

## REALISATION ET CARACTERISATION DE TRANSDUCTEURS HAUTE FREQUENCE

Dans ce dernier chapitre, les caractéristiques des matériaux et structures piézo-électriques (*Tableau IV.7*) sont utilisées pour la fabrication de transducteurs haute fréquence (de 20 à 30 MHz). Pour cela, une méthode de caractérisation de lames d'adaptation d'impédance acoustique est développée. Cette méthode permet d'obtenir les paramètres acoustiques en situation réelle de fonctionnement d'une couche de polymère de quelques dizaines de micromètres d'épaisseur. Puis, l'assemblage et le choix des différents éléments constituant les transducteurs sont précisés (milieu arrière, lame adaptatrice et lentille). Les transducteurs fabriqués sont ensuite caractérisés (diagramme de rayonnement et réponse électro-acoustique au point focal). Ces résultats expérimentaux sont comparés entre eux et avec ceux de la modélisation développée dans le *Chapitre III* pour l'un des cas. Enfin, ces transducteurs sont intégrés dans un échographe développé au laboratoire pour comparer qualitativement leurs performances en situation réelle d'imagerie.

### **I Caractérisation du parylène en haute fréquence**

L'utilisation d'une (ou plusieurs) lame(s) adaptatrice(s) permet d'améliorer la réponse électro-acoustique du transducteur en terme d'amplitude et de durée. Dans notre cas (autour de 30 MHz), la lame adaptatrice quart d'onde fait seulement une dizaine de micromètres d'épaisseur, ce qui rend les propriétés acoustiques difficiles à mesurer avec précision. Le parylène est un bon candidat pour la fabrication de lames adaptatrices en terme de propriétés acoustiques, vieillissement et précision sur l'épaisseur du dépôt. Des méthodes acoustiques ou électriques permettent de déterminer les propriétés du parylène [1-3]. Dans le paragraphe qui suit, la méthode de caractérisation du parylène est basée sur la mesure de l'impédance électrique d'une structure multicouche constituée d'un substrat en résine époxy, d'une couche piézo-électrique avec des électrodes et du film parylène en face avant. Une caractérisation préalable de chaque constituant permet d'identifier précisément les propriétés de chacune des couches (disque piézo-électrique et substrat). Les propriétés de la couche de parylène déposée peuvent alors être déduites au moyen d'un ajustement effectué avec le modèle KLM (*Annexe 3*). Cette méthode de caractérisation est analogue à celle utilisée pour les matériaux piézo-électriques.

## 1.1 Fabrication des échantillons

La structure multicouche complète est constituée d'un substrat en résine époxy connu sur lequel un film épais en PZT a été collé. Après avoir caractérisé l'ensemble et optimisé l'épaisseur d'une lame parylène, le dépôt est réalisé. Le film épais résonne à une fréquence proche de 30 MHz, ce qui permet de caractériser les propriétés du parylène en condition réelle de fonctionnement en haute fréquence.

### 1.1.1 Film épais

Le film épais a été fabriqué en PZT (Pz29, *Ferroperm Piezoceramics*) par coulage en bande avec une épaisseur de 65 à 70  $\mu\text{m}$  et des électrodes en platine de 2  $\mu\text{m}$  déposées par sérigraphie. La polarisation du film a été effectuée dans un bain d'huile pendant 2 minutes à 130°C avec un champ électrique de 2 kV/mm.

### 1.1.2 Substrat

Le substrat en résine époxy, dont les propriétés acoustiques sont connues, est fabriqué avec un diamètre de 12 mm et une longueur de 20 mm. Les propriétés acoustiques du substrat ont été déterminées au préalable. Ainsi, la vitesse longitudinale a été déterminée à partir de la mesure du temps de vol dans le milieu de propagation de référence (l'eau) et dans le milieu à caractériser (le substrat en résine époxy). La mesure d'atténuation effectuée de 3 à 23 MHz montre qu'elle évolue quasi linéairement. Le même comportement est extrapolé jusqu'à 35 MHz. Ces propriétés acoustiques sont données dans le *Tableau V.1* suivant :

Substrat	$c_l$ (m/s)	$r$ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	$Z_{ar}$ (MRa)	$a$ (dB/mm/MHz)
Résine époxy	2650	1170	3,10	0,56

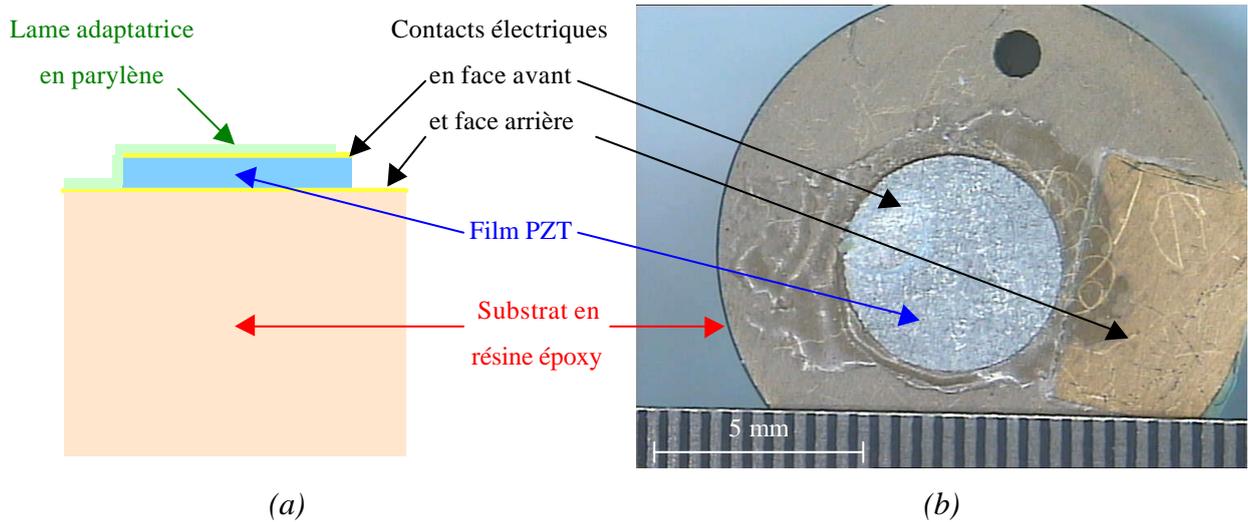
$c_l$  : vitesse longitudinale ;  $r$  : masse volumique ;  $Z_{ar}$  : impédance acoustique ;  $a$  : atténuation.

*Tableau V.1 : Caractéristiques acoustiques du substrat en résine époxy.*

Une fine couche d'or d'environ 200 nm a été déposée par vaporisation sur la face supérieure du substrat. Le film PZT a ensuite été collé et pressé en utilisant la même résine époxy que pour la fabrication du substrat.

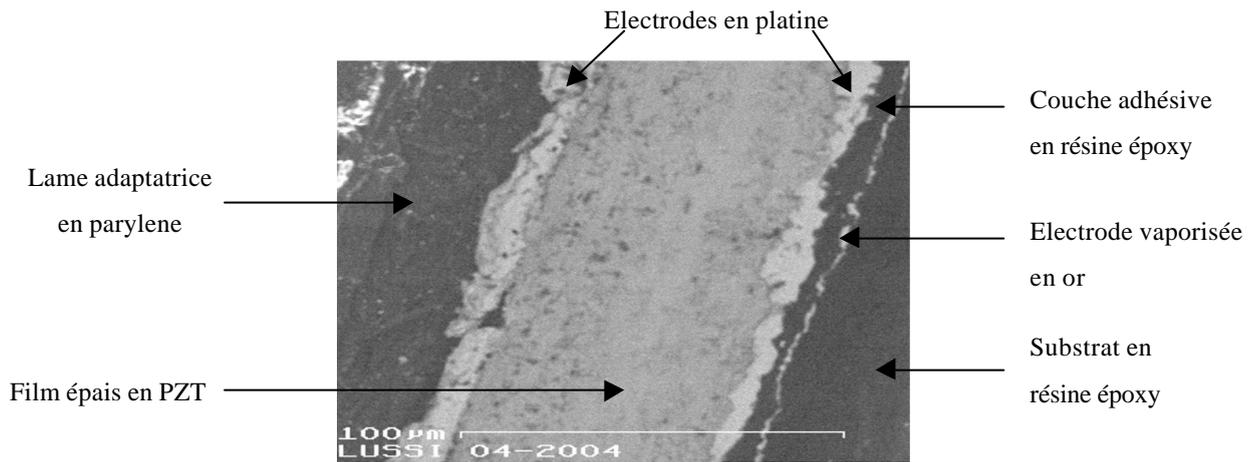
### I.1.3 Dépôt de parylène

Après nettoyage de la face supérieure du disque piézo-électrique, le film de parylène C a été déposé sur toute la surface supérieure de la structure (*Figure V.1 (b)*). Deux portions de la surface active sont protégées lors du dépôt afin de récupérer les contacts électriques en face avant du disque de PZT et du substrat (*Figure V.1*).



*Figure V.1 : Structure multicouche avec une lame adaptatrice en parylène (a) schématisé en coupe et (b) photographié en vue de face.*

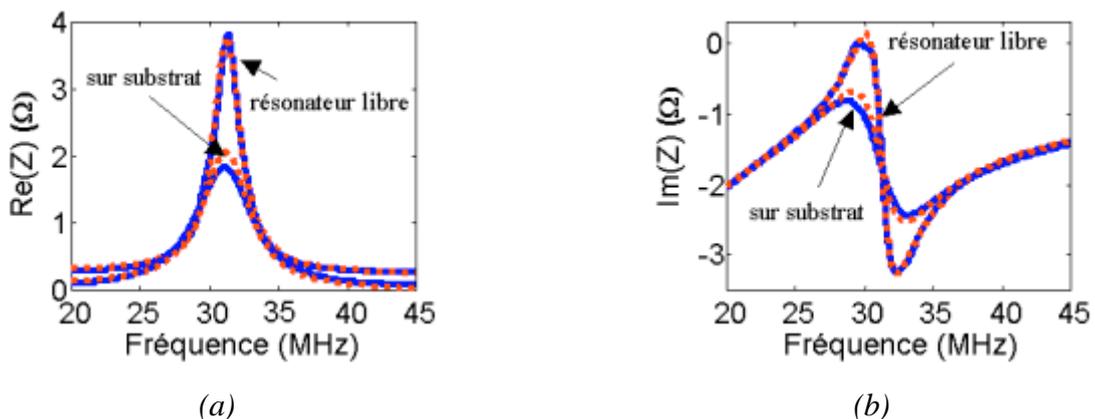
Afin de déterminer les épaisseurs effectives, une coupe a été réalisée sur l'un des échantillons et des mesures précises ont alors pu être effectuées au microscope électronique à balayage (*Figure V.2*). On peut y distinguer nettement les trois principaux éléments : le substrat, le film en PZT et la lame en parylène. Par ailleurs, on observe aussi les électrodes avant et arrière en platine, la couche adhésive en résine époxy, et l'électrode déposée sur le substrat. Ainsi, l'épaisseur très irrégulière de la couche adhésive a été mesurée en moyenne à  $7 \mu\text{m}$ , avec localement des épaisseurs nulles permettant la réalisation du contact électrique entre l'électrode en platine de la face arrière du film PZT et celle en face avant du substrat en or.



*Figure V.2 : Vue en coupe au microscope électronique à balayage de l'un des échantillons fabriqués.*

## 1.2 Caractérisation fonctionnelle

En premier lieu, les propriétés électro-mécaniques des disques de PZT ont été évaluées en condition de résonateur libre. Les dimensions de l'échantillon piézo-électrique (épaisseur faible devant les dimensions latérales) permettent le découplage du mode épaisseur de tout autre mode de résonance. L'utilisation d'un modèle unidimensionnel tel que le schéma électrique équivalent KLM (*Annexe 3*) est valide. La mesure d'impédance effectuée (expérimentale) et l'ajustement résultant (théorique) sont représentées sur la *Figure V.3* pour un disque en résonateur libre, puis sur substrat :



*Figure V.3 : Parties (a) réelle et (b) imaginaire des courbes d'impédance expérimentale (trait pointillés rouges) et théorique (trait plein bleu) d'un disque en PZT en résonateur libre, puis sur substrat en résine époxy.*

Les caractéristiques du substrat en résine époxy et du film piézo-électrique en PZT ayant été ajustées de façon satisfaisante, les résultats d'ajustement sont regroupés pour cinq échantillons dans le *Tableau V.2*.

Echantillon	$e_p$ ( $\mu\text{m}$ )	$r$ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	$c_l$ (m/s)	$f_a$ (MHz)	$k_t$ (%)	$\epsilon_{33,r}^S$	$d_m$ (%)	$d_e$ (%)
1	67	6810	4960	37,0	40,7	1075	8,4	3,8
2	68	6810	5005	36,8	45,2	1245	9,7	3,7
3	70	6810	5270	37,6	42,8	1240	16,4	3,7
4	66	6810	5015	38,0	44,6	1250	8,9	5,2
5	65	6810	5025	38,7	43,2	1055	10,2	2,2

$e_p$  : épaisseur du film piézo-électrique ;  $r$  : masse volumique ;  $c_l$  : vitesse longitudinale ;  $f_a$  : fréquence d'anti-résonance ;  $k_t$  : coefficient de couplage du mode épaisseur ;  $\epsilon_{33,r}^S$  : permittivité diélectrique relative à déformation constante ;  $d_m$  : pertes mécaniques ;  $d_e$  : pertes diélectriques.

*Tableau V.2 : Caractéristiques électro-mécaniques des films piézo-électriques en PZT.*

### 1.3 Résultats

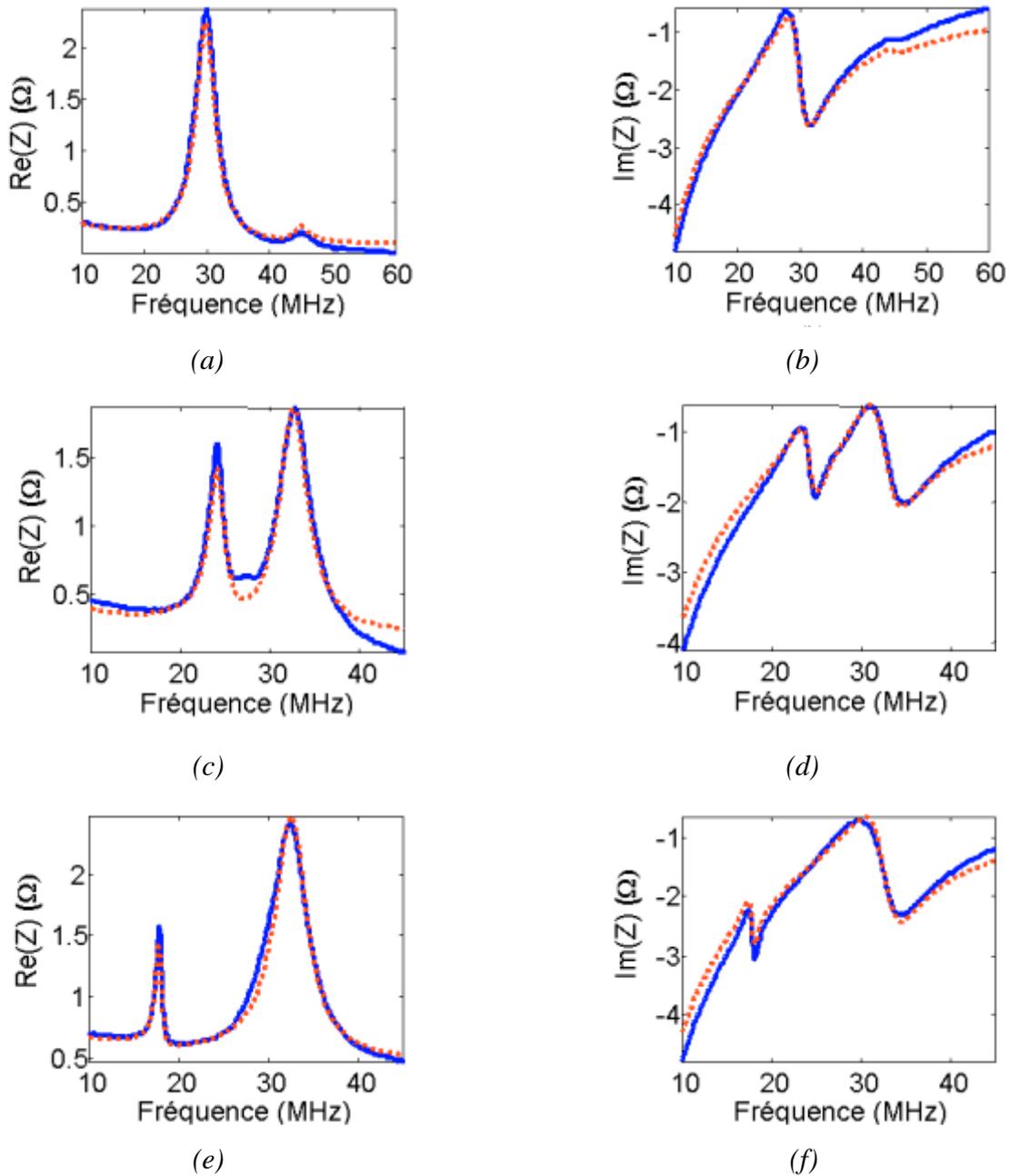
Les vitesses longitudinales de couches de parylène sont évaluées sur cinq échantillons multicouches intégrant les cinq disques de PZT caractérisés (*Tableau V.2*), avec différentes épaisseurs déposées de 10, 20 et 30  $\mu\text{m}$ . Une fois effectuées les mesures d'impédance, les couches de parylène déposées sont volontairement décollées et leur épaisseur est mesurée plus précisément avec un micromètre. Les mesures et marges d'erreur sur les épaisseurs déposées sont résumées dans le *Tableau V.3* :

Echantillon	$e_{av1,min}$ ( $\mu\text{m}$ )	$e_{av1,max}$ ( $\mu\text{m}$ )	$c_{l,min}$ (m/s)	$c_{l,max}$ (m/s)
1	12	13	2110	2280
2	20	22	2046	2252
3	21	23	1945	2129
4	29	31	1974	2216
5	29	31	2080	2222

$e_{av1,min}$ ,  $e_{av1,max}$  : épaisseurs minimale et maximale mesurées ;  
 $c_{l,min}$ ,  $c_{l,max}$  : vitesses longitudinales minimale et maximale déduites.

*Tableau V.3 : Caractéristiques mesurées et déduites du dépôt en parylène.*

Les vitesses longitudinales  $c_l$  déduites à partir des épaisseurs de parylène  $e_{av1}$  déposées puis mesurées (Tableau V.3) sont illustrées par la Figure V.4 suivante :



*Figure V.4 : Parties (a), (c), (e) réelle et (b), (d), (f) imaginaire de l'impédance expérimentale (trait pointillés rouges) et théorique (trait plein bleu) d'un multicouche constitué d'un substrat, d'un disque en PZT (Pz29), avec en face avant un dépôt de parylène d'épaisseur minimale (a), (b) 12 μm ; (c), (d) 20 μm ; (e), (f) 29 μm.*

En résumé, les caractéristiques moyennes du dépôt de parylène sont données par une vitesse longitudinale  $c_l = 2135 \pm 85$  m/s, une masse volumique  $\rho = 1289$  kg/m<sup>3</sup>, soit une impédance acoustique  $Z = 2,75 \pm 0,1$  MRa. L'atténuation a été évaluée avec une incertitude relativement importante :  $\alpha_l = 0,56 \pm 0,25$  dB/mm/MHz [4]. Les valeurs obtenues pour la vitesse longitudinale  $c_l$  sont cohérentes avec celles de la littérature [1, 2] et celles délivrées par les fabricants (*Comelec* [5], et *Onda Corporation* [6]).

Les propriétés acoustiques du parylène sont compatibles avec les exigences des applications en imagerie médicale. L'épaisseur du dépôt pouvant être contrôlée avec une précision de l'ordre du micromètre (*Tableau V.3*), ce matériau est particulièrement bien adapté aux dispositifs haute fréquence.

## II Conception et fabrication des transducteurs HF

Avec les matériaux piézo-électriques caractérisés dans le *Chapitre IV (Tableau IV.7)*, des transducteurs haute fréquence sont fabriqués et caractérisés. Six transducteurs sont réalisés : l'un à partir d'un film de polymère piézo-électrique PVDF ; un autre avec le film en PMN-PT obtenu par coulage en bande ; deux sont fabriqués en PZT/PGO déposé par sérigraphie ; enfin, deux sont élaborés avec des disques en titanate de plomb PT. Le choix et les caractéristiques des éléments à ajouter pour la fabrication des transducteurs sont tout d'abord donnés (milieu arrière, lame adaptatrice si besoin, lentille). L'assemblage de ces éléments est ensuite brièvement décrit.

### II.1 Milieu arrière (*backing*) utilisé

Le milieu arrière a été choisi en adéquation avec les caractéristiques acoustiques du matériau piézo-électrique (*Tableau IV.7, Chapitre IV*), mais aussi en fonction des contraintes de la fabrication et des matériaux disponibles.

Ainsi, pour le transducteur à base de PVDF d'impédance acoustique  $Z_p = 3,9$  MRa un milieu arrière "léger" a été choisi en vue d'optimiser la résolution axiale. Il a été réalisé à partir d'une résine époxy pure d'impédance acoustique  $Z = 3,1$  MRa. Les contacts électriques ont été repris directement sur le film PVDF métallisé.

Les céramiques de PMN-PT et de PT possèdent une impédance acoustique relativement élevée avec respectivement pour valeurs  $Z = 34,7$  et  $37,5$  MRa. Afin de conserver une bonne résolution axiale, un milieu arrière est choisi avec une impédance acoustique plus élevée que celle utilisée pour le film PVDF. De plus, pour répondre aux contraintes de fabrication, un milieu arrière conducteur est recherché. Il est réalisé à partir d'une résine époxy chargée de poudre d'argent, permettant dans le même temps d'obtenir une conduction électrique et d'augmenter son impédance acoustique, pour atteindre  $Z = 6,5$  MRa.

Enfin, la structure à base de PZT/PGO possède déjà un milieu arrière (qui a servi de substrat) en PZT poreux, avec une impédance acoustique  $Z = 18$  MRa.

## II.2 Lentille

Une lentille acoustique a été ajoutée en face avant afin d'obtenir des performances accrues pour l'imagerie. Les propriétés de la résine de polyuréthane (UR 3430 de Axson) utilisée ont été déterminées par mesure du temps de vol à deux fréquences différentes.

Cette méthode de caractérisation consiste à évaluer le temps de vol sur des échantillons d'épaisseurs de quelques millimètres, à une fréquence donnée, si possible proche des conditions expérimentales. Ainsi, avec une fréquence centrale de transducteur  $f = 3,5$  MHz, la vitesse longitudinale  $c_l$  a été évaluée à  $c_l = 2455 \pm 30$  m/s en 6 points de mesure sur des échantillons de 2 à 3 mm d'épaisseur. Cette même méthode utilisée sur les mêmes échantillons, avec maintenant une fréquence centrale de transducteur  $f = 15$  MHz donne une vitesse longitudinale  $c_l = 2535 \pm 90$  m/s en 5 points de mesure. On constate que la vitesse longitudinale suit une évolution croissante avec la fréquence. Par extrapolation linéaire de ces résultats à des fréquences  $f = 20$  à  $25$  MHz, on peut très vraisemblablement supposer que la vitesse longitudinale s'approche de  $c_l = 2550$  m/s. Par ailleurs, une masse volumique moyenne mesurée  $\rho = 1040$  kg/m<sup>3</sup> permet de déduire l'impédance acoustique de la lentille  $Z = 2,65$  MRa.

## II.3 Assemblage et fabrication

La focalisation est effectuée par mise en forme (transducteur à base de PVDF) ou moulage d'une lentille en polyuréthane (transducteurs à base de PT, PMN-PT et PZT/PGO). Les schémas d'assemblage sont ceux décrits sur la *Figure 1.11* du *Chapitre I*. Les caractéristiques acoustiques relatives au milieu arrière, à l'élément piézo-électrique et le cas échéant à la lame adaptatrice sont synthétisées dans le *Tableau V.4* pour chacun des transducteurs fabriqués :

Propriété acoustique	Milieu arrière			Élément piézo-électrique			Lame adaptatrice		
	$\mathbf{r}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_l$ (m/s)	$Z$ (MRa)	$\mathbf{r}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_l$ (m/s)	$Z$ (MRa)	$\mathbf{r}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_l$ (m/s)	$Z$ (MRa)
PMN-PT	2550	2550	6,5	8920	3890	34,7	1290	2135	2,75
PZT/PGO n°1	6660	2730	18,2	5420	2880	15,6	1290	2135	2,75
PZT/PGO n°2	6660	2730	18,2	5420	2880	15,6	–	–	–
PVDF	1170	2650	3,1	1600	2440	3,9	–	–	–
PT n°1	2550	2550	6,5	7720	4860	37,5	1290	2135	2,75
PT n°2	2550	2550	6,5	7720	4860	37,5	–	–	–

$\mathbf{r}$  : masse volumique (kg/m<sup>3</sup>) ;  $c_l$  : vitesse longitudinale (m/s) ;  $Z$  : impédance acoustique (MRa).

*Tableau V.4 : Caractéristiques acoustiques des éléments constituant les transducteurs.*

De plus, pour les transducteurs à base de PZT/PGO, il faut rappeler qu'une couche de protection en PZT poreux et une électrode arrière en or relativement épaisse (paragraphe II.1.4, *Chapitre IV*) ont été sérigraphiées entre l'élément piézo-électrique et le milieu arrière. Enfin, on note que les couches de parylène déposées ont des épaisseurs comprises entre 21 et 29  $\mu\text{m}$ .

La *Figure V.5 (a)* représente une étape intermédiaire de la fabrication du transducteur intégrant la structure PZT/PGO avec la reprise de contacts électriques. Ensuite, une lame adaptatrice en parylène est éventuellement déposée, puis le transducteur est focalisé avec une lentille en polyuréthane. Le choix du rayon de courbure  $R_c$  a été fait sur la base de la vitesse moyenne évaluée par temps de vol sur des échantillons (paragraphe II.2). La lentille en polyuréthane (en noir) est réalisée par moulage et le transducteur est finalisé par mise en place de la housse de protection (*Figure V.5 (b)*).



(a)



(b)

*Figure V.5 : Transducteurs assemblés (a) PZT/PGO avant et (b) PZT/PGO après l'ajout de la lame adaptatrice et de la lentille.*

Les transducteurs à base de PT et PMN-PT ont le même aspect extérieur que celui illustré en PZT/PGO. Seul le transducteur à base d'un film PVDF possède une focalisation géométrique et une face avant métallisée.

### III Caractérisation des transducteurs

Dans cette partie, on s'attache à caractériser les performances des transducteurs en émission-réception avec un générateur fabriqué au laboratoire. Ainsi, les échos obtenus en émission-réception sont mesurés pour tous les transducteurs réalisés à base de PMN-PT (par coulage en bande, LC-EPFL), PZT/PGO (par sérigraphie, IJS), PVDF (film polymère, Solvay) et PT (par frittage, Pz34 de *Ferroperm Piezoceramics*). Les performances obtenues en terme de sensibilité et de résolution sont comparées, dans les mêmes conditions expérimentales, entre ces différents transducteurs avec les paramètres définis dans le *Chapitre III*.

#### III.1 Caractéristiques en émission-réception

##### III.1.1 Dans l'axe

La tension reçue en émission-réception est mesurée après réflexion sur une cible plane perpendiculaire à l'axe de propagation afin d'évaluer la sensibilité au point focal (le coefficient de réflexion eau-cible est très proche de 1) ainsi que la profondeur de champ pour des seuils typiques à  $-3$  et  $-6$  dB. Ces résultats de la caractérisation du champ dans l'axe du transducteur en émission-réception par réflexion sur une cible plane (*Figure V.6 (a)*) sont comparés à ceux en réflexion sur une bille (*Figure V.6 (b)*). La bille est considérée comme étant quasi-ponctuelle [7] (*Figure V.6 (b)*) dans la mesure où son diamètre  $D = 400 \mu\text{m}$  n'excède pas 5 à  $10I$  (avec ici  $I \geq 50 \mu\text{m}$ ). Le résultat en émission-réception diffère légèrement de celui obtenu sur une cible plane (*Figure V.6 (a)*), pour laquelle la tension reçue résulte de l'intégration des contributions sur la cible plane. On retiendra ici principalement le résultat sur la bille, ce qui se rapproche des conditions de l'imagerie : la caractérisation de structures de petite taille. Les résultats de caractérisation des transducteurs en émission réception sont synthétisés dans le *Tableau V.5*. Comme l'illustre la *Figure V.6*, la sensibilité est la plus élevée pour les transducteurs à base de PZT/PGO, ceci malgré un degré de focalisation plus faible (inverse du  $f_{\text{number}}$ ) que ceux des autres transducteurs.

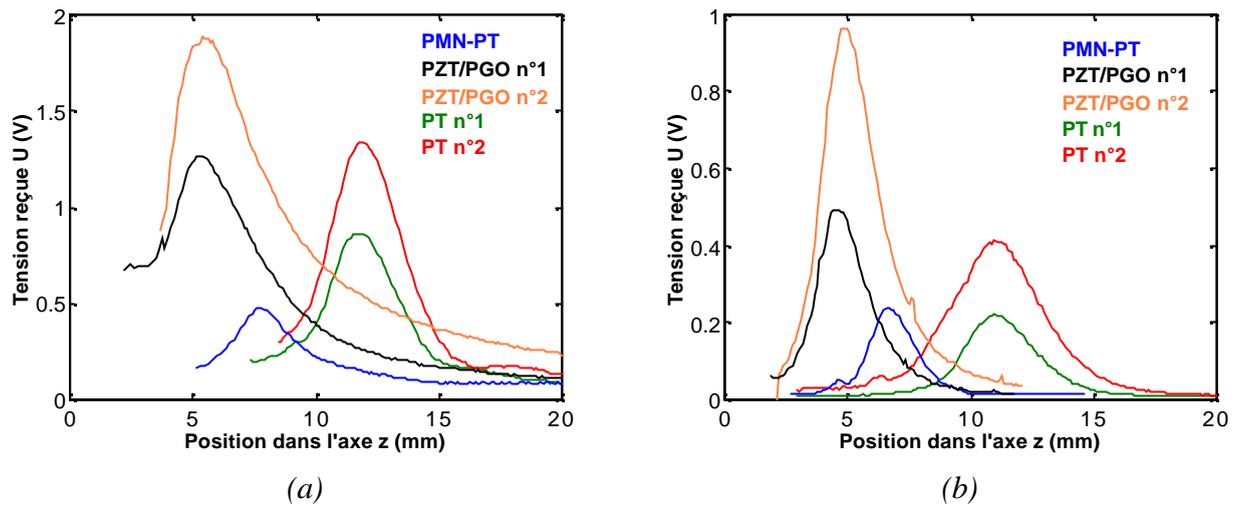


Figure V.6 : Champ dans l'axe en émission-réception (a) sur une cible plane et (b) sur une bille de 400  $\mu\text{m}$  de diamètre.

Transducteur	$U_n$ (dB)	$z_0$ (mm)	$f_{number}$	$DOF_3$ (mm)	$DOF_6$ (mm)
PVDF	-43	6	2	—	—
PMN-PT	-12	6,7	2,3	1,49	2,16
PZT/PGO n°1	-6	4,6	2,9	1,61	2,38
PZT/PGO n°2	0	4,9	3,1	1,77	2,66
PT n°1	-13	11	2,5	2,26	3,32
PT n°2	-7	11	2,5	2,72	4,31

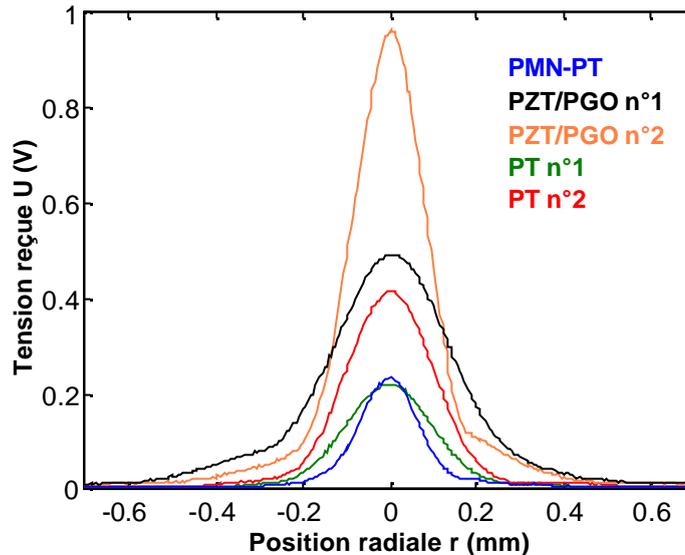
$U_n$  : tension au point focal normalisée par rapport à la meilleure ;  $z_0$  : distance focale effective ;  $f_{number}$  : rapport entre la distance focale  $F$  et le diamètre de la source  $2a$  ;  $DOF_3$  : profondeur de champ à  $-3$  dB ;  $DOF_6$  : profondeur de champ à  $-6$  dB.

Tableau V.5 : Caractéristiques du champ dans l'axe en émission-réception sur une bille de 400  $\mu\text{m}$  de diamètre.

Ces mesures donnent un premier aperçu des caractéristiques de rayonnement des transducteurs. Cependant, d'autres caractéristiques doivent être prises en compte telles que les caractéristiques de rayonnement latéral et les caractéristiques de la réponse électro-acoustique.

### III.1.2 Dans le plan focal

Le champ est mesuré en émission-réception dans le plan focal (*Figure V.7*), la cible étant la bille de 400  $\mu\text{m}$  de diamètre, afin d'évaluer les largeurs de la tache focale pour des seuils typiques à  $-6$ ,  $-12$ ,  $-15$  et  $-30$  dB (*Tableau V.6*). La résolution latérale dans le plan focal  $D_{r_6}$  est la meilleure pour le transducteur à base de PMN-PT, suivi du transducteur PZT/PGO n°2. Les estimateurs de contraste latéral à  $-12$ ,  $-15$  et  $-30$  dB vont dans le même sens.



*Figure V.7 : Champ dans le plan focal en émission-réception sur une bille de 400  $\mu\text{m}$  de diamètre.*

Transducteur	$D_{r_6}$ ( $\mu\text{m}$ )	$D_{r_{12}}$ ( $\mu\text{m}$ )	$D_{r_{15}}$ ( $\mu\text{m}$ )	$D_{r_{30}}$ ( $\mu\text{m}$ )
PMN-PT	157	225	256	822
PZT/PGO n°1	319	465	536	1077
PZT/PGO n°2	195	271	305	772
PT n°1	230	331	373	836
PT n°2	238	328	369	661

$D_{r_6}$ ,  $D_{r_{12}}$ ,  $D_{r_{15}}$ ,  $D_{r_{30}}$  : largeur radiale de la tache focale à  $-6$ ,  $-12$ ,  $-15$  et  $-30$  dB.

*Tableau V.6 : Caractéristiques du champ dans le plan focal en émission-réception sur une bille de 400  $\mu\text{m}$  de diamètre.*

Ces résultats sont en parfait accord avec les valeurs de  $f_{number}$  données dans le *Tableau V.5*. De plus, on peut remarquer que la sensibilité obtenue pour les différents transducteurs est directement liée

au coefficient de couplage en épaisseur  $k_t$  du matériau piézo-électrique (Tableau IV.7). En effet, les transducteurs intégrant un film sérigraphié en PZT/PGO présentant la meilleure sensibilité et le plus fort  $k_t$ . A partir de ces premières caractéristiques, on remarque que la présence de la lame adaptatrice en parylène sur les transducteurs PT n°1 et PZT/PGO n°1 dégrade les performances en terme de sensibilité relativement à ceux qui n'en ont pas (PT n°2 et PZT/PGO n°2). Cet effet, contraire à celui recherché, peut s'expliquer par le fait que l'impédance acoustique du milieu de propagation vu à travers la lentille est du même ordre de grandeur que celle du parylène. Pour que la lame joue son rôle, il faudrait que son impédance acoustique soit bien plus élevée.

### III.1.3 Vitesse longitudinale effective dans la lentille

#### III.1.3.1 Déduction à partir de la distance focale

Dans un premier temps, à l'aide de la mesure de la distance focale effective  $z_0$ , on remonte à la distance focale dite optique  $F$  (paragraphe II.2.3, Chapitre III), et enfin à la vitesse longitudinale  $c_l$  dans la lentille (Tableau V.7). Les valeurs obtenues pour chacun des transducteurs sont comparées à celles obtenues à partir du temps de vol (paragraphe II.2).

Transducteur	PMN-PT	PZT/PGO n°1	PZT/PGO n°2	PT n°1	PT n°2
$z_0$ (mm)	6,7	4,6	4,9	11	11
$f_0$ (MHz)	25,2	24,4	23,5	19,4	18,9
$a$ (mm)	1,5	0,9	0,9	2,26	2,26
$L_{cp}$ (mm)	39,1	13,4	13,4	67,9	67,9
$z_0 / L_{cp}$	0,17	0,34	0,36	0,16	0,16
$F$ (mm)	6,9	5,2	5,6	11,3	11,3
$R_c$ (mm)	3,5	2,38	2,38	5,56	5,56
$c_l$ (m/s) avec $F_{approchée}$	3020	2740	2570	2930	2930
$c_l$ (m/s) avec $F_{intégrée}$	2910	2670	2520	2840	2840
$c_l$ (m/s) avec $F_{rayon}$	2980	2720	2550	2900	2900

$z_0$  : distance focale effective ;  $f_0$  : fréquence centrale ;  $a$  : rayon de la source (électrode supérieure) ;  $L_{cp}$  : distance de limite de champ proche ;  $z_0 / L_{cp}$  : rapport entre distance focale effective et distance de champ proche ;  $F$  : distance focale ;  $R_c$  : rayon de courbure ;  $c_l$  : vitesse longitudinale.

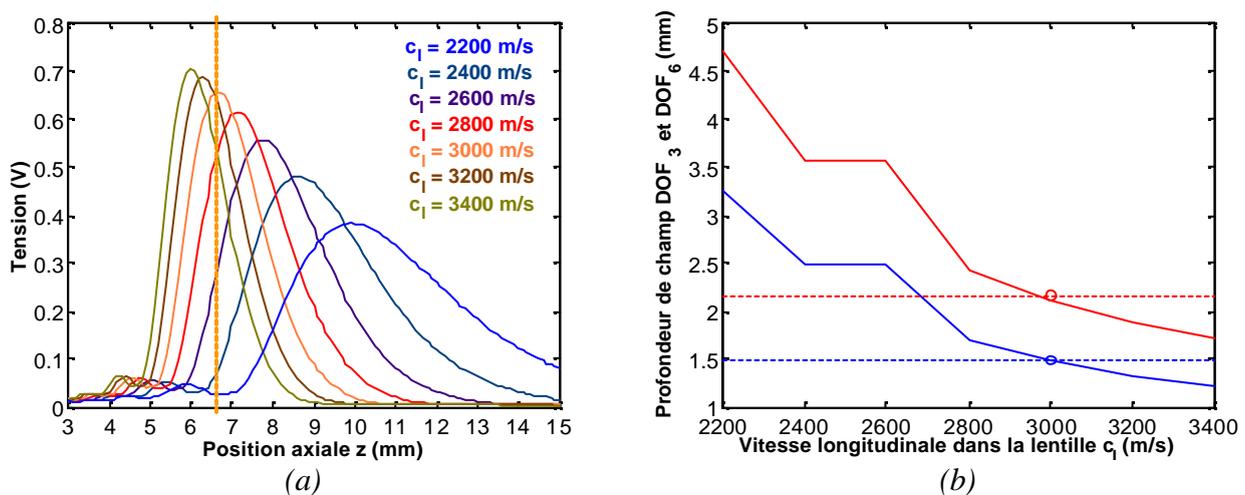
**Tableau V.7 :** Correspondance entre distance focale effective  $z_0$  et vitesse longitudinale dans la lentille selon les formulations développées dans le Tableau A5.1 de l'Annexe 5.

Les résultats obtenus à partir de la distance focale effective  $z_0$  montrent une grande dispersion en fonction des transducteurs et de la formulation employée (*Annexe 5*). Plusieurs explications à cela sont envisageables : le mélange et le dégazage de la résine pour la lentille ont été réalisés de façon indépendante pour chacun des types de transducteur (PT, PMN-PT et PZT/PGO), d'où une possible variation des propriétés d'un d'échantillon à l'autre ; la résine peut avoir subi un léger retrait lors du séchage et modifier la courbure de la lentille, ce qui expliquerait l'écart entre la distance focale attendue et celle observée.

Par contre, dans tous les cas, la vitesse longitudinale dans la lentille  $c_l$  est supérieure à celle mesurée par temps de vol. En effet, la vitesse longitudinale moyenne déduite (*Tableau V.7*) est évaluée autour de  $c_l = 2800$  m/s (*Tableau A5.1, Annexe 5*). Cette valeur permet d'en déduire l'impédance acoustique de la lentille proche de  $Z = 2,9$  MRa. Dans ce cadre, la lame de parylène ( $Z = 2,75$  MRa) ne joue pas un rôle d'adaptation, et peut avoir un effet néfaste sur la sensibilité dû à son atténuation (diminution de 6 dB) comme on l'observe sur les résultats expérimentaux.

### III.1.3.2 Modélisation

Dans un second temps, la tension en émission-réception est simulée à l'aide du modèle KLM étendu à l'axisymétrie. Le paramètre de vitesse longitudinale de la lentille varie sur une plage de  $c_l = 2200$  à  $3400$  m/s, pour les caractéristiques acoustiques et géométriques du transducteur fabriqué en PMN-PT (*Tableau V.4 et V.7*). La distance focale effective  $z_0$  et les profondeurs de champ à  $-3$  et  $-6$  dB sont alors comparées à celle obtenue expérimentalement (en pointillés, *Figure V.8*) :



*Figure V.8* : Simulation avec le modèle KLM étendu à l'axisymétrie du transducteur PMN-PT :

(a) tension en émission-réception en fonction de la distance dans l'axe et (b) profondeur de champ.

Ainsi, on relève la courbe de tension qui donne une distance focale effective proche de celle escomptée à  $z_0 = 6,7$  mm, et des profondeurs de champ à  $-3$  et  $-6$  dB proches de celles mesurées respectivement à 1,49 et 2,16 mm. La vitesse longitudinale dans la lentille qui satisfait ces deux critères (vitesse effective) se situe autour de  $c_l = 3000$  m/s, comme l'a montré la méthode précédente (Tableau V.7).

### III.2 Réponse électro-acoustique au point focal

La réponse électro-acoustique en émission-réception au point focal permet d'évaluer la résolution axiale  $D_{z_6}$ , mais aussi les niveaux de contraste axial pour des seuils typiques à  $-12$ ,  $-15$  et  $-30$  dB. Le transducteur PVDF présente de très bonnes caractéristiques dans l'axe (Figure V.9 (a)), avec une résolution axiale  $D_{z_6} = 18,3$   $\mu\text{m}$ , et des estimateurs de contraste  $D_{z_{12}} = 25,4$   $\mu\text{m}$ ,  $D_{z_{15}} = 28,3$   $\mu\text{m}$ , et  $D_{z_{30}} = 80,3$   $\mu\text{m}$ . Cependant, la sensibilité obtenue est très faible relativement aux autres transducteurs (Tableau V.5). Son spectre montre une très large bande passante (Figure V.9 (b)), avec des largeurs relatives à  $-6$  et  $-30$  dB respectivement égales à 134 % et 193 %.

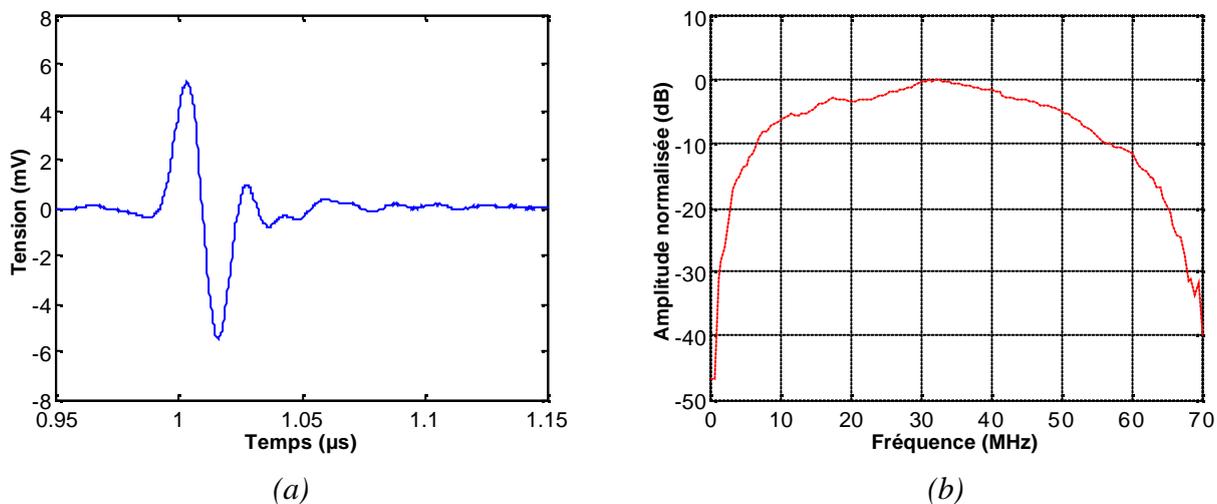
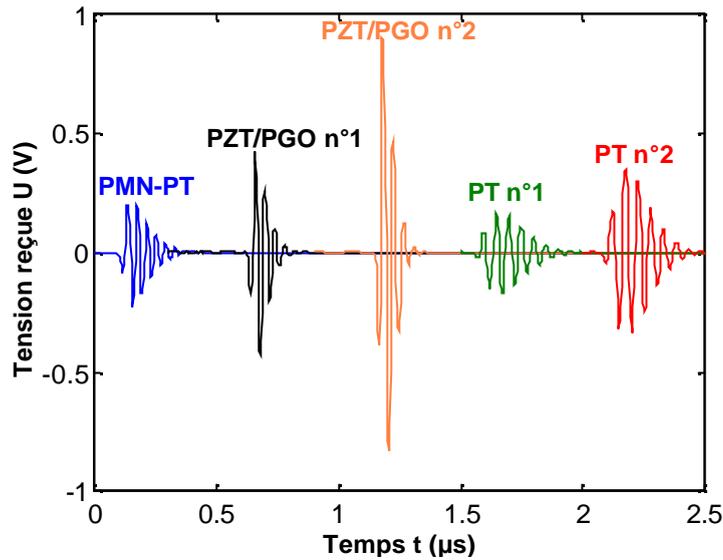


Figure V.9 : Réponse électro-acoustique au point focal en émission-réception sur une cible plane.

En ce qui concerne les transducteurs équipés d'une lentille, la résolution axiale au point focal  $D_{z_6}$  est la meilleure pour le transducteur PZT/PGO n°2 suivi du transducteur PZT/PGO n°1. Les estimateurs de contraste axial à  $-12$ ,  $-15$  et  $-30$  dB évoluent dans le même sens (Figure V.10).



*Figure V.10 : Réponse électro-acoustique au point focal en émission-réception sur une bille de 400 µm de diamètre.*

Transducteur	$D_{z_6}$ (µm)	$D_{z_{12}}$ (µm)	$D_{z_{15}}$ (µm)	$D_{z_{30}}$ (µm)	$f_0$ (MHz)	$BP_{6,r}$ (%)	$IP$
PVDF	18,3	25,4	28,3	80,3	30,8	134	–
PMN-PT	77,1	116,0	133,9	205,5	25,2	31	92
PZT/PGO n°1	49,7	74,8	84,8	129,3	24,4	48	36
PZT/PGO n°2	43,0	70,9	78,0	119,8	23,5	54	34
PT n°1	135,1	190,3	212,1	292,8	19,4	25	36
PT n°2	121,4	173,3	194,9	271,7	18,9	28	33

$D_{z_6}$ ,  $D_{z_{12}}$ ,  $D_{z_{15}}$ ,  $D_{z_{30}}$  : longueur de la réponse électro-acoustique au point focal à  $-6$ ,  $-12$ ,  $-15$  et  $-30$  dB ;  $f_0$  : fréquence centrale à  $-6$  dB ;  $BP_{6,r}$  : bande passante relative à  $-6$  dB ;  $IP$  : indice de performance.

*Tableau V.8 : Caractéristiques de la réponse électro-acoustique au point focal en émission-réception sur une bille de 400 µm de diamètre.*

La meilleure bande passante relative à  $-6$  dB notée  $BP_{6,r}$  est obtenue avec le transducteur à base de PVDF, et la moins bonne est donnée par un transducteur à base de PT. Il faut également noter que les transducteurs utilisant les films épais de composition PZT/PGO délivrent de bonnes caractéristiques spectrales. Les indices de performance  $IP$  (compromis sensibilité / résolution axiale) obtenus pour les transducteurs à base de PZT/PGO et de PT sont comparables.

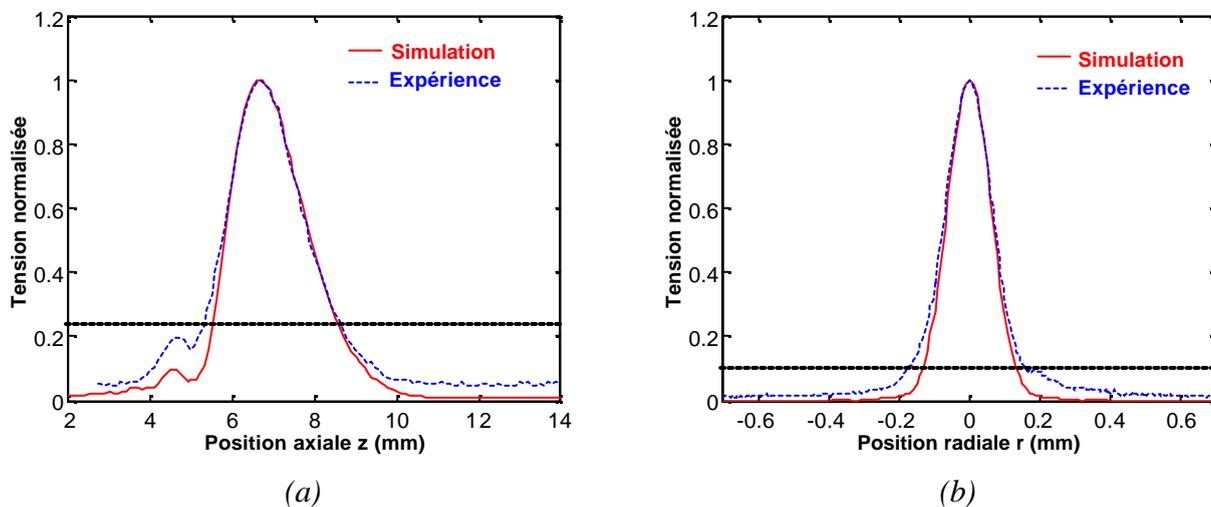
### III.3 Comparaison simulation / expérience

Pour illustration, une comparaison est effectuée en émission-réception sur une cible ponctuelle entre le résultat obtenu par simulation avec le modèle KLM étendu à l'axisymétrie et une mesure. Comme le montre la *Figure V.8*, la vitesse longitudinale effective dans la lentille qui présente le meilleur ajustement se situe à  $c_l = 3000$  m/s, ce qui correspond à une impédance acoustique effective  $Z = 3,1$  MRa. Le rayon de courbure de la lentille  $R_c = 3,5$  mm est resté inchangé. La lame adaptatrice de parylène a été modélisée avec les valeurs ajustées précédemment (paragraphe I.3). Les caractéristiques prises en compte sont celles du *Tableau V.4* pour le milieu arrière, et celles du *Tableau IV.7* pour le disque piézo-électrique.

Les illustrations du champ rayonné (*Figure V.11*) et de la réponse électroacoustique (*Figure V.12*) montrent la cohérence entre la modélisation et l'expérience, et les caractéristiques évaluées sont comparées (*Tableau V.9* et *V.10*).

#### III.3.1 Rayonnement dans l'axe et dans le plan focal

L'illustration du champ rayonné (*Figure V.11*) et sa caractérisation (*Tableau V.9*) montrent la cohérence et les limites du modèle.



*Figure V.11* : Comparaison de la tension normalisée en émission-réception du transducteur PMN-PT obtenue expérimentalement et avec le modèle KLM étendu à l'axisymétrie :  
(a) dans l'axe, (b) dans le plan radial et (c) au point focal.

La distance focale obtenue  $z_0$  et les profondeurs de champ à  $-3$  et  $-6$  dB notées  $DOF_3$  et  $DOF_6$  concordent parfaitement étant donné que la vitesse longitudinale dans la lentille  $c_l$  a été ajustée sur ces critères. On devine que le modèle et l'expérience vont donner des résultats similaires jusqu'à un seuil de  $-12$  dB (ligne en pointillés, *Figure V.11 (a)*). Les résultats de largeur de la tache focale concordent avec une erreur de 10% au maximum jusqu'à  $-15$  dB (*Tableau V.9*). En dessous d'un seuil de  $-20$  dB (ligne en pointillés, *Figure V.11 (b)*), on observe un élargissement expérimental plus important qu'en théorie.

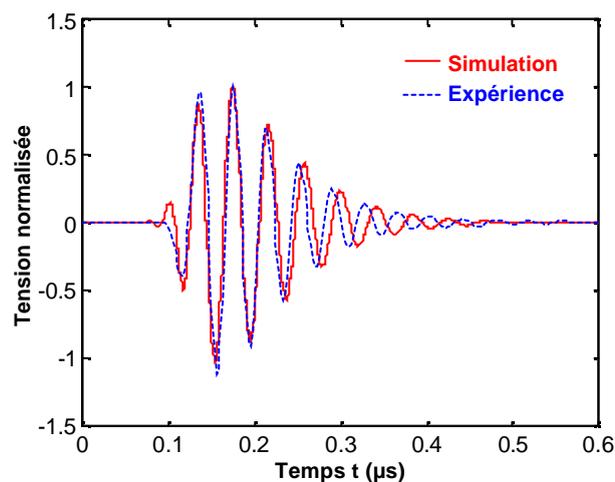
	$z_0$ (mm)	$DOF_3$ (mm)	$DOF_6$ (mm)	$Dr_6$ ( $\mu\text{m}$ )	$Dr_{12}$ ( $\mu\text{m}$ )	$Dr_{15}$ ( $\mu\text{m}$ )	$Dr_{30}$ ( $\mu\text{m}$ )
KLM étendu	6,7	1,49	2,12	149	207	231	330
Expérience	6,7	1,49	2,16	157	225	256	822

$z_0$  : distance focale effective ;  $DOF_3$  et  $DOF_6$  : profondeurs de champ à  $-3$  et  $-6$  dB ;  $Dr_6$ ,  $Dr_{12}$ ,  $Dr_{15}$ ,  $Dr_{30}$  : largeur radiale de la tache focale à  $-6$ ,  $-12$ ,  $-15$  et  $-30$  dB.

*Tableau V.9 : Comparaison du champ en émission-réception du transducteur PMN-PT obtenue expérimentalement et avec le modèle KLM étendu à l'axisymétrie.*

### III.3.2 Réponse au point focal

La réponse électro-acoustique mesurée au point focal est comparée à la simulation (*Figure V.12*) et les courbes sont caractérisées (*Tableau V.10*) :



*Figure V.12 : Comparaison de la réponse électro-acoustique en émission-réception du transducteur PMN-PT obtenue expérimentalement et avec le modèle KLM étendu à l'axisymétrie au point focal.*

	$D_{z_6}$ ( $\mu\text{m}$ )	$D_{z_{12}}$ ( $\mu\text{m}$ )	$D_{z_{15}}$ ( $\mu\text{m}$ )	$D_{z_{30}}$ ( $\mu\text{m}$ )	$f_0$ (MHz)	$BP_{6,r}$ (%)
KLM étendu	97,7	145,1	166,2	264,0	24,3	25
Expérience	77,1	116,0	133,9	205,5	25,2	31

$D_{z_6}$ ,  $D_{z_{12}}$ ,  $D_{z_{15}}$ ,  $D_{z_{30}}$  : longueur de la réponse électro-acoustique au point focal à  $-6$ ,  $-12$ ,  $-15$ , et  $-30$  dB ;  $f_0$  : fréquence centrale à  $-6$  dB ;  $BP_{6,r}$  : bande passante relative à  $-6$  dB.

*Tableau V.10 : Comparaison de la réponse électro-acoustique en émission-réception du transducteur PMN-PT obtenue expérimentalement et avec le modèle KLM étendu à l'axisymétrie*

On peut observer sur la réponse électro-acoustique (*Figure V.12 (a)*) une bonne correspondance entre le modèle et l'expérience. On distingue un décalage qui s'accroît au cours de l'amortissement de l'écho, qui est dû à un léger décalage de la fréquence centrale. D'autre part, le spectre expérimental est plus large, ce qui est cohérent avec l'amortissement légèrement plus important observé sur la réponse temporelle expérimentale. Ces observations expliquent que la modélisation conduise à une surévaluation systématique des longueurs de l'écho (*Tableau V.10*).

## IV Tests dans un échographe (images)

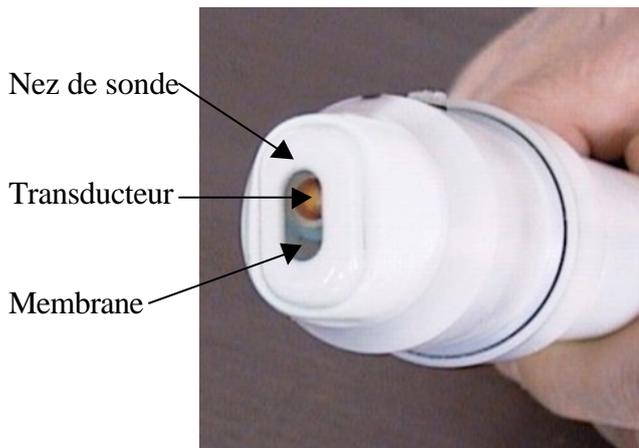
Tous les transducteurs fabriqués (excepté celui intégrant le PVDF qui possède une sensibilité trop faible) ont été intégrés dans un système d'imagerie (20 à 50 MHz). Ils possèdent tous un  $f_{number}$  compris entre 2 et 3 adapté à l'imagerie médicale [8]. Ce compromis conditionne le rapport entre résolution axiale et latérale (*Annexe 2*).

### IV.1 Mise en place dans un échographe

Les transducteurs réalisés ont été testés avec un échographe haute résolution (*Figure V.13*) développé au laboratoire [9]. Ce système d'imagerie a été développé en vue d'exams cliniques pour l'aide au diagnostic des tissus superficiels tels que la peau [10]. La qualité des images obtenues va permettre d'évaluer les transducteurs et leur technique de fabrication décrite dans ces deux derniers chapitres.



(a)



(b)



(c)

*Figure V.13 : (a) Mise en place du transducteur dans la sonde ; (b) Sonde pour balayage mécanique prête à l'utilisation ; (c) Système d'imagerie développé au laboratoire [9].*

Les transducteurs sont placés dans la tête de la sonde qui effectue un balayage linéaire de la zone à imager (*Figure V.13 (a)*). L'image est constituée à partir des échos recueillis au cours du balayage du transducteur, avec une fréquence de rafraîchissement de 10 images par seconde. Le transducteur est immergé dans une eau aseptisée, mis en position par rapport au nez de sonde, et confiné par une membrane qui permet d'assurer l'isolation et l'étanchéité de la tête de sonde (*Figure V.13 (b)*). Le positionnement du transducteur est ajusté en fonction de sa distance focale, de façon à obtenir le maximum de sensibilité dans la zone d'intérêt.

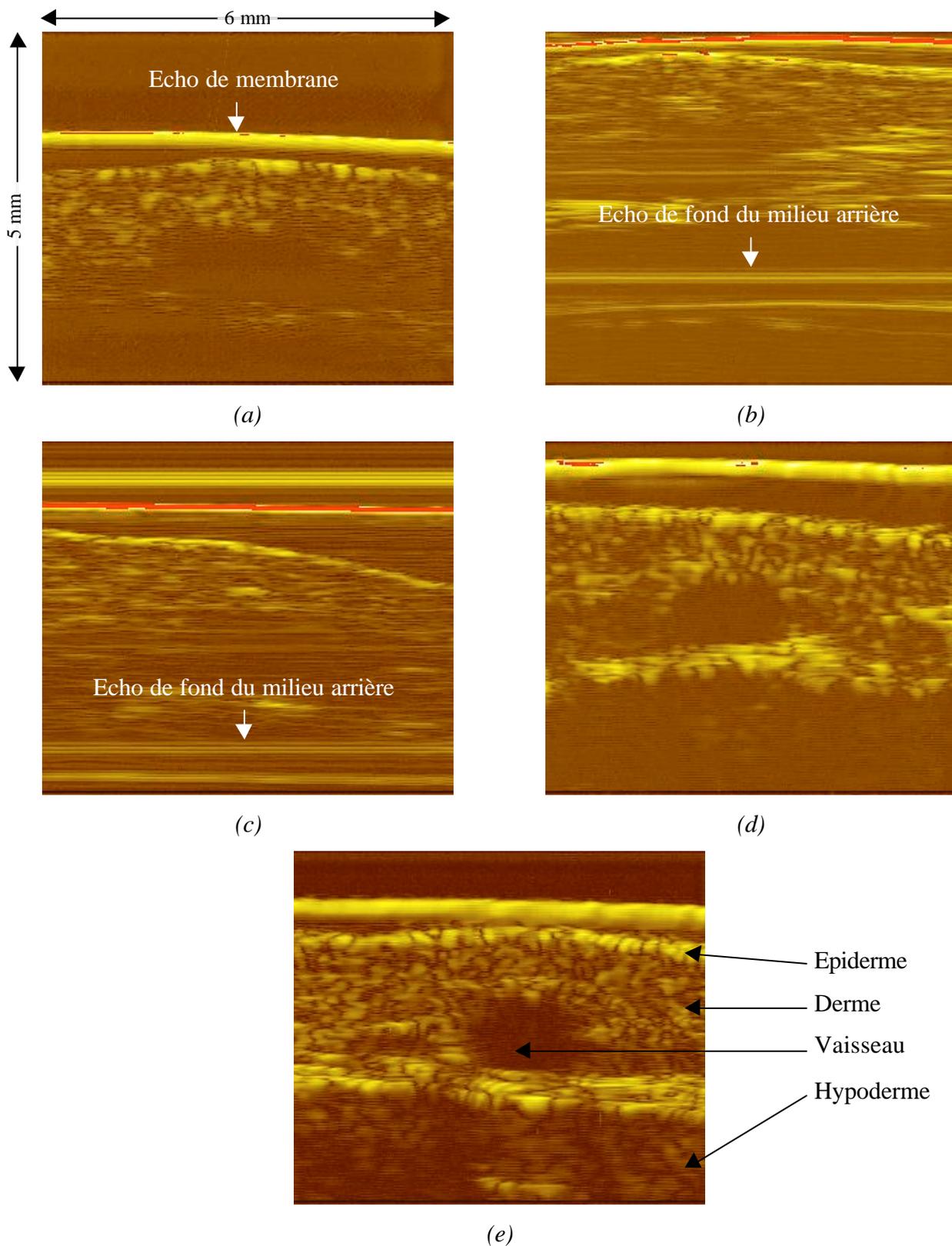
## IV.2 Image de la peau d'un avant-bras

La *Figure V.14* permet de comparer les images réalisées sur un avant-bras à un emplacement identique. Sur chacune d'entre elles, on distingue l'écho de la membrane derrière laquelle se trouve le transducteur (*Figure V.13 (a)*). On remarque que les zones les plus échogènes sont saturées sur l'image avec une coloration rouge (*Figure V.14 (b) et (c)*).

L'image réalisée avec le transducteur PT n°2 (*Figure V.14 (e)*) correspond à un bon compromis entre résolutions latérale et axiale, avec de plus une bonne sensibilité. On y distingue clairement les différentes couches constituant la peau comme spécifié sur cette figure. Le transducteur PT n°1 (*Figure V.14 (d)*) donne une qualité d'image comparable, mais avec une sensibilité un peu moins bonne. Pour l'image réalisée avec le transducteur PMN-PT (*Figure V.14 (a)*), les résolutions semblent comparables mais la sensibilité est plus faible. Enfin, les images obtenues avec les transducteurs PZT/PGO n°1 et n°2 (*Figure V.14 (b) et (c)*) ont une bien meilleure résolution axiale et une bonne sensibilité. Cette résolution axiale se voit nettement au niveau de l'épiderme qui est très échogène et qui apparaît plus finement sur l'image. Par contre, un écho de fond du milieu arrière vient dégrader la qualité de l'image et la résolution latérale est très largement insuffisante.

La suppression de l'écho de fond du milieu arrière est envisageable par usinage de sa face arrière et ajout d'une résine chargée très atténuante. La faible résolution latérale est simplement la conséquence d'un trop faible diamètre actif de l'élément piézo-électrique, ce qui devrait être modifié sur les prochains échantillons. Dans l'hypothèse où ces deux modifications donneraient satisfaction, la technologie des films sérigraphiés en PZT/PGO serait la plus performante.

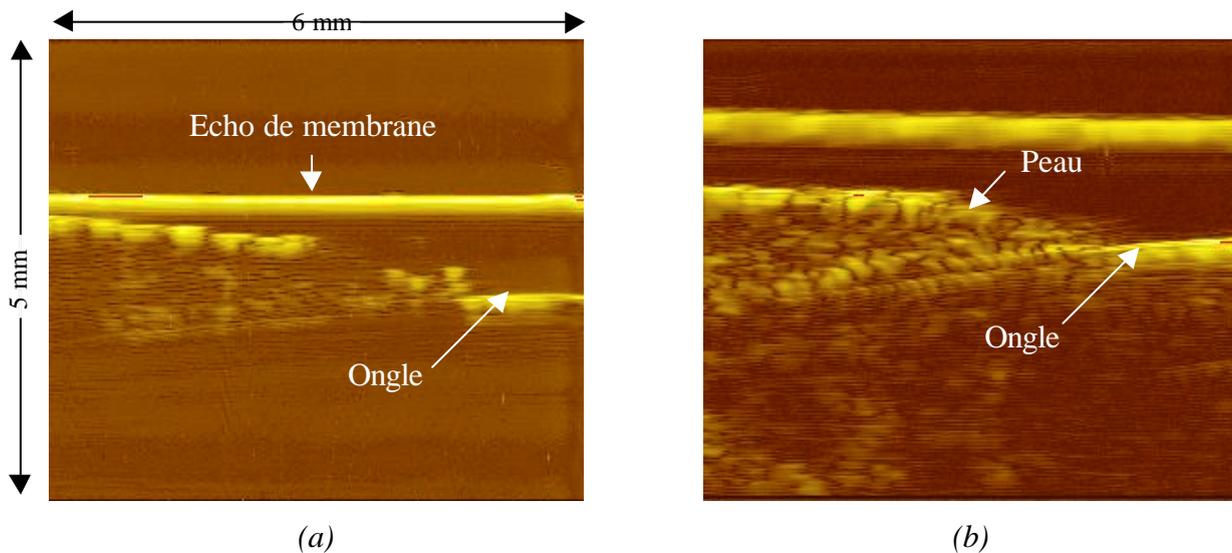
La sensibilité du transducteur dépend non seulement de ses caractéristiques électro-mécaniques, mais aussi de l'adaptation électrique avec le générateur et le récepteur. L'adaptation électrique a été évoquée succinctement, notamment en ce qui concerne le câble de liaison entre le transducteur et le système électronique d'émission-réception (paragraphe II.3, *Chapitre I*). Une amélioration notable serait certainement apportée à ce niveau avec la mise en place d'une compensation de la partie imaginaire de l'impédance électrique du transducteur autour de la résonance avec une inductance adéquate. De plus, l'ajout d'un transformateur électrique permettrait d'appliquer un facteur multiplicateur au module de l'impédance du transducteur pour l'adapter à celui du générateur. Ces deux éléments sont souvent utilisés une fois le transducteur finalisé et mis en place dans un système d'imagerie donné. Ils améliorent sensiblement les caractéristiques de la réponse électro-acoustique.



*Figure V.14 : Image 6 ´ 5 mm d'un avant-bras avec une veine dans le derme réalisée avec les transducteurs (a) PMN-PT, (b) PZT/PGO n°1, (c) PZT/PGO n°2, (d) PT n°1 et (e) PT n°2.*

### IV.3 Image d'un pouce

Pour terminer, des images d'un pouce ont aussi été effectuées avec les deux transducteurs PMN-PT et PT n°2, c'est-à-dire ceux donnant les meilleurs compromis sensibilité/résolution axiale/résolution latérale (*Figure V.15*). Le transducteur PT n°2 possède une profondeur de champ à  $-6$  dB de 4,3 mm contre 2,16 mm pour le PMN-PT, ce qui explique les différences sur le bas de l'image (*Figure V.15 (a)*). Sur l'image réalisée avec le transducteur PT n°2 (*Figure V.15 (b)*), on peut facilement repérer le prolongement de l'ongle sous la peau.



*Figure V.15* : Image 6 × 5 mm d'un ongle réalisée avec les transducteurs (a) PMN-PT et (b) PT n°2.

## V Conclusion

Six transducteurs haute fréquence ont été réalisés, caractérisés et utilisés dans un échographe haute fréquence. En ce qui concerne le choix des différents éléments passifs constituant ces transducteurs, le parylène ne s'est pas révélé très avantageux pour nos conceptions. En haute fréquence, ce choix est fortement lié à un compromis entre les propriétés et la possibilités de mise en œuvre des matériaux. Toutefois, les propriétés de ce matériau en couche fine ont été évaluées et le parylène reste un candidat de premier choix pour sa facilité de mise en œuvre et la précision sur l'épaisseur déposée. Ce matériau est particulièrement approprié à l'adaptation acoustique de transducteurs ne nécessitant pas l'ajout d'une lentille, tels que ceux dont l'élément piézo-électrique est focalisé par mise en forme.

La comparaison des performances en imagerie des différents transducteurs réalisés montre que ceux intégrant les disques de titanate de plomb, considérés comme référence, délivrent un bon