] M. Du Plessis, C. Conradie, Nano-explosions in silicon, 12th International Conference of Mixed Design of Integrated Circuits and Systems, MIXED, Krakow, Poland, 22-25 June 2005.
- [15] D. Teasdale, V. Milanovic, P. Chang, K. Pister, K. Bohringer, Microrocket for smart dust, *Smart Materials and structure*, 10 (6), 2001, pp1145-1155.

- [16] B.A. English, Microcombustor based on controllable solid fuel element, Proceedings of IMECE'03, 2003.
- [17] T. Troianello, Precision foil resistors used as electro-pyrotechnic initiators, Proceedings of the 51st Electronic Components and Technology Conference, 29 May-1 June 2001, Orlando, Florida.
- [18] C. Rossi, La micropyrotechnie sur silicium et l'intégration microsystemes, Habilitation à Diriger des Recherches, Université Paul Sabatier, Toulouse, 13 Mars 2006, 155p, Rapport LAAS No06167.
- [19] P. Pennarun, Conception et intégration d'un micro-initiateur sécurisé sur silicium à base de micro-interrupteurs pyrotechniques, Doctorat de l'Institut National des Sciences Appliquées, Toulouse, 23 Octobre 2006, Rapport LAAS No06717.
- [20] B. Larangot, Conception, fabrication et caractérisation de matrices de micropropulseurs pyrotechniques sur silicium, Doctorat de l'Université Paul Sabatier, Toulouse, 23 Janvier 2004, Rapport LAAS No 04049.
- [21] C. Pradère, Nouvelle génération d'airbag à base d'un complexe de métaux de transition et d'un oxyde métallique à l'état nanométrique, Doctorat de l'Université Paul Sabatier, Toulouse, 14 Octobre 2005.
- [22] C. Rossi , Conception et réalisation d'un système de réhydratation pour patch transdermique à partir de micro actionneurs pyrotechniques, Doctorat de l'Institut National des Sciences Appliquées, Toulouse, 18 Décembre 1997, Rapport LAAS No97520.
- [23] C. Bailey, Multi-Physics Modelling for Microelectronics and Microsystems – Current Capabilities and Future Challenges, 8th. Int. Conf. on Thermal, Mechanical and Multiphysics Simulation and Experiments in Micro-Electronics and Micro-Systems, EuroSimE 2007, Londres, Grande-Bretagne, 15-18 Avril 2007.
- [24] www.ansys.com
- [25] www.comsol.com
- [26] www.ansoft.com
- [27] <http://www.flomerics.com>
- [28] <http://www.physica.co.uk>
- [29] M. Dumonteuil, Solution générique pour l'adressage matriciel de micro-actionneurs thermiques et optimisation de micro-sources thermiques, Doctorat de l'Université Paul Sabatier, Toulouse, 24 Février 2006, Rapport LAAS No 06374.
- [30] J. P. Holman, *Heat Transfer*, Mc Graw Hill, 1997.

-
- [31] D. K. Armani et al., Re-configurable fluid circuits by PDMS elastomer micromachining, 12th Int. Conf. on MEMS (MEMS 99), Orlando, FL, 1999, p 222–227.
 - [32] H. Schmid et al., Preparation of metallic films on elastomeric stamps and their application for contact processing and contact printing, *Advanced Functional Materials*, Vol. 13, No.2, 2003, pp. 145-153.
 - [33] G. Y. Yang et al., Design of microfabricated strain gauge array to monitor bone deformation in vitro and in vivo, *IEEE Fourth Symposium on Bioinformatics and Bioengineering BIBE 2004*, Taichung, Taiwan, May 19 – 21, 2004, pp. 30-37.
 - [34] J. C. Lötters et al., The mechanical properties of the rubber elastic polymer polydimethylsiloxane for sensor applications, *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 7, 1997, pp. 145-147.
 - [35] W. Zhang et al., Novel room-temperature first-level packaging process for microscale devices, *Sensors and Actuators A*, Vol. 123-124, 2005, pp. 646-654.
 - [36] X. Yang et al., A MEMS thermopneumatic silicone membrane valve, *The Tenth Annual International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems MEMS97*, Nagoya, Japan, January 26-30, 1997, pp. 114-118.
 - [37] P. Pennarun, Modélisation de micro-initiateurs pyrotechniques. Comparaison de plusieurs technologies, Juin 2005, 49p, Rapport LAAS N°05296.
 - [38] S. P. Timoshenko and S. Woinowsky-Krieger, *Théorie des plaques et coques*, Béranger, Paris, 1961.
 - [39] E. Bonnotte et al., Two interferometric methods for the mechanical characterization of thin films by bulging tests. Application to single crystal of silicon, *J. Mater. Res.*, Vol. 12 No.9, 1997, pp. 2234-2248.
 - [40] E. B. Tadmor et al., Mixed finite element and atomistic formulation for complex crystals, *Phys. Rev. B*, Vol. 59, No.1, 1999, pp. 235-245.
 - [41] A. Hoel and M. C. Jullien, Modelisation of a hyperelastic polymer membrane deformation *COMSOL Multiphysics Conference 2005*, Paris, pp. 37-39.
 - [42] V. Studer et al., Scaling properties of a low-actuation pressure microfluidic valve, *J. Appl. Phys.*, Vol. 95, No.1, 2004, pp. 393-398.
 - [43] G. A. Ardila Rodríguez, Multi-physics system modeling of a pneumatic micro actuator, *Sensors and Actuators A*, 2007, Sous-presse.
 - [44] *COMSOL Multiphysics MEMS Module User's Guide, Fluid-Structure Interaction, Version 3.3*, August 2006.

CHAPITRE III : Fabrication et intégration de l'actionneur PYRACT dans une microcanalisation

- [1] P. Abgrall, Microtechnologies polymères pour les laboratoires sur puces, Doctorat de l'Université Paul Sabatier, Toulouse, 7 Février 2006, Rapport LAAS No06107.
- [2] P. Pennarun, Conception et intégration d'un micro-initiateur sécurisé sur silicium à base de micro-interrupteurs pyrotechniques, Doctorat de l'Institut National des Sciences Appliquées, Toulouse, 23 Octobre 2006, Rapport LAAS No 06717.
- [3] M. Dumonteuil, Solution générique pour l'adressage matriciel de micro-actionneurs thermiques et optimisation de micro-sources thermiques, Doctorat de l'Université Paul Sabatier, Toulouse, 24 Février 2006, Rapport LAAS No 06374.
- [4] B. Larangot, Conception, fabrication et caractérisation de matrices de micropropulseurs pyrotechniques sur silicium, Doctorat de l'Université Paul Sabatier, Toulouse, 23 Janvier 2004, Rapport LAAS No 04049.
- [5] C. Duffy et al, Rapid Prototyping of Microfluidic Systems in Poly(dimethylsiloxane), *Anal. Chem.*, 70, 1998, pp. 4974-4984.
- [6] A. A. S. Bhagat et al, Re-usable quick-release interconnect for characterization of microfluidic systems, *J. Micromech. Microeng.* 17, 2007, pp. 42–49.
- [7] J.C. Lötters et al, Polydimethylsiloxane, a photocurable rubberelastic polymer used as spring material in micromechanical sensors, *Microsystem Technologies*, 1997, pp. 64-67.
- [8] A. Ulman, Formation and Structure of Self-Assembled Mono- layers, *Chemical Reviews*, Vol. 96, 1996, pp. 1553-1554.
- [9] L. Liang et al., Surfaces with Reversible Hydrophilic/Hydrophobic Characteristics on Cross-linked Poly(*N*-sopropylacrylamide) Hydrogels, *Langmuir*, 16 (21), , 2000, pp. 8016-8023.
- [10] S. Suhard, P. Fau, J. Fitremann, D. Gonbeau, M. Mauzac, A.-F. Mingotaud and C. Rossi, Easily photopatternable PDMS covalently bonded to Si wafers for microsystems applications, soumis au *J. Micromech. Microeng.*
- [11] A. A. S. Bhagat et al, Photosensitive Poly(Dimethylsiloxane) (PHOTOPDMS) for rapid and simple polymer fabrication, *TRANSDUCERS & EUROSensors '07*, The 14th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, Lyon, France, June 10-14, 2007, pp. 537-540.
- [12] DEK PSP, <http://www.dek.com/data/Mesh%20Stock%20list.pdf>

- [13] P. Ginet et al, Nouveau procédé de fabrication d'un microsystème entièrement sérigraphié : réalisation d'un actionneur thermique sur alumine, JNRDM 2006, 9èmes Journées Nationales du Réseau Doctorale en Microélectronique, Rennes, France, 10-12 Mai 2006
- [14] S. Charlot et al, Développement d'une technologie hybride 3D pour l'intégration de puces actives en silicium dans les microsystèmes fluidiques polymères, *SHF – Microfluidics 2006 - Toulouse, 12-14 December 2006*.
- [15] C. Pradère, Nouvelle génération d'airbag à base d'un complexe de métaux de transition et d'un oxyde métallique à l'état nanométrique, Doctorat de l'Université Paul Sabatier, Toulouse, 14 Octobre 2005.
- [16] Dow Corning Sylgard® 184. <http://www.dowcorning.com/applications/search/products/Details.aspx?prod=01064291&type=PROD>
- [17] http://www.microfab.com/equipment/pdf/jetlab4_specs_mf1.pdf

CHAPITRE IV : Caractérisation et validation des modèles de conception

- [1] M. Saadaoui, Optimisation des circuits passifs micro-ondes suspendus sur membrane diélectrique, Doctorat de l'Université Paul Sabatier, Toulouse, 28 Novembre 2005, Rapport LAAS No05624.
- [2] C. Pradère, S. Suhard, L. Vendier, G. Jacob, B. Chaudret, S. Sabo-Etienne, to be published.
- [3] C. Poliane et al, Analysis of the mechanical behaviour of shape memory polymer membranes by nanoindentation, bulging and point membrane deflection tests, *Thin Solids Film*, Vol. 379, 2000, pp. 156-165.
- [4] W. Zhang et al, Novel room-temperature first-level packaging process for microscale devices, *Sensors and Actuators A*, 2005, pp. 646-654.
- [5] G. M. Odegard et al, Characterization of Viscoelastic properties of polymeric materials through nanoindentation, *Experimental Mechanics*, Vol. 45 No. 2, 2005, pp. 130-136.
- [6] Z. Zhou et al, The evaluation of Young's modulus and residual stress of nickel films by microbridge testings, *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 15, 2004, pp. 2389-2394.
- [7] R. Edwards et al, Comparison of tensile and bulge tests for thin-film silicon nitride, *Experimental Mechanics*, Vol. 44, No. 1, Feb. 2004, pp. 49-54.

- [8] O. Tabata et al, Mechanical property measurements of thin films using load-deflection of composite rectangular membranes, *Sensors and Actuators A*, 20, 1989, pp. 135-141.
- [9] J. Pan et al, Verification of FEM analysis of load-deflection methods for measuring mechanical properties of thin films, *IEEE Solid-State Sensors and Actuators Workshop* (Hilton Head Island, SC, 1990) technical digest pp 70-3.
- [10] Lin et al, The in-situ measurement of biaxial modulus and residual stress of multi-layer polymeric thin films, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, vol. 188, 1990, pp. 41-46.
- [11] J. Vlassak, W. Nix, A new bulge test for the determination of Young's modulus and Poisson's ratio of thin films, *J. Mat. Res.*, Vol 7, Dec. 1992, pp. 3242-3249.
- [12] D. Maier-Schneider et al., A new analytical solution for the load-deflection of square membranes, *J. Micromech. Syst.*, Vol. 4 No.4, 1995, pp. 238-241.
- [13] E. Bonnotte et al., Two interferometric methods for the mechanical characterization of thin films by bulging tests. Application to single crystal of silicon, *J. Mater. Res.*, Vol. 12 No.9, 1997, pp. 2234-2248.
- [14] S. P. Timoshenko and S. Woinowsky-Krieger, *Théorie des plaques et coques*, Béranger, Paris, 1961.

ANNEXE F : Détail du calcul du module de Young à partir des courbes de « bulge test »

- [1] D. Maier-Schneider et al, A new analytical solution for the load-deflection of square membranes, *J. Micro. Syst.*, Vol. 4, No. 4, Dec. 1995, pp. 238-241.
- [2] E. Bonnotte et al, Two interferometric methods for the mechanical characterization of thin films by bulging tests. Application to single crystal of silicon, *J. Mater. Res.*, Vol. 12, No. 9, Sep. 1997, pp. 2234-2248.
- [3] S. Timoshenko, S. Woinowsky-Krieger, *Théorie des plaques et coques*, 1961.
- [4] O. Tabata et al, Mechanical property measurements of thin films using load-deflection of composite rectangular membranes, *Sensors and Actuators A*, 20, pp. 135-141, 1989, pp. 135-141.

« Conception, simulation et réalisation d'un micro actionneur à base de matériau énergétique pour l'actionnement microfluidique »

Résumé

L'intégration sur puce d'opérations successives d'un protocole plus ou moins complexe d'analyse biologique ou chimique et mettant en jeu la circulation de petits volumes d'échantillons et de réactifs dans des canalisations de taille micrométrique constitue le cœur des technologies microfluidiques. Les technologies de réalisation de micro canalisations sont aujourd'hui bien maîtrisées. Cependant, la manipulation des fluides et l'intégration technologique des éléments de contrôle comme les valves, les actionneurs, les mélangeurs dans les micro canalisations posent des problèmes essentiellement liés aux très faibles dimensionnalités. Des solutions originales et pratiques pour manipuler des volumes très faibles (entre 1nl et 10nl) doivent être développées pour déplacer, mélanger ou séparer ces liquides. Dans ce cadre, nous avons proposé un projet de recherche ANR Blanc (PYRACT) animé par le LAAS et associant des équipes de recherche des laboratoires LCC et IRMCP.

Les travaux de thèse s'insérant dans le cadre du projet PYRACT, ont porté sur la conception, la simulation et la réalisation d'un micro actionneur à base de matériau énergétique pour la manipulation de faibles quantités de fluides (10-100nl). L'actionneur, tel que nous l'avons conçu, consiste en une plate-forme chauffante sur laquelle sont déposés en couche très mince un matériau énergétique et une membrane élastique permettant de faire l'étanchéité entre le gaz d'actionnement et le fluide. Le principe de fonctionnement est simple : lorsque le matériau énergétique atteint 225°C, sa décomposition exothermique (333J/g) génère des gaz (N_2 , H_2O , O_2) qui augmentent la pression sous la membrane fine élastique (30 μ m). La pression ainsi générée et la déformation induite de la membrane élastique permettent d'actionner le fluide dans la micro canalisation. Ce concept simple d'actionnement présente l'avantage d'être compact, intégrable directement dans la canalisation contenant le fluide à actionner, biocompatible, bas coût et nécessite seulement quelques mW (quelques V) pour générer des surpressions qui peuvent être réglées entre quelques dizaines de kPa et quelques centaines de kPa. Son caractère monocoup le rend adapté aux applications portables et jetables.

Tout d'abord, un modèle multi physique a été développé sous COMSOL pour simuler le fonctionnement de l'actionneur intégré dans une micro canalisation. Ensuite, un modèle global de conception a été construit permettant de prédire les performances de l'actionnement (pression, déformation, volume et vitesse du fluide éjecté) en fonction des caractéristiques de l'actionneur et de la puissance électrique d'actionnement. Enfin, deux démonstrateurs ont été fabriqués : un actionneur de 1mm²×100 μ m et un de 0.25mm²×100 μ m. Un travail important a porté sur l'intégration technologique en utilisant des procédés compatibles MEMS et microfluidique des différents matériaux (énergétique et de structure) sur des surfaces très petites et nécessitant des traitements de surface particuliers. Le principe d'actionnement a été validé.

Mots-clefs : Microsystème, Microfluidique, Micro actionneur, Microfabrication, modélisation éléments finis, matériaux énergétiques

« Conception, simulation and fabrication of a micro actuator based on energetic material for microfluidic actuation »

Abstract

The high integration of successive operations from a relatively complex protocol of a biological or chemical analysis, using small amounts of samples and reagents into micrometric channels is the core of microfluidic technologies. Nowadays, micro channel fabrication technologies are well known. The main difficulty concerns the fluids manipulation and the integration of control elements such as valves, actuators and mixers because of their small size. New and practical solutions must be developed to manipulate small quantities of fluids (between 1nl and 10nl). We propose a White ANR research project (PYRACT) led by the LAAS in association with research teams from the LCC and IRMCP laboratories.

The work of this PhD thesis on the framework of the PYRACT project, concerns the conception, the simulation and fabrication of a micro actuator based on energetic material to manipulate small quantities of fluid (10-100nl). The conceived actuator consists of a heating platform with a thin film of energetic material and an elastic membrane deposited over it, isolating the liquid from the acting gas. The functioning principle is quite simple: when the energetic material reaches the ignition temperature of 225°C, its exothermic decomposition (333J/g) liberates a gas (N_2 , H_2O , O_2) increasing the pressure under the thin elastic membrane (30 μ m). This pressure and the induced membrane deformation allow pushing the fluids into the micro channel. This simple actuation principle is compact, directly integratable into the microfluidic channel, biocompatible, cheap and only requires a few mW (some V) to obtain controlled overpressures between 10kPa and some 100kPa. It's "one shot" characteristic is well adapted for portable and disposable applications.

First, a multiphysic model is built under COMSOL to simulate the behaviour of the actuator integrated into a micro channel. Secondly, a global conception model is built to predict the actuation performances (pressure, deformation, volume and rate of flow of the ejected fluid) as a function of the actuator characteristics and the applied electrical power. In the end, two prototypes have been fabricated: one actuator having dimensions of 1mm²×100 μ m and one having 0.25mm²×100 μ m. An important work concerns the technological integration of different materials (energetic and structural) on small surfaces requiring special surfaces treatments using techniques been compatible with MEMS and microfluidics. The actuating principle has been validated.

Keywords: Microsystems, Microfluidic, Micro actuator, Micro fabrication, Finite element modeling, Energetic materials