

Modèles de Preisach et de Jiles-Atherton étendus via une contribution fractionnaire pour la modélisation de l'hystérésis ferroélectrique dynamique

Bin Zhang¹, Benjamin Ducharne²

¹Shandong University, School of Mechanical, Electrical & Information Engineering, 180 Wenhuaixilu, Weihai, Shandong Province, China 264209.

²Laboratoire de Génie Electrique et Ferroélectricité – INSA de Lyon Bât. Gustave FERRIE, 8 rue de la physique, 69621 Villeurbanne cedex, France

RESUME – Cet article décrit l'extension des bien-connus modèles d'hystérésis quasi-statiques scalaires de Preisach et de Jiles-Atherton pour la prise en compte de l'hystérésis ferroélectrique dynamique. Les deux modèles étendus donnent de bons résultats pour des formes d'onde d'amplitudes et de fréquences fortement variables. Cette extension est possible grâce à une contribution dynamique, produit d'une constante ρ et de la dérivée fractionnaire de la polarisation P , l'ensemble est considéré dans la simulation comme un champ électrique équivalent. L'ordre fractionnaire peut être considéré comme un degré de liberté supplémentaire. En ajustant ce paramètre, des bons résultats de simulation peuvent être obtenus sur de larges bandes de fréquences ce qui n'est pas le cas via la considération classique du type pertes visqueuses ($\rho \cdot dP/dt$) dont la précision se limite à une ou deux décades de fréquence.

Mots-clés—Hystérésis, matériaux ferroélectriques, modèle de Preisach, modèle de Jiles-Atherton, dérivée fractionnaire.

1. INTRODUCTION

Les dispositifs piézoélectriques présentent un large spectre d'applications (capteurs ou actionneurs) [1]. Des forces extrêmement grandes, des pertes d'énergie quasi statiques faibles, ainsi que d'excellentes propriétés dynamiques, rendent les actionneurs piézoélectriques très intéressants dans de nombreux domaines d'application. Même si beaucoup d'efforts scientifiques ont été fait récemment pour développer des matériaux piézoélectriques souples, la majorité des applications d'aujourd'hui sont toujours basées sur des matériaux céramiques, en raison de leur fort effet piézoélectrique inverse. Malheureusement pour les utilisateurs, ces matériaux céramiques présentent un comportement fortement non-linéaire (saturation, hystérésis, dépendance de fréquence) directement lié aux niveaux élevés de sollicitation (amplitude, fréquence) nécessaires pour l'actionnement. L'amélioration de ces dispositifs nécessite des outils de simulation précis. De nombreuses propriétés intéressantes des matériaux piézoélectriques sont disponibles en mesurant les variations temporelles du champ de polarisation. La méthode la plus courante consiste au tracé des boucles d'hystérésis de champ de polarisation en fonction du champ d'excitation électrique $P(E)$. Les cycles d'hystérésis diélectrique sont fortement dépendants

de la fréquence. Différentes approches ont été testées pour prendre en compte numériquement cette dépendance en fréquence. Une autre solution possible est basée sur l'extension d'une contribution quasi statique à un terme de pertes dépendant du temps, produit d'une résistance ρ et de la dérivée temporelle de la polarisation dP/dT . Malheureusement, pour cette expression simple, les premiers résultats expérimentaux sont suffisants pour vérifier que cette considération ne peut être utilisée qu'avec une précision modérée sur une bande passante de fréquence restreinte. En effet, en traçant les variations de l'aire du cycle d'hystérésis en fonction de la fréquence, $\langle A \rangle (f)$, nous observons que la courbe mesurée croît lentement à un rythme régulier tandis que la simulation présente une pente croissante, un maximum et une diminution rapide pour les hautes fréquences. Le terme visqueux $\rho \cdot dP/dT$ conduit à une surestimation de la composante haute fréquence du signal de polarisation. Pour surmonter ce problème, dans cet article nous proposons d'utiliser un opérateur qui nous permet de traiter différemment l'équilibre entre les basses et les hautes fréquences. Ce type d'opérateur existe dans le domaine du calcul fractionnaire. In [2]-[4], les auteurs nous expliquent comment ils ont réussi la simulation des cycles dynamiques $P(E)$ d'une céramique piézoélectrique grâce à l'extension dynamique fractionnaire d'un modèle d'hystérésis quasi statique basé sur l'analogie entre des mouvements parois et des frottements secs mécaniques. Cependant dans cette étude, on se limite à une céramique douce typique (P188 quartz & silice, France, type navy II), et après de nombreuses tentatives nous nous sommes rendu compte que la modélisation d'autres types de céramique est hasardeuse surtout dans la définition des paramètres du modèle. Dans cet article, pour surmonter ces limitations, deux modèles d'hystérésis scalaires quasi statiques bien connus, à savoir les modèles de Jiles-Atherton et de Preisach, sont testés pour l'établissement de la contribution quasi statique requise par le modèle complet. Ces deux modèles d'hystérésis quasi statique seront décrits dans la première partie de l'article, puis les extensions dynamiques utilisant des contributions dynamiques fractionnaires. Enfin, une vérification expérimentale permettra de comparer la robustesse des modèles proposés.

2. MODELISATION

2.1. Modélisation quasi-statique : Preisach

Le modèle de Preisach a historiquement d'abord été utilisé pour décrire le phénomène d'hystérésis dans les matériaux ferromagnétiques [5]. Plus récemment, il a été validé pour les ferroélectriques [6]. Le modèle de Preisach suppose que la polarisation de la céramique est déterminée par la contribution d'un ensemble de boucles d'hystérésis élémentaires dont le poids dans la reconstitution du cycle final est donné par une fonction de distribution (le triangle du Preisach). Il s'appuie sur une description physique des phénomènes d'accrochage et de décrochage des parois de domaines.

2.2. Modélisation quasi-statique : Jiles-Atherton

Comme le modèle du Preisach, le modèle de Jiles-Atherton a dans un premier temps été utilisé pour décrire le phénomène d'hystérésis dans les matériaux magnétiques [7][8]. Pour ce modèle la polarisation P est décomposée en deux composantes réversibles et irréversibles. Ce modèle utilise une approche phénoménologique de la dissipation énergétique lors du déplacement des parois en interaction avec des défauts (dislocations, inclusions, inhomogénéités, ...) pour expliquer le comportement diélectrique.

2.3. Contribution dynamique

Dans des conditions de fréquences faibles, les modèles scalaires quasi statiques de l'hystérésis fournissent des résultats précis pour l'évolution de la polarisation diélectrique P en fonction du champ électrique E . Malheureusement pour ces modèles simples dès que la condition quasi statique n'est plus respectée, d'énormes différences apparaissent. De petites améliorations peuvent être obtenues en ajoutant une contribution dynamique simple, un terme d'amortissement proportionnel à la dérivée temporelle du champ de polarisation P . Cette simple considération fournit des résultats de simulation corrects mais limités à une bande passante de fréquence étroite. En remplaçant le terme de dérivée simple par un terme de dérivée fractionnaire nous offrons un degré de liberté supplémentaire à la simulation et la convergence sur de larges bandes de fréquences devient possible. La définition de la dérivée fractionnaire que nous utilisons est celle de Riemman Liouville;

$$\frac{d^n f(t)}{dt^n} = D_t^n f(t) = \frac{1}{\Gamma(1-n)} \frac{d}{dt} \int_{-\infty}^t (t-\tau)^{-n} f(\tau) d\tau$$

Où Γ est la fonction gamma. La dérivée fractionnaire est introduite dans le modèle d'hystérésis quasi statique, par une contribution dynamique. Le terme $\rho \cdot dP/dT$ est remplacé par $\rho \cdot d^n P/dt^n$, puis cette contribution est ajoutée à la contribution quasi statique:

$$\rho \cdot \frac{d^n P(t)}{dt^n} = E_{dyn}(t) - f_{static}^{-1}(P(t))$$

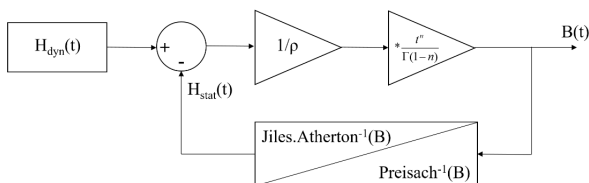


Fig. 1. Schéma bloc de la modélisation complète.

3. BANC DE CARACTERISATION

Dans la version finale de l'article le banc de caractérisation présentée figure 2 sera décrit en détail.

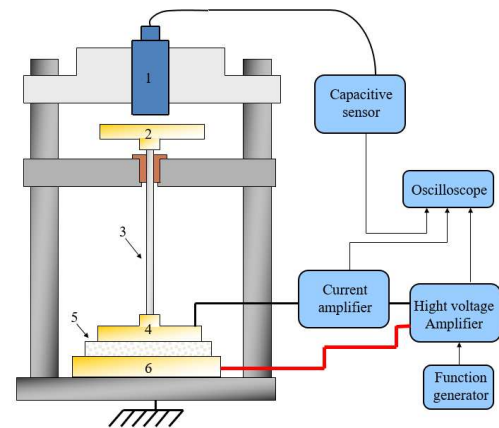


Fig. 2. Banc de caractérisation

4. COMPARAISON SIMULATIONS/MESURES CONCLUSION

Pour la validation de cette étude, des comparaisons simulations/mesures ont été effectuées sur plusieurs décades de fréquences et pour différents formes d'onde du champ d'excitation E . Trois matériaux d'origine commerciale ont testé. La figure 3 présente comme première illustration les résultats obtenus pour une céramique Morgan Matroc PZT 5A.

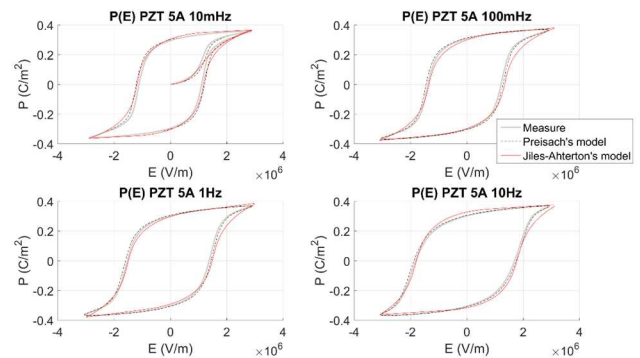


Fig. 3. Comparaison simulation/mesure pour sur 3 décades de fréquence.

5. REFERENCES

- [1] Slocum A. "Precision Machine Design" (Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall) pp 666-74, 1992
- [2] D.Guyomar, B.Ducharme, G.Sebald, "Dynamical hysteresis model of ferroelectric ceramics under electric field using fractional derivatives", *J. Phys.D: Appl.Phys.*, 2007.
- [3] D.Guyomar, B.Ducharme, G.Sebald, "The use of fractional derivation in modeling ferroelectric dynamic hysteresis behavior over large frequency bandwidth", *J. Appl. Phys.*, 2010, vol.107, Iss. 11, n° 114108.
- [4] B. Ducharme, B. Zhang, D. Guyomar, G. Sebald, "Fractional derivative operators for modeling piezoceramics polarization behaviors under dynamic mechanical stress excitation", *Sensors and Actuators A: Physical* 189, pp. 74-79, 2013.
- [5] F. Preisach, "Über die magnetische Nachwirkung". *Zeitschrift für Physik*, 94: 277-302, 1935.
- [6] Y. Bernard, H. Maalej, L. Lebrun, B. Ducharme, "Preisach modelling of ferroelectric behavior", *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, vol. 25, Iss. 1-4, pp. 729-733, 2007.
- [7] D.C. Jiles, D.L. Atherton, "Theory of ferromagnetic hysteresis". *J. App. Pjys.* 55, pp. 2115, 1984.
- [8] Chwastek K., and Szczygłowski J., "An alternative method to estimate the parameters of Jiles Atherton model". *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 314, pp. 47-51, 2007.