

Transducteur de type Langevin pour des applications sous-marines (BaTiO₃:Co)

Aussi appelé par les allemands pendant la Seconde Guerre Mondiale « *Tonpilz* » (champignon acoustique), ce transducteur essentiellement utilisé pour les applications sous-marines se compose de 4 parties principales (illustrées sur la Figure 8.1). Une **colonne** d'anneaux de céramiques piézoélectriques est le moteur du transducteur. Ces anneaux sont empilés de manière à ce que les orientations des polarisations soient alternées avec des connexions électriques adéquates. Pour cela, des feuillets conducteurs (fines feuilles de cuivre, par exemple) peuvent être placés entre chaque céramique pour permettre la reprise des contacts électriques afin de pouvoir envoyer l'excitation nécessaire.

Un **pavillon**, généralement conçu avec un matériau dont la masse volumique est assez faible (aluminium par exemple), possède une face contre la colonne de céramiques et une autre face au contact de l'eau, appelée face avant. Le pavillon sert à amplifier le rayonnement du mode piston dans l'eau qui est créé par la colonne de céramiques. Ses dimensions conditionnent la qualité du rayonnement.

Une **contremasse** est constituée d'un matériau de grande densité. Elle se positionne à l'opposé du pavillon, de l'autre côté de la colonne de céramique. Son rôle est d'immobiliser au mieux la surface arrière de la colonne de céramiques. De cette manière, le nœud de l'onde de vibration se placera idéalement à l'interface colonne/contremasse pour laisser le maximum d'énergie vers le pavillon.

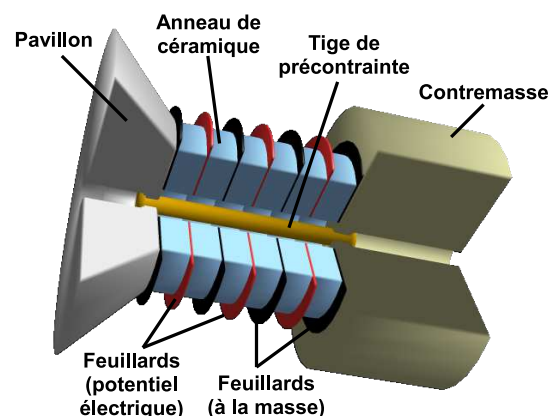


FIGURE 8.1 – Schéma d'un transducteur de type Langevin

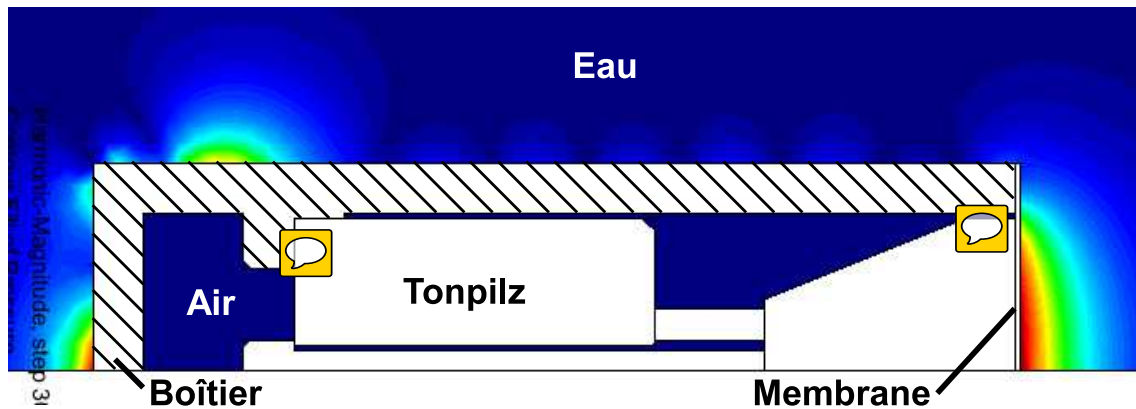


FIGURE 8.2 – Coupe axisymétrique d'un *tonpilz* dans un boîtier étanche et plongé dans l'eau.

Une **tige de précontrainte** solidarise l'ensemble. Son but essentiel est de maintenir les céramiques sous une compression permanente qui est une condition indispensable pour des performances optimisées.

Enfin, pour que ce transducteur puisse être immergé sans problème, un boîtier étanche lui est ajouté tout autour comme le montre la Figure 8.2. Pour l'optimisation du *tonpilz*, tout un travail doit aussi être fait sur le boîtier afin d'améliorer le rayonnement dans l'eau dont les pressions élevées sont représentées en rouge sur le schéma. C'est évidemment du côté de la membrane collée sur la face du pavillon que la pression est la plus forte. Pour créer cette pression, le mode de fonctionnement de la colonne de céramiques et du pavillon est le mode piston. Le but de ce chapitre est d'évaluer les performances du *tonpilz* avec des céramiques piézoélectriques sans plomb par rapport à ceux intégrant les habituelles céramiques PZT. Les dimensions et géométries des éléments du *tonpilz* ont été choisies suite à des études d'optimisation faites au préalable avec différentes configurations par l'IEMN. La simulation numérique et quelques mesures sont réalisées pour cette comparaison de transducteurs avec ou sans plomb. Pour savoir si un matériau piézoélectrique est efficace pour ce genre de transducteur, sa sensibilité M qui fait partie de la figure de mérite (FOM) définie dans l'ouvrage de Sherman et Butler [145], est calculée comme suit :

$$M = d_{33} + 2d_{31} \quad (8.1)$$

Un autre paramètre très important dans cette FOM est le facteur de qualité mécanique Q_m . La FOM augmente avec la valeur croissante de Q_m . Avec ces informations et la liste des caractéristiques des matériaux sans plomb du chapitre 3, les céramiques à base de BT sont un bon choix car elles possèdent des valeurs de d_{33} qui peuvent être supérieures aux céramiques KNN voire même certains PZT. Suite à un travail effectué par Thalès Research&Technology où différentes compositions à base de BT sont testées, la céramique BaTiO₃ dopée au cobalt (BaTiO₃:Co) apparaît comme la meilleure composition car ses propriétés électromécaniques laissent présager de relativement bonnes performances avec des coefficients de couplage mesurés, sur un disque, de 39,9% pour le k_t et 27,5% pour le k_p . Les facteurs de qualité ont des valeurs très intéressantes, supérieures à 500.

8.1 Caractérisation des anneaux de $\text{BaTiO}_3:\text{Co}$

Pour une simulation correcte du *tonpilz*, une des premières étapes est de renseigner correctement les propriétés des matériaux. L'outil de caractérisation développé dans le chapitre 4 sert ici à la caractérisation directe des anneaux avant qu'ils soient intégrés dans le transducteur. Cet outil est indispensable pour ce type de caractérisation car, comme il est montré plus loin, les dimensions des anneaux ne permettent pas le découplage des modes et donc il est impossible de caractériser l'anneau en utilisant la méthode standard IEEE [25]. De plus, les caractéristiques piézoélectriques importantes du matériau pour la conception d'un *tonpilz* sont les valeurs de d_{33} et d_{31} qui participent à la figure de mérite de ce transducteur. N'ayant pas été déterminées au préalable, elles le seront ici afin d'évaluer si ce matériau sans plomb est un bon candidat pour remplacer le PZT dans ces transducteurs.

8.1.1 Les anneaux

Le choix du nombre d'anneaux qui forment la colonne de céramique se fait en fonction des caractéristiques finales souhaitées. En effet, la hauteur de la colonne conditionne la fréquence de résonance de l'ensemble même si ce n'est pas le seul paramètre puisque les matériaux aussi participent par leurs caractéristiques propres (masse volumique, élasticité, etc.). Dans notre cas, comme il s'agit d'une comparaison de *tonpilz* intégrant des matériaux piézoélectriques avec ou sans plomb, le nombre d'anneaux importe peu.

Deux anneaux sont donc retenus. Leurs dimensions sont données sur la Figure 8.3 et la masse volumique est de 5656 kg/m^3 . Pour vérifier que leurs propriétés électro-mécaniques sont quasi-identiques, leurs impédances électriques sont superposées sur la Figure 8.4. Les trois principaux modes qui y sont numérotés de 1 à 3 dans l'ordre fréquentiel d'apparition ont quasiment les mêmes fréquences de résonance et d'anti-résonance. Dans cette gamme fréquentielle d'observation devrait se trouver le mode épaisseur « pur » car les caractéristiques mises en jeu dans le calcul de la fréquence d'anti-résonance de ce mode épaisseur (ρ , c_{33}^D et l'épaisseur t) la prévoient à 1,1 MHz. Le paramètre élastique et la masse volumique sont extraits de la caractérisation du mode épaisseur d'un disque de même composition. Autour de cette fréquence, il existe 3 modes légèrement couplés qui s'apparentent donc à un mode épaisseur et deux modes radiaux dépendant des dimensions radiales de l'anneau. Il n'y a aucune raison de commencer la caractérisation sur un mode en particulier donc le travail se fera sur ces 3 modes pour avoir un maximum d'information. Les déformées de ces modes simulés sont reportées sur la Figure 8.5 et ne sont pas typiques d'un mode épaisseur ou d'un mode radial pur, même si le mode 1 a une nature proche de celle d'un mode radial. Le plan reproduit est un plan radial de l'anneau et le calcul a été fait en 2 dimensions sur une demi-épaisseur avec des conditions d'axisymétrie. Il est appelé

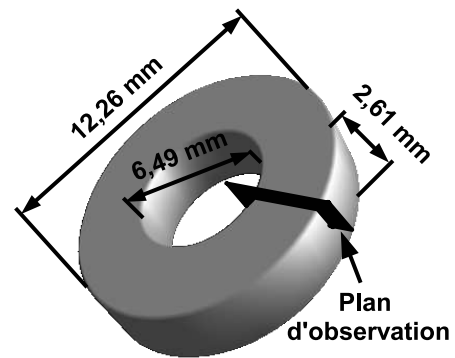
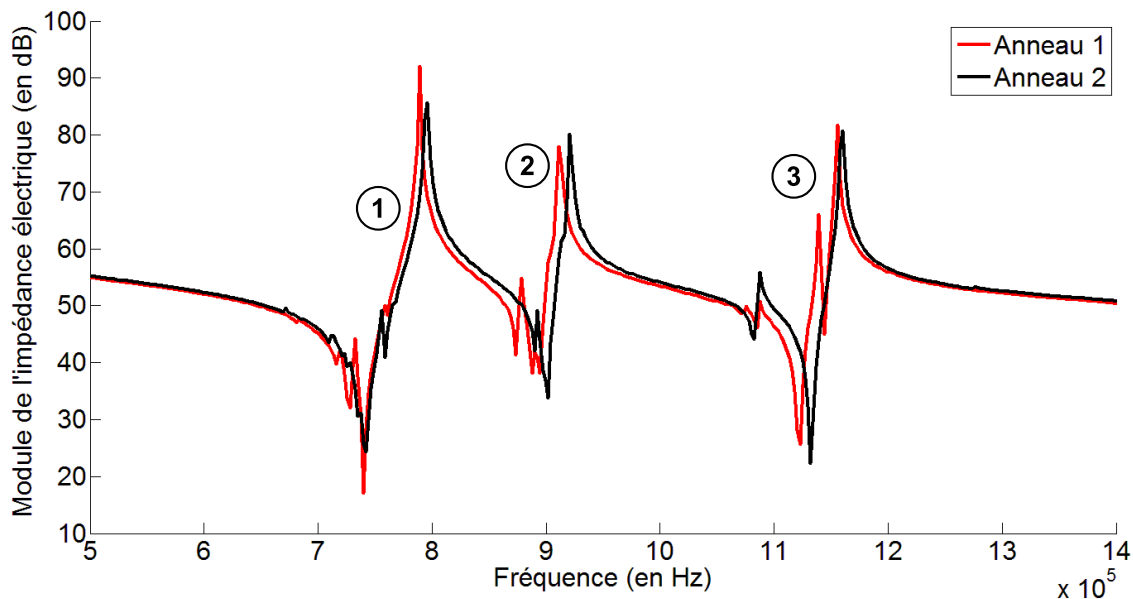


FIGURE 8.3 – Dimensions des anneaux utilisés pour la fabrication des *tonpilz*.

FIGURE 8.4 – Impédances électriques des 2 anneaux de $\text{BaTiO}_3\text{:Co}$ du *tonpiliz*.

« plan d'observation » et il est représenté sur la Figure 8.3.

Cette mesure d'impédance électrique est un cas où les modèles unidimensionnels de circuit électrique équivalent ne peuvent pas fonctionner pour la caractérisation piézoélectrique car les modes ne sont pas purs. Il est néanmoins intéressant de faire la caractérisation à cette étape de l'élaboration du *tonpiliz*, même si, habituellement, les matériaux sont caractérisés avant l'usinage pour des questions de facilité. En effet, l'anneau est prêt à être intégré dans le transducteur et donc les propriétés déterminées à cette étape seront extrêmement proches des propriétés finales. Si la caractérisation avait été faite avant l'usinage de la céramique pour la transformer en anneau (sur le disque), les propriétés auraient pu être légèrement différentes. Il s'agit ici de la même démarche que la caractérisation d'un composite piézoélectrique de connectivité 1-3 *in situ* vu dans le chapitre 7.

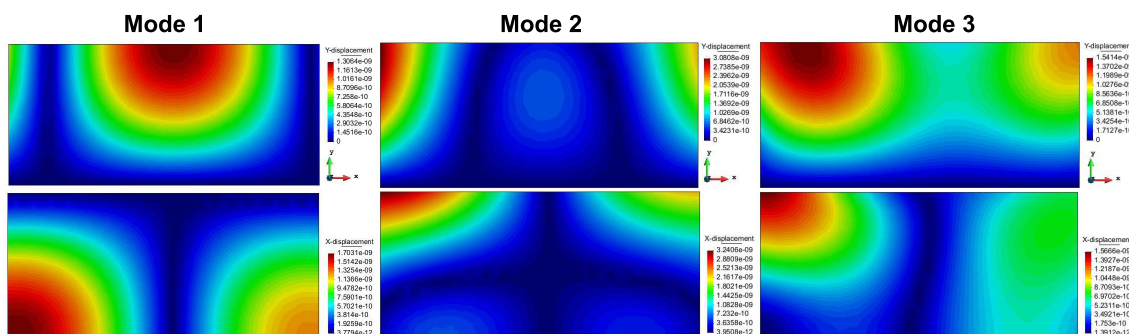
FIGURE 8.5 – Composantes selon la direction de l'épaisseur \vec{y} (1^{ère} ligne) et selon la direction radiale \vec{x} (2^{ème} ligne) du champ de déplacement d'une coupe radiale de l'anneau.

TABLE 8.1 – Données commerciales et ajustées de la céramique BaTiO_3 utilisée dans la fabrication des anneaux de *tonpils*

Données	Commerciales [2]	Ajustées	Différences (%)
c_{11}^E (GPa)	164,9	173,5	5,1
c_{12}^E (GPa)	57,7	83,6	36,7
c_{13}^E (GPa)	61,5	76,1	21,3
c_{33}^E (GPa)	151,5	160,4	5,7
c_{44}^E (GPa)	37,7	42,3	11,5
c_{66}^E (GPa)	53,5	-	-
e_{31} (C/m ²)	-1,9	-2,3	20,2
e_{33} (C/m ²)	11,6	17,0	37,6
e_{15} (C/m ²)	7,7	-	-
$\epsilon_{11}^S/\epsilon_0$	1696	-	-
$\epsilon_{33}^S/\epsilon_0$	454	1090	56,2

8.1.2 Caractérisation piézoélectrique

L'algorithme de caractérisation mis au point dans le chapitre 4 est aussi utilisé ici pour déterminer les caractéristiques des anneaux de $\text{BaTiO}_3:\text{Co}$ qui présentent des modes de vibration légèrement couplés.

Paramètres de la Fonction Objectif (FO) Les modes utilisés sur la mesure d'impédance électrique pour la caractérisation piézoélectrique multimodale sont les 3 modes spécifiés précédemment. De ce fait, les grandeurs spécifiques Dif_1^1 , Dif_1^2 , Dif_2^2 , Dif_2^1 , Dif_3^1 et Dif_3^2 sont créées en suivant les définitions (4.3) et (4.4), sans oublier la grandeur Eps (expression (4.5)). Contrairement à la caractérisation multiphasique des composites 1-3, les filtres utilisés (représentés sur la Figure 4.5) se limitent aux filtres sur les valeurs des coefficients de couplage et les conditions de stabilité thermodynamique. Les pondérations des Dif sont égales car il n'y a pas de raison d'avantager un mode plus que les autres : $\alpha_1 = \beta_1 = \alpha_2 = \beta_2 = \alpha_3 = \beta_3$. Autrement, les valeurs de pénalisation sont identiques à celles données dans le chapitre 4.

Paramètres de l'Algorithme Génétique (GA) Pour la caractérisation piézoélectrique s'appuyant sur ces 3 modes, les constantes du $\text{BaTiO}_3:\text{Co}$ les plus sensibles sont c_{11}^E , c_{12}^E , c_{13}^E , c_{33}^E , c_{44}^E , e_{31} , e_{33} et ϵ_{33}^S . La base de données commerciales utilisée est celle du BT de Ferroperm [2] car, en les utilisant, elles donnent déjà une approximation correcte de l'impédance électrique de l'anneau de $\text{BaTiO}_3:\text{Co}$. Elles sont données dans la Table 8.1. Les valeurs de lim_{inf} et lim_{sup} sont toujours égales à 0,01% et 100%, respectivement, pour ne

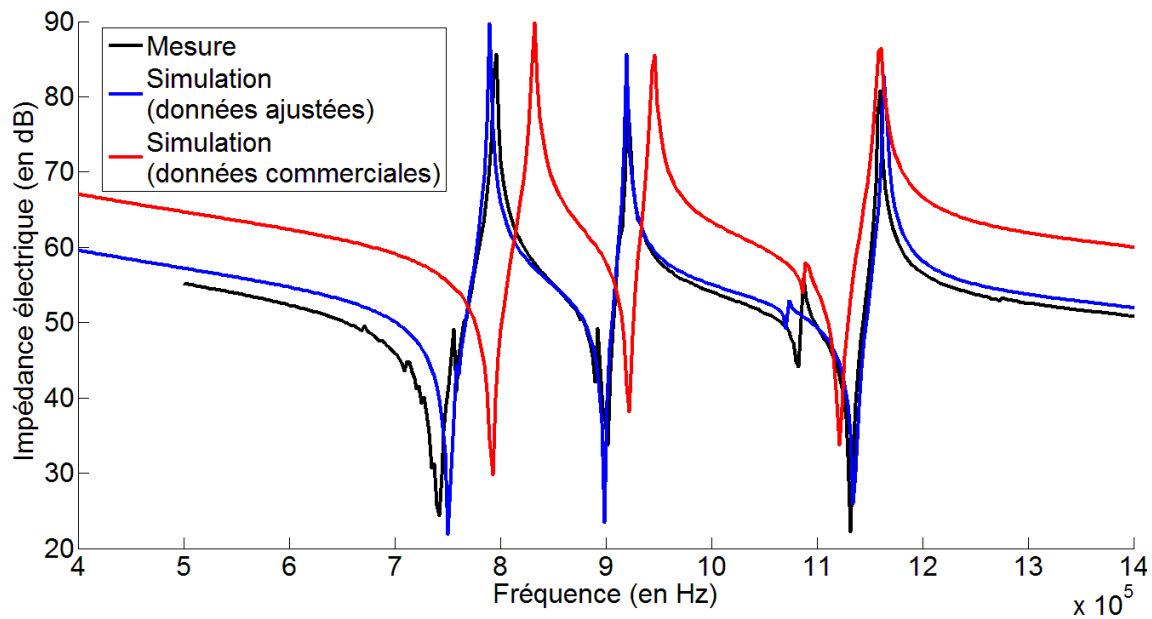


FIGURE 8.6 – Comparaison des impédances électriques mesurées d'un anneau de $\text{BaTiO}_3\text{:Co}$ avec les impédances électriques simulées avec des données commerciales et ajustées.

pas contraindre l'algorithme et garder les avantages liés à l'utilisation de l'algorithme génétique. Comme le nombre de variables est le même que pour la caractérisation des phases d'un composite 1-3, les 200 individus évoluant sur 100 générations avec une élite contenant 10 individus sont conservés.

Résultats La caractérisation est faite sur l'impédance électrique mesurée du premier anneau. Elle est tracée sur la Figure 8.6 avec la simulation utilisant les données commerciales et la simulation employant les données ajustées par l'algorithme. Comme pour la caractérisation multiphasique du composite 1-3, l'impédance simulée avec les données ajustées est plus proche de la mesure. Les fréquences de résonance et d'anti-résonance du 1^{er} mode ne sont pas aussi bien évaluées que celles des deux autres modes. La précision obtenue aurait pu être améliorée en augmentant le temps d'ajustement qui, dans notre cas, a été limité à 48h. De plus, les quelques différences observées peuvent également provenir de petits défauts dimensionnels (non planéité par exemple) sur l'échantillon qui provoque une évolution de l'impédance qui ne pourra pas être prise en compte dans la simulation. Les valeurs de cette solution sont données dans la Table 8.1. Grâce aux filtres de l'algorithme de caractérisation, les nouveaux k_t et k_p de cette base de données ajustée sont très proches de ceux mesurés à l'origine et valent, respectivement, 39,7% et 30,5%.

Les différences des caractéristiques entre la base de données commerciale et la base de données ajustées est difficile à interpréter car les anneaux sont à base de BT mais dopés avec du cobalt (Co). La plus grande variation vient de la constante diélectrique ϵ_{33}^S qui est très dépendante de l'ajout de dopant. Ayant déterminé les constantes nécessaires au calcul des constantes d_{31} et d_{33} du tenseur piézoélectrique d grâce à cette caractérisation,

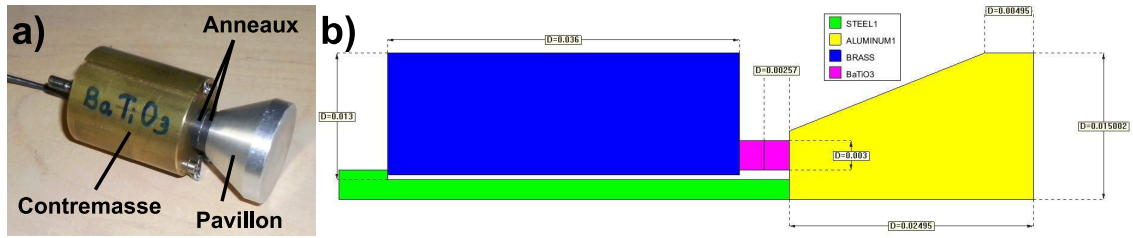


FIGURE 8.7 – Le *tonpiliz* avec les anneaux de $\text{BaTiO}_3\text{:Co}$ a) photographié et b) modélisé (dimensions en m).

leurs valeurs sont déduites : $d_{31} = -56.10^{-12} \text{ CN}^{-1}$ et $d_{33} = 160.10^{-12} \text{ CN}^{-1}$. La figure de mérite définie dans la relation (8.1) vaut alors $46,9.10^{-12} \text{ CN}^{-1}$. Si une céramique PZT standard (Pz26 de chez MEGGIT-Ferropem [2]) habituellement utilisée dans la fabrication des *tonpiliz* est choisie pour la comparaison, sa figure de mérite est égale à $72.10^{-12} \text{ CN}^{-1}$, ce qui est 1,5 fois plus grand que celle du $\text{BaTiO}_3\text{:Co}$.

D'après ces premières constatations, le $\text{BaTiO}_3\text{:Co}$ ne semble pas plus performant que le Pz26 pour ce type de transducteur. Néanmoins, les autres paramètres conditionnant le comportement du transducteur (matériaux passifs utilisés ou forme du pavillon) ne sont pas étudiés ici. Il n'est donc pas possible de savoir, *a priori* et de façon définitive, si cette configuration de *tonpiliz* est mieux adaptée à l'usage du Pz26 que du $\text{BaTiO}_3\text{:Co}$. Les étapes de fabrication et de mesure de déplacement du pavillon de ces deux transducteurs sont donc réalisées pour conclure sur la comparaison de ces matériaux. Les mesures, au-delà de la comparaison des matériaux avec plomb ou sans plomb, permettront d'estimer la précision des simulations correspondantes.

8.2 Modélisation des *tonpiliz*

Des *tonpiliz* avec deux anneaux sont fabriqués et celui réalisé avec les anneaux de $\text{BaTiO}_3\text{:Co}$ est en photographie sur la Figure 8.7.a). Le matériau à base de plomb, choisi pour la comparaison, est la céramique Pz26 [2]. Les anneaux de Pz26 ont les mêmes dimensions que les anneaux de $\text{BaTiO}_3\text{:Co}$. Les pavillons sont en aluminium, les contremasses en laiton et les précontraintes sont appliquées grâce à des tiges métalliques.

Pour la simulation par éléments finis, les données utilisées pour ces matériaux sont répertoriées dans le livre de l'institut américain de la physique [3]. Les dimensions générales du *tonpiliz* sont visibles sur la Figure 8.7.b). Le but de cette modélisation est de prévoir au mieux les valeurs de déplacement de la face avant du pavillon qui est une grandeur facilement mesurable grâce à l'utilisation d'un vibromètre laser. La confrontation simulation/expérience se fera sur le *tonpiliz* avec le $\text{BaTiO}_3\text{:Co}$ car les anneaux ont été caractérisés avant la fabrication. Tous les résultats de mesure ou de simulation sont regroupés dans la Table 8.2 à la fin de ce chapitre.

Sur la Figure 8.8, les déplacements normalisés par rapport à la tension appliquée du centre du pavillon sont tracés pour la mesure (en noir), pour la simulation avec les données commerciales (en bleu) et pour la simulation avec les données ajustées (en rouge). Il existe, tout d'abord, un léger décalage fréquentiel entre les fréquences de résonance de la mesure

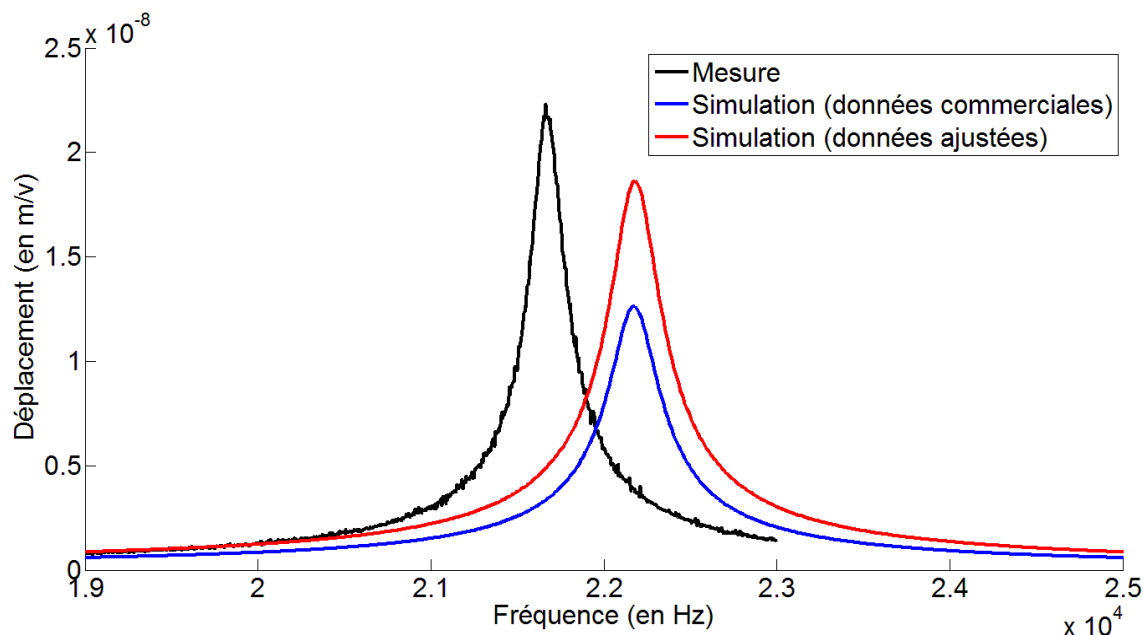


FIGURE 8.8 – Déplacements mesurés et simulés du centre du pavillon du *tonpilz* de BaTiO₃:Co

(21,66 kHz) et des deux simulations (22,17 kHz) qui équivaut à une différence relative de 2,4%. Bien que cet écart soit minime, il peut s'expliquer par une approximation des caractéristiques des matériaux utilisés pour le pavillon, la contremasse et la tige mais aussi par les contacts mécaniques ou l'alignement axial des anneaux qui sont considérés comme parfaits lors de la modélisation.

Maintenant, intéressons-nous à l'estimation du déplacement à la fréquence de résonance. Expérimentalement, le déplacement maximal vaut $2,23 \cdot 10^{-8} \text{ m/V}$. En utilisant les données commerciales de BT, la simulation prévoit un déplacement maximal de $1,26 \cdot 10^{-8} \text{ m/V}$ soit une différence relative avec la mesure de 55,5%. Lorsque les anneaux sont caractérisés avant leur intégration dans le transducteur, la simulation correspondante donne un déplacement de $1,87 \cdot 10^{-8} \text{ m/V}$, ce qui réduit la différence relative avec la mesure à 17,9%. Il est montré ici que la caractérisation *in situ* des éléments piézoélectriques avant leur utilisation a un effet non-négligeable sur l'évaluation des performances par la modélisation numérique. La différence d'amplitude de déplacement est confirmée par la valeur de la grandeur M (relation (8.1)) des données commerciales qui ne vaut que 31 pCN^{-1} contre $46,9 \text{ pCN}^{-1}$ pour les données ajustées.

8.3 Comparaison expérimentale des *tonpilz*

En mesurant le déplacement au centre du pavillon du même *tonpilz* mais avec des anneaux de Pz26, il atteint $7,28 \cdot 10^{-8} \text{ m/V}$ pour une fréquence de résonance à 20,55 kHz. Les résonances des 2 *tonpilz* étant proches (5,3% de différence relative), les performances peuvent être comparées. Ainsi le déplacement du pavillon à la fréquence de résonance avec

8.3. COMPARAISON EXPÉRIMENTALE DES *TONPILZ*

les anneaux de Pz26 est 3,3 fois plus important que celui avec les anneaux de BaTiO₃:Co. Cet écart des valeurs de déplacement entre le Pz26 et le BaTiO₃:Co n'est pas aussi marqué lorsque ces *tonpilz* sont simulés :

- $1,87 \cdot 10^{-8}$ m/v à 22,17 kHz pour le BaTiO₃:Co aux données ajustées,
- $3,72 \cdot 10^{-8}$ m/v à 20,12 kHz pour le Pz26 aux données commerciales [2].

L'écart fréquentiel est plus élevé (9,7%) entre les deux fréquences de résonance simulées. De plus, le déplacement du pavillon avec les anneaux de Pz26 n'est plus que 2 fois supérieur à celui des anneaux de BaTiO₃:Co. Cela prouve que, malgré une caractérisation antérieure des anneaux, une différence entre la mesure et la simulation demeure et a, pour origine essentielle, la valeur de précontrainte appliquée à la colonne piézoélectrique. En effet, elle modifie les caractéristiques du matériau piézoélectrique. Comme il a été montré pour des céramiques PZT [146], une précontrainte de 40 MPa optimise les propriétés piézoélectriques, et en particulier le d_{33} . La précontrainte appliquée ici, sur les anneaux de BaTiO₃:Co, a été fixée à 10 MPa en s'appuyant sur des travaux précédents [147] pour ne pas briser la céramique mais il n'est pas prouvé que les coefficients piézoélectriques du BaTiO₃:Co sont optimisés avec cette valeur de précontrainte. Pour comparer précisément cette céramique sans plomb avec un PZT standard, il est nécessaire de réaliser une étude sur la dépendance de ses coefficients piézoélectriques en fonction de la précontrainte appliquée. Il serait même judicieux de faire cette étude sur la céramique de composition BZT-50BCT présentée dans la chapitre 3 qui présente déjà les plus grandes valeurs de d_{33} . Enfin, le calcul de M pour le KNbO₃ caractérisé dans le chapitre 5 ne vaut que $9,7 \text{ pCN}^{-1}$, ce ne serait donc pas un matériau adéquate pour cette application.

TABLE 8.2 – Informations sur les mesures et simulations des fréquences d'antirésonance (f_a) et des déplacements normalisés du pavillon des *tonpilz* de BaTiO₃:Co et de Pz26.

Anneaux		Déplacement (m/V)	f_a (kHz)
BaTiO ₃ :Co	Mesure	$2,23 \cdot 10^{-8}$	21,66
	Simulation (commerciales)	$1,26 \cdot 10^{-8}$	22,17
	Simulation (ajustées)	$1,87 \cdot 10^{-8}$	22,17
Pz26	Mesure	$7,28 \cdot 10^{-8}$	20,55
	Simulation (commerciales)	$3,72 \cdot 10^{-8}$	20,12
	Simulation (ajustées)	-	-

Chapitre 9

Transducteur multi-éléments HF (30 MHz) pour l'imagerie médicale (KNbO₃)

Après la transduction pour les applications sous-marines, un transducteur haute - fréquence (30 MHz) pour l'imagerie médicale est aussi conçu en intégrant le matériau sans plomb KNbO₃. En effet, ce matériau n'a pas les propriétés adéquates pour une utilisation dans les *tonpilsz* mais il en a de bonnes pour les applications en imagerie médicale (avec des coefficients de couplage autour de 50%). Le monocristal KNbO₃, caractérisé dans le chapitre 5, est donc utilisé ici pour la fabrication d'un composite piézoélectrique de connectivité 1-3 haute-fréquence qui servira, à son tour, à la conception d'un réseau linéaire haute-fréquence. La fabrication de cette sonde échographique constituée de 128 éléments a été réalisée par la société Vermon.

Lorsqu'un transducteur mono-élément, présenté dans le chapitre 1, est focalisé grâce à une lentille ou à la forme directement incurvée du matériau piézoélectrique, des résolutions de quelques dizaines de micromètres au point focal peuvent être atteintes (pour des fréquences de plusieurs dizaines de MHz) mais la profondeur de champ est limitée et la résolution se détériore rapidement en dehors de la zone focale. Ces limitations peuvent être évitées en utilisant un ensemble d'éléments,

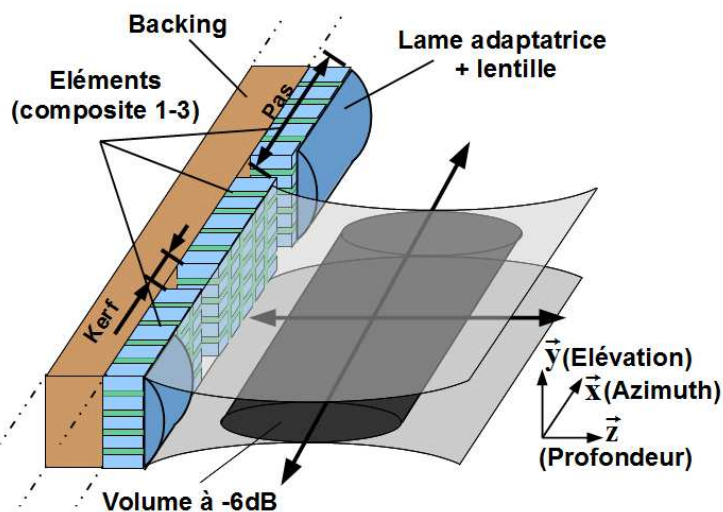


FIGURE 9.1 – Schéma illustrant le principe d'un réseau linéaire pour l'imagerie haute-fréquence

appelé « réseau », qui est représenté schématiquement sur la Figure 9.1. Généralement, un réseau linéaire est constitué de 128 ou 256 éléments alignés dans la direction \vec{x} , appelée « azimuth ». Au moment de l'émission, l'excitation électrique est envoyée successivement sur des groupes d'éléments qui sont, typiquement, au nombre de 16, 32 ou 64. Un décalage du choix des éléments constituant ce groupe d'émission permet à la zone focale (volume à -6dB) de se déplacer le long de l'azimuth. Des déphasages temporels entre les éléments d'un même groupe d'émission donne la possibilité à la zone focale de se mouvoir dans la direction \vec{z} , la profondeur. De cette manière, la tâche focale peut couvrir le plan (\vec{z}, \vec{x}) dit « plan focal ». Ce plan est formé des points de l'espace où les ondes acoustiques peuvent être focalisées. Ils dépendent donc du temps minimal de déphasage possible entre 2 éléments et de la configuration spatiale de la barrette linéaire (pas, kerf...). Ces 2 paramètres participent à la définition de la résolution du système échographique complet (sonde et électronique). La lentille permet une focalisation dans la direction \vec{y} (élévation) qui est donc fixe. Elle sert à optimiser la focalisation et donc, obtenir une meilleure qualité d'image. Le nombre d'éléments utilisés en réception dépend de la stratégie de formation de faisceau choisie. Il s'agit ici d'une introduction succincte des réseaux linéaires qui n'énumère pas toutes les possibilités de configurations existantes et les paramètres d'optimisation à respecter (espace inter-élément, par exemple) pour un bon fonctionnement. Tout cela est déjà détaillé dans de nombreux ouvrages et thèses [148, 149].

9.1 Sonde Haute-Fréquence

9.1.1 Dimensionnement

Composite 1-3 À partir du KNbO_3 caractérisé dans le chapitre 5, un composite piézo-électrique de connectivité 1-3 est fabriqué et en photo sur la Figure 9.2. Les conditions de découpage du matériau en utilisant la méthode « Dice anf Fill » [37] ont du être finement réglées car le matériau possède un module d'Young nettement plus élevé que les habituels monocristaux avec du plomb. Il y a donc un risque de brisure du monocristal. La fraction volumique finale, après imprégnation du polymère, est de 64% et son épaisseur vaut 69 μm .

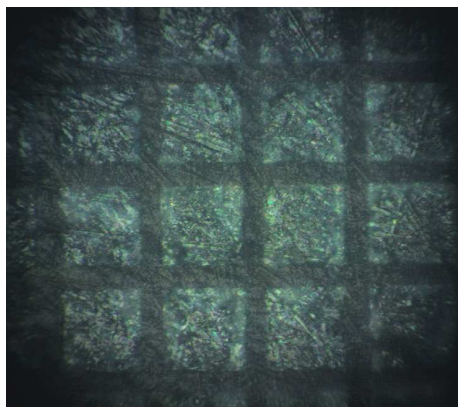


FIGURE 9.2 – Photographie du composite 1-3 de KNbO_3 .

Les détails exacts sur les dimensions du pas, et donc du *kerf*, ne sont pas donnés ici pour des raisons de confidentialité. Néanmoins, les rapports h/p critiques développés dans le chapitre 6 sont évités. Le composite sera ensuite re-découpé afin de constituer le réseau linéaire de 128 éléments.

L'impédance électrique est mesurée grâce à l'analyseur de spectre HP4395 avec son kit spécifique de mesure sur chaque élément. L'utilisation d'un schéma de circuit électrique équivalent (modèle KLM [27]) permet de simuler le comportement de l'élément autour de sa fréquence de résonance et donc, de déduire ses caractéristiques électriques, acoustiques et électromécaniques de son mode épaisseur, à partir de son impédance électrique mesurée.

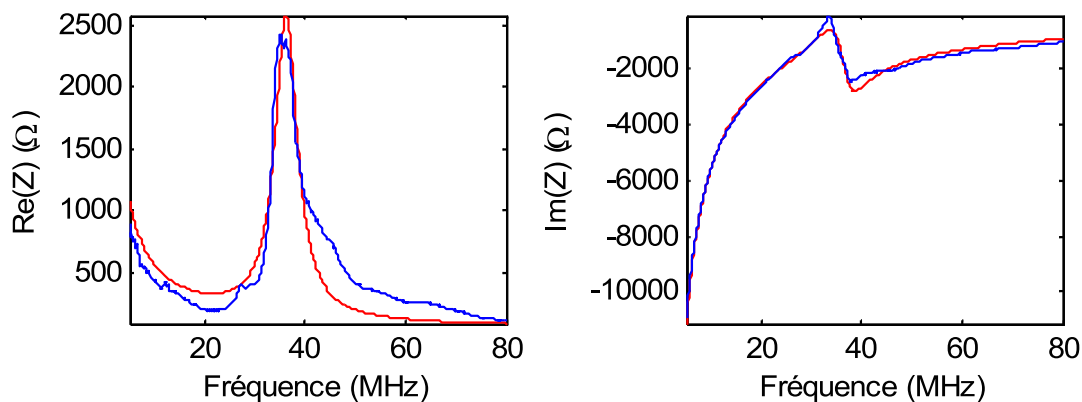


FIGURE 9.3 – Impédance électrique complexe du composite 1-3 à base de KNbO_3 mesurée dans l'air (courbe bleue : mesure ; courbe rouge : simulation)

La Figure 9.3 présente l'impédance électrique d'un élément centrée sur sa fréquence d'anti-résonance (environ 40 MHz). Le coefficient de couplage de cet élément a été déduit à 47% malgré une détérioration possible du cristal durant l'étape d'usinage pour de si petites tailles. En effet, avec notre base de données du chapitre 5 et le modèle d'homogénéisation de Smith *et al.* [35] pour prévoir les caractéristiques homogénéisées d'un composite 1-3, le k_t théorique pour une fraction volumique de phase piézoélectrique v_f de 0,64 vaut 53,6% soit une différence relative avec la mesure de 13%.

Sonde 128 éléments La fabrication de la sonde de 128 éléments suit les étapes décrites dans un travail similaire [150]. L'ouverture en élévation qui est, pour le cas d'une barrette linéaire, la hauteur d'un élément dans l'axe \vec{y} vaut 3 mm et l'espacement entre chaque élément (le pas) est de 100 μm . Enfin, une lentille acoustique focalisant dans le sens de l'élévation, à 8 mm sur l'axe \vec{z} , est ajoutée à la barrette linéaire. La sonde est ensuite intégrée dans un boîtier connecté à un câble coaxial de 2 m et se terminant par l'adaptateur permettant la connexion à un échographe. Une photographie de la sonde de 128 éléments est présentée sur la Figure 9.4.



FIGURE 9.4 – Photographie de la sonde complète de 128 éléments à base de KNbO_3

9.1.2 Propriétés finales

Mesure électrique L'impédance électrique de chacun des éléments du transducteur final a été mesurée (sans les câbles) pour évaluer son adaptation électrique avec les échographes. La Figure 9.5 montre la partie imaginaire et la partie réelle de l'impédance d'un élément qui a été mesurée à l'aide d'un analyseur de spectre Agilent E5100A. À 30 MHz, l'impédance complexe délivrée est égale à $144\Omega - i460\Omega$, ce qui est moins favorable qu'un élément à base de monocristal avec plomb déjà utilisé [150] qui avait une impédance mieux adaptée à $54\Omega - i18\Omega$ pour les systèmes échographiques. Cette haute valeur d'impédance est directement liée à la faible constante diélectrique du monocristal KNbO_3 .

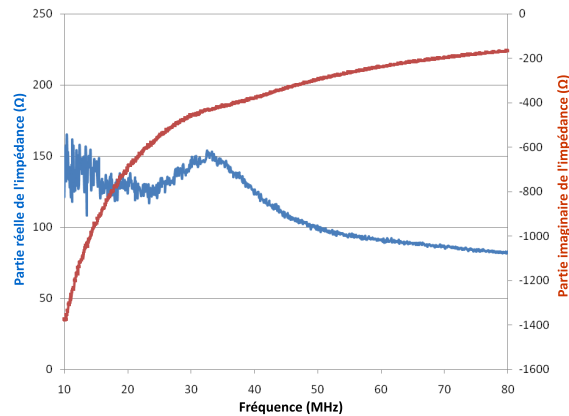


FIGURE 9.5 – Parties réelle (en bleu) et imaginaire (en rouge) de l'impédance électrique complexe d'un élément.

Caractérisation électroacoustique Comme détaillé dans la partie 1.2.1, les propriétés acoustiques de la sonde sont déterminées par la mesure de *pulse-écho*. Pour cela, un Émetteur/Récepteur Panametrics 5073R d'impédance électrique de 50Ω est utilisé pour exciter chaque élément, un par un, et le gain en réception est fixé à 20 dB. La mesure est effectuée dans l'eau avec un miroir acoustique plan en acier inoxydable positionné à 4 mm de la sonde. La Figure 9.6 présente l'écho mesuré sur un élément représentatif et son spectre correspondant. De ces mesures sont calculées une fréquence centrale de 27 MHz et une BP_{-6dB} de 48,5% avec son intervalle limite $[f_{\min}, f_{\max}]$ (défini dans la section 1.2.1) égal à [20,3 MHz, 32,3 MHz].

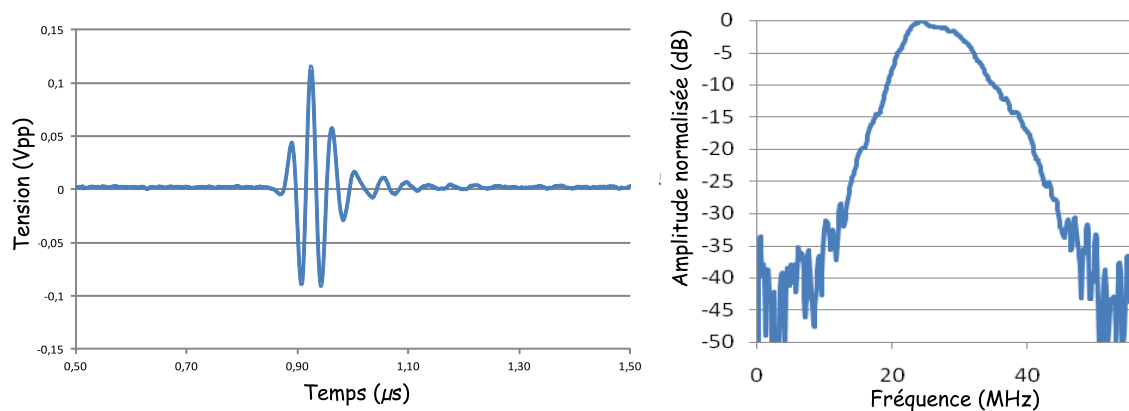


FIGURE 9.6 – Mesure représentative de la réponse électroacoustique temporelle et fréquentielle d'un élément de la sonde finale.

9.2 Écographe et images

9.2.1 Le système échographique ECODERM

La barrette linéaire est connectée à un système d'imagerie appelé ECODERM. Il s'agit d'un prototype fabriqué dans le laboratoire de l'U930 de l'INSERM de l'Université François-Rabelais de Tours. Cet appareil est constitué de 128 émetteurs/récepteurs et capable d'appliquer des retards de focalisation électronique avec une résolution de 500 ps. Les émetteurs délivrent une tension unipolaire d'amplitude -100 V. Les 128 récepteurs ont des pré-amplificateurs individuels avec un gain ajustable allant de 30 à 75 dB. Seize canaux de réception sont synchronisés à une fréquence réglable de 50 à 400 MHz avec une précision de 12 bits. Le système ECODERM a deux modes de fonctionnement dont un est utilisé pour l'imagerie clinique en temps réel (40 images par seconde) avec les méthodes conventionnelles de formation de faisceau et l'autre sert aux applications pour la recherche autorisant le contrôle des émissions et le nombre d'émetteurs et de récepteurs grâce au multiplexage. Le mode recherche fournit les données brutes qui peuvent être ensuite traitées avec les méthodes de formation de faisceau désirées.

Dans notre cas, le système ECODERM est utilisé avec 15 éléments en émission et 32 en réception. Une focalisation fixée à 8 mm est appliquée aux émetteurs avec la fréquence d'images de 40 Hz.

9.2.2 Les images

Pour comparer les performances de ce transducteur multi-éléments à base de matériau sans plomb, les images obtenues sont comparées avec celles réalisées par une sonde à base de PZT et de fréquence centrale 20 MHz, avec exactement les mêmes caractéristiques de fabrication (nombre d'éléments, *pitch*, *kerf*, etc.) et de formation de faisceau spécifiée dans le paragraphe précédent.

Au vu des fréquences centrales des deux sondes qui sont différentes, il est difficile de comparer dans l'absolu la résolution des images mais cela est principalement fait pour montrer le potentiel d'intégration d'un matériau sans plomb (KNbO_3) dans une sonde à hautes performances. La haute résolution de la sonde 30 MHz permet de distinguer clairement la paroi de l'artère sur la Figure 9.7.a). La profondeur de champs peut atteindre 6 mm avec cette sonde. De même, des images d'un nævus sont faites avec les deux sondes sur la Figure 9.8 et les contours sont très distincts dans les deux cas. La structure de la peau à des profondeurs autour de 3,5 mm est nettement plus détaillée avec la sonde à 30 MHz. La sensibilité, la résolution spatiale et la profondeur de champs de cette sonde HF prouve le potentiel des nouvelles générations de sondes sans plomb.

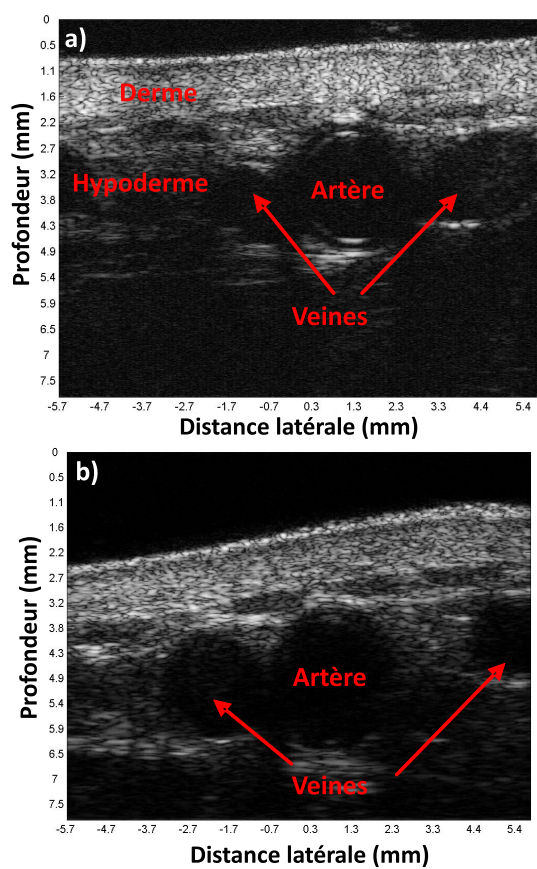


FIGURE 9.7 – Images de la peau *in vivo* d'un avant-bras humain acquises avec a) la sonde sans plomb de 30 MHz et b) la sonde de PZT de 20 MHz.

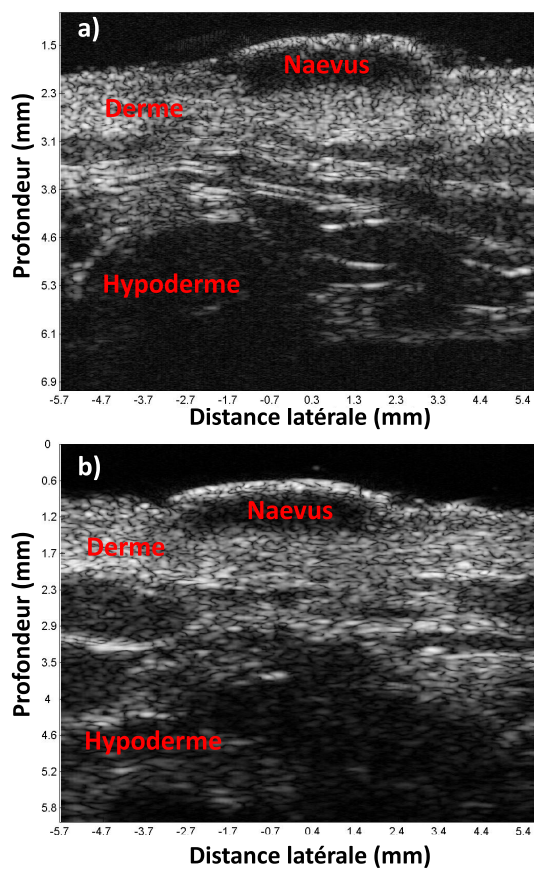


FIGURE 9.8 – Images d'un naevus *in vivo* d'un avant-bras humain acquises avec a) la sonde sans plomb de 30 MHz et b) la sonde de PZT de 20 MHz.

Conclusion générale

S'inscrivant dans le cadre du projet HYPERCAMPUS (ANR Mat&Pro), cette thèse a participé à son accomplissement qui passait par la démonstration du potentiel de certains matériaux piézoélectriques sans plomb pour des applications de transduction ultrasonore. Guidé par cette finalité, ce travail devait donc répondre à deux objectifs principaux : la sélection et l'optimisation de ces matériaux piézoélectriques sans plomb.

Suite à une recherche approfondie sur les compositions actuelles les plus prometteuses, la sélection du monocristal KNbO_3 pour la coupe spécifique d'un barreau à $(YXt) - 45^\circ$ a été choisie. Afin d'effectuer des simulations numériques de transducteurs intégrant ce matériau, la mesure de ses caractéristiques a été réalisée sur un échantillon commercial en utilisant une méthode de caractérisation piézoélectrique standard. Ainsi, certains résultats théoriques prévus par des homologues scientifiques ont pu être vérifiés expérimentalement et la première base de données complète de ce matériau et pour cette coupe spécifique a pu être élaborée. Ces paramètres élastiques, piézoélectriques et diélectriques sont donnés pour toutes les différentes écritures possibles des équations de la piézoélectricité. Il s'agit d'un exercice non trivial puisqu'il crée un problème de cohérence (ou consistence) entre toutes ces caractéristiques du matériau pouvant engendrer des erreurs de calculs lors de leur utilisation. Dans cet optique, un outil d'évaluation de cette consistance est réalisé et appliqué à notre propre base de données pour confirmer qu'elle se place parmi les plus consistantes rencontrées dans la littérature. Ce matériau sans plomb a des propriétés électromécaniques comparables à certains PZT voire supérieures avec un k_t de 60%.

Une étude complémentaire de stabilité de ses performances en fréquence a été effectuée jusqu'à 150 MHz sur les harmoniques de son mode épaisseur (présent à 10 MHz). Après cela et la confirmation que son k_t n'avait pas significativement diminué à 30 MHz, un composite piézoélectrique de connectivité 1-3 a été conçu avec ce dernier et intégré dans une sonde échographique de 30 MHz. Des images *in vivo* de la peau d'un avant-bras humain sont le résultat de ce travail en étroite collaboration avec la société Vermon.

En parallèle, la prise en main d'un nouvel outil dans le domaine de la caractérisation piézoélectrique, l'algorithme génétique (GA), a ouvert de nouvelles possibilités, notamment grâce à son indépendance à une situation initiale. Ainsi, un nouvel algorithme de caractérisation a été développé en combinant la stratégie d'optimisation du GA et les capacités de modélisation du calcul par éléments finis. Il est d'abord validé sur un composite piézoélectrique de connectivité 1-3 dont les caractéristiques des deux phases sont connues (référence

CONCLUSION

numérique) et qu'il doit retrouver. Il est ensuite appliqué à un composite réel *in situ* pour donner des caractéristiques plus précises sur les matériaux piézoélectrique et polymère le composant et réduisant donc l'écart entre son impédance électrique mesurée et simulée. Cela a également des conséquences directes sur la simulation de sa réponse électroacoustique qui correspond davantage à la mesure.

Finalement, cet outil permet aussi de caractériser des échantillons piézoélectriques de forme complexe présentant des modes légèrement couplés. Il est donc adapté pour des anneaux dont les modes épaisseur et radiaux sont couplés. Il s'agit d'anneaux de $\text{BaTiO}_3\text{:Co}$ prêts à être intégrés dans un transducteur ultrasonore pour SONAR, le *tonpilz*. Une fois ce transducteur fabriqué, les mesures de déplacement de son pavillon sont comparés avec des simulations faites par éléments finis utilisant d'une part, la base de données du fournisseur, et d'autre part les caractéristiques déterminées par le nouvel algorithme. Le résultat met en exergue l'importance de la re-caractérisation *in situ* du matériau par ce nouvel algorithme procurant une simulation nettement plus précise du transducteur.

Enfin, une activité a été menée sur l'optimisation de la structure des composites piézoélectriques de connectivité 1-3. En effet, aujourd'hui, la structure régulière est largement répandue car elle possède un rapport performance/coût très compétitif grâce à sa méthode de fabrication par « Dice and Fill », très populaire. Cependant, il est connu que des modes parasites, dits latéraux, présents dans ces structure nuisent à leur bon fonctionnement en dégradant, par exemple, leur bande passante pour des cas précis. Les techniques de fabrication pour la méthode « Dice and Fill » et l'existence de ces modes engendrent une limite fréquentielle au-delà de laquelle ce type de composite ne se comporte plus comme il le devrait. Pour supprimer cette limite de fonctionnement, une structure pseudo-périodique a été imaginée, et dont les caractéristiques spatiales sont réalisables avec la méthode de fabrication « par lamination ». Une étude numérique de cette nouvelle structure a permis, dans un premier temps, de confirmer l'atténuation des modes latéraux et donc, augmenter la gamme fréquentielle dans laquelle le composite peut œuvrer. Lorsque la bande passante à -6 dB d'un composite à structure régulière diminue à 5%, grâce à sa nouvelle structure pseudo-périodique, ce même composite maintient sa bande passante à 30% (dans l'eau). Grâce au savoir-faire de la société Thalès Research & Technology, ce composite pseudo-périodique imaginé a pu être fabriqué. Simultanément, des composites équivalents et à structure régulière ont été réalisés, ce qui a permis d'effectuer la validation expérimentale des performances de cette nouvelle structure par comparaison. La campagne de mesures qui avait pour objectif de mesurer les performances électroacoustiques des différentes structures lorsqu'elles évoluent vers des plus hautes fréquences s'est faite par amincissement des composites. Ainsi, l'effacement de cette limite fréquentielle de fonctionnement, propre aux structures régulières, qui était attendu théoriquement, est confirmé. Dépendant essentiellement de la configuration spatiale de la structure, la totalité de ce travail a été fait en s'appuyant sur des matériaux maîtrisés depuis longtemps qui sont la céramique à base de plomb Pz27 et la résine époxy E501 mais les résultats sont tout à fait transposables à n'importe quel matériau et *a fortiori* pour les matériaux piézoélectriques sans plomb.

Les différentes problématiques abordées durant ce travail de thèse dessinent de nouvelles perspectives pour, principalement, la caractérisation fonctionnelle des matériaux piézoélec-

CONCLUSION

triques. En effet le nouvel outil développé pour la caractérisation de formes complexes ou multi-phasiques peut être utilisé pour des études de détérioration des caractéristiques des matériaux par les méthodes d'usinage par exemple. Plus généralement, s'il est possible de mesurer l'observable utile (ici, l'impédance électrique) au bon fonctionnement de l'algorithme, l'évolution des propriétés du matériaux *in situ*, sous des conditions d'utilisation plus larges (thermique, pré-contrainte, etc.) pourront être étudiées.

Le monocristal KNbO_3 choisi est un matériau commercial mais les nouvelles avancées faites dans les laboratoires de recherche, sur les compositions sans plomb et les techniques de croissance des monocristaux laissent présager des matériaux sans plomb encore plus performants. De plus, une optimisation du choix de la coupe pourra être également réalisée. Ces innovations seront accompagnées par la nécessité d'élaboration des bases de données correspondantes et consistantes afin de quantifier ces progrès sur les propriétés électromécaniques avec précision.

Pour finir, les structures aléatoires pour les composites piézoélectriques de connectivité 1-3 sont une clé pour lever les limites fréquentielles de fonctionnement. La structure pseudo-périodique définie dans ce manuscrit est un cas simple mais sa complexification pourrait mériter une étude spécifique afin de voir si la diminution de la périodicité améliore encore les propriétés acoustiques.