

# Micro-transducteur ultrasonique à base de nanotubes de carbone pour l'instrumentation immergée des matériaux cimentaires

B. LEBENTAL<sup>a,b,c</sup>, F. BOURQUIN<sup>b</sup>, J.-M. CAUSSIGNAC<sup>b</sup>, E. DELEVOYE<sup>a</sup>, P. CHENEVIER<sup>d</sup>, A. GHIS<sup>a</sup>

a. CEA-LETI, MINATEC, 17 rue des Martyrs, 38054 Grenoble, Cedex 9, France

b. Lab. Cent. Ponts et Chaussées (LCPC), 58 Bld. Lefebvre, 75015 Paris, France.

c. Ecole Nat. Ponts et Chaussées (ENPC), Av. Blaise Pascal, Cité Descartes, 77455 Marne-la-Vallée Cedex 2, France.

d. CEA-IRAMIS, CEA Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette, France.

## Résumé :

*Le suivi in-situ des matériaux est essentiel au suivi du vieillissement des constructions. Cette science a besoin de microcapteurs autonomes implémentables en masse dans les matériaux cimentaires. Démontrer que de tels capteurs sont effectivement immergeables et qu'ils fournissent des informations exploitables sur la durabilité des structure constituerait une rupture technologique majeure.*

*En vue de cet objectif à long terme, nous réalisons un nouveau type de cMUT. Il s'agit d'un dispositif hautes-fréquences dont la membrane vibrante est faite de nanotubes de carbone alignés.*

*Par une modélisation acousto-élastique couplée à partir d'une géométrie de pore schématique, nous avons évalué l'amplitude des vibrations de la membrane dans un pore rempli d'air ou d'eau et identifié des résonances liées aux dimensions du pore. Ce premier modèle valide l'intérêt applicatif du dispositif pour la métrologie de la microporosité.*

## Abstract :

*In-situ instrumentation enables better prediction of aging of structures than the commonly used visual inspection. To reach its full development, this science is in dire need for cheap wireless microsensors immersed by the thousands in the concrete of every new structure. Demonstrating that such micro-sensors are actually embeddable into cementitious materials and can provide the user with valuable information on the durability of the material under test would be a major breakthrough.*

*A step toward this long-term goal, we are building up an innovative ultra-high frequency capacitive micromachined transducer (cMUT) based on a membrane of aligned carbon nanotubes. By an acousto-elastic modeling based on a simplified pore geometry, we have assessed the amplitudes of vibrations of the device membrane in a water- and air-filled pore. We also have identified resonances correlated to the pore dimensions. This initial model confirms the usefulness of the targeted device for microporosity metrology.*

**Mots clefs :** cMUT, NEMS, nanotubes de carbone, microfluidique, acousto-élastique

## 1 Introduction

Le suivi structural des ouvrages d'art pour la prévention des risques liés à leur vieillissement s'impose aujourd'hui. Le contrôle non destructif des structures à l'aide de capteurs in-situ immergés est un domaine encore peu développé mais prometteur, car il rend possible le diagnostic en continu et en volume des ouvrages.

Dans ce contexte, nous développons un  $\mu$ -cMUT (transducteur ultrasonique capacitif micro-machiné de dimension micrométrique) innovant à base d'une membrane de nanotubes de carbone, destiné à être immergé dans des matériaux cimentaires pour étudier statistiquement leur microporosité et en déduire leurs propriétés de durabilité. Nous décrivons ici le dispositif et proposons une modélisation originale de son fonctionnement qui prend en compte son interaction avec le fluide contenu dans un pore du matériau étudié. Cette modélisation valide l'emploi d'un tel capteur pour l'instrumentation de la microporosité des matériaux cimentaires.

## 2 Conception d'un micro-cMUT à base d'une membrane de nanotubes de carbone

### 2.1 Méthode de CND proposée

Les méthodes in-situ et immergées d'évaluation de la porosité capillaire des matériaux cimentaires (pores de  $10\text{nm}$  à  $10\ \mu\text{m}$ ) sont actuellement très peu développées. Les méthodes existantes reposent principalement sur l'homogénéisation du matériau et sont peu sensibles à ses hétérogénéités à l'échelle micrométrique.

Nous proposons donc une méthode innovante [1] de suivi de la porosité capillaire fondée sur la dissémination d'un grand nombre de microsystèmes capables de recueillir des informations sur la microstructure sans hypothèse d'homogénéisation de la microstructure. Les microsystèmes sont composés de capteurs adaptés à la métrologie de pores micrométriques. L'assemblage fonctionnel associe aux éléments sensibles un dispositif d'alimentation en énergie et des moyens de communication. Le système complet est protégé mécaniquement et chimiquement du milieu agressif par un enrobage, dont l'effet perturbatif sur la mesure est pris en compte dans l'analyse et l'exploitation des données traitées.

Nous avons choisi comme principe physique de mesure d'utiliser des ondes acoustiques. L'élément sensible est un émetteur-récepteur d'ultrasons. Chaque capteur génère une onde acoustique dans le milieu et en mesure les grandeurs caractéristiques. L'onde se propage principalement dans la composante fluide de la microstructure. Les dimensions des dispositifs leur permettent d'exciter acoustiquement les pores de façon individuelle. A partir de l'ensemble des mesures fournies par chaque récepteur, on déduit des informations statistiques sur la morphologie de la microporosité.

### 2.2 Dispositif proposé

Les critères précédents imposent l'emploi de transducteurs ultrasoniques adaptés aux milieux aqueux et aériens, de dimension caractéristique de l'ordre de  $1\ \mu\text{m}$  et de bande passante atteignant le domaine du Gigahertz. Il existe de nombreux types de transducteurs ultrasoniques, capacitifs [2] (cMUT) ou piézoélectriques [3]. Mais ils ne satisfont pas la double contrainte technologique en dimension et en fréquence qui est un réel challenge technologique. Par contre, il existe des résonateurs NEMS vibrant à des fréquences supérieures à  $1\ \text{GHz}$  et de dimensions de l'ordre de  $1\ \mu\text{m}$ , en particulier les résonateurs à nanotubes de carbone comme dans [4].

Le dispositif que nous proposons est une mise en œuvre de ces résonateurs comme actuateurs. Il s'agit d'un cMUT de dimension caractéristique  $1\ \mu\text{m}$  dont la membrane est composée de nanotubes de carbone alignés [5] (fig. 2.2a). Les deux avantages des nanotubes de carbone pour cette application sont leur module d'Young très élevé ( $1\ \text{TPa}$  [6]) et leur très faible diamètre ( $1$  à  $2\ \text{nm}$  pour des nanotubes monoparois), qui permet la réalisation d'une membrane d'épaisseur nanométrique. L'assemblage des nanotubes en membrane rend possible la fonction d'actuation. en fonction de la densité des nanotubes, pour garantir l'imperméabilité de la membrane et son efficacité d'actuation sans perturber ses propriétés mécaniques, on peut la recouvrir d'un seul ou d'un petit nombre de feuillets de graphène [7].

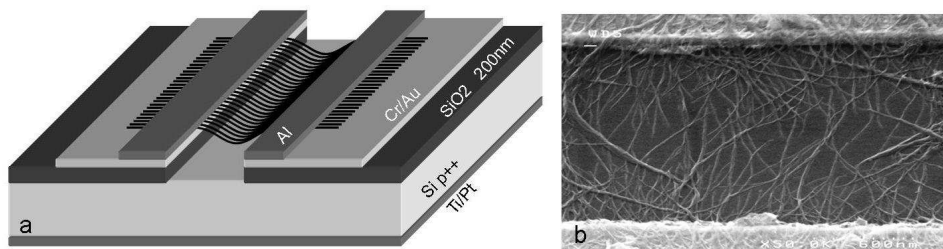


FIG. 1 – a : cMUT : Principe de la membrane et empilement technologique. b : Nanotubes de carbones monoparois (Carbon Solution Inc.) déposés par diélectrophorèse à  $10\ \text{MHz}$  entre des électrodes (Pt) séparées de  $2\ \mu\text{m}$ .

### 2.3 Réalisation du dispositif

Les membranes de nanotubes de carbone sont réalisées à partir de nanotubes de carbone produit par arc électrique, purifiés et mis en solution dans un solvant organique, puis déposés par diélectrophorèse sur des électrodes selon le procédé décrit dans [8]. Les substrats de dépôt sont conçus avec des lignes coplanaires pour leur utilisation à des fréquences RF. Les nanotubes de carbone déposés sont ensuite maintenus en place par un dépôt de nickel de faible épaisseur ( $20\ \text{nm}$ ) localisé sur les nanotubes de carbone par lithographie e-beam. La membrane ainsi réalisée est ensuite libérée par gravure HF à travers le masque formé par les ancrages en nickel et par les électrodes. L'optimisation du dépôt des nanotubes et la mise en place du procédé d'intégration de la membrane sont en cours (fig. 2.2). Les caractérisations électro-mécaniques des dispositifs suivront.

Dans une première étape de caractérisation, les déplacements de la membrane, de l'ordre du nanomètre, seront mesurés par des méthodes externes (MEB, AFM, interférométrie optique). A terme, des méthodes de mesure in-situ des vibrations seront implémentées. Elles devront être sensibles à des variations de capacité de l'ordre de l'attofarad à 1 GHz environ. Elles reposeront par exemple sur une détection capacitive du déplacement (éventuellement via une amplification CMOS) ou sur un effet piezo-résistif. La méthode de lecture indiquera l'amplitude moyenne des vibrations de la membrane en régime permanent pour une excitation sinusoïdale.

Pour fournir un cahier des charges précis pour la conception et l'optimisation de la méthode de détection, ainsi que pour préciser les modalités de la méthode d'instrumentation des matériaux cimentaires à partir du dispositif proposé, nous avons modélisé le fonctionnement du dispositif en interaction avec son environnement cible, à savoir les micro-pores du ciment.

### 3 Modélisation du fonctionnement du $\mu$ -cMUT en interaction avec un fluide

#### 3.1 Présentation du modèle

##### 3.1.1 Principe

La membrane du dispositif est mise en mouvement par une excitation sinusoïdale. On suppose qu'elle est positionnée face à un pore de forme et contenu inconnu, qui influence son mouvement. Un dispositif de lecture fournit une valeur moyenne du déplacement de la membrane. On souhaite évaluer l'amplitude des vibrations de la membrane en fonction de la fréquence d'excitation et de la forme du pore. On veut également définir les informations sur la géométrie et le contenu du pore que l'on peut déduire de la mesure de l'amplitude des vibrations en fonction de la fréquence. Dans cette première étape de la modélisation, nous déterminons, pour une excitation d'amplitude et de fréquence donnée et pour une forme schématique donnée de pore l'amplitude moyenne de déplacement de la membrane.

Les fluides considérés sont l'air ou l'eau. Le comportement des résonateurs dans l'air est très proche du comportement dans le vide ([4]). Nous attendons des différences importantes entre les vibrations de la membrane dans l'eau et dans le vide. Nous nous concentrons donc dans la suite à résoudre le problème d'interaction fluide-structure pour l'eau.

##### 3.1.2 Spécificité du problème

La spécificité de cette étude par rapport aux modélisations usuelles des cMUTs dans l'eau (par exemple dans [9]), ou encore aux études d'acoustique microfluidique pour l'eau, par exemple dans [10], est l'importance que prennent les termes visqueux, car les dimensions cibles de notre dispositif sont un à deux ordres de grandeur plus petites que celles des études préexistantes. Le problème doit donc être résolu en utilisant les équations complètes de Navier-Stokes pour le fluide, de façon analogue aux méthodes proposées pour l'air dans [11].

Une spécificité supplémentaire du problème est l'apparition d'effets de bords liés aux petites dimensions, qui se traduit par une augmentation locale (de plus d'un ordre de grandeur) de la viscosité du milieu au voisinage immédiat des bords. Ce problème est bien connu dans les écoulements d'eau dans des micro-canaux en régime permanent [12], mais n'a pas été analysé en acoustique. En l'absence de données expérimentales sur de tels effets de bords en acoustique, et dans le cadre de cette étude préliminaire, nous ne prenons pas en compte une éventuelle augmentation locale de la viscosité au voisinage des frontières domaine fluide. La viscosité est donc supposée homogène sur le domaine fluide.

#### 3.2 Géométrie et équations du modèle

##### 3.2.1 Géométrie

Pour cette étude simplifiée, nous considérons une plaque encastrée libre sur une de ses faces et en contact sur son autre face à un domaine fermé aux bords rectilignes rempli de fluide (fig. 3.2.1). Ce domaine fermé figure un pore non connecté et non rugueux du matériau poreux étudié. La matrice solide est supposée infiniment rigide. On étudie le système en coupe : le pore est supposé rectangulaire, de largeur  $L$  égale à la longueur de la section de la plaque. On s'intéresse uniquement à l'impact de la profondeur  $l$  du pore sur les vibrations de la membrane. On note  $\Omega$  le domaine fluide,  $\partial\Omega$  sa frontière,  $P$  la section de plaque. On pose  $S = \partial\Omega - P$ .

##### 3.2.2 Equation de la plaque

La position médiane  $w(y, t)$  de la section de plaque encastrée à l'abscisse  $y$  et au temps  $t$  suit l'équation de Kirchoff avec invariance selon la direction orthogonale au plan de coupe. On se limite à des déplacements  $w \ll \min(L, l)$ . La plaque est soumise à une excitation sinusoïdale  $F \sin(\omega t)$  de fréquence  $\omega$  et indépendante de  $y$ . On note  $E$  le module d'Young de la plaque,  $\nu$  son coefficient de Poisson,  $h$  son épaisseur.  $w$  satisfait l'équation suivante :

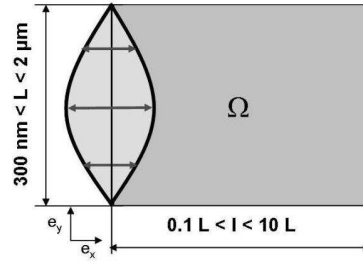


FIG. 2 – Géométrie du modèle

$$F = \rho h \partial_t^2 w + D \partial_y^4 w \quad (1)$$

$$D = \frac{E h^3}{12(1 - \nu^2)} \quad (2)$$

$$w(0) = w(L) = \partial_y w(0) = \partial_y w(L) = 0 \quad (3)$$

$L(\mu m)$	$h(nm)$	$E(TPa)$	$\rho(kg/m^3)$	$\nu$
1	1	1	2000	0,3

TAB. 1 – Paramètres physiques de référence pour la plaque

### 3.2.3 Equation du fluide

Le fluide est newtonien compressible isotherme à la température  $T_0 = 20^\circ C$ . Il suit les équations de Navier Stokes. Il n'y a pas d'écoulement moyen. Comme on a aussi  $w \ll \min(l, L)$ , on peut donc négliger les termes de convection. On linéarise les équations de Navier Stokes en faisant l'hypothèse de petites variations des paramètres (pression  $p = p_0 + \delta p$ , masse volumique  $\rho = \rho_0 + \delta \rho$ , vitesse  $\bar{U} = \bar{U}_0 + \delta \bar{U}$ ) autour de leur valeur moyenne. On note  $\kappa_T$  la compressibilité isotherme,  $\mu$  la viscosité dynamique et  $\lambda = \frac{-2\mu}{3}$ .

$$\frac{\partial_t(\delta \rho)}{\rho_0 \kappa_T} = \partial_t(\delta p) \quad (4)$$

$$\partial_t(\delta \rho) + \rho_0 \text{div}(\delta \bar{U}) = 0 \quad (5)$$

$$\rho_0 \partial_t(\delta \bar{U}) = -\overline{\text{grad}}(\delta p) + \overline{\text{grad}}(\lambda \text{div}(\delta \bar{U})) + \text{div}(\mu(\overline{\text{grad}}(\delta \bar{U}) + \overline{\text{grad}}^t(\delta \bar{U}))) \quad (6)$$

Les conditions aux limites associées sont les suivantes, pour une force  $F(t)$  imposée sur P selon la direction  $e_x$  :

- Sur P, la vitesse tangentielle  $\delta U_y = 0$  et la contrainte normale vérifie  $\bar{n} \cdot \overline{\delta \sigma} \cdot \bar{n} = -F$ , avec  $\delta \sigma = -\delta p + \lambda \text{div}(\delta \bar{U}) + \mu(\overline{\text{grad}}(\delta \bar{U}) + \overline{\text{grad}}^t(\delta \bar{U}))$ .
- Sur S,  $\delta \bar{U} = 0$ .

	$\rho_0(kg/m^3)$	$c(m/s)$	$\mu(kg/(m * s))$	$\lambda(kg/(m * s))$	$\kappa_T(Pa^{-1})$
air sec	1,2	343,5	$1,8 \cdot 10^{-5}$	$-1,2 \cdot 10^{-5}$	$10^{-5}$
eau	998,2	1486	$1,005 \cdot 10^{-3}$	$-6,67 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-10}$

TAB. 2 – Paramètres physiques de référence pour l'air sec et l'eau, à  $T_0 = 20^\circ C$  et  $p_0 = 10^5$  Pa

## 4 Résolution du problème couplé

Le couplage entre la plaque et le fluide apparaît sur le bord P. Les conditions aux limites couplées s'écrivent, sur le bord P :

$$\delta U_x = \partial_t w \quad (7)$$

$$F_{x,plaque \rightarrow fluide} = -F_{x,fluide \rightarrow plaque} \quad (8)$$

On note  $L^2(P)$  l'ensemble des fonctions de carrés sommables de P dans  $\mathfrak{R}$  et  $S$  est l'opérateur qui à une contrainte  $F$  appliquée sur le bord P du fluide associe la trace de  $U_x$  sur P :

$$S : L^2(P) \longrightarrow L^2(P) \quad (9)$$

$$F \longrightarrow U_{x,|P} \quad (10)$$

On évalue l'opérateur S par éléments finis sur le domaine  $\Omega$  d'une part et les équations de la plaque par décomposition de la solution sur une base de l'espace  $H(P) = \{v \in L^2(P) | v(0) = v(1) = \partial_y v(0) = \partial_y v(1) = 0\}$  d'autre part. Le couplage entre le fluide et la structure est obtenu en décomposant l'opérateur S sur une base de  $L^2(P)$ . Les détails de cette méthode feront l'objet d'une publication dédiée.

L'estimation de l'erreur commise indique que, pour l'eau, sur un domaine de  $1 \mu m$  par  $1,3 \mu m$  à 215 MHz, avec une approximation sur des bases de  $L^2(P)$  et  $H(P)$  de 19 éléments, et un maillage par éléments finis de 10000 noeuds environ, on obtient une erreur relative sur les solutions de l'ordre de 7%. Pour des raisons de temps de calcul, les résultats présentés dans la suite sont calculés avec ces paramètres et donc entachés d'une erreur relative de 7 %.

## 5 Analyse du fonctionnement du $\mu$ -cMUT en interaction avec un fluide

### 5.1 Comportement des fluides seuls

On applique une force sinusoïdale normale unitaire sur le bord P du domaine rempli de fluide.

Dans l'eau, à fréquences inférieures à 25 MHz environ, on observe un comportement du fluide dominé par les forces visqueuses [11]. Entre 2 MHz et 20 MHz, le profil de vitesse  $\delta U_x$  est parabolique et son atténuation est de l'ordre de  $0,9 \text{ dB}/\mu m$ . Au-delà de 25 MHz, le comportement est dominé par les forces inertielles, avec un profil de vitesse plat en dehors de la couche limite. L'onde émise se propage dans le pore : le premier nœud est à distance  $\frac{\lambda}{4}$  de P, puis les nœuds suivants sont réparties toutes les demi longueurs d'onde. A 1 GHz, l'amortissement de  $\delta U_x$  est de l'ordre de  $0,1 \text{ dB}/\mu m$  pour une couche limite d'épaisseur 80 nm. L'épaisseur de la couche limite diminue et l'amortissement augmente quand la fréquence augmente.

Dans l'air, la transition entre régime visqueux et régime inertiel intervient vers 200 MHz. A 5 MHz, l'atténuation est d'environ  $0,85 \text{ dB}/\mu m$  et augmente fortement avec la fréquence. Par contre, l'atténuation est très forte dans le régime inertielle : environ  $30 \text{ dB}/\mu m$  à 1 GHz pour une couche limite de 80 nm : l'onde ne se propage pas.

### 5.2 Comportement de la plaque

Dans l'eau (fig. 5.2), on distingue deux comportements différents en fonction de l'épaisseur de la plaque. Pour une plaque fine ( $h < 5 \text{ nm}$ ), son comportement est presque indépendant des autres caractéristiques physiques de la plaque. Les résonances observées correspondent aux modes propres de la cavité : le premier pic est situé à  $\frac{\lambda}{4}$ , le second à  $\frac{\lambda}{4} + \frac{\lambda}{2}$ . Le facteur de qualité du second pic est beaucoup plus bas que celui du premier et l'amplitude de la résonance est plus faible. Quand l'épaisseur de la plaque augmente, sa masse augmente par rapport à la charge en eau, et des pics associées aux résonances propres de la plaque apparaissent.

Dans l'air, la charge du milieu sur la plaque est beaucoup plus faible donc les courbes observées varient fortement en fonction des paramètres physiques de la plaque. L'amortissement des vitesses est très important. Les résonances du pore sont donc très amorties et le système se comporte comme un passe bas en fréquence.

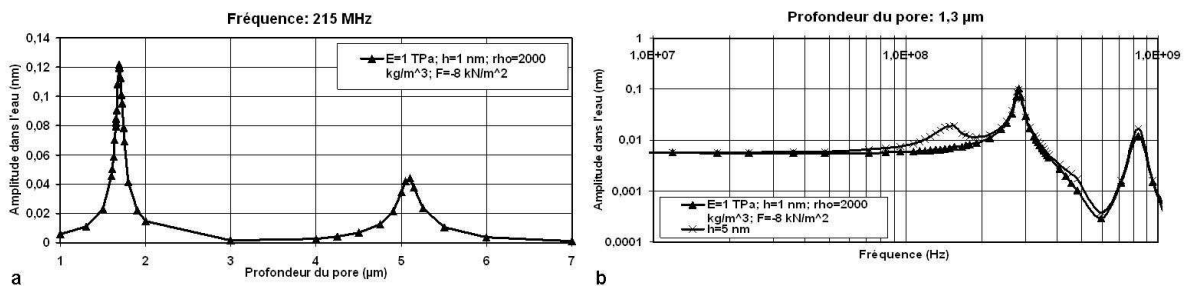


FIG. 3 – Amplitudes de vibration de la plaque dans l'eau. a : à 215 MHz en fonction de la profondeur du pore  $l$ . Les pics sont situés à  $1,7 \mu m$  (pic  $l = \lambda/4$ ) et  $5,1 \mu m$  (pic  $l = \frac{3\lambda}{4}$ ). b : en fonction de la fréquence pour une profondeur de pore  $l = 1,3 \mu m$ . Les pics sont situés à 149 MHz, 281 MHz (pic  $l = \lambda/4$ ) et 836 MHz ( $l = 3\lambda/4$ ).

### 5.3 Validation de l'intérêt applicatif du dispositif

A basse fréquence (10 MHz), pour une plaque fine ( $h < 5 \text{ nm}$ ), les amplitudes de vibration de la plaque dans l'air sont de 4 ordres de grandeur supérieures aux amplitudes dans l'eau, pour une même force appliquée sur la plaque et une même dimension de pore. L'écart se réduit à deux ordres de grandeur quand l'épaisseur de plaque atteint  $5 \text{ nm}$ , et à moins d'un ordre de grandeur pour une épaisseur de  $40 \text{ nm}$ . Par une mesure à basse fréquence, un capteur placé aléatoirement dans le milieu peut donc différencier un pore rempli d'eau d'un pore rempli d'air. Plus la membrane est fine, plus l'information est fiable.

Si le pore est saturé en eau, la mesure de l'amplitude des vibrations permet de déterminer la profondeur du pore : à 215 MHz par exemple, il existe près de 3 ordres de grandeur de différence entre les amplitudes de vibrations de la plaque dans un pore de  $100 \text{ nm}$  et un pore de  $1,7 \text{ }\mu\text{m}$ . Plus précisément, la figure (fig. 5.2b) montre que les amplitudes de vibrations dépendent de la profondeur du pore. En raison de la périodicité de l'onde, plusieurs profondeurs différentes de pore peuvent conduire à la même amplitude de vibration. En procédant à une seconde mesure d'amplitude de vibrations à une fréquence beaucoup plus basse (quelque MHz), on peut alors déterminer de la profondeur.

Pour une telle mesure, l'emploi de membranes ultra fines de nanotubes de carbone est particulièrement adapté : en raison de leur faible masse, les informations fournies sur le pore sont quasi indépendantes de la membrane choisie. C'est un atout essentiel car il est souvent difficile de garantir une très faible dispersion des paramètres mécaniques et physiques des dispositifs NEMS.

## 6 Conclusion

Nous abordons la conception et la réalisation d'un dispositif cMUT dont la membrane est faite de nanotubes de carbone alignés. Les aspects de lecture in-situ des amplitudes, de traitement du signal, d'intégration du capteur sont encore à définir. Le capteur est conçu spécifiquement pour l'instrumentation immergée de la microporosité des matériaux cimentaires. Par une modélisation acousto-élastique couplée à partir d'une géométrie de pore schématique, nous avons évalué l'amplitude des vibrations de la membrane dans un pore rempli d'air ou d'eau et identifié des résonances liées aux dimensions du pore. Ce premier modèle valide l'intérêt applicatif du dispositif pour la métrologie de la microporosité. Il devra être étendu pour prendre en compte des situations physiques plus réalistes, en particulier des formes de pores plus complexes.

## Références

- [1] Lebental B., Ghis A., and Delevoye E. Procédé et dispositif d'analyse acoustique de microporosites dans un matériau tel que le béton à l'aide d'une pluralité de transducteurs cmuts incorporés dans le matériau. Brevet soumis N° EN 08 57927. 2008.
- [2] Rey P., Salhi M., Giroud S., Robert P., Lagahe-Blanchard C., Clatot S., and Ballandras S. New manufacturing method for capacitive ultrasonic transducers with monocrystalline membrane. In MEMS, pages 581–584, 2007.
- [3] Zhou Q. F., Sharp C., Cannata J. M., and Shung K. K. Self-focused high frequency ultrasonic transducers based on zno piezoelectric films. Appl. Phys. Lett., 90(11), 113502, 2007.
- [4] Peng H. B., Chang C. W., Aloni S., Yuzvinsky T. D., and Zettl A. Ultrahigh frequency nanotube resonators. Phys. Rev. Lett., 97, 087203, 2006.
- [5] Lebental B. and Ghis A. Cellule cmut formée d'une membrane de nanotubes ou de nanofils ou de nanopoutres et dispositif d'imagerie acoustique ultra haute fréquence comprenant une pluralité de telles cellules. Brevet soumis N° EN 08 57928. 2008.
- [6] Krishnan A., Dujardin E., Ebbesen T. W., Yianilos P. N., and Treacy M. M. J. Young's modulus of single-walled nanotubes. Phys. Rev. B, 58, 14013, 1998.
- [7] Scott Bunch J., Verbridge S. S., Alden J. S., van der Zande A. M., Parpia J. M., Craighead H. G., and McEuen P. L. Impermeable atomic membranes from graphene sheets. Nano Lett., 8(8), 2458–2462, 2008.
- [8] Le Louarn A., Kapche F., Bethoux J.-M., Happy H., Dambrine G., Derycke V., Chenevier P., Izard N., Goffman M. F., and Bourgoin J.-P. Intrinsic current gain cutoff frequency of 30 ghz with carbon nanotube transistors. Appl. Phys. Lett., 90, 233108, 2007.
- [9] Yamaner F. Finite element and equivalent circuit modeling of capacitive micromachined ultrasonic transducer. Master's thesis, Graduate School of Engineering and Natural Sciences, Sabancı University, 2006.
- [10] Hagsäter S. M., Lenshof A., Skafte-Pedersen P., Kutter J., Laurell T., and Bruus H. Acoustic resonances in straight micro channels : Beyond the 1d-approximation. Lab on Chip, 8, 1178–1184, 2008.
- [11] Beltman W. M. Viscothermal wave propagation including acousto-elastic interaction, part i : theory. J. Sound Vib., 227(3), 555–586, 1999.
- [12] Qu W., Mala G. M., and Li D. Heat transfer for water flow in trapezoidal silicon microchannels. Int. J. Heat Mass Transfer, 43, 3925–3936, 2000.