

Présentation de la technologie cMUT

Un transducteur cMUT s'observe à deux échelles. La première, identique à toutes les barrettes échographiques, est celle que l'on connaît : topologie de la ou des surfaces émettrices, source mono-élément ou réseaux multi-éléments. La seconde est la façon dont est réalisée la conversion électroacoustique. Ici, chaque émetteur est constitué de centaines voire de milliers de cMUTs, chacun fonctionnant comme un microphone électrostatique mais appliqué à une échelle micrométrique. Pour concevoir une sonde, il faut donc définir la géométrie latérale d'un cMUT, la répartition des cMUTs sur la surface émettrice à couvrir et leur topologie verticale (nature des matériaux mobiles, hauteur de cavité, épaisseur des couches déposées, ...). Selon l'application envisagée et le domaine fréquentiel visé, il est ainsi nécessaire d'ajuster au mieux l'ensemble de ces paramètres. Ce sont les propriétés élémentaires mais aussi « collectives » des cMUTs qui conditionnent la réponse en fréquence de la barrette. Nous décrivons tous ces aspects dans la première section de ce chapitre. En général, pour dimensionner correctement une cellule et un émetteur ultrasonore multi-cMUTs, il faut s'appuyer sur des modèles numériques complets. Toutefois, on arrive, tant que le dispositif fonctionne dans l'air, à cibler certaines grandeurs et prédire des comportements de base en s'appuyant sur le modèle masse-ressort (modèle 1-D) de la cellule cMUT. Nous proposons ici (section 1.2) de le décrire pour introduire de manière naturelle toutes les caractéristiques électroacoustiques de base d'un cMUT.

1.1 Topologie d'une barrette cMUT

Dans cette section, la topologie des barrettes cMUT est décrite de façon générique et indépendante du procédé de fabrication. Seuls les aspects liés au fonctionnement même des barrettes sont présentés et aucun élément résultant d'une quelconque contrainte de fabrication n'est abordé.

1.1.1 Structure d'une cellule élémentaire cMUT

La structure d'une cellule élémentaire est relativement simple, comme le montre le schéma de principe représenté figure 1.1. Elle s'apparente à celle d'un condensateur plan composé de deux électrodes, dont l'une est mobile, séparées par un diélectrique. Plus pré-

1.1. TOPOLOGIE D'UNE BARRETTE CMUT

cisément, l'électrode inférieure est déposée sur un substrat, tandis que la partie mobile est suspendue au dessus d'une cavité scellée sous vide. L'électrode inférieure est isolée électriquement du substrat (parfois conducteur) au moyen d'un matériau d'isolation dédié. Le substrat est très souvent du silicium dopé, donc conducteur, mais il existe aussi des substrats verre.

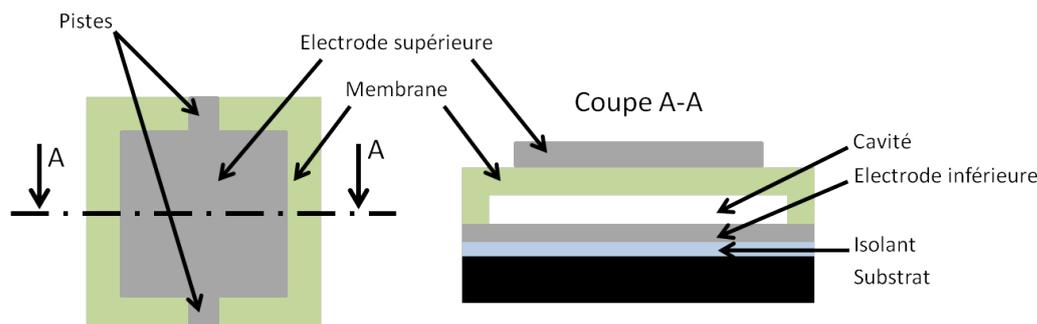


FIGURE 1.1 – Schéma de principe d'une cellule cMUT de géométrie carrée. A gauche vue de dessus, à droite de vue en coupe.

Selon l'application envisagée, les cavités peuvent être maintenues à la pression atmosphérique normale, c'est généralement le cas des microsystèmes audio ou des dispositifs fonctionnant dans l'air. Ces applications requièrent des membranes de grande taille, qui si elles étaient scellées, subiraient la pression atmosphérique avec d'importantes déformations initiales. La partie mobile est composée d'une membrane, en général du nitrure de silicium ou du silicium monocristallin, métallisée totalement ou partiellement pour former l'électrode supérieure. Le taux de métallisation varie de 50% à 100% selon les applications. On évite parfois de métalliser à 100%, car le pourtour de la membrane bouge peu et produit peu de charges électriques. Cette zone métallisée constitue une source de capacité parasite qui diminue le coefficient de couplage électromécanique de la cellule.

Ce sont les propriétés de cette partie mobile qui définissent la réponse en fréquence de la cellule cMUT. La forme, la taille et l'épaisseur de chacune des couches de la partie mobile sont définies au vu des fréquences ultrasonores visées. Traditionnellement, le choix de notre laboratoire s'est tourné plutôt vers la conception de cellules de forme rectangulaire, bien qu'il existe une multitude d'autres possibilités : cercle, hexagone, octogone, etc ... Ce format a été choisi, car il est celui qui offre le meilleur taux de surface active lorsque l'on désire concevoir des émetteurs de barrette ultrasonore de forme rectangulaire eux aussi. Une couche dite de passivation, peut recouvrir la totalité des membranes afin de renforcer la protection vis à vis de l'extérieur : protection mécanique, électrique et vieillissement de l'électrode supérieure.

1.1.2 Caractéristiques d'une barrette linéaire cMUT

La technologie cMUT permet de réaliser presque tous les types de sondes ultrasonores développées aujourd'hui et cela quel que soit son type : mono-élément, multi-éléments ou matricielle. Notons que les sondes courbes ou convexes n'existent pas encore en technologie

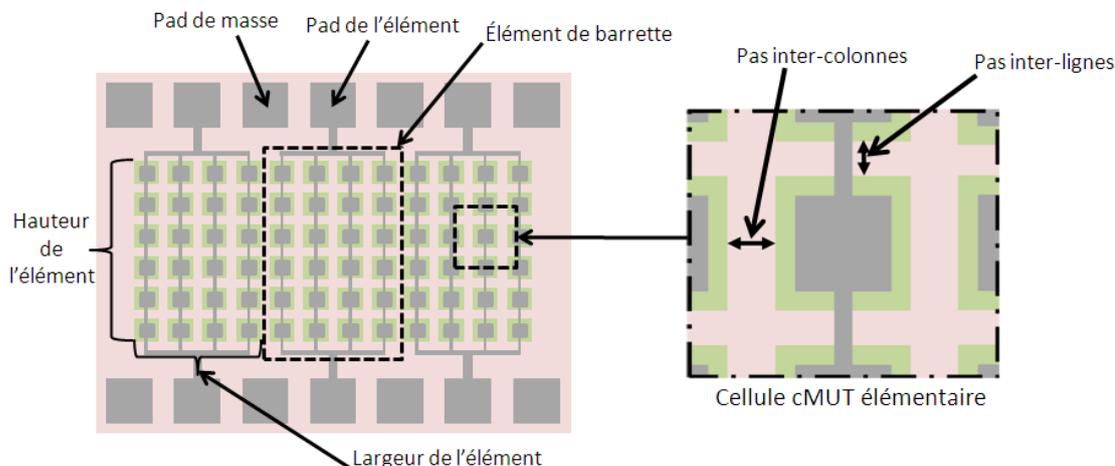


FIGURE 1.2 – Schéma de principe d'une barrette cMUT

cMUT. Dans la littérature, plusieurs travaux démontrent la capacité de cette technologie à se substituer aux sondes PZT pour tous types d'application [61].

De façon similaire aux sondes PZT, une barrette cMUT se compose de plusieurs éléments répartis avec un pas régulier, selon une direction donnée. En général, le nombre d'éléments par barrette est souvent choisi comme étant une puissance entière de 2, typiquement selon l'application 64, 128 ou 256 émetteurs/récepteurs. La taille des éléments est définie au vu des critères acoustiques recherchés pour la sonde. Pour une barrette linéaire classique, la largeur de l'élément est plutôt comprise entre $\frac{\lambda}{2}$ et λ , λ étant la longueur d'onde à la fréquence centrale. La hauteur des éléments est définie en fonction de la profondeur d'observation souhaitée pour la sonde. Dans le cas où aucune lentille de focalisation n'est placée sur la surface de la barrette, la hauteur des éléments est ajustée afin de faire correspondre la limite de champ proche avec la profondeur d'observation souhaitée.

On forme un élément de barrette en associant électriquement en parallèle, plusieurs cMUTs, généralement agencées de manière périodique comme on peut le voir sur la figure 1.2. On accède électriquement à un élément par un pad métallique connecté en parallèle à tous les cMUTs. L'électrode inférieure, commune à tous les cMUTs d'un élément, est structurée au niveau des pads des électrodes supérieures afin de diminuer la capacité parasite de la barrette. Des pads connectés à l'électrode inférieure, dit pads de « masse », sont aussi reportés sur le pourtour de la barrette. Bien que dans la plupart des cas, l'électrode inférieure soit commune à tous les éléments de la barrette et qu'un seul pad soit nécessaire, il est généralement choisi d'en disposer plusieurs. Cela facilite la caractérisation individuelle des éléments lors des étapes de contrôle post fabrication, mais aussi, cela minimise la résistance électrique liée à l'électrode inférieure.

Les pas inter-membranes sont aussi des paramètres qui influent la réponse en fréquence des éléments. Traditionnellement, lors de la phase de conception de la barrette, ces distances sont minimisées afin d'obtenir le meilleur taux de surface active et par conséquent le meilleur niveau de pression en sortie du transducteur. Ces distances inter-membranes minimales sont uniquement fixées par le procédé de fabrication.

1.2 Analyse 1D du comportement d'une cellule cMUT

Afin d'analyser le principe de fonctionnement des cellules cMUT et d'illustrer les phénomènes physiques mis en jeu, une étude unidimensionnelle de leur comportement est ici rappelée. En guise d'introduction, une brève présentation des différents modes de fonctionnement des cellules cMUT sera tout d'abord réalisée. Le modèle unidimensionnel d'une cellule cMUT sera ensuite présenté avec les différentes forces mécaniques régissant son comportement. Finalement, le comportement du système sera totalement décrit par l'intermédiaire d'études statique et dynamique.

1.2.1 Principe de fonctionnement d'une cellule cMUT

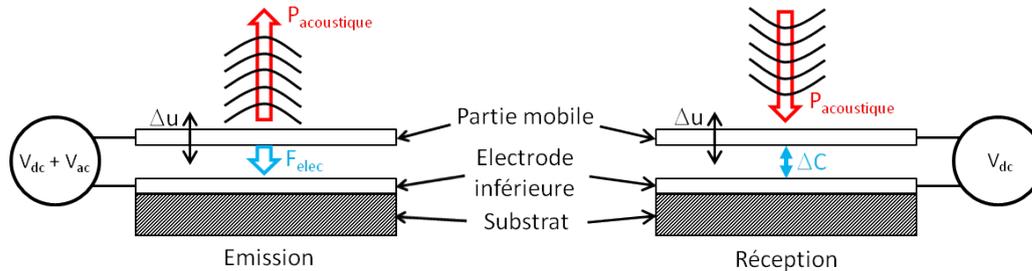


FIGURE 1.3 – Principe de fonctionnement d'une cellule cMUT en mode émission (à gauche) et en mode réception (à droite)

Comme l'ensemble des transducteurs, les cellules cMUT sont utilisées selon deux modes de fonctionnement : le mode émission et le mode réception (figure 1.3). En mode émission, une tension alternative est appliquée aux bornes des électrodes de la cellule. La force électrostatique (F_{elec}) ainsi appliquée, met en mouvement la partie mobile de la cellule. A partir de ce déplacement, une pression acoustique est rayonnée en face avant de la cellule cMUT dans son milieu environnant. La plupart du temps, une tension de polarisation continue est ajoutée à la tension d'excitation afin d'augmenter le coefficient de couplage électromécanique de la cellule cMUT. En réception, la partie mobile de la cellule se met en mouvement sous l'action de la pression engendrée par l'onde acoustique incidente. Son déplacement va alors entraîner une variation de la capacité intrinsèque de la cellule et donc un courant de réception. Dans ce mode d'utilisation, il est nécessaire que la cellule soit préalablement polarisée afin de pouvoir détecter des variations de charges.

1.2.2 Présentation du modèle unidimensionnel d'une cellule cMUT

Largement utilisé par la communauté scientifique [68, 121], le modèle unidimensionnel constitue une méthode descriptive mais réaliste d'analyse du principe de fonctionnement d'une cellule cMUT. Au vu du rapport entre les dimensions latérales d'une cellule et son déplacement maximum, la partie mobile des cellules est assimilée, dans cette approche, à une plaque rigide (figure 1.4). En effet, le déplacement maximal au centre de la partie

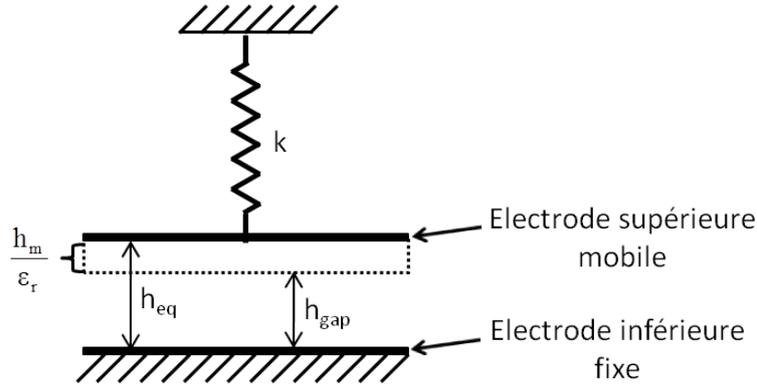


FIGURE 1.4 – Schéma 1-D équivalent d'une cellule cMUT

mobile est à peu près 1000 fois plus petit que ses dimensions latérales. Dans ces conditions, on comprend aisément que la courbure de la partie mobile puisse être négligée dans une première approche. Afin de prendre en compte l'épaisseur de la membrane dans les forces électrostatiques mises en jeu, la hauteur entre les deux électrodes est définie comme la hauteur équivalente (h_{eq}) suivante :

$$h_{eq} = h_{gap} + \frac{h_m}{\epsilon_r} \quad (1.1)$$

avec

- h_{gap} la hauteur de la cavité,
- h_m l'épaisseur de la membrane,
- ϵ_r la permittivité diélectrique relative de la membrane.

Le comportement mécanique de la partie mobile de la cellule cMUT est modélisé comme un système masse-ressort. Dans cette étude, le poids de l'électrode mobile est négligé devant les autres forces mises en jeu. Par conséquent, l'électrode mobile est uniquement soumise à la force électrostatique et à la force de rappel mécanique.

1.2.3 Energie électrostatique

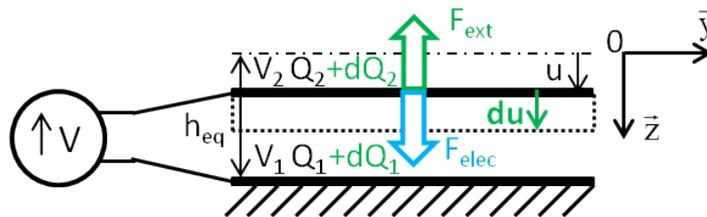


FIGURE 1.5 – Schéma équivalent d'une cellule cMUT d'un point de vue électrique

Dans l'hypothèse du condensateur plan, la capacité du transducteur s'exprime en fonc-

tion de la position u de l'électrode mobile par :

$$C(u) = \frac{\epsilon_0 S}{(h_{eq} - u)} \quad (1.2)$$

où

- $C(u)$ est la capacité du transducteur,
- u est la position de l'électrode mobile,
- S est la surface de l'électrode mobile,
- ϵ_0 est la permittivité diélectrique du vide.

L'énergie électrostatique emmagasinée dans le condensateur (E_{cond}), lorsqu'on applique une tension V et une charge Q , s'écrit de la façon suivante :

$$E_{cond} = \frac{1}{2} QV \quad (1.3)$$

Pour estimer la force électrostatique appliquée à l'électrode mobile, on utilise la méthode des travaux virtuels. Ainsi, on suppose qu'un opérateur extérieur exerce une force (\vec{F}_{ext}) s'opposant à la force électrostatique (\vec{F}_{elec}) (voir figure 1.5). Puis, à proximité de l'équilibre mécanique, on étudie l'impact d'un petit déplacement du autour de cette position. L'opérateur fournit donc un travail dw_{op} à l'électrode mobile qui s'oppose à celui exercé par la force électrostatique et qui vaut :

$$dw_{op} = \vec{F}_{ext} \cdot \vec{du} = -\vec{F}_{elec} \cdot \vec{du} \quad (1.4)$$

En plus de l'énergie stockée dans le condensateur, il existe une deuxième source d'énergie : le générateur. Lors du déplacement de l'électrode, celui-ci maintient les potentiels V_1 et V_2 constants. Cela ne peut se faire qu'en modifiant les charges Q_1 et Q_2 de chacune des électrodes. Ainsi pendant le déplacement du , le générateur fournit un travail permettant d'amener des charges dQ_1 au potentiel V_1 et dQ_2 au potentiel V_2 , autrement dit il fournit l'énergie suivante :

$$dE_{gen} = dQ_1 V_1 + dQ_2 V_2 \quad (1.5)$$

En vertu du principe de conservation de l'énergie, on peut établir la relation suivante :

$$dE_{cond} = dw_{op} + dE_{gen} \quad (1.6)$$

$$\frac{1}{2} dQV = -\vec{F}_{elec} \cdot \vec{du} + dQ_1 V_1 + dQ_2 V_2 \quad (1.7)$$

étant donné que :

$$\begin{cases} Q = Q_2 = -Q_1 \\ V = V_2 - V_1 \end{cases} \quad (1.8)$$

on obtient :

$$\vec{F}_{elec} \cdot \vec{du} = \frac{1}{2} dQV \quad (1.9)$$

Ainsi l'expression de la force électrostatique est :

$$\vec{F}_{elec} = \frac{1}{2} \frac{\partial Q}{\partial u} V \vec{z} = \frac{1}{2} \frac{\partial C}{\partial u} V^2 \vec{z} = \frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 S V^2}{(h_{eq} - u)^2} \vec{z} \quad (1.10)$$

Partant de l'expression de la force électrostatique, il est facile de déterminer l'énergie potentielle associée. Sachant que la force électrostatique dérive d'une énergie potentielle, on peut écrire :

$$\vec{F}_{elec} = -\frac{\partial}{\partial u} \left(-\frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 S V^2}{(h_{eq} - u)} \right) \vec{z} = -\frac{\partial E_{elec}}{\partial u} \vec{z} \quad (1.11)$$

On en déduit que l'énergie électrostatique de l'électrode mobile, à potentiel constant, vaut :

$$E_{elec} = -\frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 S V^2}{(h_{eq} - u)} \quad (1.12)$$

1.2.4 Energie élastique

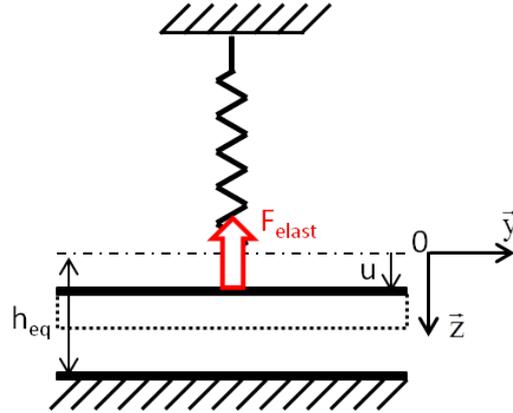


FIGURE 1.6 – Schéma équivalent d'une cellule cMUT d'un point de vue mécanique

En ce qui concerne la partie mécanique de l'électrode mobile, elle est modélisée par un système masse-ressort (figure 1.6). La force mécanique associée est donc simplement la force de rappel mécanique du ressort. Elle s'exprime :

$$\vec{F}_{elast} = -ku \vec{z} \quad (1.13)$$

avec k la constante de raideur du ressort.

L'énergie potentielle élastique dérivant de cette force s'écrit donc :

$$E_{elast} = \frac{1}{2} ku^2 \quad (1.14)$$

étant donné que :

$$\vec{F}_{elast} = -\frac{\partial E_{elast}}{\partial u} \vec{z} \quad (1.15)$$

1.2.5 Etude statique

L'objectif de cette étude est d'analyser le principe de fonctionnement d'une cellule cMUT en régime statique. Autrement dit, pour une tension de polarisation donnée, nous allons chercher à déterminer la ou les positions d'équilibre de l'électrode mobile. Pour cela notre raisonnement est basé sur l'étude de l'évolution de l'énergie globale de l'électrode mobile. En effet, étant donné que les forces mises en jeu dérivent toutes d'une énergie potentielle, la recherche des positions d'équilibre de l'électrode mobile est obtenue en déterminant les extremums de la courbe représentant l'évolution de son énergie potentielle en fonction de sa position. Ainsi, dans le cas statique, l'énergie mécanique globale de l'électrode mobile correspond uniquement à son énergie potentielle et s'exprime :

$$E_p = E_{elec} + E_{elast} = -\frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 S V_{DC}^2}{(h_{eq} - u_0)} + \frac{1}{2} k u_0^2 \quad (1.16)$$

où

- V_{DC} est la tension de polarisation,
- u_0 est la position de l'électrode mobile pour une tension de polarisation $V = V_{DC}$.

La figure 1.7 représente pour différentes tensions de polarisation l'évolution de l'énergie potentielle de l'électrode mobile en fonction de sa position. Sur cette figure, les positions d'équilibre de l'électrode mobile ont été signalées pour chaque tension de polarisation.

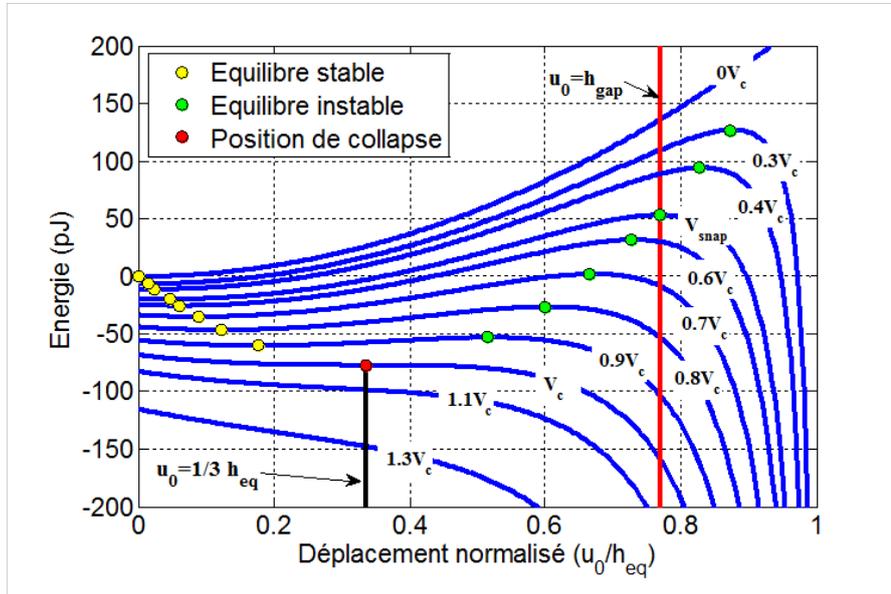


FIGURE 1.7 – Variation de l'énergie potentielle de l'électrode mobile en fonction de sa position normalisée

Pour une tension de polarisation de 0 V, une seule position d'équilibre stable est observée. Cette position correspond à la position de l'électrode mobile à son état initial. Dès que la tension de polarisation est non nulle, une position d'équilibre instable apparaît sur la

courbe de l'énergie potentielle en plus de la position d'équilibre stable. Lorsque la tension de polarisation augmente, les deux positions d'équilibre (stable et instable) convergent l'une vers l'autre jusqu'à se confondre pour une tension dite de collapse. Dans ce cas particulier, l'électrode mobile est dans une position d'équilibre instable et elle s'effondre au fond de la cavité. Au-delà de cette tension, il n'existe plus de position d'équilibre et l'électrode mobile reste bloquée au fond de la cavité.

D'un point de vue mathématique, la recherche des positions d'équilibre de l'électrode mobile revient à déterminer les positions pour lesquelles la dérivée de l'énergie potentielle s'annule. Ainsi, pour chaque tension de polarisation donnée, on doit résoudre l'équation du troisième degré suivante :

$$\left(\frac{\partial E_p}{\partial u_0}\right)_V = 0 \Leftrightarrow u_0^3 - 2h_{eq}u_0^2 + h_{eq}^2u_0 - \frac{\epsilon_0SV_{DC}^2}{2k} = 0 \quad (1.17)$$

Nous avons vu précédemment que la tension de collapse correspondait au cas où les deux positions d'équilibre étaient confondues. Mathématiquement, cela revient à chercher la tension de polarisation pour laquelle l'équation du troisième degré admet une solution double non nulle. D'après la méthode de cardan, on obtient ce cas lorsque le discriminant de cette équation défini par cette méthode est égal à zéro. Autrement dit lorsque :

$$\Delta = 0 \Leftrightarrow \frac{2h_{eq}^3\epsilon_0SV_C^2}{k} - \frac{27\epsilon_0^2S^2V_C^4}{4k^2} = 0 \quad (1.18)$$

La tension de collapse (V_c) s'exprime donc :

$$V_c = \sqrt{\frac{8kh_{eq}^3}{27\epsilon_0S}} \quad (1.19)$$

La position de l'électrode mobile au moment du collapse (u_c) est quant à elle obtenue en calculant la solution double de l'équation du troisième degré. Ainsi, on obtient :

$$u_c = \frac{1}{3}h_{eq} \quad (1.20)$$

Sur la figure 1.7, la position de l'électrode mobile au moment du collapse correspond bien à la valeur déterminée analytiquement, c'est à dire à un tiers de la hauteur équivalente [68, 143].

Une fois l'électrode mobile bloquée au fond de la cavité, il faut réduire la tension de polarisation jusqu'à une tension dite de snapback pour la libérer. Ainsi mathématiquement, la tension de snapback est déterminée comme étant la tension pour laquelle les forces se compensent de nouveau à partir du nouvel état initial ($u_0 = h_{gap}$). On cherche donc à déterminer la tension pour laquelle on peut écrire :

$$F_{elast}(u_0 = h_{gap}) = F_{elec}(u_0 = h_{gap}) \quad (1.21)$$

On en déduit l'expression de la tension de snapback (V_{snap}) suivante :

$$V_{snap} = \sqrt{\frac{2h_{gap}h_m^2k}{\epsilon_r\epsilon_0S}} \quad (1.22)$$

En terme d'énergie, cette tension de snapback correspond à la tension de polarisation pour laquelle l'électrode mobile, placée au fond de la cavité, est dans une position d'équilibre instable (figure 1.7).

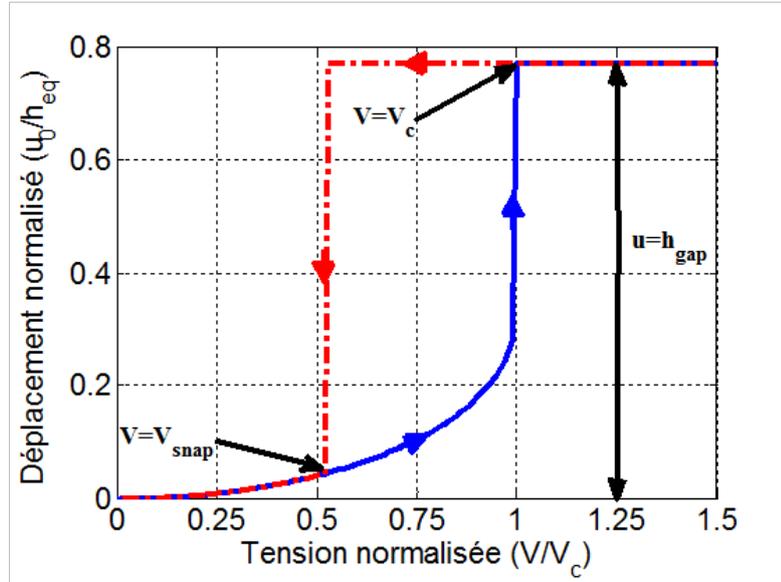


FIGURE 1.8 – Variation de la position de l'électrode mobile en fonction de la tension de polarisation (bleu : tension croissante, rouge : tension décroissante)

Afin de conclure l'étude statique, nous avons représenté figure 1.8 l'évolution de la position de l'électrode mobile en fonction de la tension de polarisation. Les positions de l'électrode mobile représentées sur la figure 1.8 sont celles déterminées par l'étude statique. Sur cette courbe, le cycle d'hystérésis, caractéristique de plusieurs types de MEMs électrostatiques, est parfaitement observé. La tension de snapback est clairement identifiée à une valeur inférieure à celle du collapse. Ce cycle permet aussi de vérifier que le déplacement maximal de l'électrode mobile correspond bien à la hauteur de la cavité.

1.2.6 Etude dymanique

Afin d'étudier le comportement dynamique de l'électrode mobile, une tension alternative (V_{AC}) est ajoutée à la tension de polarisation continue (V_{DC}). Ainsi, le déplacement de l'électrode mobile peut se décomposer comme étant la somme du déplacement statique (u_0) produit par la tension de polarisation et du déplacement dynamique produit par la tension alternative (u_{AC}). Par conséquent, l'objectif de notre étude sera d'analyser le comportement dynamique de l'électrode mobile autour de la position d'équilibre stable produite par la tension de polarisation. De plus, dans cette étude, les pertes mécaniques sont volontairement négligées. La tension globale appliquée aux bornes de la cellule (V) et le déplacement de l'électrode mobile (u) s'écrivent donc sous la forme suivante :

$$\begin{cases} V = V_{DC} + V_{AC} \\ u = u_0 + u_{AC} \end{cases} \quad (1.23)$$

D'après la deuxième loi de Newton, on a :

$$m \frac{\partial^2 u_{AC}}{\partial t^2} = \overrightarrow{F_{elec}}(u_{AC}, V_{AC}) + \overrightarrow{F_{elast}}(u_{AC}) \quad (1.24)$$

avec m la masse de l'électrode mobile.

Ici et par la suite, on considère que la tension d'excitation est très inférieure à la tension de polarisation ($V_{AC} \ll V_{DC}$) et que par conséquent le déplacement dynamique de l'électrode mobile est lui aussi très inférieur à son déplacement statique ($u_{AC} \ll u_0$). Ainsi, la force électrostatique peut être linéarisée autour de la position d'équilibre (u_0, V_{DC}) par l'intermédiaire d'un développement de Taylor à l'ordre 1.

$$\overrightarrow{F_{elec}}(u, V) = \overrightarrow{F_{elec}}(u_0, V_{DC}) + \left. \frac{\partial \overrightarrow{F_{elec}}(u, V)}{\partial u} \right|_{u_0, V_{DC}} u_{AC} + \left. \frac{\partial \overrightarrow{F_{elec}}(u, V)}{\partial V} \right|_{u_0, V_{DC}} V_{AC} \quad (1.25)$$

La force électrostatique induite par les composantes dynamiques du système s'exprime donc :

$$\begin{aligned} \overrightarrow{F_{elec}}(u_{AC}, V_{AC}) &= \overrightarrow{F_{elec}}(u, V) - \overrightarrow{F_{elec}}(u_0, V_{DC}) \\ &= \left. \frac{\partial \overrightarrow{F_{elec}}(u, V)}{\partial u} \right|_{u_0, V_{DC}} u_{AC} + \left. \frac{\partial \overrightarrow{F_{elec}}(u, V)}{\partial V} \right|_{u_0, V_{DC}} V_{AC} \\ &= \frac{\epsilon_0 S V_{DC}^2}{(h_{eq} - u_0)^3} u_{AC} \vec{z} + \frac{\epsilon_0 S V_{DC}}{(h_{eq} - u_0)^2} V_{AC} \vec{z} \end{aligned} \quad (1.26)$$

On peut donc reformuler la relation fondamentale de la dynamique (équation 1.24) sous la forme :

$$m \frac{\partial^2 u_{AC}}{\partial t^2} = \left(\frac{\epsilon_0 S V_{DC}^2}{(h_{eq} - u_0)^3} - k \right) u_{AC} + \frac{\epsilon_0 S V_{DC}}{(h_{eq} - u_0)^2} V_{AC} \quad (1.27)$$

A partir de cette équation, deux nouvelles grandeurs sont définies : la raideur équivalente (k_{soft}) et le coefficient de transformation électroacoustique (φ).

$$k_{soft} = \left(k - \frac{\epsilon_0 S V_{DC}^2}{(h_{eq} - u_0)^3} \right) \quad (1.28)$$

$$\varphi = \frac{\epsilon_0 S V_{DC}}{(h_{eq} - u_0)^2} \quad (1.29)$$

Le terme d'origine purement électrostatique dans l'expression de la raideur équivalente est à l'origine du phénomène appelé « softening ». Il a pour effet de réduire la raideur du système lorsque la tension de polarisation augmente.

Par la suite, on considère que la tension d'excitation (V_{AC}) est un signal harmonique et qu'il en résulte un déplacement (u_{AC}) qui lui aussi est purement harmonique. Autrement dit, on peut écrire :

$$\begin{cases} V_{AC} = \tilde{V} e^{j\omega t} \\ u_{AC} = \tilde{u} e^{j\omega t} \end{cases} \quad (1.30)$$

La relation fondamentale de la dynamique (équation 1.27) devient :

$$m\omega^2\tilde{u} - k_{soft}\tilde{u} + \varphi\tilde{V} = 0 \quad (1.31)$$

De cette relation, on en déduit l'expression du déplacement dynamique (\tilde{u}) en fonction de la tension d'excitation (\tilde{V}). Ainsi on a :

$$\tilde{u} = \frac{\varphi}{m\omega^2 - k_{soft}}\tilde{V} \quad (1.32)$$

Connaissant l'évolution du déplacement (\tilde{u}) de l'électrode, on peut exprimer plusieurs grandeurs électriques. La première est la quantité de charge dynamique ($Q(u_{AC}, V_{AC})$) partant de l'expression de la charge électrique ($Q(u, V)$). On rappelle que l'expression de la charge électrique est :

$$Q(u, V) = C(u)V = \frac{\epsilon_0 S V}{(h_{eq} - u)} \quad (1.33)$$

De façon similaire à la force électrostatique, un développement de Taylor à l'ordre 1 est appliqué sur l'expression de la charge électrique du condensateur afin de linéariser son expression. Le développement est réalisé autour de la position d'équilibre statique du système (u_0, V_{DC}). On obtient donc :

$$\begin{aligned} Q(u_{AC}, V_{AC}) &= Q(u, V) - Q(u_0, V_{DC}) \\ &= \left. \frac{\partial Q(u, V)}{\partial u} \right|_{u_0, V_{DC}} u_{AC} + \left. \frac{\partial Q(u, V)}{\partial V} \right|_{u_0, V_{DC}} V_{AC} \\ &= \frac{\epsilon_0 S V_{DC}}{(h_{eq} - u_0)^2} u_{AC} + \frac{\epsilon_0 S}{(h_{eq} - u_0)} V_{AC} \end{aligned} \quad (1.34)$$

Ainsi, on peut exprimer la charge dynamique du condensateur en fonction du coefficient de transformation électroacoustique (φ) et de la capacité statique (C_0) obtenue lorsque l'électrode mobile est à la position d'équilibre (u_0).

$$Q(u_{AC}, V_{AC}) = \varphi u_{AC} + C_0 V_{AC} \quad (1.35)$$

Le courant aux bornes des électrodes (I) est quant à lui obtenu à partir de l'expression de la charge. On a donc :

$$I = \frac{\partial Q(u_{AC}, V_{AC})}{\partial t} = \varphi \frac{\partial u_{AC}}{\partial t} + C_0 \frac{\partial V_{AC}}{\partial t} \quad (1.36)$$

En considérant que (I) est purement harmonique, on peut écrire que :

$$I = \tilde{I} e^{j\omega t} \quad (1.37)$$

et on obtient :

$$\tilde{I} = j\omega (\varphi \tilde{u} + C_0 \tilde{V}) \quad (1.38)$$

Finalement, en remplaçant \tilde{u} par son expression (équation 1.32), on obtient que le courant aux bornes des électrodes s'exprime, en fonction de la tension d'excitation, sous la forme suivante :

$$\tilde{I} = j\omega \left(C_0 - \frac{\varphi^2}{m\omega^2 - k_{soft}} \right) \tilde{V} \quad (1.39)$$

L'admittance électrique (Y_{elec}) du système est ainsi identifiée. Elle correspond à celle d'un condensateur et vaut :

$$Y_{elec} = j\omega \left(C_0 - \frac{\varphi^2}{m\omega^2 - k_{soft}} \right) = j\omega C(\omega) \quad (1.40)$$

avec $C(\omega)$ la capacité du condensateur équivalent.

A partir de l'expression de l'admittance électrique, les fréquences de résonance (f_r) et d'antirésonance (f_a) du système sont déterminées. En effet, la fréquence de résonance est définie comme étant la fréquence pour laquelle la tension d'entrée \tilde{V} du système est nulle. Mathématiquement, cela revient à déterminer la fréquence pour laquelle l'admittance tend vers l'infini. En ce qui concerne la fréquence d'antirésonance, elle intervient lorsque le courant d'entrée \tilde{I} du système est nul. Par conséquent, elle est obtenue en cherchant la fréquence pour laquelle l'inverse de l'admittance, c'est à dire l'impédance l'électrique, tend vers l'infini. Ainsi, on a démontré que :

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_{soft}}{m}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k - \frac{\epsilon_0 S V_{DC}^2}{(h_{eq} - u_0)^3}}{m}} \quad (1.41)$$

$$f_a = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1.42)$$

On remarque que le terme de softening possède un impact sur la fréquence de résonance du système. En effet, en réduisant la raideur équivalente du système, il provoque une diminution de la fréquence de résonance lorsque la tension de polarisation augmente. La fréquence d'antirésonance correspond quant à elle à la fréquence mécanique propre du système. Elle est par conséquent invariante en fonction de la tension de polarisation. Toutefois, dans le cas d'un cMUT dont la membrane n'est pas plane, la fréquence d'antirésonance dépend aussi de la tension de polarisation appliquée. Nous le verrons par la suite.

Deux autres grandeurs caractéristiques du système peuvent être déterminées : la capacité dite hautes fréquences (C_{HF}) et la capacité dite basses fréquences (C_{BF}). Ces deux grandeurs traduisent les valeurs asymptotiques de la capacité du système aux limites du domaine fréquentiel. Ainsi, en hautes fréquences, la capacité du système correspond à la capacité clampée. Elle tend vers la valeur de la capacité statique du système (C_0). En basses fréquences, la capacité du système correspond à la capacité libre. Elle est augmentée du terme $\frac{\varphi^2}{k_{soft}}$ par rapport à la capacité hautes fréquences.

$$C_{HF} = \lim_{\omega \rightarrow \infty} C(\omega) = C_0 = \frac{\epsilon_0 S}{(h_{eq} - u_0)} \quad (1.43)$$

$$C_{BF} = \lim_{\omega \rightarrow 0} C(\omega) = C_0 + \frac{\varphi^2}{k_{soft}} = \frac{\epsilon_0 S}{(h_{eq} - 3u_0)} \quad (1.44)$$

Le coefficient de couplage électromécanique du système (k_t) peut aussi être estimé. Il définit l'efficacité du système à transformer l'énergie électrique en énergie mécanique et inversement. Sa valeur varie toujours entre 0 et 1. Le coefficient de couplage électromécanique atteint sa valeur maximale de 1 lorsque la totalité de l'énergie électrique est convertie en énergie mécanique. Plusieurs relations permettent de le déterminer [143] :

$$k_t^2 = \frac{E_{meca}}{E_{meca} + E_{elect}} = 1 - \frac{C_{HF}}{C_{BF}} = 1 - \left(\frac{f_r}{f_a} \right)^2 \quad (1.45)$$

Dans le cas du modèle 1-D, les deux formules permettent de déterminer simplement le coefficient de couplage électromécanique. Ainsi, de façon similaire à la littérature [143, 121] on a :

$$k_t^2 = \frac{2u_0}{(h_{eq} - u_0)} \quad (1.46)$$

On remarque que le coefficient de couplage atteint sa valeur maximale lorsque le déplacement statique de l'électrode mobile (u_0) vaut $\frac{1}{3}h_{eq}$, autrement dit lorsque l'électrode mobile atteint la position de collapse. Ainsi, afin d'augmenter l'efficacité de la cellule cMUT, on comprend aisément qu'il sera nécessaire de la polariser avec une tension la plus proche possible de la tension collapse.

Chapitre 2

Procédés de fabrication

Bien que le concept des transducteurs électrostatiques soit énoncé depuis le début de la première guerre mondiale, il a fallu attendre l'avènement des techniques de la micro-électronique et de ses procédés de fabrication pour que la conception d'une telle sonde soit réalisable. La publication des travaux de Haller et de Khuri-Yakub sur la réalisation d'un transducteur ultrasonore capacitif micro-usiné (cMUT) marque une évolution décisive sur la maîtrise de ces procédés de fabrication. A partir de ce moment, un réel engouement s'engagea autour des transducteurs électrostatiques et plus précisément sur le développement de transducteurs cMUT. Il existe actuellement deux filières pour la conception de sondes ultrasonores en technologie cMUT : la filière dite de micro-usinage de surface et la filière dite de wafer-bonding.

Après un bref rappel historique remontant aux prémisses des sondes ultrasonores, cette section sera dédiée à la présentation de ces deux filières de production. Pour chacune de ces technologies, une étude détaillée de leur procédé de référence sera réalisée, avant de présenter certaines évolutions intéressantes.

2.1 Bref historique : du condensateur « chantant » aux cMUTs

Bien que les transducteurs piézoélectriques aient largement dominé le domaine des transducteurs ultrasonores durant l'ensemble du 20^{ème} siècle, historiquement les premiers travaux sur la génération d'ondes ultrasonores furent réalisés avec des transducteurs électrostatiques [43]. En effet, en 1915, lors de la première mise en évidence de la propagation d'une onde ultrasonore dans l'eau, Paul Langevin utilisa comme transducteur un condensateur au mica : le condensateur « chantant » de Langevin [70]. Cependant, ses travaux sur le condensateur « chantant » furent rapidement abandonnés en 1917 au profit des lames de quartz piézoélectrique ayant un meilleur rendement. La principale raison qui contraignit Langevin à abandonner ses travaux sur les transducteurs électrostatiques résida dans la difficulté qu'il éprouva à augmenter le champ électrique interne. Selon lui, pour obtenir un niveau d'efficacité acceptable, il aurait fallu atteindre des champs électriques de l'ordre 10^8 V.m⁻¹ [57], valeur qu'il était impossible d'obtenir avec les matériaux et les techniques de fabrications existantes.

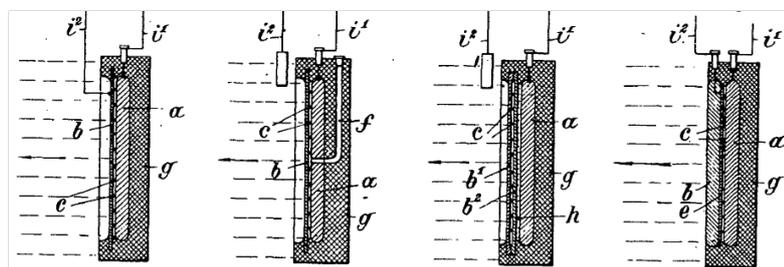
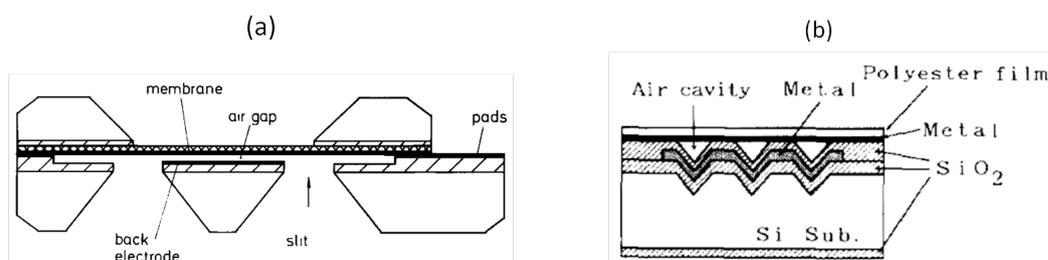


FIGURE 2.1 – Schéma du condensateur « chantant » de Langevin breveté en 1916 [70].

Ainsi, bien que les travaux sur les transducteurs électrostatiques ultrasonores n'aient jamais réellement cessé [65, 19], il a fallu attendre la fin du 20^{ème} siècle et les progrès réalisés dans le domaine des microtechnologies pour que les transducteurs électrostatiques redevinrent d'actualité.


 FIGURE 2.2 – Schéma du transducteur électrostatique à technologie silicium de (a) Hohm *et al.* [53] et de (b) Suzuki *et al.* [123].

Les premiers transducteurs électrostatiques à technologie silicium sont apparus à la fin des années 1980. Leur utilisation était dédiée à la transduction aérienne et plus précisément à la détection de proximité. Parmi ces transducteurs électrostatiques, deux furent particulièrement remarquables. Le premier, développé par Hohm *et al.* [53], se distingua de part son procédé de fabrication. En effet, contrairement à la plupart des transducteurs électrostatique réalisés jusque là, la partie mobile de celui-ci n'était pas composée d'un film diélectrique mais d'une couche de nitrure de silicium. L'autre particularité de ce procédé de fabrication était que la membrane en nitrure de silicium était réalisée sur un wafer différent, avant d'être assemblée sur la partie arrière du transducteur.

L'autre transducteur électrostatique particulièrement remarquable développé à la fin des années 1980 fut celui réalisé par Suzuki *et al.* [123]. Avec une bande passante centrée à 150 kHz, il fut le premier dispositif issu des technologies du silicium à travailler dans le domaine ultrasonore. Sa topologie se rapprochait de celle d'un microphone standard. La partie mobile était composée d'un film diélectrique en polyester métallisé et seule la partie arrière du transducteur était fabriquée sur un wafer en silicium. Selon son procédé de fabrication, les cavités arrière des membranes étaient directement gravées dans le wafer en silicium. Le caractère anisotrope de la gravure du silicium procurait aux cavités des formes pyramidales. Ainsi, la profondeur des cavités dépendait directement de leurs largeurs (profondeur = $\frac{1}{\sqrt{2}}$ largeur).

Malgré l'avancée technologique que représentait ces deux transducteurs, leurs performances acoustiques ne furent pas suffisantes pour pouvoir s'imposer dans le domaine des transducteurs ultrasonores. De plus, la complexité des procédés de fabrication employés pour réaliser ces dispositifs fut un autre frein à leurs développements.

Il a fallu attendre 1993 et les travaux de M. Haller *et al.* [49, 48] sur les transducteurs capacitifs micro-usinés (cMUT), pour obtenir un transducteur électrostatique ultrasonore capable de rivaliser en termes de performances avec les transducteurs piézoélectriques. Le premier transducteur présenté dans ces travaux était uniquement dédié aux applications aériennes. Il présentait une bande passante de 20% centrée à 1.9 MHz. L'originalité introduite par ces travaux résida dans le procédé de fabrication. Contrairement à toutes les techniques développées jusque là qui étaient basées sur le micro-usinage de volume du wafer en silicium, le procédé de fabrication proposé ici était basé sur une technique dite de micro-usinage de surface. En effet, ici le wafer en silicium servait uniquement de support sur lequel les matériaux formant les différentes couches du transducteur étaient successivement déposés ou gravés. Ainsi, grâce à cette technique, il fut possible de réaliser des espaces inter-électrodes de l'ordre de la centaine de nanomètres et d'obtenir les champs électrostatiques nécessaires ($>10^8$ V.m⁻¹) pour améliorer significativement l'efficacité du transducteur. A partir de ces travaux, une forte dynamique s'engagea autour des transducteurs ultrasonores et plus précisément autour des cMUTs. Le procédé de fabrication fut développé et adapté à différentes applications, comme par exemple pour une utilisation en immersion [122]. Les principales raisons qui firent de ce procédé une référence dans la fabrication de transducteurs ultrasonores furent sa simplicité, sa reproductibilité et sa capacité à fort volume de production.

En 2002, un nouveau procédé de fabrication par wafer bonding fut mis au point par l'équipe du professeur Khuri-Yakub [40]. L'originalité de cette technologie fut basée sur la combinaison du micro-usinage de volume et du collage de deux wafers. En plus d'être une alternative aux procédés de fabrication déjà existants, il permit d'obtenir des dispositifs offrant une meilleure surface active et une meilleure homogénéité. La suite de ce chapitre est dédiée à la présentation de ces deux procédés de fabrication.

2.2 Fabrication de transducteur cMUT par micro-usinage de surface

Comme expliqué précédemment, les procédés de fabrication par micro-usinage de surface furent, pendant une dizaine d'années, la seule technique pour réaliser des transducteurs ultrasonores capacitifs. Durant cette période, plusieurs approches ont été mises au point par différentes équipes. La principale variante entre ces différents procédés de fabrication réside plutôt dans le choix des matériaux et des techniques de dépôt, plutôt que sur les étapes de fabrication en elles-mêmes.

La première étape (figure 2.3-(a)) consiste à structurer l'électrode inférieure sur le substrat en silicium. On retrouve principalement deux types de matériau déposés : soit du polysilicium fortement dopé [16, 69, 58], soit un matériau conducteur de type métallique [64, 108, 15, 98]. Dans tous les cas, une couche d'isolation est déposée entre le substrat et l'électrode inférieure afin d'éviter tout couplage électrique par le substrat. L'oxyde de

2.2. FABRICATION DE TRANSDUCTEUR CMUT PAR MICRO-USINAGE DE SURFACE

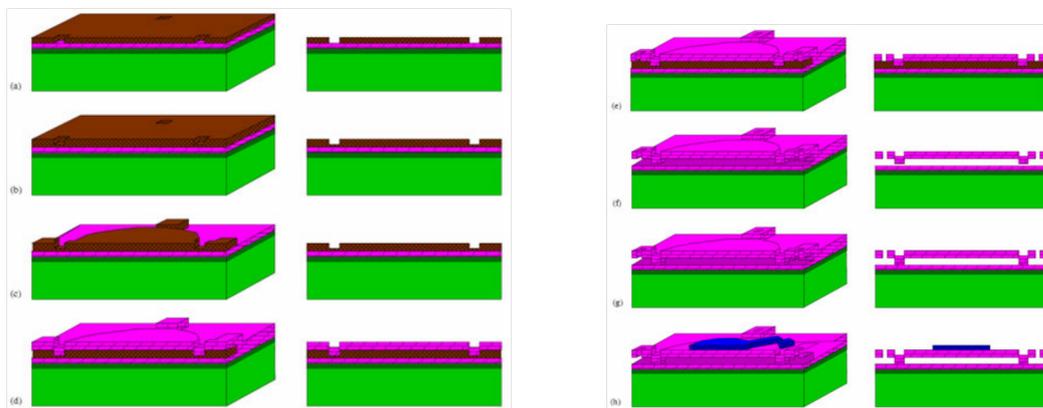


FIGURE 2.3 – Illustration des différentes étapes de fabrication des cMUTs en micro-usinage de surface [39].

silicium (SiO_2) est un exemple d'isolant souvent utilisé. Parmi les différents matériaux métalliques déposés pour former l'électrode inférieure (tungstène [15], chrome [64], ...) l'aluminium est le plus fréquemment utilisé [58, 98]. Parfois, lorsque cela est nécessaire, une fine couche d'isolant (oxyde de silicium [16, 108, 15], nitrure de silicium [64, 69, 58]) est déposée sur l'électrode inférieure pour la protéger lors de la gravure de la couche sacrificielle. L'autre avantage que présente l'emploi de cette couche d'isolant est qu'elle permet d'ajuster le champ électrostatique régnant dans les cavités indépendamment des propriétés mécaniques de la membrane.

La couche sacrificielle est ensuite déposée et gravée (figure 2.3-(b) et (c)) afin de définir la géométrie des futures cavités et de ses canaux d'excavation. Ce matériau est choisi de façon à présenter une forte sélectivité de gravure avec les matériaux de la membrane et de l'électrode inférieure (ou de la couche protection). Différents matériaux peuvent être utilisés : le silicium polycristallin [16, 15], l'oxyde de silicium [69], le chrome [108], le silicium amorphe [58] ou un polyamide [98].

Par la suite, la couche structurale formant la membrane est déposée sur l'ensemble du substrat (figure 2.3-(d)). Le matériau le plus courant est le nitrure de silicium. L'épaisseur du dépôt de la membrane doit être supérieure à celle du dépôt de la couche sacrificielle, afin que la membrane englobe la totalité de la hauteur des futures cavités et d'assurer la conformité des couches déposées.

Des ouvertures y sont ensuite gravées par voie sèche (figure 2.3-(e)), afin d'accéder aux canaux d'excavation de la couche sacrificielle et aux reprises de contact de l'électrode inférieure. Une gravure par solution humide permet d'éliminer de façon isotrope la couche sacrificielle et de libérer les membranes au dessus des cavités (figure 2.3-(f)). La nature de la solution dépend bien évidemment du matériau choisi pour la couche sacrificielle. Lors de cette étape de gravure, les forces de capillarité peuvent dépasser la force de rappel des membranes et coller de façon irrémédiable les membranes au fond des cavités. Plusieurs techniques ont été mises au point pour s'affranchir de ce problème : la lyophilisation [44], le séchage supercritique [73] et la libération sèche [93].

Une fois les membranes libérées, les cavités sont scellées (figure 2.3-(f)) sous vide par

le dépôt d'une couche de scellement (oxyde de silicium [15] ou niture de silicium [64, 108] principalement). Le dépôt est réalisé pleine plaque avant d'être structuré autour des ouvertures réalisées dans le niture pour l'excavation de la couche sacrificielle. L'épaisseur de cette couche de scellement doit être suffisamment importante pour remplir la totalité des ouvertures et assurer l'étanchéité des cavités.

La dernière étape des procédés de fabrication par micro-usinage de surface consiste à réaliser l'électrode supérieure (figure 2.3-(f)). En général, elle est composée d'une couche d'aluminium déposée par pulvérisation puis structurée par gravure humide [16, 15, 58, 98]. Cette couche sert aussi à métalliser les reprises de contact de l'électrode inférieure. D'autres matériaux, tel que le chrome [64] ou l'or [69], ont aussi été testés avec succès dans la littérature.

Dans la plupart des cas, une fine couche de passivation (oxyde de silicium, niture de silicium, Parylène C) est déposée sur l'ensemble de l'empilement afin de protéger les dispositifs du milieu extérieur. L'électrode supérieure métallique est ainsi protégée de tout risque de vieillissement précoce (oxydation, électrolyse, ...).

Parmi les procédés de fabrication de cMUTs par micro-usinage de surface, on distingue l'originalité du procédé de fabrication de l'université de Rome [17, 22]. Selon ce procédé, les cellules cMUT sont réalisées dans le sens opposé à celui décrit plus haut. C'est la raison pour laquelle on l'appelle « procédé inversé ». Les différentes couches constituant le cMUT sont déposées successivement sur un substrat en silicium de l'électrode supérieure à l'électrode inférieure. Une fois l'ensemble des dépôts réalisé, le substrat est complètement gravé (gravure sèche puis humide sur les 5 derniers microns) afin de libérer les membranes. Préalablement au retrait du substrat, une épaisse couche de résine époxy (2 mm) est déposée sur l'ensemble de l'empilement afin d'assurer la tenue mécanique du dispositif. Ce procédé présente deux principaux avantages par rapport aux procédés de fabrication classiques en micro-usinage de surface :

- les propriétés du matériau constituant la membrane sont homogènes, étant donné que le matériau n'est pas issu d'un dépôt,
- les étapes d'excavation et de scellement des cavités étant déportées sur la face arrière des cellules, la surface active de ces dispositifs est nettement supérieure à celle des dispositifs réalisés avec un procédé classique.

Bien que les travaux sur les procédés de fabrication en micro-usinage de surface soient les plus anciens, ils sont toujours d'actualité. D'ailleurs, l'ensemble des dispositifs réalisés et présentés dans le cadre de ce document ont été conçus selon ce type de procédé.

2.3 Fabrication de transducteur cMUT par wafer-bonding

Ce procédé, issu des filières de la micro-électronique, fut utilisé pour la première fois en 2002 pour la conception de sondes cMUT [40]. L'originalité des procédés de fabrication par wafer bonding, réside dans l'utilisation et le collage de deux substrats : un substrat de silicium consacré à la partie immobile du cMUT (électrode inférieure + cavités) et un substrat SOI (Silicon On Insulator) dédié à la partie mobile (membrane + électrode supérieure).

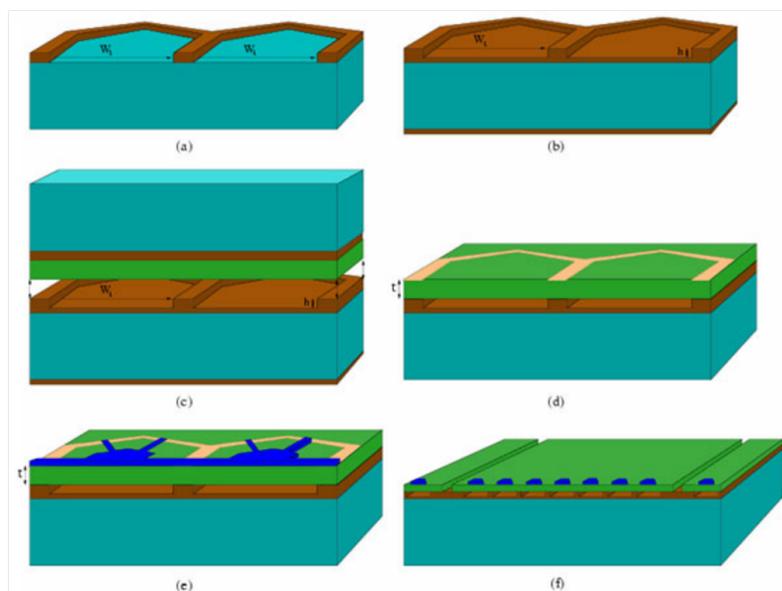


FIGURE 2.4 – Illustration des différentes étapes de fabrication des cMUTs par wafer-bonding [39]

La première étape consiste à former l'électrode inférieure en dopant fortement le substrat en silicium. Une fois l'électrode inférieure réalisée, un dépôt d'oxyde de silicium est effectué sur l'ensemble du substrat (figure 2.4-(a)). L'épaisseur de ce dépôt correspond à la hauteur des futures cavités. La couche d'oxyde est ensuite gravée jusqu'à atteindre la surface du substrat en silicium pour former les cavités (figure 2.4-(a)). Une seconde couche d'oxyde est appliquée afin d'éviter un possible contact entre le substrat dopé et les électrodes supérieures (figure 2.4-(b)). Une fois les cavités réalisées, le substrat SOI est assemblé sur le substrat silicium par une technique de collage par fusion (figure 2.4-(c)). Cette technique requiert une température d'enceinte de 1000°C [56], rendant impossible l'intégration de composants électroniques. Dans la littérature, d'autres techniques, telles que le collage anodique [7] ou le collage par compression thermique [129], sont parfois utilisées pour assembler les deux wafers. Le substrat provenant du wafer SOI et sa couche intermédiaire sont ensuite éliminés (figure 2.4-(d)) par une gravure humide de type BOE (Buffered Oxyde Etch) pour libérer les membranes en silicium monocristallin au-dessus des cavités. La dernière étape consiste à définir les électrodes supérieures (figure 2.4-(e)) et à isoler les éléments (figure 2.4-(f)). En effet, étant donné que le silicium n'est pas un bon isolant, il est nécessaire d'isoler chaque élément en gravant le silicium jusqu'à la couche d'oxyde. L'électrode supérieure est quant à elle réalisée par un dépôt puis une gravure humide. Selon d'autres procédés, on peut tout naturellement doper la membrane en silicium monocristallin.

Au cours de la dernière décennie, de nombreuses évolutions ont été apportées à ce procédé par l'université de Stanford (voir tableau 2.1). Leurs motivations étaient multiples : réduire la capacité parasite produite entre la membrane conductrice et l'électrode inférieure, réduire les tensions de collapse en maîtrisant mieux la hauteur des cavités et réduire les

effets de chargement électrique de l'isolant déposé sur l'électrode inférieure.

Leur première innovation, proposée par Huang *et al.* [55], consiste à remplacer la couche d'isolant (SiO_2) déposée sur l'électrode inférieure par un ou plusieurs plots d'isolation. L'objectif de cette modification est de réduire la surface de contact entre l'électrode supérieure et la couche d'isolation, afin de limiter les effets de charge dans l'isolant. Huang *et al.* constatent par ailleurs, que la bande passante de ces dispositifs se trouve être améliorée lorsque la membrane est plaquée sur les plots.

Par la suite, Park *et al.* ont proposé de réutiliser le procédé de fabrication LOCOS (Local Oxidation of Silicon) pour réaliser des cMUTs par wafer bonding [111]. La principale innovation technologique apportée par ces travaux, réside dans la technique utilisée pour former les cavités. En effet, selon ce procédé, les cavités sont formées en réalisant une oxydation locale du wafer sur les zones correspondant aux plots inter-membranes. La hauteur des cavités est ainsi mieux maîtrisée et les tensions de collapse peuvent être diminuées de façon significative. De plus, en renforçant l'épaisseur de la couche d'isolant sur les zones inter-membrane, ce procédé offre l'avantage de réduire la capacité parasite de la barrette.

En 2010 Kupnik *et al.* publient, toujours pour l'université de Stanford, un nouveau procédé de fabrication de cMUTs par wafer-bonding [67]. L'objectif de ces travaux est de réduire au maximum la capacité parasite de la barrette cMUT en limitant l'implantation de l'électrode inférieure aux zones où la membrane est la plus mobile (zone centrale). Le substrat en silicium servant de plan électrique, une épaisse couche d'isolant (5 ou 10 μm de dioxyde de silicium) est déposée entre l'électrode inférieure et celui-ci pour éviter l'apparition d'une source de capacité parasite supplémentaire. La reprise de contact entre l'électrode inférieure et le substrat est quant à elle réalisée par l'implantation d'un via en poly-silicium dopé dans la couche d'isolant. Ainsi, en comparaison avec le procédé original, la capacité parasite des dispositifs est réduite de 48% pour une couche d'isolant de 5 μm et de 63% pour une couche de 10 μm .

Le dernier procédé de fabrication de l'université de Stanford est issu des travaux réalisés par Nikoozadeh *et al.* [95]. Pour augmenter le niveau de pression en sortie de leurs dispositifs, ces derniers ont cherché à augmenter le volume balayé par les membranes en les forçant à travailler collectivement comme un piston idéal. Pour cela, plutôt que d'isoler mécaniquement les membranes de cMUT à cMUT, les zones de séparation inter-cMUTs sont réduites à de simples « supports » souples capables de travailler en flexion. Ainsi, lorsque le transducteur émet des ultrasons, la face avant bouge de manière homogène et ce sont les plots d'ancrage au substrat qui assurent les forces de rappel élastiques. Ce procédé apporte un réel gain sur le volume balayé par les membranes.

D'autres équipes ont aussi fait le choix de développer un procédé de fabrication par wafer-bonding [76, 88, 101]. La structure des cellules développées se rapproche de celle des cellules issues du procédé original de Stanford. Parmi les travaux les plus convaincants, nous citerons ceux de Logan *et al.* [76] et de Midtbo *et al.* [88]. Ils ont utilisé pour former la membrane un substrat proche d'un substrat SOI, sauf que le silicium a été remplacé par du nitrure de silicium. L'avantage avancé est le coût mais aussi, pour eux, la possibilité d'un plus grand choix dans les épaisseurs de membrane finie. Très récemment en 2013, Cetin *et al.* proposent un procédé de fabrication utilisant une membrane en diamant [28]. Les avantages de cette technologie sont clairement liés aux propriétés intrinsèques du diamant en terme

2.3. FABRICATION DE TRANSDUCTEUR CMUT PAR WAFER-BONDING

de : résistance mécanique, durée de vie, faible dilatation thermique, biocompatibilité,...

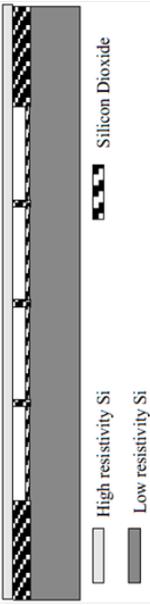
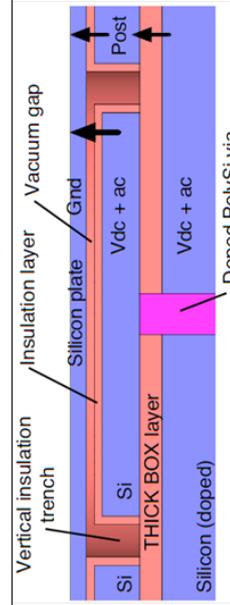
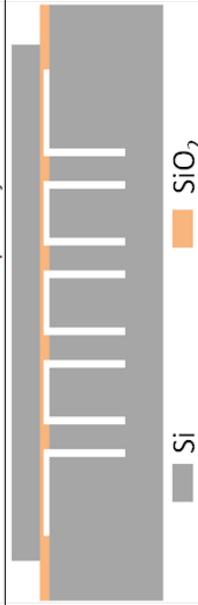
Comme l'exprime la plupart des travaux cités dans cette section, les procédés de fabrication par wafer-bonding présentent un certain nombre d'avantages par rapport au micro-usinage de surface :

- le nombre de masques de photolithographie est réduit (quatre masques contre six pour le micro-usinage de surface),
- l'uniformité des propriétés de la membrane est garantie,
- le taux de surface active est meilleure (absence des puits d'excavation),
- aucun risque de stiction de la membrane (suppression de l'étape d'excavation).

Cependant, malgré ces atouts, la filière wafer-bonding possède encore un certain nombre d'inconvénients qui l'empêche de s'imposer comme étant la méthode de référence pour la fabrication de barrette cMUT. Les principaux inconvénients restant à améliorer sont :

- le coût des wafers SOI, dix fois plus élevé qu'un dépôt de nitrure de silicium,
- la capacité parasite qui peut être élevée,
- les difficultés à intégrer de façon monolithique des composants électroniques sur le cMUT (hautes températures nécessaires au collage du wafer SOI),
- les effets de charges électriques de la couche d'isolant.

TABLE 2.1 – Tableau récapitulatif des différents procédés de fabrication de cMUTs par wafer-bonding développés par l’université de Stanford.

Nom du procédé	Schéma de la cellule cMUT	Innovation apportée par ce procédé de fabrication
Procédé original [40]		
cMUT à plot d’isolation [55]		<ul style="list-style-type: none"> • diminution des effets de charge dans la couche d’isolant, • augmentation de la bande passante lorsque la membrane touche les plots d’isolation.
cMUT basé sur la technologie LOCOS [111]		<ul style="list-style-type: none"> • meilleure maîtrise de la hauteur des cavités, • capacité parasite réduite grâce à la couche d’isolation plus épaisse dans les espaces inter-membranes.
cMUT sur couche d’oxyde épaisse [67]		<ul style="list-style-type: none"> • capacité parasite réduite : <ul style="list-style-type: none"> – électrode inférieure limitée à la zone centrale des membranes, – dépôt d’une épaisse couche d’isolant sur substrat évitant ainsi une source de capacité parasite supplémentaire.
cMUT à support flexible [95]		<ul style="list-style-type: none"> • augmentation du niveau de pression en sortie des éléments : <ul style="list-style-type: none"> – augmentation du volume balayé par les membranes, – suppression des zones inactives inter-membranes.