Étude expérimentale de matériaux piézoélectriques sous contrainte mécanique

Après avoir effectué l'étude théorique de matériaux piézoélectriques sous contraintes électrique et mécanique, nous développons dans ce chapitre la mise en place d'un dispositif expérimental adapté à l'étude de la non-linéarité du déplacement électrique et des déformations de matériaux piézoélectriques sous contrainte mécanique.

Dans un premier temps, nous mettons en place le dispositif expérimental purement mécanique. Ainsi, nous mesurons l'évolution des déformations longitudinale et transversales dans le niobate de lithium jusqu'à la limite de rupture mécanique. Cette étude permet de mesurer la valeur de ce paramètre et d'estimer la limite élastique de ce matériau. De plus, nous mettons en avant les difficultés expérimentales dédiées à l'évaluation des paramètres électroacoustiques du niobate de lithium sous contrainte mécanique.

Dans un deuxième temps, nous mesurons l'évolution du déplacement électrique et des déformations longitudinale et transversales des Pz21 et 26 sous contrainte mécanique. Ces résultats sont mis en parallèle avec ceux du précédent chapitre et permettent de discuter les hypothèses de notre modèle.

I Étude du niobate de lithium sous contrainte mécanique

I.1 Dispositif expérimental

I.1.1 Echantillons

Les échantillons utilisés ont été fabriqués par l'entreprise Sino Risingtech Material (Beijing, Chine) sous forme de disques (électrodés en surface) de 6 mm d'épaisseur, 12 et 18 mm de diamètre. Les propriétés du second ordre du niobate de lithium nous intéressant sont rappelées :

Coefficient piézoélectrique - d ₃₁₁ (10 ⁻¹² C/N)	1
Coefficient piézoélectrique d ₃₃₃ (10 ⁻¹² C/N)	6
Densité volumique (kg/m ³)	4700
Coefficient élastique de souplesse s_{3333} (10 ⁻¹² m ² /N)	5.02
Coefficient élastique de souplesse $-s_{1133}$ (10 ⁻¹² m ² /N)	1.47
Coefficient de Poisson	0.29

Tableau VI.1 : Propriétés du niobate de lithium [Warner1967].

Rappelons que ces constantes sont estimées dans le cas d'un plan de coupe $\varphi = 0^\circ$ et $\theta = 0^\circ$.

Dans le but d'étudier les évolutions de paramètres électro-acoustiques de ce matériau en fonction de la contrainte mécanique, nous disposons de ces matériaux dans quatre plans de coupe dans lesquels il a été montré que les changements étaient les plus importants [Lematre2006-Lematre2011]. Les plans de coupe choisis sont les suivants :

- $\varphi = 90^\circ$ et $\theta = 0^\circ$,
- $\varphi = 90^\circ$ et $\theta = 45^\circ$,
- $\varphi = 90^\circ$ et $\theta = 54^\circ$,
- $\varphi = 0^\circ$ et $\theta = 45^\circ$.

Afin de dimensionner l'instrumentation nécessaire à la mesure des paramètres électroacoustiques du matériau, nous avons commencé par rechercher leurs limites élastique et à la

rupture. Dans un premier temps, nous avons testé l'échantillon de petit rayon et de plan de coupe $\varphi = 90^{\circ}$ et $\theta = 45^{\circ}$, car nous disposons du plan de coupe $\varphi = 90^{\circ}$ et $\theta = 54^{\circ}$ qui est très proche et aux propriétés plus connues. Par la suite, nous avons choisi le matériau avec le module d'Young le plus élevé, soit celui de plan de coupe $\varphi = 90^{\circ}$ et $\theta = 0^{\circ}$ qui correspond à une orientation cristallographique forte. Les deux exemplaires de ce plan de coupe (avec rayons différents) ont été utilisés. Les électrodes de ces 3 échantillons de niobate sont retirées, les surfaces polies et considérées planes avec une précision inférieure à 5 micromètres. Trois jauges de contraintes mesurant chacune les déformations longitudinale et transversales ont été collées sur chacun de ces matériaux pour évaluer l'évolution des déformations sous contrainte mécanique. Les surfaces latérales ont elles aussi polies de manière à assurer une meilleure adhérence avec les jauges de déformation. Rappelons que pour ce matériau, les déformations transverses sont égales, soit $S_{11} = S_{22}$.

I.1.2 Mise en place du dispositif expérimental

La première phase de test a été effectuée sur l'échantillon de plan de coupe $\varphi = 90^{\circ}$ et $\theta = 45^{\circ}$, de diamètre 12 mm. L'essai sur cet échantillon a montré que le dispositif expérimental nécessite une grande précision de planéité et que le plateau rotulé en mode libre n'est pas capable de s'adapter assez rapidement au défaut de planéité. La dispersion entre les 3 jauges était non négligeable et la rupture est apparue brutalement aux alentours de -60 MPa, ce qui oblige à considérer le niobate de lithium comme un matériau fragile.

Lors de l'essai sur l'échantillon de plan de coupe $\varphi = 90^{\circ}$, $\theta = 0^{\circ}$ et de même diamètre, nous avons choisi de bloquer le plateau rotulé sous compression en insérant 2 plateaux rotulés de diamètre égale à celui des échantillons. Ces résultats ont montré une meilleure cohérence et une faible dispersion entre les 3 jauges, mais a mis en avant le manque de souplesse du dispositif sous contrainte. La rupture de ce matériau a elle aussi été brutale et est apparue à -80 MPa, ce qui est en bon accord avec le fait que ce plan de coupe correspond à un plan fort du matériau. Pour compenser ce défaut de souplesse, nous avons choisi d'insérer des éléments souples en carton de faible épaisseur entre le plateau rotulé et l'échantillon afin de s'adapter rapidement et de combler les défauts de planéité. Le dispositif adapté à nos mesures est représenté sur la figure VI.1.

Chapitre VI : Étude expérimentale de matériaux piézoélectriques sous contrainte mécanique



Figure VI.1 : Dispositif expérimental de mesure de déformations longitudinale et transversales sous contrainte uniaxiale.

Sous l'action d'une machine de traction/compression, utilisée en mode de compression, et pilotée en force (logiciel Wave Maker-Runner) nous appliquons une force pouvant atteindre à -100 kN. Cette dernière envoie les informations de force et de déplacement de sa cellule de force au système d'acquisition qui traite les données. Afin d'assurer la planéité du plateau d'alignement, nous pressons ce dernier à -10 kN, et nous serrons les quatre vis de manière à éliminer tous défauts entre les deux plateaux. Le matériau est placé entre deux éléments mous en carton d'épaisseur 1.2 mm qui garantissent une planéité parfaite entre le plateau d'alignement et l'échantillon. L'influence du carton compressé est négligée. Nous collons ensuite sur l'échantillon 3 jauges de déformation mesurant chacune la déformation longitudinale et transversale. L'ensemble des jauges est relié à un pont de jauge, lui-même relié au système d'acquisition. Ce dernier traite les informations reçues et les renvoie à l'unité centrale. Le dispositif est considéré plan quand les 3 jauges de déformation mesurent des valeurs égales à 4% près sous une contrainte de -2 MPa.

I.1.3 Instrumentation

La machine de traction-compression de marque Instron (modèle 8801) est capable d'appliquer une force uniaxiale dans une gamme de ± 100 kN, avec une précision effective de $\pm 0.22\%$. Connaissant précisément la valeur de la force appliquée, le changement de surface de l'échantillon est négligeable [Lematre2011] et on calcule la contrainte appliquée :

$$\sigma = \frac{F}{S},$$
 (VI.1)

où S est la surface de l'échantillon. Cet outil est équipé d'un capteur LVDT qui mesure le déplacement de la cellule de force dans une gamme de ± 75 mm, avec une précision de $\pm 0.5\%$. Les informations de déplacement et de force sont envoyées en sortie de la machine sous forme de signaux de tensions inférieures à 7 V (avec une précision de $\pm 0.5\%$).

Le plateau d'alignement de marque Testwell est formé d'un plateau rotulé et d'un plateau fixe de diamètre de contact 56 mm, tous les deux traités 58 HRC. Le réglage des 4 vis permet de parfaire la planéité du plateau supérieur par rapport au plateau inférieur. Une fois bloqué sous -10 kN, la précision de la planéité est évaluée à $\pm 1 \,\mu m$.

Les jauges utilisées sont de marque Vishay (France, Chartres), de type rosette (C2A-06-062LT-120), précablées et isolées électriquement. Leurs dimensions totales sont de 5.33 mm × 4.17 mm, la largeur de grille est de 13 mm, les résistances de grille de 120 Ohm ($\pm 0.6\%$). Ces jauges mesurent la déformation longitudinale avec un facteur de gain de 1.95 ($\pm 0.5\%$) et une sensibilité transversale de 3 $\pm 0.2\%$, et la déformation transverse avec un facteur de gain de 2.01 ($\pm 0.2\%$) et une sensibilité transversale de 1.4 $\pm 0.2\%$.

Le pont de jauge est adapté au câblage de 8 voies de déformation et fait le lien entre les jauges et le système d'acquisition.

Le système d'acquisition utilisé est le Système 7000 de l'entreprise Vishay. Il possède deux cartes d'acquisition, l'une pouvant recevoir 8 mesures de déformation et l'autre 8 voies externes. Cet appareil code sur 24 bits et traite des tensions de ± 10 V avec une précision de 100μ V. Le logiciel qui lui est dédié (StrainSmart) permet d'équilibrer les ponts de jauges et de calibrer l'ensemble des voies.

I.2 Mesures expérimentales

I.2.1 Chargement mécanique

Afin de vérifier la planéité de notre système, un préchargement de -500 N, soit une contrainte de -2 MPa, est appliqué pour s'assurer de la cohérence des valeurs de déformations des 3 jauges de déformations et on vérifie que l'écart entre les 3 jauges de déformation est inférieur à 3%. Le cycle de contrainte est appliqué à une vitesse de -1 MPa/s, en compression comme en décompression. Nous effectuons des cycles de charge-décharge successifs avec un pas de -5 MPa ponctués par un temps de 60 secondes de compression constante pour observer la tenue du matériau et s'assurer qu'il n'est pas en déformation plastique.



Figure VI.2 : Cycle de chargement imposé au niobate de lithium.

L'application de la contrainte est cyclique et le niveau de force est appliqué relativement à l'état initial. Cet état étant l'état de préchargement initial (-2 MPa), la contrainte ne revient pas en mode complètement libre à chaque cycle, ce qui évite la perte de contact entre éléments du dispositif et n'altère pas la mesure. Dans un deuxième temps, nous vérifions la cohérence des données en évaluant la dispersion entre les données de chacune des jauges et on en effectue la moyenne. De plus, un filtre de Savitzky-Golay est appliqué pour lisser l'effet de l'inversion du sens de chargement dans l'évolution de la déformation.

I.2.2 Mesure des déformations

La figure VI.3 montre l'évolution de la déformation longitudinale lors de l'application des cycles de chargement/déchargement sur un échantillon de niobate de lithium de plan de coupe $\varphi = 90^{\circ}$, $\theta = 0^{\circ}$ et 18 mm de diamètre. L'écart quadratique entre la mesure des 3 jauges est inférieur à 3%. L'état initial (préchargé) est pris comme état de référence.



Figure VI.3 : Déformation longitudinale du niobate de lithium (plan de coupe $\varphi = 90^\circ$ et $\theta = 0^\circ$) en fonction de la contrainte mécanique au cours des cycles de chargement.

Cette figure montre que dans ce plan de coupe, le niobate de lithium se déforme quasi-linéairement au cours des cycles de compression-décompression. La rupture du matériau est observée aux alentours de -105 MPa, sans passer par une zone plastique. Aucun phénomène de fluage n'est observé, ce qui confirme que le matériau est dans sa zone élastique de déformation. Ainsi, le matériau est considéré comme un matériau fragile.

Cette figure permet une évaluation directe du coefficient de souplesse s_{3333} , soit :

$$s_{3333} = \frac{S_{33}}{\sigma_{33}}.$$
 (VI.2)

A faible contrainte (-2 MPa), nous obtenons un coefficient $s_{3333} = 4.99 \ 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$, soit un écart de 12% par rapport à la mesure effectuée par Warner [Warner1967]. Cette différence est en majeure partie attribuée à la géométrie de notre matériau (plus adaptée en mode barreau) ainsi qu'à nos incertitudes de mesure.

La figure VI.4 montre l'évolution de la déformation transversale lors de l'application des cycles de chargement/déchargement sur un échantillon de niobate de lithium de plan de coupe $\varphi = 90^{\circ}$, $\theta = 0^{\circ}$ et de diamètre 18 mm. L'écart entre la mesure des 3 jauges est inférieur à 3%.



Figure VI.4 : Déformation transversale du niobate de lithium (plan de coupe $\varphi = 90^\circ$ et $\theta = 0^\circ$) en fonction de la contrainte mécanique au cours des cycles de chargement.

Cette figure montre que dans ce plan de coupe, le niobate de lithium se déforme quasi-linéairement au cours des cycles de compression-décompression. La rupture est observée pour une même valeur de contrainte, ce qui confirme la rupture totale du matériau. Dans ce mode de déformation aussi, aucune zone plastique n'est observée. Cette courbe confirme la précédente, valide la bonne tenue du dispositif au cours de l'essai et le caractère fragile du matériau.

Cette figure permet une mesure direct du coefficient de souplesse s_{1133} , soit :

$$s_{1133} = \frac{S_{11}}{\sigma_{33}},$$
 (VI.2)

A faible contrainte, on obtient un coefficient $s_{1133} = -1.18 \ 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$ soit un écart de 5% par rapport à la mesure effectuée par Warner [Warner1967]. Cette différence est en majeure partie attribuée à la géométrie de notre matériau ainsi qu'aux incertitudes de mesure.

I.3 Conclusion

Dans cette partie, nous avons développé la mise en place du dispositif expérimental permettant la mesure de déformations longitudinale et transversales de matériau peu épais sous contrainte mécanique. La précision des valeurs mesurées sur le niobate de lithium permet de valider notre matériel et ses réglages avec une exactitude significative.

Au travers de ces mesures, nous avons montré que les courbes d'évolution des déformations longitudinale et transversales suivent une loi caractéristique d'une déformation élastique. La limite à la rupture se confondant avec la limite élastique, le caractère fragile du matériau est confirmé. Notons que cette propriété est classiquement observée dans les monocristaux. Cette limite a été mesurée à -105 MPa dans le plan de coupe le plus dur du matériau et ne peut donc être considérée comme valable dans tous les plans de coupe. En outre, cette limite est largement dépendante du matériau, de sa géométrie ou mode de fabrication et au mode. Ainsi, nous considérons dans nos modèles une limite légèrement supérieure de -110 MPa.

Cette mesure a permis de dimensionner les résultats numériques de différents articles publiés dans le domaine qui évaluent la non-linéarité d'une précontrainte mécanique allant jusqu'à 3 GPa [Lematre2006-Lematre2011].

II. Étude des Pz21 et Pz26 sous contrainte mécanique

Dans cette partie, le dispositif de mesure précédent est étendu à la caractérisation de matériaux piézoélectriques aux propriétés hystérétiques. Ainsi, nous développons le banc de mesure à l'évaluation du déplacement électrique sous contrainte mécanique dans le cas des Pz21 et 26.

II.1 Dispositif expérimental

II.1.1 Préparation du matériau

Dans cette partie, nous caractérisons 2 matériaux piézoélectriques fabriqués par la société Ferroperm (Danemark). Le choix de forme du matériau a été motivé par deux aspects :

- dès que le matériau est plus haut que large, on risque d'observer un phénomène de flambage,

- l'approximation de contrainte uniaxiale est considérée à partir d'une hauteur 3 fois supérieure à la largeur.

De manière à concilier ces deux éléments et avoir une déformation homogène, nous avons choisi des échantillons de forme cubique de 15 mm de côté. Ces matériaux sont polarisés dans la direction perpendiculaire à leurs surfaces électrodées, correspondant à la direction de compression.

	Pz21	Pz26
Constante diélectrique $\boldsymbol{\varepsilon}_{33}^{T}(\boldsymbol{\varepsilon}_{0})$	3800	1300
Constante diélectrique $\mathcal{E}_{33}(/\mathcal{E}_0)$	1980	700
Coefficient piézoélectrique - d ₃₁₁ (10 ⁻¹² C/N)	250	130
Coefficient piézoélectrique d ₃₃₃ (10 ⁻¹² C/N)	640	328
Densité volumique (kg/m ³)	7800	7700
Coefficient élastique de souplesse s_{3333} (10 ⁻¹² m ² /N)	18	19.6
Coefficient élastique de souplesse $-s_{1133}$ (10 ⁻¹² m ² /N)	6.85	7.05
Coefficient de Poisson	0.38	0.35

Tableau VI.2 : Propriétés des Pz21 et Pz26.

Ces deux céramiques PZT possèdent une structure Pérovskite de classe de symétrie transverse isotrope. De par leurs propriétés diélectriques et piézoélectriques, le Pz21 est classé dans la catégories des matériaux mous, alors que le Pz26 appartient à la catégorie des matériaux durs.

Ces matériaux étant de forme cubique, il est beaucoup plus aisé de coller les jauges de déformation sur les 4 faces des matériaux pour mesurer les déformations longitudinale et transversales. Ici aussi, les déformations transversales sont égales, soit $S_{11} = S_{22}$. La mesure des dimensions de ces matériaux a montré une précision de l'ordre de 3 micromètres.

II.1.2 Instrumentation

Parce que la planéité de ces matériaux électrodés est égale à celle du niobate de lithium poli, mais que les céramiques sont significativement plus souples que ce dernier, il n'est pas nécessaire d'insérer un élément aussi mou que le carton entre le plateau rotulé et l'échantillon. Pour effectuer la mesure du déplacement électrique, nous mesurons la quantité de charges qui migrant sur les surfaces électrodées de l'échantillon. Ainsi, nous insérons une électrode et un matériau isolant entre l'échantillon et le plateau rotulé. Différents auteurs utilisent des matériaux tels que l'alumine, qui possède une limite à la rupture de -2.2 GPa et une résistivité électrique de l'ordre de 10⁸ MOhm cm pour isoler électriquement l'échantillon. Ce matériau est de nature fragile, et un défaut de planéité de l'ordre de quelques microns suffit à le casser. Ainsi, de manière à avoir un matériau résistif avec une surface d'électrode suffisamment fine, nous avons choisi d'utiliser du PCB FR4 (de marque CIF). Ce matériau possède lui aussi une très haute résistivité électrique 8 10⁷ MOhm cm et une limite à la rupture de -415 MPa. Moins rigide que l'alumine, il présente l'avantage de rester en zone élastique très longtemps dans la gamme de contrainte dans laquelle nous travaillons et permet ainsi d'adapter la force de manière plane sur l'échantillon et de combler un éventuel défaut de planéité. Les essais effectués ont tout de même montré que le PCB possède une déformation plastique de l'ordre de 8 microns sous -280 MPa. C'est pourquoi, ces matériaux ont été changés pour chaque essai. La taille des électrodes est considérée égale à celle de l'échantillon. Notons que l'utilisation de ce matériau ne peut dépasser des niveaux de contraintes supérieurs à -350 MPa, au risque de rentrer en zone plastique. Le dispositif de mesure est représenté sur la figure VI.6.

Chapitre VI : Étude expérimentale de matériaux piézoélectriques sous contrainte mécanique



Figure VI.6 : Schéma du dispositif de mesure des déformations et du déplacement électrique d'un matériau piézoélectrique sous contrainte mécanique.

La mesure du déplacement électrique est évaluée en mesurant le flux de charge entre les deux électrodes. L'électrode inférieure étant reliée à la masse, le flux de charge est déterminé en mesurant la tension aux bornes du condensateur, relié d'un côté à l'électrode supérieure et de l'autre à la masse, soit :

$$\Delta Q = C V , \qquad (\text{VI.3})$$

où C est la capacité du condensateur aux bornes duquel la tension V est mesurée. Cette capacité est de 10 μ F. Par convention, la décharge est indiquée par un ΔQ négatif. L'état initial est pris comme référence.

La capacité statique d'un élément piézoélectrique se mesure comme :

$$C_0 = \frac{\varepsilon_{33} S}{d}, \qquad (\text{VI.4})$$

où *S* est la surface des électrodes et *d* l'épaisseur de l'échantillon. Ainsi, les capacités de nos échantillons de Pz21 et Pz26 sont respectivement de 2.6 10^{-10} F et 9.2 10^{-11} F, donc largement négligeable par rapport à la capacité de notre condensateur de mesure. La résistance du fil étant très faible, la constante de temps de décharge de l'échantillon dans la capacité est donc très faible.

Pour éviter tous phénomènes de décharge dans l'appareil de mesure, la tension aux bornes du condensateur est mesurée à l'aide d'un électromètre Keithley (6517b), qui possède une résistance interne de 200 T Ω . Ainsi, la capacité de mesure et la résistance étant toutes deux très grandes, la constante de temps de décharge de notre capacité est très largement supérieure au temps de mesure. On néglige donc tous phénomènes de décharge dans notre dispositif de mesure.

Le déplacement électrique dans l'échantillon est évalué en divisant la décharge par la surface des électrodes :

$$D = \frac{CV}{S}.$$
 (VI.5)

Les électrodes dépassant de moins d'un millimètre la taille de l'échantillon, nous considérons que les surfaces d'électrode sont égales aux surfaces métallisées des échantillons.

De manière à déterminer la polarisation initiale du matériau, nous effectuons un test sous contrainte maximum (au delà de la contrainte de saturation). Ainsi, la valeur de la polarisation initiale des échantillons de Pz21 est de 0.175 C/m^2 et de 0.21 C/m^2 pour les échantillons de Pz26. La valeur de la dépolarisation permet ensuite de quantifier la valeur de la polarisation en fonction de la contrainte mécanique.

II.1.3 Mode de chargement

Les Pz21 et 26 possédant un comportement hystérétique, leurs déformations sont différentes à chaque cycle de charge/décharge. Ainsi, le mode de chargement est uniquement composé d'une charge, suivie d'une décharge. Les seuils de contrainte de saturation et les vitesses de charge et décharge ont été déterminés précédemment sur des échantillons identiques. Ainsi, la vitesse de chargement a été choisie égale à 4 minutes pour 10 kN (relativement lente) pour laisser aux domaines le temps de s'équilibrer. La vitesse de décharge a été choisie égale à 3 min pour 10 kN, (légèrement supérieure) car la relaxe du matériau est naturellement plus rapide. Les contraintes de saturation ont été observées à -255 MPa (-57.5 kN) pour le Pz21 et -280 MPa (-64 kN) pour le Pz26. La figure VI.7 représente les cycles de charge et décharge des deux matériaux.



Figure VI.7 : Mode de charge et décharge du Pz21 (rouge) et du Pz26 (bleu).

Dans les deux cas, un préchargement de -2 MPa est effectué pour contrôler la planéité du dispositif via les valeurs indiquées par les jauges de déformation.

II.2 Étude du Pz21 sous contrainte mécanique

II.2.1 Mesure du déplacement électrique et évaluation du coefficient piézoélectrique d_{333} sous contrainte mécanique

La figure VI.8 représente l'évolution de la contrainte mécanique en fonction du déplacement électrique dans un échantillon de Pz21, à champ électrique nul.



Figure VI.8 : Mesure du déplacement électrique en fonction de la contrainte mécanique à champ électrique nul dans un Pz21.

Initialement, le matériau possède une polarisation assez faible $P_0 = 0.175 \text{ C/m}^2$. Nous observons une dépolarisation rapide jusque -70 MPa, puis un ralentissement assez franc pendant lequel la vitesse de dépolarisation devient de plus en plus constante en se rapprochant de la contrainte de saturation $\sigma_{sat} = -255 \text{ MPa}$. Le déplacement électrique à la saturation est alors égale à $D_{sat} = 0.003 \text{ C/m}^2$. Lors de la relaxation de la contrainte, la repolarisation est d'abord très faible, puis augmente légèrement près de -75 MPa jusqu'à une valeur de polarisation résiduelle égale à $P^{res} = 0.028 \text{ C/m}^2$. Cette repolarisation est évaluée à $D_{rep} = 14.4\%$. Ces observations sont en bon accord avec le caractère mou du Pz21.

Cette figure ne révèle aucun problème de mesure et montre une très bonne cohérence avec les résultats expérimentaux étudiés dans le chapitre V.

De la figure précédente, nous extrayons l'évolution du coefficient piézoélectrique d_{333} sous contrainte mécanique, en l'absence de champ électrique (figure VI.9).



Figure VI.9 : Évolution du coefficient piézoélectrique d_{333} en fonction de la contrainte mécanique à champ électrique nul dans un Pz21.

Cette figure montre que la valeur initiale du coefficient piézoélectrique d_{333} est de 750 10^{-12} C/m², soit un écart de 14% par rapport à la valeur indiquée par le fabriquant. Notons que les données du constructeur sont effectuées 24h après la polarisation de l'échantillon sur des matériaux de forme barreau avec une précision de 10% à très faible niveau de contrainte mécanique. Notre valeur est mesurée à une valeur de précontrainte de -2 MPa avec une instrumentation dédiée à l'application de niveaux de contrainte plus élevés sur des cubes. De plus, d'autres auteurs [Hwang1995-Chen1998-Fan1999] ont eux aussi trouvés de grands écarts de mesures (allant jusqu'à 100%) des coefficients par cette méthode. Par ailleurs, la mesure de ce coefficient est fortement dépendante du ratio hauteur/largeur du matériau [Barzegar2002-Barzegar2004], les écarts pouvant être de 30%. Ainsi, la valeur mesurée reste proche de la valeur théorique et conforte la validité du dispositif expérimental.

Dès le début de la compression, le coefficient piézoélectrique augmente rapidement, avec un maximum au niveau de la contrainte coercitive $\sigma_c = -50$ MPa. La valeur du coefficient est alors 2.7 fois plus importante que la valeur initiale. Une fois cette contrainte franchie, le coefficient diminue rapidement, puis de plus en plus lentement en se rapprochant de la contrainte de saturation. A la contrainte de saturation, le coefficient est très faible (17.5 fois plus petit que le coefficient initial). Lors de la relaxation de la contrainte, le coefficient croît d'abord très lentement, puis beaucoup plus rapidement près de la contrainte coercitive. La valeur finale du coefficient est deux fois plus petite que la valeur initiale.

L'ensemble de ces considérations est en bon accord avec le caractère mou de la céramique.

II.2.2 Mesure de la déformation longitudinale et évaluation du coefficient de souplesse s_{3333} associé

La figure VI.10 représente l'évolution de la contrainte mécanique en fonction de la déformation longitudinale dans un échantillon de Pz21, à champ électrique nul.



Figure VI.10 : Mesure de la déformation longitudinale en fonction de la contrainte mécanique à champ électrique nul dans un Pz21.

Nous observons une déformation rapide jusque -70 MPa, puis un ralentissement de plus en plus important en se rapprochant de la contrainte de saturation où la vitesse de déformation est constante. La déformée est alors égale à $S_{33}^{sat} = 0.59\%$. Lors de la relaxation de la contrainte, la vitesse de déformation est d'abord faible puis augmente légèrement à partir de -70 MPa. Une fois le mode libre atteint, la déformation résiduelle longitudinale est de $S_{33}^{res} = 0.32\%$. Ainsi, cette déformée correspond à 54.6% de la déformation de saturation. Notons que la non-linéarité du relâchement est faible, en accord avec la faible repolarisation du matériau. Ici aussi, cette évolution est en bon accord avec le caractère mou du Pz21.

De nouveau, cette figure ne révèle aucun problème de mesure et montre une très bonne cohérence avec les résultats expérimentaux étudiés dans le chapitre V.

De la figure précédente, on extrait l'évolution du coefficient de souplesse s_{3333} associé sous contrainte mécanique, en l'absence de champ électrique (figure VI.11).



Figure VI.11 : Évolution du coefficient de souplesse s_{3333} en fonction de la contrainte mécanique à champ électrique nul dans un Pz21.

Cette figure montre que la valeur initiale du coefficient s_{3333} est de 2.36 10⁻¹¹ m²/N, soit un écart de 31% par rapport à la valeur indiquée par le fabriquant. Notons que cette valeur est calculée dans des conditions de polarisations et des géométries différentes des nôtres, et que l'entreprise indique une précision de 5%. Ici aussi, le préchargement de -2 MPa ainsi que le dimensionnement de l'instrumentation et la géométrie de notre échantillon ne permettent pas de retrouver une valeur du coefficient de souplesse très précise. Cependant, d'autres auteurs [Hwang1995-Chen1998-Fan1999] ont eux aussi trouvé de grands écarts de mesures des coefficients de souplesse lors de leurs mesures de comportement hystérétiques. Ainsi, la précision de notre mesure de ce coefficient est peu élevée, mais révèle que le matériau évolue rapidement à faible contrainte. Par ailleurs, nous sommes assez près de la valeur théorique pour considérer le bon fonctionnement de notre dispositif.

Le coefficient élastique augmente d'abord très rapidement en début de chargement, puis moins rapidement jusqu'à la contrainte coercitive. Notons que cette valeur de contrainte est la même que lors de l'évolution du coefficient piézoélectrique, ce qui est une nouvelle validation de l'hypothèse de base de notre modèle. La valeur du coefficient est alors 2.5 fois plus importante que la valeur initiale. Une fois cette contrainte franchie, le coefficient diminue rapidement, puis de plus en plus lentement en se rapprochant de la contrainte de saturation. A ce niveau, le coefficient est faible (2.7 fois plus petit que le coefficient initial). A cet endroit, il apparaît une légère non-linéarité dans la mesure. Ce défaut n'était pas visible dans l'évolution de la déformation, car les niveaux de déformations évoluaient peu, mais il traduit une discontinuité lors de l'inversion de sens de la contrainte qui semble engendrer une fluctuation dans l'évolution de la déformation.

Lors de la relaxation de la contrainte, le coefficient croît d'abord très lentement, puis beaucoup plus rapidement en se rapprochant de la contrainte coercitive. La valeur finale du coefficient à l'état libre est proche de la valeur initiale, en accord avec ce qui a été observé sur les matériaux mous étudiés au chapitre V.

II.2.3 Mesure de la déformation transversale et évaluation du coefficient de souplesse s_{1133} associé

La figure VI.12 représente l'évolution de la contrainte mécanique en fonction de la déformation transversale dans un échantillon de Pz21, à champ électrique nul.



Figure VI.12 : Mesure de la déformation transversale en fonction de la contrainte mécanique à champ électrique nul dans un Pz21.

Nous observons une déformation rapide jusque -70 MPa, bien que légèrement plus lente que dans le cas de la déformée longitudinale, puis un ralentissement après lequel la déformée devient rapidement constante jusqu'à la contrainte de saturation. La déformée est alors égale à $S_{11}^{sat} = 0.201\%$. Lors de la relaxation de la contrainte, la vitesse de déformation est d'abord faible puis augmente près de -70 MPa. En fin de cycle, la déformation transversale résiduelle est de $S_{11}^{res} = 0.122\%$. Le phénomène de relâchement est donc relativement faible, en accord avec la faible repolarisation du matériau. Ainsi, la déformation résiduelle correspond à 60.6% de la déformation de saturation. Il apparaît que la déformation résiduelle est relativement plus importante

transversalement que longitudinalement, ce qui contredit l'hypothèse de déformation rémanente isochore.

Cette figure ne révèle aucun problème de mesure et reste en accord avec les observations faites au chapitre V.

De la figure précédente, nous extrayons l'évolution du coefficient de souplesse associé s_{1133} sous contrainte mécanique, en l'absence de champ électrique (figure VI.13).



Figure VI.13 : Évolution du coefficient de souplesse s_{1133} en fonction de la contrainte mécanique à champ électrique nul dans un Pz21.

Cette figure montre que la valeur initiale du coefficient s_{1133} est de 4.8 10^{-12} m²/N, soit un écart de 29% par rapport à la valeur indiquée par le fabriquant. Comme dans le cas du coefficient s_{3333} , la précision de notre mesure de ce coefficient est dégradée par le préchargement, le dimensionnement de notre instrumentation et la géométrie de notre matériau. Ainsi, cet écart montre que le coefficient de souplesse évolue dès le début, comme observé dans les autres matériaux polydomaines. Cependant, nous sommes assez près de la valeur théorique pour considérer le bon fonctionnement de notre dispositif.

Raisonnant en valeur absolue, le coefficient élastique augmente d'abord rapidement jusqu'au même niveau de contrainte coercitive. La valeur du coefficient est alors 4.5 fois plus importante que la valeur initiale. Ainsi, la valeur du coefficient s_{1133} évolue bien plus que le coefficient s_{3333} . Au-delà de cette contrainte, le coefficient diminue rapidement, puis de plus en plus lentement en se rapprochant de la contrainte de saturation. Le coefficient est alors faible (2 fois plus petit que le

coefficient initial), mais a moins diminué que le coefficient s_{3333} . On note qu'à cet endroit, la nonlinéarité de mesure est aussi visible.

Lors de la relaxation de la contrainte, le coefficient croît d'abord lentement, puis plus rapidement près de la contrainte coercitive. La valeur finale du coefficient à l'état libre est proche de la valeur initiale comme dans le cas longitudinal, en accord avec ce qui a été observé sur les matériaux mous étudiés au chapitre V.

II.2.4 Évolution du coefficient de Poisson sous contrainte mécanique

Des mesures de déformations longitudinale et transversale, nous déduisons la valeur du coefficient de Poisson en faisant le rapport des deux modes de déformation en fonction de la contrainte mécanique appliquée, à champ électrique nul.



Figure VI.14 : Évolution du coefficient de Poisson en fonction de la contrainte mécanique à champ électrique nul dans un Pz21.

Cette figure montre clairement que le coefficient de Poisson évolue significativement sous compression mécanique. Ceci est en accord avec les différences entre maximums de coefficient de souplesse observé. Dans le cas de ce matériau, le coefficient de Poisson est d'abord très faible, ce qui implique que le matériau se déforme beaucoup plus longitudinalement que transversalement. La valeur indiquée par le constructeur est significativement plus élevée, mais ici aussi, cette dernière se mesure sur des échantillons de géométrie différente en mesurant les coefficients de souplesse précédents. Dans notre cas, l'évaluation de ce coefficient est très sensible à la mesure de chacune

des déformations et les erreurs liées à la géométrie et au dimensionnement du dispositif occasionne un écart significatif. De plus, le fabriquant ne fournit aucun élément quant à la précision de sa mesure. Cependant, la valeur du coefficient augmente rapidement jusqu'à la contrainte coercitive et ralentit ensuite vers une valeur stable de 0.35, très proche de la valeur indiquée par le fabriquant. Lors du relâchement, ce coefficient augmente d'abord lentement, puis plus rapidement en fin de décharge.

Ainsi, il apparaît que le coefficient de Poisson ne peut être considéré constant au cours du cycle de charge et décharge. De plus, son évolution est proche de celle des autres coefficients du matériau, avec un point d'inflexion près de la contrainte coercitive, et une évolution faible près de la saturation. Ainsi, la non-linéarité de son évolution semble clairement liée à l'évolution des domaines du matériau, donc à l'évolution de sa déformation rémanente. Ainsi, l'approximation de déformation rémanente isochore ne peut être considérée dans le cas de ce matériau et nous pouvons supposer une loi d'évolution analogue à celle proposée dans la description des phénomènes rémanents.

II.3 Mesure du déplacement électrique et des déformations du Pz26 sous contrainte mécanique

II.3.1 Mesure du déplacement électrique et évaluation du coefficient piézoélectrique d_{333} sous contrainte mécanique

La figure VI.15 représente l'évolution de la contrainte mécanique en fonction du déplacement électrique dans un échantillon de Pz26, à champ électrique nul.



Figure VI.15 : Mesure du déplacement électrique en fonction de la contrainte mécanique à champ électrique nul dans un Pz26.

Initialement, le matériau possède une polarisation plus importante que celle du Pz21, mais peu élevée, soit $P^0 = 0.21 \text{ C/m}^2$. En comparaison du précédent échantillon, on observe une dépolarisation plus rapide jusque -150 MPa, puis un ralentissement plus lent au bout duquel la dépolarisation devient constante près de la contrainte de saturation évaluée à $\sigma_{sat} = -280 \text{ MPa}$. Le déplacement électrique est alors $D_{sat} = 0.007 \text{ C/m}^2$. Lors de la relaxation de la contrainte, la repolarisation est significativement plus rapide et s'accélère près de -120 MPa jusqu'à une valeur de polarisation résiduelle $P^{res} = 0.061 \text{ C/m}^2$. Cette repolarisation est plus importante que celle du Pz21 et évaluée à $D_{rep} = 26.7\%$. Ces observations sont en bon accord avec le caractère dur du Pz26.

Une fois de plus, cette figure ne révèle aucun problème de mesure et montre une très bonne cohérence avec les résultats expérimentaux étudiés dans le chapitre V. Cette deuxième mesure valide notre dispositif expérimental de suivi du déplacement électrique en fonction de la contrainte mécanique.

De la figure précédente, nous extrayons l'évolution du coefficient piézoélectrique d_{333} sous contrainte mécanique, en l'absence de champ électrique (figure VI.16).



Figure VI.16 : Évolution du coefficient piézoélectrique d_{333} en fonction de la contrainte mécanique à champ électrique nul dans un Pz26.

Cette figure montre que la valeur initiale du coefficient piézoélectrique est de 260 10^{-12} C/m², soit un écart de 20% par rapport à la valeur indiquée par le fabriquant, donc tout à fait acceptable aux vues de la configuration de notre dispositif.

Dès le début de la compression, le coefficient piézoélectrique augmente rapidement, avec un maximum au niveau de la contrainte coercitive $\sigma_c = -140 \text{ MPa}$. La valeur du coefficient piézoélectrique est alors 5 fois plus importante que la valeur initiale. Une fois cette contrainte franchie, le coefficient diminue rapidement avec une vitesse qui baisse lentement en se rapprochant de la contrainte de saturation. A ce niveau, le coefficient est faible (1.8 fois plus petit que le coefficient initial), mais proportionnellement plus élevé que dans le cas du Pz21. Lors de la relaxation de la contrainte, le coefficient croît d'abord très lentement, puis beaucoup plus rapidement près de la contrainte coercitive. La valeur finale du coefficient est deux fois plus élevée que la valeur initiale.

L'ensemble de ces considérations est en bon accord avec le caractère dur de la céramique.

II.3.2 Mesure de la déformation longitudinale et évaluation du coefficient de souplesse s_{3333} associé

La figure VI.17 représente l'évolution de la contrainte mécanique en fonction de la déformation longitudinale dans un échantillon de Pz26, à champ électrique nul.



Figure VI.17 : Mesure de la déformation longitudinale en fonction de la contrainte mécanique à champ électrique nul dans un Pz26.

Nous observons une déformation rapide jusque -140 MPa, puis un lent ralentissement après lequel la la vitesse de déformation devient constante en se rapprochant de la contrainte de saturation. La déformée est alors égale à $S_{33}^{sat} = 0.82\%$. Lors de la relaxation de la contrainte, la déformation est relativement rapide (en accord avec la repolarisation relativement rapide) puis augmente près de - 100 MPa jusqu'à une valeur de déformation résiduelle $S_{33}^{res} = 0.48\%$. Ainsi, la déformée résiduelle correspond à 58.5% de la déformation de saturation. La non-linéarité du relâchement est légèrement plus importante que dans le cas du Pz21, en accord avec la repolarisation plus importante du matériau. Ici aussi, cette évolution est en bon accord avec les résultats expérimentaux observés dans le chapitre V, et confirme le caractère dur du Pz26.

De la figure précédente, nous extrayons l'évolution du coefficient de souplesse associé s_{3333} sous contrainte mécanique, en l'absence de champ électrique (figure VI.18).



Figure VI.18 : Évolution du coefficient de souplesse s_{3333} en fonction de la contrainte mécanique à champ électrique nul dans un Pz26.

Cette figure montre que la valeur initiale du coefficient s_{3333} est de 1.6 10⁻¹¹ m²/N, soit un écart de 18% par rapport à la valeur indiquée par le fabriquant acceptable dans notre configuration. Dans le cas de ce matériau, l'augmentation du coefficient est moins rapide et permet donc une mesure plus précise du coefficient. Le coefficient élastique augmente jusqu'à la contrainte coercitive évaluée lors de l'évolution du déplacement électrique. La valeur du coefficient est alors 3.1 fois plus importante que la valeur initiale. Une fois cette contrainte franchie, le coefficient diminue rapidement, puis de plus en plus lentement en se rapprochant de la contrainte de saturation. Le coefficient est alors faible (1.6 fois plus petit que le coefficient initial). La non-linéarité due à l'inversion de la charge se retrouve à nouveau.

Lors de la relaxation de la contrainte, le coefficient croît d'abord lentement, puis beaucoup plus rapidement près de la contrainte coercitive. La valeur finale du coefficient à l'état libre est 1.8 fois plus élevée que la valeur initiale, en accord avec ce qui a été observé sur les matériaux durs étudiés au chapitre V.

II.3.3 Mesure de la déformation transversale et évaluation du coefficient de souplesse s_{1133} associé

La figure VI.19 représente l'évolution de la contrainte mécanique en fonction de la déformation transversale dans un échantillon de Pz26, à champ électrique nul.



Figure VI.19 : Mesure de la déformation transversale en fonction de la contrainte mécanique à champ électrique nul dans un Pz26.

Nous observons une déformation rapide jusque -130 MPa, bien que légèrement plus lente que dans le cas de la déformée longitudinale, puis un ralentissement après lequel la déformée devient constante près de la contrainte de saturation. La déformée est alors égale à $S_{11}^{sat} = 0.297\%$. Lors de la relaxation de la contrainte, la déformation est d'abord faible puis augmente près de -140 MPa jusqu'à une valeur de déformation résiduelle $S_{11}^{res} = 0.19\%$. Ici aussi, la non-linéarité de relâchement est faible, en accord avec la faible repolarisation du matériau, mais plus importante que dans le cas du Pz21. Ainsi, la déformée résiduelle correspond à 63.9% de la déformation de saturation. Il apparaît donc que la déformation résiduelle est relativement plus importante transversalement que longitudinalement, ce qui contredit ici aussi l'hypothèse de déformation isochore.

De la figure précédente, nous extrayons l'évolution du coefficient de souplesse associé s_{1133} sous contrainte mécanique, en l'absence de champ électrique (figure VI.20).



Figure VI.20 : Évolution du coefficient de souplesse s_{1133} en fonction de la contrainte mécanique à champ électrique nul dans un Pz26.

Cette figure montre que la valeur initiale du coefficient s_{1133} est de 3.6 10^{-12} m²/N, soit un écart de 48% par rapport à la valeur indiquée par le fabriquant, mais acceptable dans notre configuration. Par ailleurs, cet écart montre que le coefficient de souplesse évolue dès le début, comme observé dans les autres matériaux étudiés. Cependant, nous sommes assez près de la valeur théorique pour considérer le bon fonctionnement de notre dispositif.

Raisonnant en valeur absolue, le coefficient élastique augmente rapidement jusqu'au même niveau de contrainte coercitive évaluée lors de l'évolution du déplacement électrique. La valeur du coefficient est alors 5.5 fois plus importante que la valeur initiale. Ainsi, la valeur du coefficient s_{1133} évolue légèrement plus que le coefficient s_{3333} . Une fois cette contrainte franchie, le coefficient diminue rapidement, puis de plus en plus lentement en se rapprochant de la contrainte de saturation. Le coefficient est alors faible et proche du coefficient initial, alors qu'il était significativement inférieur dans le cas du coefficient s_{3333} . Notons qu'à cet endroit, la non-linéarité de mesure est aussi visible.

Lors de la relaxation de la contrainte, le coefficient croît d'abord lentement, puis plus rapidement près de la contrainte coercitive. Comme dans le cas longitudinal, la valeur finale du coefficient à l'état libre est 3.8 fois plus élevée que la valeur initiale, en accord avec ce qui a été observé sur les matériaux durs étudiés au chapitre V.

II.3.4 Évolution du coefficient de Poisson sous contrainte mécanique

Des mesures de déformation longitudinale et transversale, nous déduisons la valeur du coefficient de Poisson en faisant le rapport des deux modes de déformations en fonction de la contrainte mécanique appliquée, à champ électrique nul.



Figure VI.21 : Évolution du coefficient de Poisson en fonction de la contrainte mécanique à champ électrique nul dans un Pz26

Cette figure montre clairement que le coefficient de Poisson évolue significativement sous contrainte mécanique, en accord avec les différences d'évolutions observées entre les deux coefficients de souplesse. Dans le cas de ce matériau, le coefficient de Poisson est d'abord faible, ce qui implique que le matériau se déforme d'avantage longitudinalement que transversalement. Il augmente ensuite très rapidement, puis plus lentement jusqu'à la contrainte coercitive et ralentit ensuite franchement vers une valeur stable de 0.362 au niveau de la contrainte de saturation. Lors du relâchement, ce coefficient augmente d'abord lentement, puis plus rapidement en fin de décharge.

Ainsi, comme dans le cas du Pz21, nous observons que le coefficient de Poisson évolue peu au-delà de la contrainte coercitive, mais ne peut être considéré constant en dessous de cette limite. Ici aussi, la non-linéarité de l'évolution de ce coefficient semble liée à l'évolution des domaines du matériau, donc à sa déformation rémanente. Ainsi, l'approximation de déformation rémanente isochore ne peut être considérée dans le cas de ces matériaux, ce qui confirme la nouvelle hypothèse d'une évolution du coefficient de Poisson liée aux mouvements de domaines.

II.4 Conclusion

Dans cette partie, nous avons montré la précision de notre dispositif de mesure des déformations sous contrainte mécanique. L'ensemble des évolutions de deux modes de déformations a été correctement évalué. Les valeurs des coefficients de chacun des matériaux ont été retrouvées avec une précision moyenne de 30%. Les deux matériaux étudiés se déformant très vite en début de cycle, on attribue cette imprécision à la zone de préchargement de -2 MPa qui nous empêche de mesurer ces valeurs à très faible contrainte, au dimensionnement de la machine de force qui est dédiée à l'application de plus grosse force, mais aussi à la géométrie (rapport hauteur/largeur) des échantillons qui n'est pas idéale pour la mesure de ces coefficients. De plus, nous avons observé de légères non-linéarités dans les vitesses de déformations au moment du changement de mode entre charge et décharge, ce qui engendre des imprécisions près de la contrainte de saturation. Par ailleurs, les évolutions des deux matériaux sont cohérentes avec la théorie et les observations faites sur les autres matériaux dans le chapitre V.

Le bon accord des évolutions des déplacements électriques avec la théorie valide notre dispositif d'évaluation du déplacement électrique sous contrainte mécanique. La précision sur la mesure du coefficient piézoélectrique est proche de 17%. Ces résultats ont permis de valider la mesure de déplacement électrique et le dispositif qui lui est dédié. L'ensemble de ces résultats est en bon accord avec les remarques effectuées au chapitre V sur les autres matériaux étudiés.

Cependant, la comparaison des évolutions des coefficients de souplesse pour les deux matériaux a montré que les paramètres de chacun des matériaux évoluent de la même manière, mais pas dans les même proportions. Cette observation a été confirmée par l'étude de l'évolution du coefficient de Poisson des deux matériaux. Ainsi, il apparaît que ce coefficient peut-être considéré constant audelà de la contrainte coercitive, donc quand les domaines sont bloqués et la polarisation très faible. Mais inversement, le coefficient de Poisson évolue très vite avant la contrainte coercitive en compression et après cette contrainte en relâchement. Cette non-linéarité est donc attribuée aux mouvements de domaines, ce qui invalide l'hypothèse de déformation rémanente isochore sous contrainte mécanique faite par d'autres auteurs et admise dans notre modèle.

Ainsi, nous avons montré au chapitre V que la déformation rémanente piézoélectrique peut-être considérée isochore, mais que l'hypothèse de déformation rémanente isochore sous contrainte mécanique était plus discutable. Nos mesures confirment cette remarque et nous permettent de supposer une évolution de la déformation rémanente ferroélastique non isochore. Par ailleurs Cao et Evans [Cao1993] ont montré que le coefficient de Poisson de matériaux antiferroélectriques sous contrainte mécanique varie significativement sous contrainte mécanique, ce qui confirme cette nouvelle hypothèse. De plus, nos observations montrent une grande analogie entre l'évolution du

coefficient de Poisson et les mouvements de domaines. Ainsi, nous pouvons supposer une loi d'évolution de la déformation rémanente ferroélastique transversale propre et analogue à celles des autres modes de déformation rémanente. Cette constatation permet donc de corriger un élément fondamental de notre modèle.

Conclusion

Dans cette partie, nous avons développé la mise en place du dispositif expérimental permettant la mesure des déformations longitudinale, transversales et du déplacement électrique sous contrainte mécanique. La précision des valeurs mesurées sur le niobate de lithium et les deux PZT permet de valider notre matériel et ses réglages avec une exactitude significative.

Nous avons montré que les courbes d'évolution des déformations longitudinale et transversales du niobate de lithium suivent une loi caractéristique d'une déformation élastique d'un matériau fragile, avec une limite à la rupture se confondant avec la limite élastique mesurée à -105 MPa dans le plan de coupe le plus dur. Cette limite étant largement dépendante du matériau, de sa géométrie, nous considérons une limite à la rupture légèrement supérieure de -110 MPa. Les valeurs des coefficients de souplesse ont été retrouvées avec une précision moyenne de 8%. Cet écart est en majeure partie expliqué par la géométrie de notre échantillon qui n'est pas optimale pour la mesure de ces paramètres.

Le bon accord des évolutions des déplacements électriques des deux PZT a permis d'évaluer les coefficients piézoélectriques et élastiques de chacun des matériaux avec des précisions respectives de 17% et 30%. Ces écarts sont attribués aux mouvements de domaines rapides de ces matériaux mais aussi à la géométrie (rapport hauteur/largeur) de nos échantillons qui n'est pas idéale pour la mesure de ces coefficients. De plus, nous avons observé de légères non-linéarités dans les vitesses de déformations au moment du changement de mode entre charge et décharge, ce qui engendre de légères imprécisions près de la contrainte de saturation. Par ailleurs, les évolutions de ces paramètres sont en bon accord avec la théorie et les observations faites sur les autres matériaux dans le chapitre V. Cependant, la comparaison des évolutions des coefficients de souplesse pour les deux PZT a montré que les paramètres de chacun des matériaux évoluaient de la même manière, mais pas dans les même proportions. Cette observation a été confirmée par l'étude de l'évolution des coefficients de Poisson qui est non négligeable et semble liée aux mouvements de domaines, ce qui invalide l'hypothèse de déformation rémanente isochore sous contrainte mécanique. Mettant en parallèle notre conclusion du chapitre V qui valide l'hypothèse de déformation rémanente piézoélectrique, avec des travaux d'autres auteurs, nous pouvons considérer

que l'évolution de la déformation rémanente ferroélastique est non isochore. L'évolution du coefficient de Poisson montrant une grande analogie avec les mouvements de domaines, nous pouvons supposer une loi d'évolution de la déformation rémanente ferroélastique transversale propre et analogue à celles des autres modes de déformation rémanente. Cette constatation nous permet de corriger un élément fondamental de notre modèle.