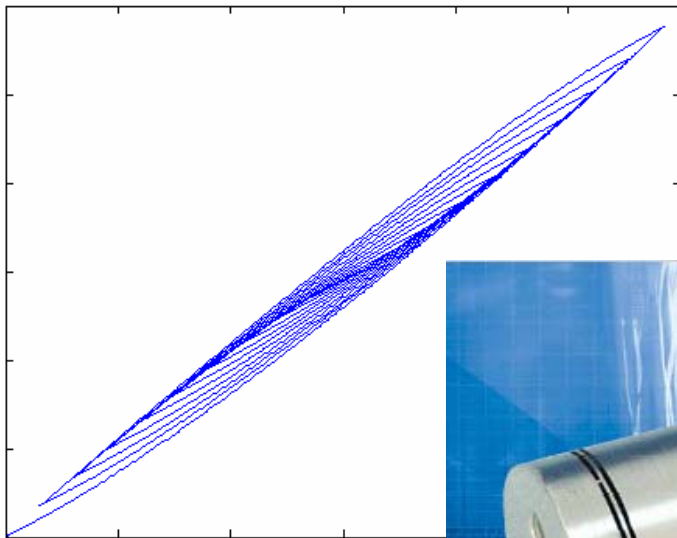


## Projet de semestre

# Hysteresis compensation for a piezoelectric stack actuator



Etudiant : Frédéric Weibel

Assistants : Yvan Michellod, Philippe Müllhaupt

Professeur : Denis Gillet

# TABLE DES MATIERES

<b>1</b>	<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>3</b>
1.1	CONTEXTE DU PROJET .....	3
1.2	BUT DU PROJET.....	3
1.3	DEROULEMENT DU PROJET .....	4
<b>2</b>	<b>MODELE DE L'HYSTERESE.....</b>	<b>5</b>
2.1	MODELE DE CONNAISSANCE.....	5
2.1.1	<i>Origine de l'hystérèse dans les piezoélectriques .....</i>	<i>5</i>
2.1.2	<i>Différents modèles de connaissance .....</i>	<i>5</i>
2.2	MODELE DE REPRESENTATION.....	6
2.2.1	<i>Modèles existants .....</i>	<i>6</i>
2.2.2	<i>Modèle de Preisach classique .....</i>	<i>7</i>
2.2.3	<i>Implémentation de l'algorithme .....</i>	<i>10</i>
2.2.4	<i>Résultats de la simulation .....</i>	<i>11</i>
<b>3</b>	<b>COMPENSATION DE L'HYSTERESE .....</b>	<b>13</b>
3.1	INTRODUCTION.....	13
3.2	METHODE DU PREMIER HARMONIQUE .....	14
3.2.1	<i>Principe de la méthode.....</i>	<i>14</i>
3.2.2	<i>Application à l'hystérèse.....</i>	<i>15</i>
3.2.3	<i>Stabilité en boucle fermée .....</i>	<i>16</i>
3.2.4	<i>Résultats de la simulation .....</i>	<i>17</i>
3.3	METHODE DE PREISACH .....	18
3.3.1	<i>Introduction.....</i>	<i>18</i>
3.3.2	<i>Principe de la méthode.....</i>	<i>18</i>
3.3.3	<i>Résultats de la simulation .....</i>	<i>21</i>
<b>4</b>	<b>MESURES SUR LE PROTOTYPE .....</b>	<b>24</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSION.....</b>	<b>25</b>
<b>6</b>	<b>REMERCIEMENTS.....</b>	<b>25</b>
<b>7</b>	<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>26</b>

# 1 Introduction

## 1.1 Contexte du projet

Le présent travail se déroule dans le cadre de la construction d'une nouvelle ligne optique de type « Differential Delay Line » (DLL) pour le télescope VLTI (Very Large Telescope Interferometer) situé au Chili. L'EPFL a été chargé de la réalisation d'un système de compensation des perturbations atmosphériques permettant un déplacement total de 70mm avec une précision de plus de 70nm rms.

Le système conçu est représenté dans la figure 1. Il est constitué d'une structure à lames flexibles permettant un déplacement rectiligne d'une très grande précision et contrôlée par un moteur pas-à-pas. Comme un tel système n'a pas une bande passante suffisante par rapport à la fréquence des perturbations atmosphériques et que sa précision n'est que de l'ordre du micromètre, un actuateur piézoélectrique a été ajouté sur la structure à lames. Ce dernier augmente ainsi la bande passante du système et permet la correction simultanée des perturbations atmosphériques ainsi que des imprécisions du système à lames.

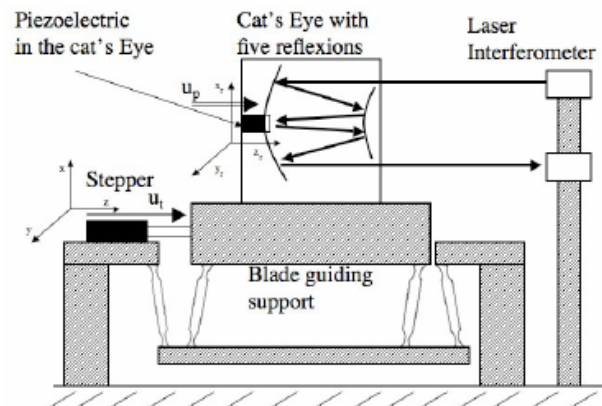


Figure 1 : Schéma du système de compensation complet

## 1.2 But du projet

Actuellement, l'actuateur piézoélectrique fonctionne en boucle fermée et parvient ainsi à atteindre la précision exigée par le cahier des charges. Le régulateur PI qui a été dimensionné est très réactif ( $K_p$  très élevé) pour permettre au système de bien suivre la consigne. Cependant, cette précision a un prix qui n'est autre que la diminution de la bande passante. Ceci n'est pas tolérable puisque les perturbations que le système doit compenser peuvent avoir des fréquences de l'ordre de 150 Hz, voire plus.

Une des causes principales du manque de précision de l'actuateur piézoélectrique est la présence d'une hystérèse. Celle-ci peut atteindre 10 à 15% de la tension appliquée aux bornes de l'actuateur, comme on peut le constater dans la figure 2. Le but de ce projet est donc de compenser cette hystérèse. De cette manière, l'erreur que le régulateur devra compenser sera fortement diminuée et la bande passante restera plus large qu'auparavant.

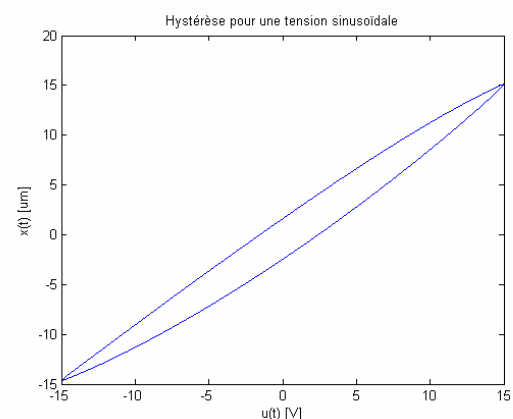


Figure 2 : Hystérèse sur le piezoélectrique avec une tension d'entrée de 15V d'amplitude. L'hystérèse représente 13.8% de cette amplitude.

### **1.3 Déroulement du projet**

La première étape du projet consiste à réaliser un modèle de l'hystérèse afin de l'utiliser par la suite pour effectuer des simulations sur Matlab. Il n'est en effet pas envisageable d'implanter immédiatement un algorithme de compensation de l'hystérèse sur le prototype. Les données sont d'une part bien plus difficiles à exploiter que lors d'une simulation, mais avant tout, il y a un fort risque d'endommager l'actuateur. Ce modèle doit bien sûr être le plus fidèle possible au comportement réel du piézoélectrique. C'est pour cette raison que l'idée première était la réalisation d'un modèle de connaissance. Comme il va être expliqué par la suite, cette possibilité n'a cependant pas pu être réalisée et un modèle de représentation a été utilisé en lieu et place.

L'étape suivante est la compensation de l'hystérèse à proprement parler. Deux méthodes sont testées pour cela : la méthode du premier harmonique et l'inversion du modèle de représentation développé précédemment. Le fonctionnement de cette compensation est ensuite vérifié en mettant en série le système de compensation et le modèle de représentation. Suite à la validation du système de compensation en simulation, l'algorithme développé est implanté sur le prototype et différentes mesures sont effectuées.

## 2 Modèle de l'hystérèse

### 2.1 Modèle de connaissance

#### 2.1.1 Origine de l'hystérèse dans les piézoélectriques

Comme les matériaux magnétiques, les piézoélectriques présentent une hystérèse qui peut représenter dans leur cas jusqu'à 15% de l'amplitude de la tension appliquée. Ce phénomène a notamment pour origine le déplacement des joints de grain lorsqu'une tension est appliquée au piézoélectrique. Ces mouvements ne se font pas instantanément, mais avec un certain retard, ce qui crée le phénomène d'hystérèse. Lorsque la tension est enlevée, les joints de grain restent majoritairement dans leur position, bloqués par des dislocations ou des défauts de la structure.

L'explication et la compréhension de ces déplacements sont particulièrement difficiles, c'est pourquoi de nombreuses recherches sont effectuées encore aujourd'hui dans ce domaine. Malgré les nombreuses avancées dans l'explication du mécanisme qui engendre l'hystérèse, il n'existe encore aucune théorie générale qui décrive précisément ce phénomène.

#### 2.1.2 Différents modèles de connaissance

Le modèle le plus simple qui décrit la déformation d'un matériau piézoélectrique est la relation bien connue :

$$\Delta L = \varepsilon \cdot L_0 \cong E \cdot d_{ij} \cdot L_0$$

avec	$\Delta L$ : variation de la longueur	$E$ : champ électrique
	$\varepsilon$ : variation relative de la longueur	$d_{ij}$ : coefficient piézoélectrique
	$L_0$ : longueur du piézoélectrique	

Cette expression n'offre cependant qu'une description linéaire du comportement des piézoélectriques, sans tenir compte du phénomène d'hystérèse. C'est pourquoi, ces dernières années, de nombreux groupes de recherche ont publié des articles contenant des modèles de connaissance faisant évoluer le coefficient piézoélectrique. Aucun n'a cependant pour ambition de décrire parfaitement le comportement des piézoélectriques, puisque tous les résultats ont été obtenus de manière empirique. Le modèle le plus communément admis est celui tiré de la loi de Rayleigh. Utilisé à l'origine pour modéliser l'hystérèse des matériaux ferroélectriques, il a été modifié de manière à faire évoluer le coefficient piézoélectrique [4] :

$$d_{33} = d_{init} + \alpha X$$

$$Q = d_{init} X + \alpha X^2$$

avec	$d_{init}$ : coefficient piézoélectrique initial	$X$ : contrainte dans le piézoélectrique
	$\alpha$ : coefficient de Rayleigh	$Q$ : charge appliquée au piézoélectrique

Comme ce modèle n'est pas optimal, les chercheurs tentent actuellement de l'améliorer [5]. Des propositions existent également pour modéliser la dépendance en fréquence du coefficient piézoélectrique [6].

Bien que de tels modèles s'approchent toujours plus du comportement réel des matériaux, il n'a pas été jugé judicieux de les utiliser pour représenter notre actuateur. En effet, ceux-ci ont tout spécialement été conçus pour décrire les déformations des piézoélectriques à l'échelle

microscopique, et non pour un actuateur. Ce dernier est constitué de plusieurs couches de piézoélectriques collés ensemble et fixées dans un châssis d'acier. Généraliser les modèles précédemment cités à un actuateur de 50mm de longueur entraînerait forcément des erreurs non négligeables. C'est pourquoi il a été jugé plus approprié d'avoir recours à un modèle de représentation.

## 2.2 Modèle de représentation

### 2.2.1 Modèles existants

Il existe différents modèles de représentation qui permettent de créer un modèle assez précis de l'hystérèse d'un actuateur piézoélectrique. Contrairement aux modèles de connaissance dont nous avons brièvement parlés, ces modèles sont tout spécialement conçus pour être utilisés avec des actuateurs et non pour représenter l'hystérèse à un niveau microscopique. Ceux que l'on retrouve le plus souvent dans la littérature sont les modèles de Preisach [8,10,11] et de Maxwell [6,7] :

- **Maxwell Slip Model** : Le principe de base de cette méthode est la représentation du déplacement de l'actuateur par un grand nombre de systèmes masse-ressort mis en parallèle (Figure 3). Les masses sont supposées nulles et l'on prend en compte le frottement des blocs sur des surfaces avec un coefficient de frottement  $\mu_i$ .

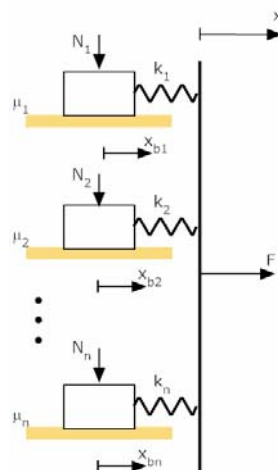


Figure 3 : Schéma de principe du modèle de représentation de Maxwell. Une force  $F$  tire tous les blocs qui ne se déplacent pas de manière uniforme. Leur déplacement  $x_{bi}$  dépend de la raideur  $k_i$  du ressort et du coefficient de frottement  $\mu_i$ .

- **Classical Preisach Model** : Ce modèle est à la base utilisé pour décrire le comportement de l'hystérèse dans les matériaux ferroélectriques et a été adapté pour les matériaux piézoélectriques. Contrairement au modèle de Maxwell, il n'a aucune représentation physique correspondante, mais son principe de base n'en demeure pas moins assez semblable (§2.2.2).

Ces deux modèles ont une précision assez équivalente et le temps nécessaire à leur implémentation est comparable. Leur principal désavantage est que la propriété de congruence doit être satisfaite pour que l'on puisse les utiliser au maximum de leur précision. Cette propriété n'est respectée que lorsque des variations dans une boucle mineure entre deux valeurs de tension identique peuvent être représentées par la même boucle hystérèse quel que soit l'historique, c'est-à-dire les précédentes valeurs de la tension. On peut démontrer que cela n'est vrai que lorsque aucune charge ou une charge constante est appliquée sur l'actuateur. Si la propriété n'est pas satisfaite et que l'on ne souhaite pas perdre en précision, il est possible d'utiliser le modèle suivant :

- **Generalized Preisach Model** [9] : Prolongement de la méthode classique, il permet de relaxer la propriété de congruence en différenciant les boucles d'hystérèse ascendantes des boucles descendantes. Il demande cependant un effort de modélisation bien supérieur aux modèles précédemment cités. En effet le nombre de valeurs à collecter sur le prototype peut allégrement être d'un ordre de grandeur supérieur.

On peut par ailleurs ajouter qu'aucun de ces modèles ne prend en compte la dynamique. Comme les caractéristiques de l'hystérèse varient d'une manière non négligeable en fonction de la fréquence [4], leur validité n'est vraiment effective qu'aux alentours de la fréquence utilisée pour réaliser la modélisation. Une éventuelle solution pouvant être apportée à ce problème sera mentionnées à la fin de ce rapport.

Le modèle de Preisach généralisé est théoriquement le seul permettant de représenter l'hystérèse d'un signal quelconque, comme c'est le cas pour des perturbations atmosphériques. Cependant, le temps de calcul peut être problématique si l'on souhaite inverser ce modèle pour une compensation en temps réel, avec une fréquence d'échantillonnage de 8 kHz. Le modèle de Preisach classique a donc été choisi pour la suite du travail. Il offre de bonnes performances pour un effort d'implémentation moyen. Le modèle généralisé n'étant qu'une extension du modèle classique, nous avons toujours la possibilité de passer à la méthode plus complète en cas de nécessité. Ceci n'a cependant pas été le cas.

## 2.2.2 Modèle de Preisach classique

Le modèle de Preisach est depuis longtemps utilisé en électromagnétisme pour représenter le comportement de l'hystérèse des matériaux ferromagnétiques. Ce n'est que récemment qu'il a été légèrement modifié par Ge et Jouaneh pour être applicable aux actuators piézoélectriques [8].

La formule de base du modèle de Preisach qui représente la déformation  $x(t)$  en fonction de la tension  $u(t)$  appliquée aux bornes de l'actuateur est la suivante :

$$x(t) = \iint_{\alpha \geq \beta} \mu(\alpha, \beta) \gamma_{\alpha\beta} [u(t)] \cdot d\alpha \cdot d\beta \quad (1)$$

- $\alpha$  et  $\beta$  sont les valeurs des extremums de la tension sur la trajectoire de l'hystérèse (Figure 5). Les maximums sont représentés par  $\alpha$  et les minimums par  $\beta$ .
- $\gamma_{\alpha\beta}$  est un opérateur qui représente l'hystérèse de manière simplifiée (Figure 4).
- $\mu(\alpha, \beta)$  sont des poids qui sont fonction des valeurs de  $\alpha$  et de  $\beta$ . Ils sont calculés de manière empirique en effectuant différentes mesures sur l'actuateur.

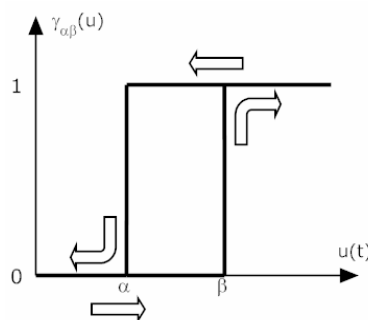


Figure 4 : Opérateur  $\gamma_{\alpha\beta}$

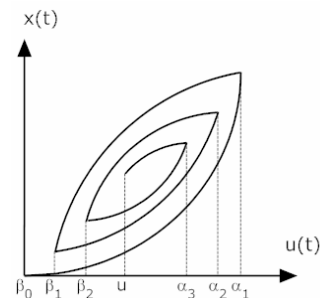


Figure 5 : Boucle d'hystérèse avec différents extrema  $\alpha$  et  $\beta$

La méthode de Preisach utilise un diagramme avec  $\beta$  en abscisses et  $\alpha$  en ordonnées pour représenter l'évolution de l'hystérèse (Figure 6). Lorsque la tension augmente, on se déplace de bas en haut dans le diagramme, c'est-à-dire que le  $\alpha'$  suivant augmente en même temps que la tension. Lorsque la tension diminue, on se déplace de droite à gauche, ainsi le  $\beta'$  suivant diminue en même temps que la tension. A chaque fois que le signe de la tension change, les anciennes valeurs des extrema sont mémorisées.

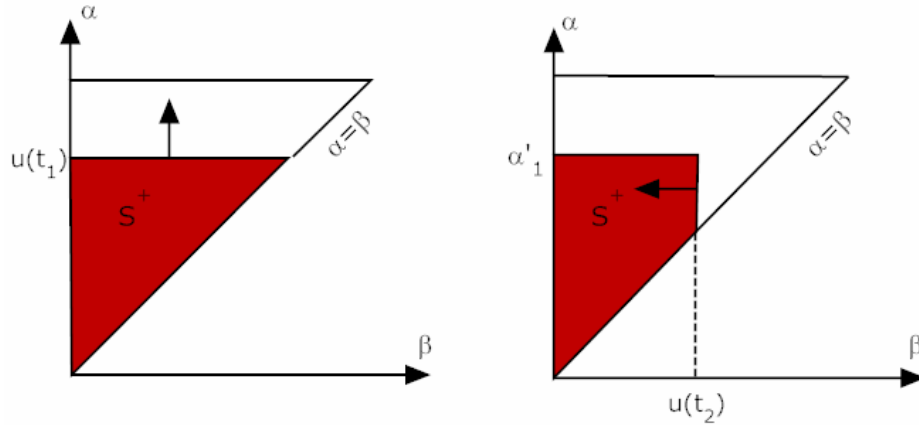


Figure 6 : Diagramme  $\alpha$ - $\beta$  lorsque l'on se trouve dans une boucle ascendante (à gauche) ou descendante (à droite).

Les opérateurs  $\gamma_{\alpha\beta}$  qui se situent dans la surface  $S^+$  valent 1, alors que ceux du dessus valent 0. On peut ainsi exprimer l'équation (1) de la manière suivante :

$$x(t) = \iint_{S^+} \mu(\alpha, \beta) \cdot d\alpha \cdot d\beta \quad (2)$$

Malheureusement, les équations (1) et (2) contiennent une double intégrale qui ne simplifie pas les calculs et peut poser des problèmes de précision. C'est pourquoi on définit la différence suivante (Figure 7) :

$$X(\alpha', \beta') = x_{\alpha'} - x_{\alpha'\beta'} \quad (3)$$

Elle peut également être exprimée par une double intégrale dans la surface  $T_1$  :

$$X(\alpha', \beta') = \iint_{T_1} \mu(\alpha, \beta) \cdot d\alpha \cdot d\beta \quad (4)$$

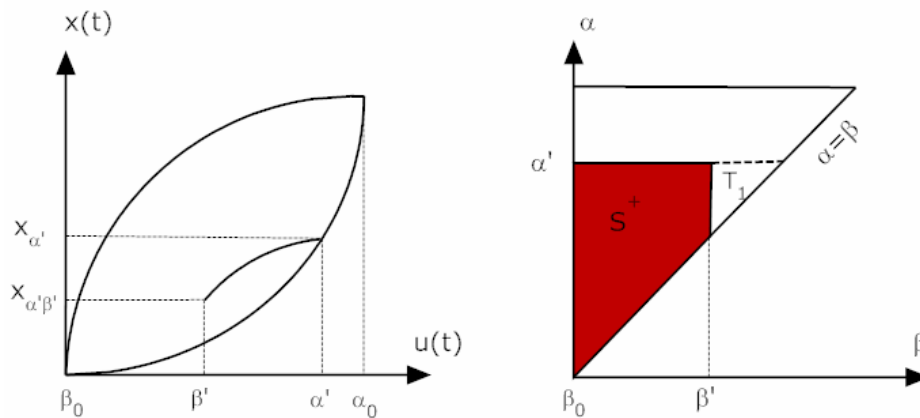


Figure 7 : Illustration du passage dans une boucle d'hystérèse mineure (à gauche) avec le diagramme  $\alpha$ - $\beta$  correspondant. Le point  $x_{\alpha'}$  est l'intersection entre la boucle d'hystérèse principale et la boucle mineure, alors que le point  $x_{\alpha'\beta'}$  est le minimum de la boucle mineure.



En combinant les différentes équations, on peut finalement obtenir des expressions simplifiées de la méthode de Preisach ne prenant en compte que des différences  $X(\alpha', \beta')$ , facilement mesurables sur l'actuateur :

- Pour une boucle ascendante

$$x(t) = \sum_{k=1}^{N-1} [X(\alpha'_k, \beta'_{k-1}) - X(\alpha'_k, \beta'_k)] + X(u(t), \beta'_N) \quad (5)$$

- Pour une boucle descendante

$$x(t) = \sum_{k=1}^{N-1} [X(\alpha'_k, \beta'_{k-1}) - X(\alpha'_k, \beta'_k)] + X(\alpha'_N, \beta'_{N-1}) - X(\alpha'_N, u(t)) \quad (6)$$

Il est possible de représenter les différences  $X(\alpha', \beta')$  dans le diagramme  $\alpha$ - $\beta$ . Pour ce faire, on construit un tableau de référence qui contient les valeurs  $X(\alpha, \beta)$  pour différentes valeurs de  $\alpha$  et de  $\beta$ . Cela revient à créer une grille dans le diagramme  $\alpha$ - $\beta$  et de placer une valeur de référence  $X(\alpha, \beta)$  à chaque intersection. En connaissant dans quels intervalles se trouvent les valeurs mesurées  $\alpha'$  et  $\beta'$ , il découle la position de  $X(\alpha', \beta')$  dans la grille (Figure 8). Il suffit ensuite d'effectuer une interpolation avec les valeurs placées dans les angles de la case :

$$X(\alpha', \beta') = a_{00} + a_{10}\alpha' + a_{01}\beta' + a_{11}\alpha'\beta' \quad (7)$$

Si la case se trouve le long de la droite  $\alpha = \beta$ , il se peut qu'elle soit triangulaire. Dans ce cas, on utilise :

$$X(\alpha', \beta') = a_{00} + a_{10}\alpha' + a_{01}\beta' \quad (8)$$

Les coefficients  $a_{00}$ ,  $a_{10}$ ,  $a_{01}$  et  $a_{11}$  sont propre à chaque case et peuvent être calculés avant la simulation pour diminuer le temps de calcul.

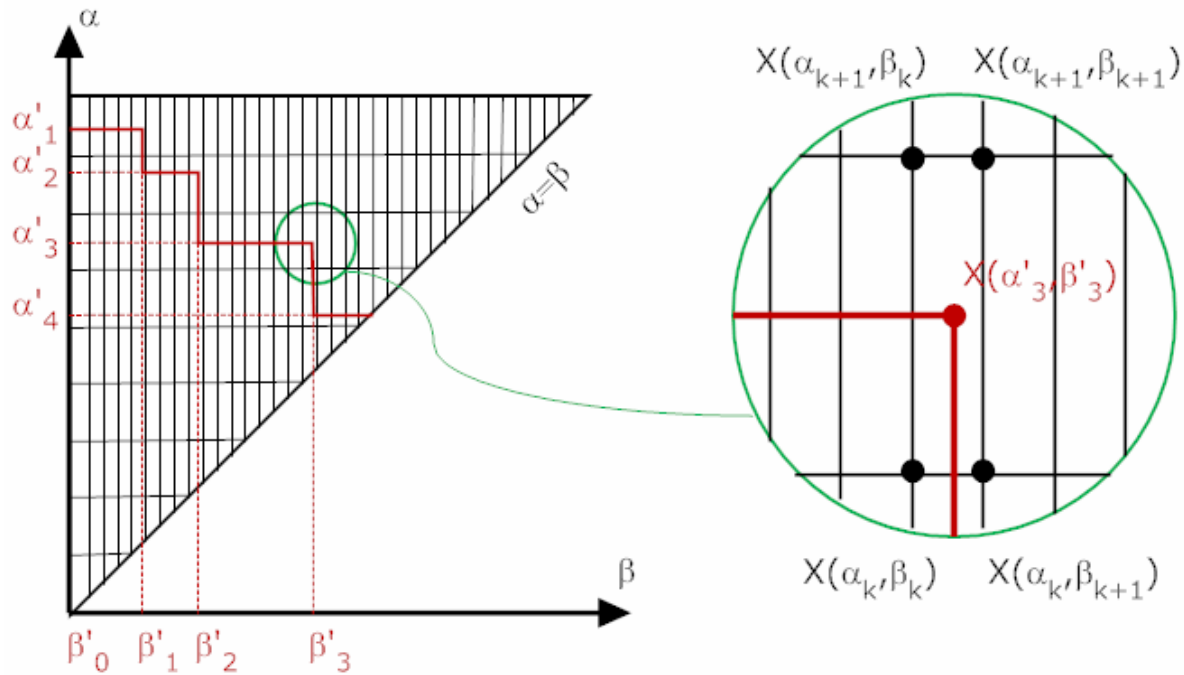


Figure 8 : Grille qui contient les valeurs  $X(\alpha, \beta)$  et permet de calculer les valeurs  $X(\alpha', \beta')$  par interpolation. Comme on peut le voir, le nombre de division sur l'axe  $\alpha$  ne doit pas forcément être égal à celui sur l'axe  $\beta$ . Des divisions en 15x150 cases, puis en 30x150 cases pour plus de précision, ont été choisies dans notre cas.

Il faut ajouter également une caractéristique propre à l'hystérèse et qui simplifie grandement la sauvegarde de l'historique, c'est-à-dire des valeurs  $\alpha'$ ,  $\beta'$  et  $X(\alpha',\beta')$ . La propriété de « wipe-out » permet simplement d'effacer d'anciennes valeurs  $\alpha'$  et  $\beta'$  si la tension  $u(t)$  devient plus petite, respectivement plus grande qu'elles (Figure 9). La taille de l'historique ne grandit ainsi pas indéfiniment, mais sa varie en fonction des différentes valeurs de la tension.

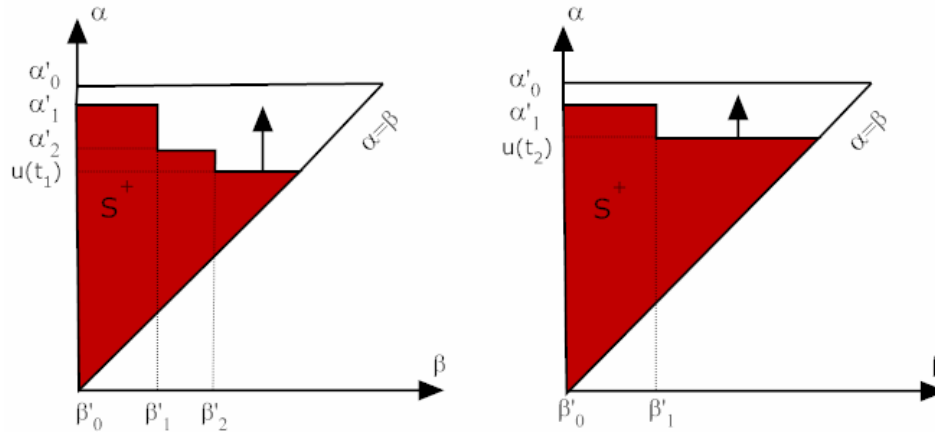


Figure 9 : Illustration du phénomène de « wipe-out ». Au temps  $t_1$  (à gauche) la tension est inférieure à  $\alpha'_2$ . Au temps  $t_2$  (à droite),  $\alpha'_2$  et  $\beta'_2$  ont été effacés comme la tension est supérieure à  $\alpha'_2$ . Le même phénomène se déroule sur une boucle descendante.

### 2.2.3 Implémentation de l'algorithme

L'actuateur piézoélectrique permettant des courses entre 0 et 30 $\mu\text{m}$ , il a tout d'abord été choisi de diviser l'axe  $\alpha$  en 15 parties égales de 2 $\mu\text{m}$  et l'axe  $\beta$  en 150 parties de 0.2 $\mu\text{m}$ . La taille de la matrice de référence obtenue est donc de 16x151. Les mesures sont effectuées à l'aide de l'hystérèse mesurée sur le prototype pour des tensions sinusoïdales de 15 amplitudes différentes (Figure 10). Les courbes de faible amplitude ont tout d'abord été filtrées pour éviter que le bruit du capteur de distance laser ne perturbe les mesures. L'amplitude de ces perturbations correspondait en effet presque à la taille de l'hystérèse.

Les valeurs  $x_{\alpha}$  correspondent aux différentes amplitudes des sinusoïdes utilisées, soit 2 $\mu\text{m}$ , 4 $\mu\text{m}$ , ..., 30 $\mu\text{m}$ . Les valeurs  $x_{\alpha\beta}$  sont quant à elles mesurées sur les boucles descendantes. 150 valeurs  $x_{\alpha\beta}$  sont sauvegardées pour la sinusoïde d'une amplitude de 30 $\mu\text{m}$ , 140 valeurs pour une amplitude de 28 $\mu\text{m}$  et ainsi de suite jusqu'à 10 valeurs pour l'amplitude minimale de 2 $\mu\text{m}$ . On obtient ainsi, à l'aide de l'équation (3), toutes les différences  $X(\alpha,\beta)$  qui nous permettent de créer le tableau de référence.

Lorsqu'on se déplace dans le tableau, le point de départ est toujours la droite  $\alpha = \beta$  qui ne contient que des valeurs  $X(\alpha,\beta)$  nulles. Puis, soit l'on monte si la tension augmente, soit l'on part vers la gauche si la tension diminue. A chaque changement de signe, un extremum supplémentaire est sauvegardé dans la mémoire et l'on repart de la droite  $\alpha = \beta$ , à la hauteur du dernier extremum. Pour la propriété de « wipe-out », une variable  $k$  est simplement décrémentée le cas échéant et permet d'oublier les extrema désormais superflus. Les matrices contenant l'historique ( $\alpha'$ ,  $\beta'$ ,  $X(\alpha',\beta')$ ) ne sont ainsi pas des matrices dynamiques. La variables  $k$  pointe simplement sur la dernière ligne utilisée et s'incrémente ou se décrémente selon les cas.

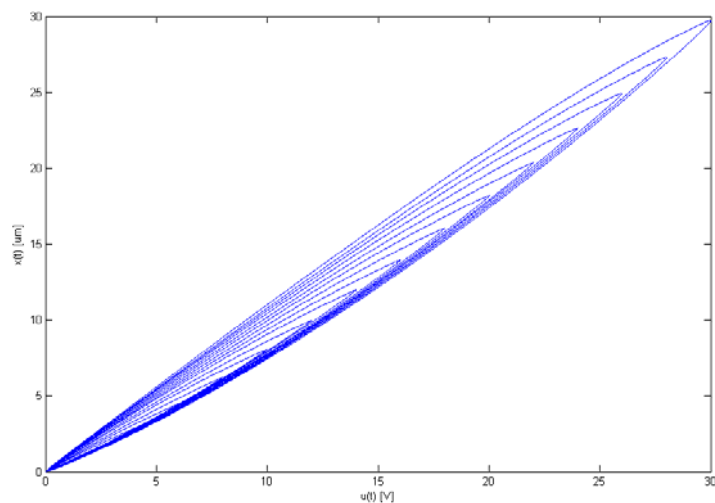


Figure 10 : Courbes d'hystérèse utilisées pour la construction du tableau de référence.

## 2.2.4 Résultats de la simulation

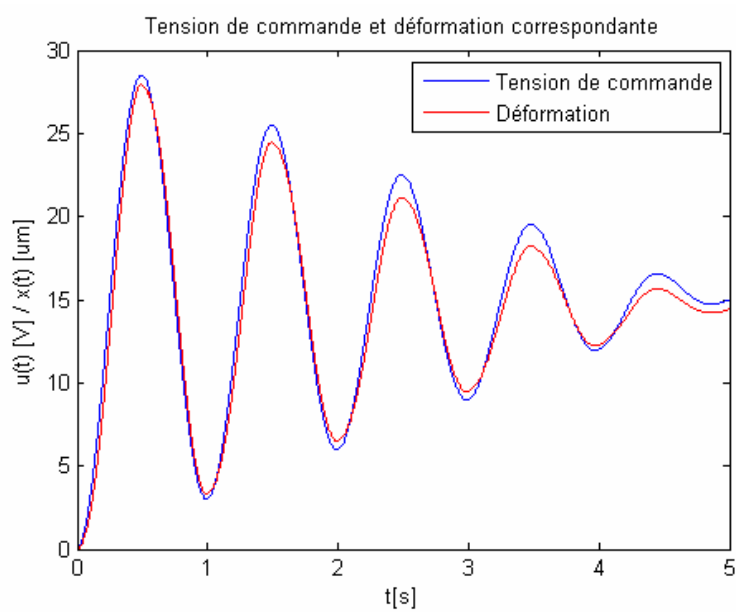
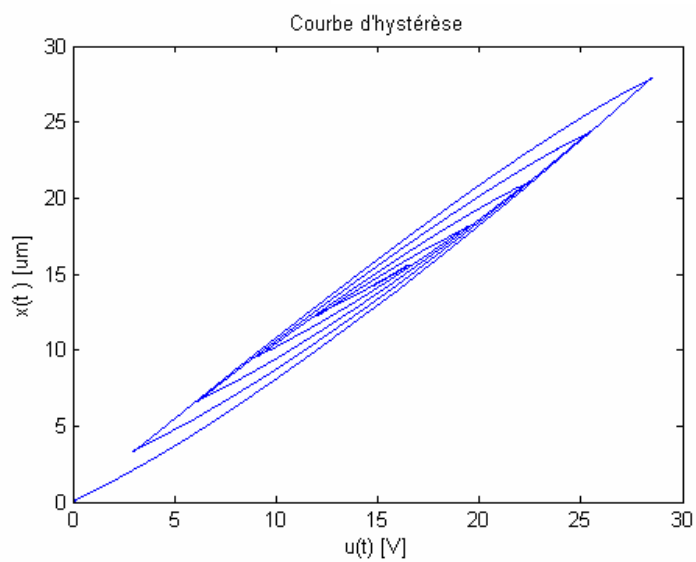


Figure 11 : Tension de commande et déformation correspondante

Figure 12 : Boucle d'hystérèse correspondant à la figure 11



On a pu voir à l'aide des deux graphiques précédents que la modélisation semble parfaitement marcher. On peut également la comparer avec la déformation réelle de l'actuateur pour la même tension de commande :

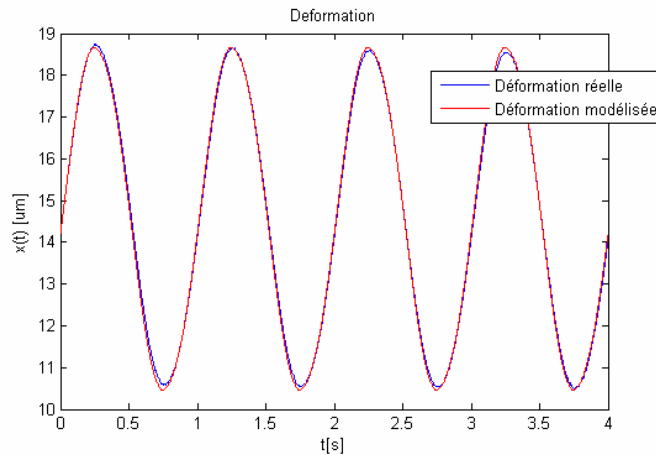


Figure 13 : Comparaison entre la déformation réelle du piézoélectrique (en bleu) et la déformation calculée à l'aide du modèle de Preisach (en rouge) pour une tension sinusoïdale de 5V d'amplitude.

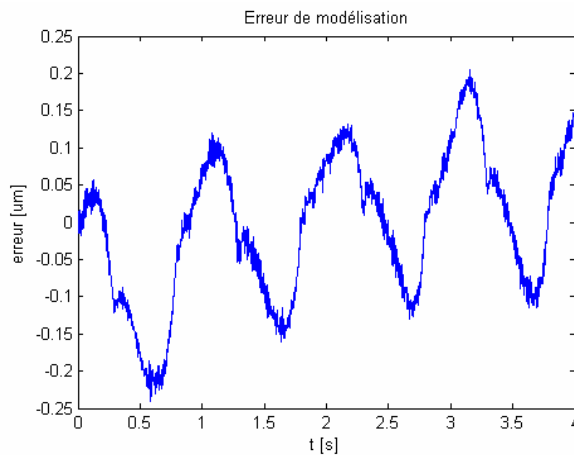


Figure 14 : Erreur de modélisation pour une tension sinusoïdale de 5V d'amplitude

Après quelques tests, il a été décidé d'augmenter la taille du tableau pour obtenir une précision plus élevée. La résolution sur l'axe  $\alpha$  est passée de  $2\mu\text{m}$  à  $1\mu\text{m}$ , ce qui suppose un tableau de  $31 \times 151$ . On peut voir que l'erreur de modélisation est très légèrement diminuée lorsqu'on améliore la précision du tableau de référence :

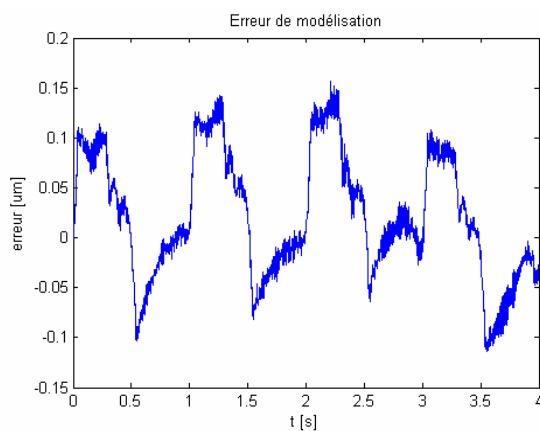


Figure 15 : Erreur de modélisation pour une tension sinusoïdale de 5V d'amplitude à l'aide du tableau de référence amélioré. On peut observer une très légère diminution de l'erreur.

### 3 Compensation de l'hystérèse

#### 3.1 Introduction

Comme il a été brièvement mentionné dans l'introduction de ce rapport, le but de la compensation n'est pas de commander tout le système en boucle ouverte. Il serait illusoire d'espérer atteindre une grande précision avec cette technique. Le régulateur et la boucle de contre-réaction sont conservés, mais une commande a priori est ajoutée dans le système (Figure 16). Cette commande a priori contient un modèle inversé de l'actuateur piézoélectrique contenant l'hystérèse. L'erreur due à l'hystérèse est ainsi fortement diminuée et le régulateur peut être un peu moins rapide pour conserver une plus grande bande passante.

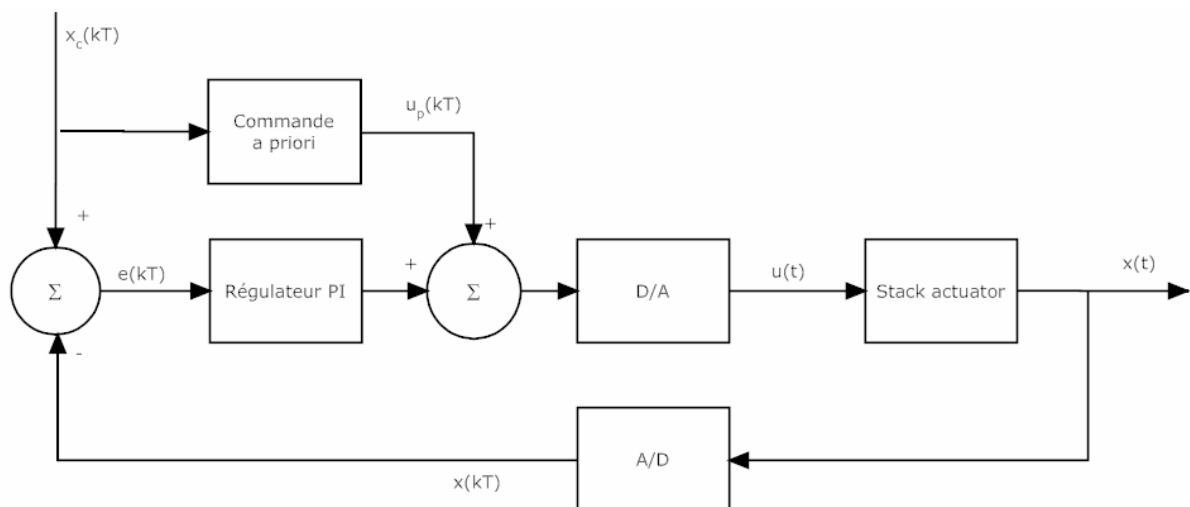


Figure 16 : Circuit de commande avec régulateur PI et commande a priori

Les compensations effectuées par la suite le seront cependant toutes en boucle ouverte. Il est en effet nécessaire dans un premier temps d'obtenir une amélioration de la commande en boucle ouverte par l'ajout de la commande a priori.

Avant de nous atteler à l'inversion du modèle de Preisach que nous avons développé dans le paragraphe précédent, nous allons étudier brièvement les possibilités qu'offre la méthode du premier harmonique. Une brève description de la méthode sera faite pour être appliquée à l'hystérèse. Puis nous nous intéresserons à l'éventuelle présence d'un cycle limite lors d'une compensation en boucle fermée. Enfin nous utiliserons cette méthode pour compenser l'hystérèse en simulation.

## 3.2 Méthode du premier harmonique

### 3.2.1 Principe de la méthode

La méthode du premier harmonique est avant tout utilisée pour analyser la stabilité d'un système linéaire auquel on ajoute une boucle de rétroaction qui contient un système non linéaire. Elle permet notamment de détecter la présence d'un cycle limite stable, et le cas échéant, de connaître son amplitude et sa fréquence [3].

Si l'on met en série une non linéarité ainsi qu'une fonction de transfert passe-bas  $G(s)$ , on peut constater que le signal de sortie n'est rien d'autre que le signal d'entrée avec une différence d'amplitude et de phase. Il est donc possible d'estimer la non linéarité par un nombre complexe  $N(A, \omega)$ .

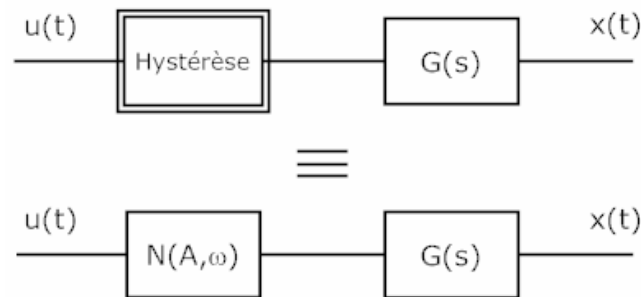


Figure 17 : Principe de la méthode du premier harmonique

Dans la pratique, on ne fait dépendre  $N$  que de l'amplitude  $A$ . Pour trouver le nombre complexe qui représente au mieux la non linéarité, on utilise la décomposition en série de Fourier du signal de sortie :

$$y(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{l=1}^{\infty} [a_l \cos(k\omega t) + b_l \sin(k\omega t)]$$

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} y(t) d(\omega t)$$

$$a_l = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} y(t) \cos(l\omega t) d(\omega t)$$

$$b_l = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} y(t) \sin(l\omega t) d(\omega t)$$

On ne garde ensuite que les coefficients  $a_0$ ,  $a_1$  et  $b_1$ , ce qui constitue l'approximation du premier harmonique. Si la non linéarité est symétrique ( $a_0 = 0$ ), on peut l'estimer par le nombre complexe suivant :

$$N(A) = \frac{1}{A} (b_1 + ja_1)$$

On peut ensuite mettre le système en boucle fermée. L'amplitude et la phase d'un éventuel cycle limite sont contenues dans l'équation suivante :

$$1 = -G(j\omega)N(A, \omega)$$

Pour représenter les éventuelles solutions on utilise un diagramme de Nyquist. Si les deux courbes se croisent, il existe un cycle limite. On détermine ensuite s'il est stable observant l'évolution du système lorsqu'on lui applique une petite perturbation.

### 3.2.2 Application à l'hystérèse

On fait une approximation de l'hystérèse en la représentant d'une manière simplifiée :

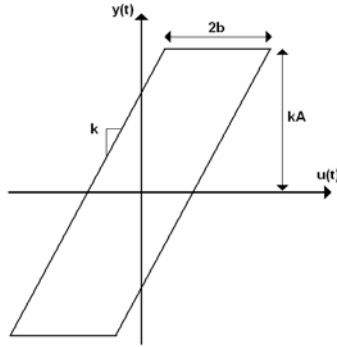


Figure 18 : Représentation simplifiée de l'hystérèse permettant une adaptation à la méthode du premier harmonique. L'amplitude de la tension de commande est représentée par  $A$  ;  $b$  est la demi largeur de l'hystérèse, alors que  $k$  est la pente, c'est-à-dire le rapport entre l'amplitude de la déformation et celle de la tension.

La non linéarité peut être remplacé par le nombre complexe suivante :

$$\|N(A)\| = \frac{1}{A} \sqrt{a_1^2 + b_1^2}$$

$$\arg(N(A)) = \arctan\left(\frac{a_1}{b_1}\right)$$

avec

$$a_1 = \frac{4kb}{\pi} \left( \frac{b}{A} - 1 \right)$$

$$b_1 = \frac{Ak}{\pi} \left[ \frac{\pi}{2} - \arcsin\left(\frac{2b}{A} - 1\right) - \left(\frac{2b}{A} - 1\right) \sqrt{1 - \left(\frac{2b}{A} - 1\right)^2} \right]$$

Dans notre cas, la seule variable que nous connaissons avec précision est l'amplitude  $A$  de la tension que nous appliquons aux bornes de l'actuateur. Les valeurs de  $b$  et de  $k$  ont quant à elles été déterminées empiriquement à l'aide des mesures effectuées sur le piézoélectrique. Nous obtenons alors une relation entre  $k$  et  $A$  (Figure 19), ainsi qu'entre  $b$  et  $A$  (Figure 20).

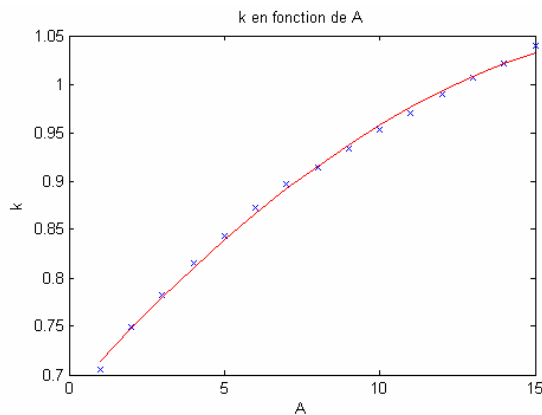


Figure 19 : Approximation de  $k$  en fonction de  $A$  par une courbe du deuxième ordre.

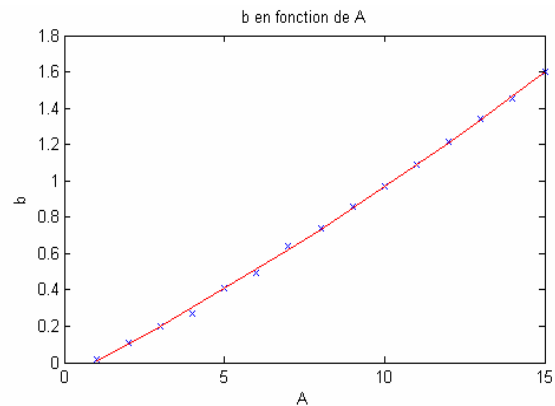


Figure 20 : Approximation de  $b$  en fonction de  $A$  par une courbe du deuxième ordre.

De cette manière nous sommes en mesure de déterminer le nombre complexe représentant au mieux l'hystérèse pour toutes les amplitudes comprises entre  $2\mu\text{m}$  et  $30\mu\text{m}$  :

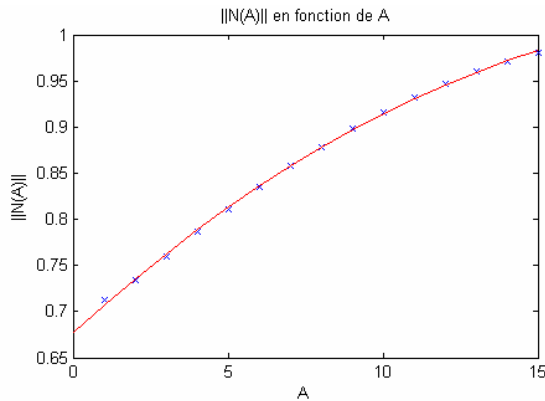


Figure 21 : Approximation de la norme du nombre complexe  $N(A)$  en fonction de  $A$  par une courbe du deuxième ordre.

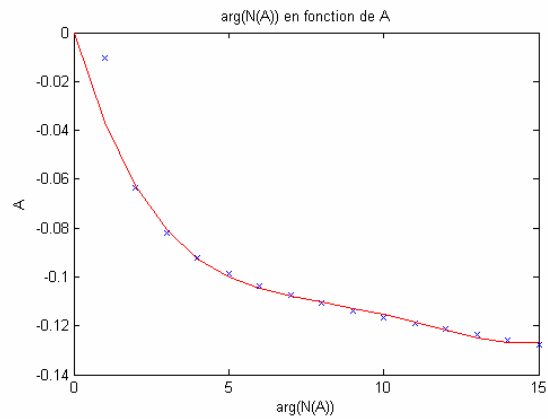


Figure 22 : Approximation de l'argument du nombre complexe  $N(A)$  en fonction de  $A$  par une courbe du quatrième ordre.

### 3.2.3 Stabilité en boucle fermée

Lorsque l'on travaille avec une boucle fermée contenant une non linéarité, la possibilité qu'un cycle limite apparaisse existe toujours. Dans notre cas, cette option n'est pas envisageable puisqu'elle ruinerait nos efforts dans la recherche d'une compensation optimale. Comme une grande précision n'est pas requise pour effectuer ce test, nous allons approximer la fonction de transfert de l'actuateur par un système harmonique du deuxième ordre avec une fréquence de coupure de 400Hz :

$$G(s) = \frac{\omega_0^2}{s^2 + 2\xi\omega_0 s + \omega_0^2} \quad \text{avec} \quad \begin{aligned} \omega_0 &= 2\pi \cdot 400 \text{ rad/s} \\ \xi &= 0.7 \end{aligned}$$

Cette fonction de transfert est ensuite représentée en boucle fermée avec le nombre complexe  $N(A)$  calculé précédemment (Figure 23). Il n'est pas nécessaire de prendre en compte le modèle de Preisach dans cette boucle puisque ce dernier ne contient aucune dynamique et que son gain est inférieur à l'unité. Il ne serait par ailleurs pas

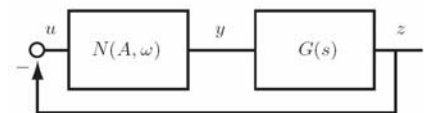
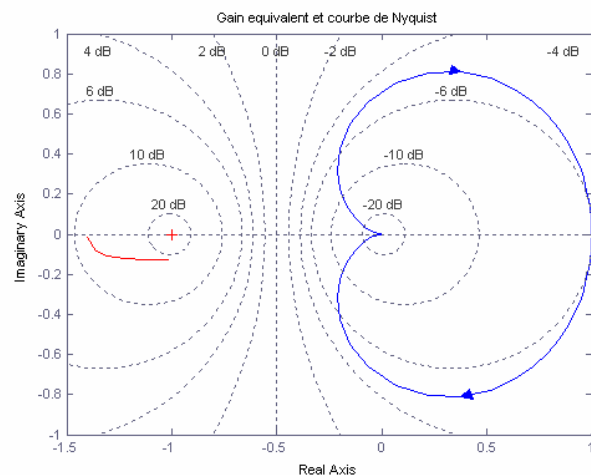


Figure 23 : Fonction de transfert de l'actuateur en boucle fermée

aisé de l'incorporer dans la boucle puisqu'il ne peut être remplacé par aucune fonction de transfert.

En représentant la fonction de transfert  $G(s)$  ainsi que la fonction  $-1/N(A)$  dans un diagramme de Nyquist, on peut constater qu'il n'existe pas de risque d'apparition d'un cycle limite puisque les deux courbes ne se coupent pas :

Figure 24 : Diagramme de Nyquist de la fonction de transfert de l'actuateur  $G(s)$  (en bleu) et du gain  $-1/N(A)$  (en rouge)





### 3.2.4 Résultats de la simulation

L'application principale de la méthode du premier harmonique n'est pas la compensation. Cependant, comme le nombre  $N(A)$  est très facilement inversable, il semble intéressant de voir quelles performances il est possible d'attendre avec une telle méthode. Pour cela, le modèle de Preisach précédemment déterminé ainsi que la fonction de transfert  $G(s)$  représenteront l'actuateur, alors que le l'inverse de  $N(A)$  permettra la compensation de l'hystérèse (Figure 25).



Figure 25 : Schéma de la simulation à l'aide de la méthode du premier harmonique

En comparant les réponses obtenues par un système sans (Figure 26) et avec (Figure 27) le bloc de compensation, nous pouvons constater que le résultat est particulièrement prometteur.

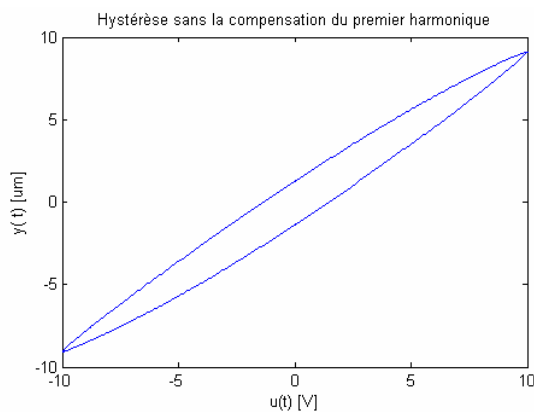


Figure 26 : Hystérèse pour une tension de 10V d'amplitude **sans** le système de compensation basé sur la méthode du premier harmonique

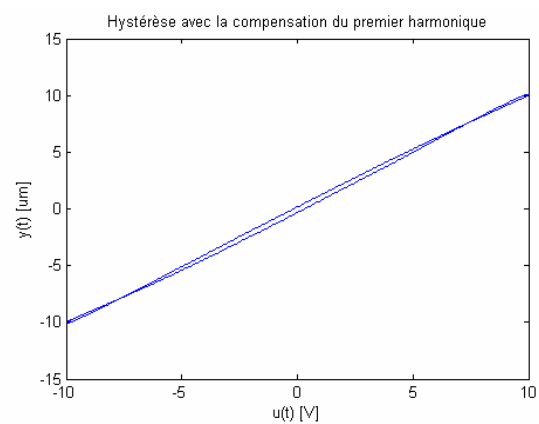


Figure 27 : Hystérèse pour une tension de 10V d'amplitude **avec** le système de compensation basé sur la méthode du premier harmonique

Malgré les résultats encourageants obtenus, la méthode du premier harmonique a de nombreuses limitations. Il est en effet impératif que la tension aux bornes de l'actuateur soit sinusoïdale pour que la compensation puisse avoir lieu. Une réflexion dans le but d'élargir la validité de cette méthode a été tentée. Cependant cet objectif semble impossible à attendre comme un seul nombre complexe ne peut à lui seul caractériser plus d'une sinusoïde. Une possibilité éventuelle serait d'utiliser plusieurs nombres complexes pour prendre en compte d'autres harmoniques, mais une telle proposition sort du cadre de ce rapport. Il faut par ailleurs ajouter que les valeurs  $b$  et  $k$  ont été choisies après plusieurs essais afin d'obtenir les meilleurs performances. La valeur  $b$  est particulièrement difficile à déterminer du fait que la courbe de l'hystérèse réelle n'a pas du tout la même forme que l'approximation utilisée pour la modélisation (Figure 18).

Cette méthode de compensation peut éventuellement être intéressante pour une application très simple où toutes les tensions sont sinusoïdales, mais elle ne peut en aucun cas être utilisée pour le problème qui nous occupe puisque les déformations exigées sont totalement imprévisibles.

### 3.3 Méthode de Preisach

#### 3.3.1 Introduction

Il n'est pas aussi aisé d'inverser le modèle de Preisach que c'est le cas pour la méthode du première harmonique. Celui-ci ne peut en effet être représenté par aucune fonction de transfert que l'on pourrait facilement inverser.

Ge et Jouaneh ont proposé une technique de compensation peu après leur adaptation de la méthode de Preisach pour les piézoélectriques. Celle-ci consiste à calculer la tension correspondant à la déformation désirée d'une manière linéaire, c'est-à-dire sans prendre en compte l'hystérèse. La déformation réelle correspondante est ensuite calculée à l'aide de la méthode de Preisach et comparée à la déformation désirée. La suite se déroule de manière itérative. On calcule les déformations obtenues avec la tension des instants d'échantillonnage suivants jusqu'à ce qu'on obtienne la déformation désirée. On connaît ainsi la tension à appliquer au système.

Cette méthode souffre cependant de plusieurs défauts. En effet, à chaque instant d'échantillonnage, on recourt au modèle de Preisach à plusieurs reprises, ce qui n'est pas envisageable pour une compensation en temps réel, à 8 kHz. Les auteurs effectuent d'ailleurs la majorité de leurs calculs avant de commencer la compensation. De plus, une telle méthode ne peut marcher qu'avec une consigne sinusoïdale ou entièrement prévisible, ce qui n'est pas du tout notre cas. Nous n'avons en effet aucune information sur la consigne du coup d'horloge suivant.

On peut cependant constater qu'il est possible de calculer la tension nécessaire à créer la déformation souhaitée en ne faisant appel qu'une seule fois au modèle de Preisach. En effet, en combinant les différentes équations introduites au paragraphe 2.2.2, on peut aboutir à l'expression de la tension  $u(t)$  en fonction de la déformation  $x(t)$ .

#### 3.3.2 Principe de la méthode

Nous allons séparer la méthode dans le cas où l'hystérèse se trouve dans une boucle ascendante, à celui où elle se trouve dans une boucle descendante.

- Si  $\dot{u}(t) \geq 0$

Si l'on pose  $t_0$  comme le temps pour lequel la tension de commande se trouve dans un minimum local, on calcule la déformation en additionnant simplement les différences  $X(\alpha', \beta')$  :

$$x(t_0) = \sum_{k=1}^{N-1} [X(\alpha'_k, \beta'_{k-1}) - X(\alpha'_k, \beta'_k)] \quad (9)$$

Lorsque la tension augmente, on utilise à chaque instant d'échantillonnage l'équation (5) pour mettre la déformation à jour :

$$x(t) = \sum_{k=1}^{N-1} [X(\alpha'_k, \beta'_{k-1}) - X(\alpha'_k, \beta'_k)] + X(u(t), \beta'_N) \quad (10)$$

La déformation  $x(t_0)$  est connue puisque toutes les différences  $X(\alpha'_k, \beta'_k)$  et  $X(\alpha'_k, \beta'_{k-1})$  ont été gardées en mémoire.  $x(t)$  est également connu si l'on suppose que c'est la déformation que l'on souhaite obtenir. On peut donc déduire que :

$$X(u(t), \beta'_N) = x(t) - x(t_0) \quad (11)$$

En sachant dans quelle case du diagramme  $\alpha$ - $\beta$  la déformation  $X(u(t), \beta'_N)$  se trouve, il est possible d'utiliser l'expression de l'interpolation dont on connaît les coefficients :

$$X(u(t), \beta'_N) = a_{00} + a_{10}u(t) + a_{01}\beta'_N + a_{11}u(t)\beta'_N \quad (12)$$

En combinant les équations (11) et (12), on peut ensuite conclure que la tension nécessaire pour obtenir la déformation  $x(t)$  est la suivante :

$$u(t) = \frac{X(u(t), \beta'_N) - a_{01}\beta'_N - a_{00}}{a_{10} + a_{11}\beta'_N} = \frac{x(t) - x(t_0) - a_{01}\beta'_N - a_{00}}{a_{10} + a_{11}\beta'_N} \quad (13)$$

Pour illustrer cette méthode d'inversion, il est plus aisé de raisonner à l'aide du diagramme  $\alpha$ - $\beta$  (Figure 8). Lorsque la tension est à son minimum local, la différence  $X(u(t), \beta'_N)$  se trouve sur la droite  $\alpha=\beta$  et vaut en toute logique 0, comme d'ailleurs toutes les autres valeurs sur cette droite. Lorsque la tension augmente, le point qui contient  $X(u(t), \beta'_N)$  se déplace sur la verticale  $\beta=\beta'_N$  (Figure 28). Pour savoir dans quelle case il se trouve, il suffit de comparer sa valeur avec les celles contenues dans la grille. Comme les valeurs  $X(\alpha, \beta)$  croissent d'une manière continue lorsque l'on monte dans le tableau, notre tâche se trouve légèrement simplifiée. Une recherche itérative de bas en haut peut être effectuée jusqu'à ce que la valeur  $X(u(t), \beta'_N)$  que l'on recherche (équation 11) soit comprise entre les limites inférieure et supérieure de la case. La tension  $u(t)$  que l'on doit appliquer à l'actuateur pour obtenir la déformation voulue est ensuite simplement l'ordonnée qui permet de satisfaire le résultat de l'interpolation dans la case correspondante (équation 13).

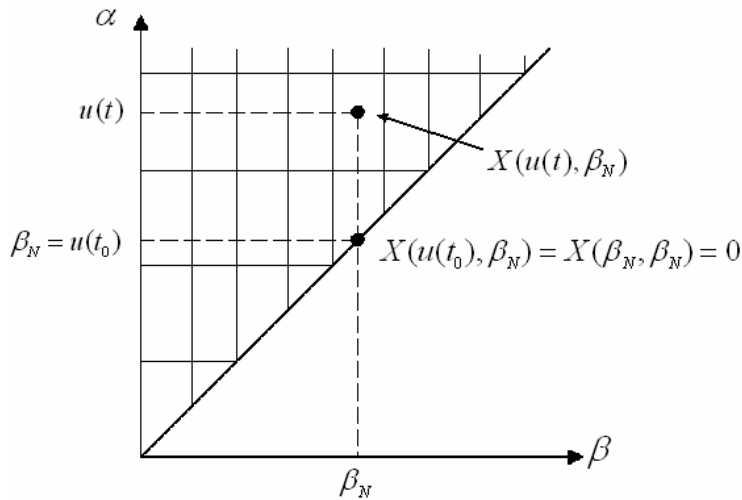


Figure 28 : Illustration de la détermination de la tension  $u(t)$  lorsque l'on se trouve dans une boucle d'hystérèse ascendante. Le point contenant la valeur  $X(u(t), \beta'_N)$  se déplaçant sur la droite  $\beta=\beta'_N$ , on peut constater que son ordonnée est la seule vraie inconnue de notre problème.

- Si  $\dot{u}(t) < 0$

Le cas où la tension diminue est très semblable à celui que nous venons de traiter. Si l'on pose  $t_0$  comme le temps pour lequel la tension de commande se trouve dans un maximum local, on calcule la déformation de la manière suivante :

$$x(t_0) = \sum_{k=1}^{N-1} [X(\alpha'_k, \beta'_{k-1}) - X(\alpha'_k, \beta'_k)] + X(\alpha'_N, \beta'_{N-1}) \quad (14)$$

Lorsque la tension diminue, on utilise à chaque instant d'échantillonnage l'équation (6) pour mettre la déformation à jour :

$$x(t) = \sum_{k=1}^{N-1} [X(\alpha'_k, \beta'_{k-1}) - X(\alpha'_k, \beta'_k)] + X(\alpha'_N, \beta'_{N-1}) - X(\alpha'_N, u(t)) \quad (15)$$

De ces deux dernières équations, on peut tirer que :

$$X(\alpha'_N, u(t)) = x(t_0) - x(t) \quad (16)$$

En sachant dans quelle case du diagramme  $\alpha$ - $\beta$  la déformation  $X(\alpha'_N, u(t))$  se trouve, il est possible d'utiliser l'expression de l'interpolation dont on connaît les coefficients :

$$X(\alpha'_N, u(t)) = a_{00} + a_{10}\alpha'_N + a_{01}u(t) + a_{10}\alpha'_N u(t) \quad (17)$$

En combinant les équations (16) et (17), on peut ensuite conclure que la tension nécessaire pour obtenir la déformation  $x(t)$  est la suivante :

$$u(t) = \frac{X(\alpha'_N, u(t)) - a_{10}\alpha'_N - a_{00}}{a_{01} + a_{11}\alpha'_N} = \frac{x(t_0) - x(t) - a_{10}\alpha'_N - a_{00}}{a_{01} + a_{11}\alpha'_N} \quad (18)$$

La différence principale entre le cas où la tension augmente et celui où elle diminue est le fait qu'au lieu de se déplacer de bas en haut, le point qui contient  $X(\alpha'_N, u(t))$  se trouve sur l'horizontale  $\alpha = \alpha'_N$  (Figure 29). Par ailleurs, la tension que l'on cherche n'est plus aux ordonnées, mais aux abscisses. Lorsque la tension est à son maximum local, la différence  $X(\alpha'_N, u(t))$  se trouve sur la droite  $\alpha = \beta$  et vaut donc 0. Lorsque la tension diminue, le point qui contient  $X(\alpha'_N, u(t))$  se déplace vers la gauche sur l'horizontale  $\alpha = \alpha'_N$ . Comme dans le cas précédent, les valeurs  $X(\alpha, \beta)$  croissent lorsqu'on se déplace dans le tableau. On recherche donc cette fois la case pour laquelle la valeur  $X(\alpha'_N, u(t))$  est comprise entre les limites droite et gauche. La tension  $u(t)$  que l'on doit appliquer à l'actuateur pour obtenir la déformation voulue est ensuite l'abscisse qui permet de satisfaire le résultat de l'interpolation dans la case correspondante (équation 18).

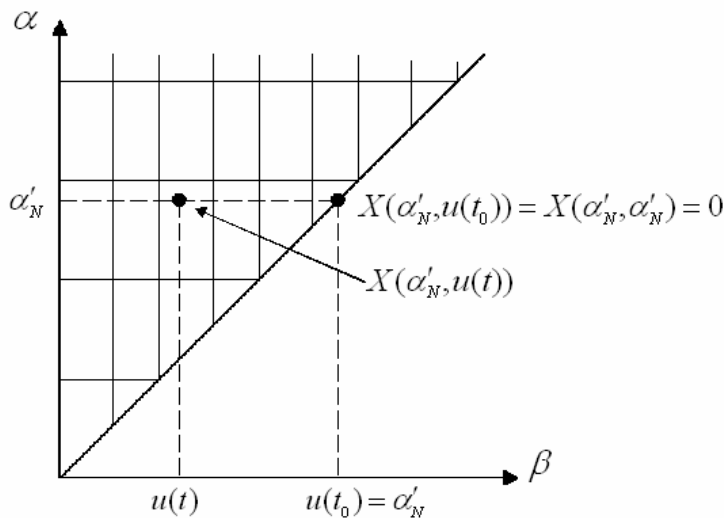


Figure 29 : Illustration de la détermination de la tension  $u(t)$  lorsque l'on se trouve dans une boucle d'hystérèse descendante.

Excepté ces petites différences de calculs, le reste de l'algorithme se déroule de la même manière que pour l'élaboration d'un modèle. A chaque changement de signe de la tension, l'historique est sauvegardé. De plus, la propriété de « wipe-out » est également valable.

### 3.3.3 Résultats de la simulation

Tout comme la compensation à l'aide de la méthode du premier harmonique (§3.2.4), la simulation s'est entièrement déroulée en boucle ouverte. La dynamique de l'actuateur, représentée par la fonction de transfert  $G(s)$ , a dans un premier temps été laissée de côté.

Lorsqu'une déformation de type sinusoïdale est souhaitée, on constate que la déformation réelle du piézoélectrique suit parfaitement la consigne (*Figure 31*). Ceci n'est pas une surprise puisque le modèle de Preisach est utilisé à la fois pour modéliser le piézoélectrique et pour générer la tension de commande prenant en compte l'hystérèse. L'hystérèse est quasi inexistante comme la relation entre l'entrée et la sortie est presque linéaire (*Figure 30*) et l'erreur reste bornée entre  $\pm 40\text{nm}$  (*Figure 32*).

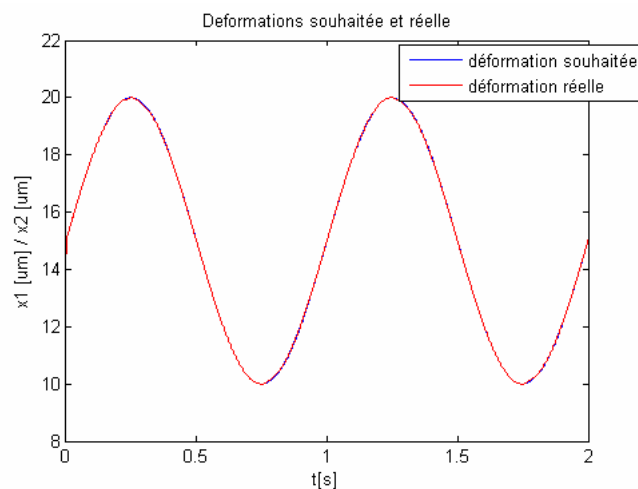


Figure 30 : Relation entre l'entrée et la sortie du système de compensation pour une consigne sinusoïdale de 5V d'amplitude. On peut observer une disparition presque complète de l'hystérèse.

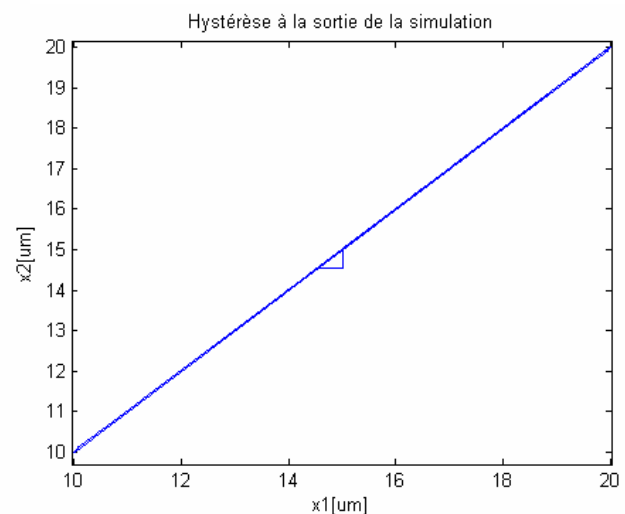
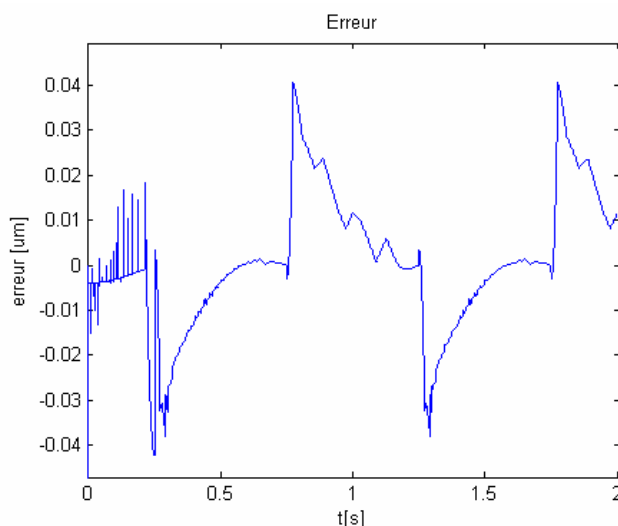


Figure 31 : Résultat obtenu en simulation pour une poursuite de consigne sinusoïdale de 5V d'amplitude. On peut constater que les deux courbes se confondent presque toujours.



Dans le système final, la consigne transmise pour rejeter les perturbations atmosphériques ne sera cependant pas du tout sinusoïdale. Elle s'apparentera plus à un signal de Kolmogorov, c'est pourquoi des tests ont été effectués à l'aide d'une consigne pouvant s'apparenter à un tel signal.

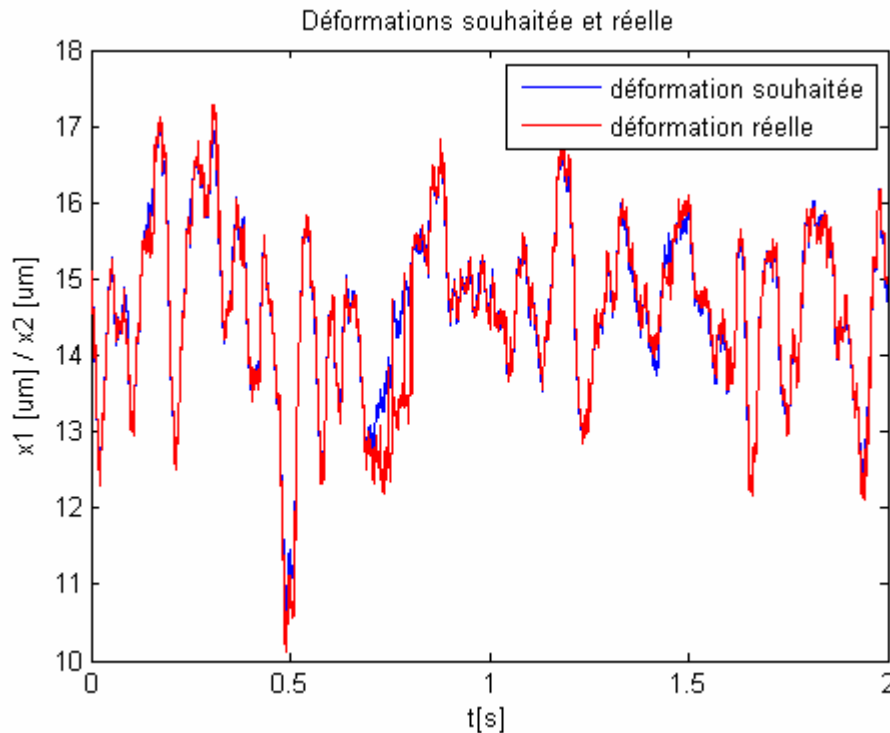


Figure 33 : Poursuite d'un signal de Kolmogorov avec le système de compensation de l'hystérèse.

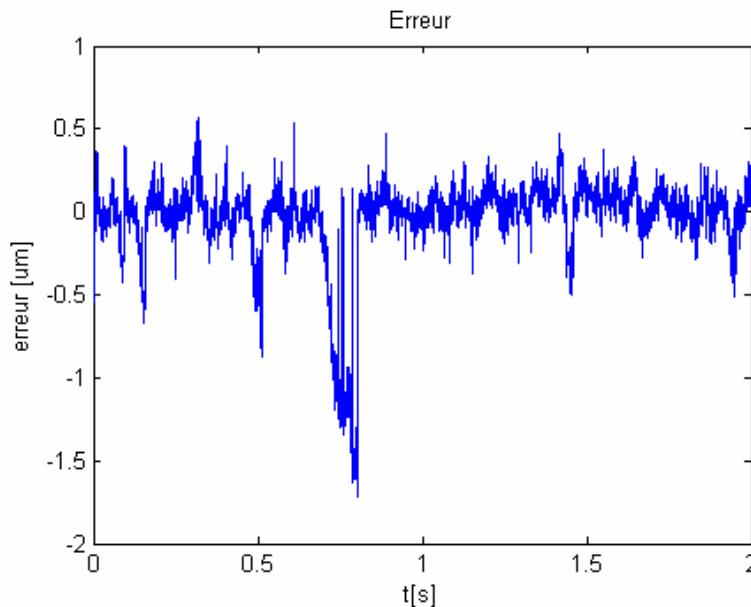


Figure 34 : Erreur obtenue pour la compensation d'un signal de Kolmogorov avec compensation de l'hystérèse. La grande majorité des points se trouvent entre  $-200\text{nm}$  et  $+200\text{nm}$ , mais en plus des nombreux petits pics, on remarque la présence momentanée d'une erreur élevée.

On peut constater que la plus grande partie de la poursuite s'avère concluante. On peut cependant noter l'erreur élevée que l'on peut voir apparaître nettement dans la Figure 34. Elle est due à une erreur dans le modèle qui n'a pas pu être totalement corrigée. Elle n'affectera cependant en rien la compensation lors de l'implantation de l'algorithme sur le prototype.

En ajoutant la dynamique au système simulé jusqu'à maintenant, on peut constater que celle-ci ajoute un retard supplémentaire à la sortie à cause de la phase de la fonction de transfert  $G(s)$  :

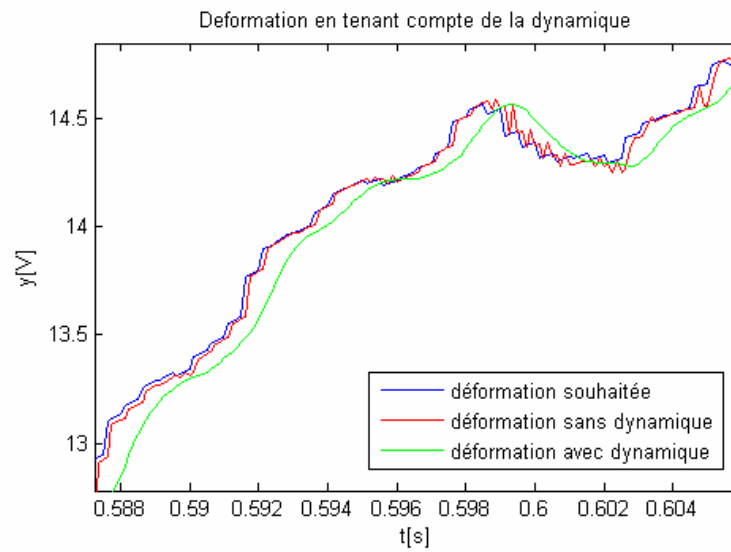


Figure 35 : Déformation simulée avec une prise en compte de la dynamique

## 4 Mesures sur le prototype

Suite aux résultats assez concluants de la compensation en simulation, l'algorithme conçu précédemment a été transformé de Matlab en C pour pouvoir être implémenté sur le prototype. Les tests se sont déroulés de la même manière que pour la simulation précédente, mais en remplaçant le modèle par le système physique qu'il représentait. La compensation se déroule donc en boucle ouverte, sans qu'aucun régulateur ne corrige l'erreur résiduelle.

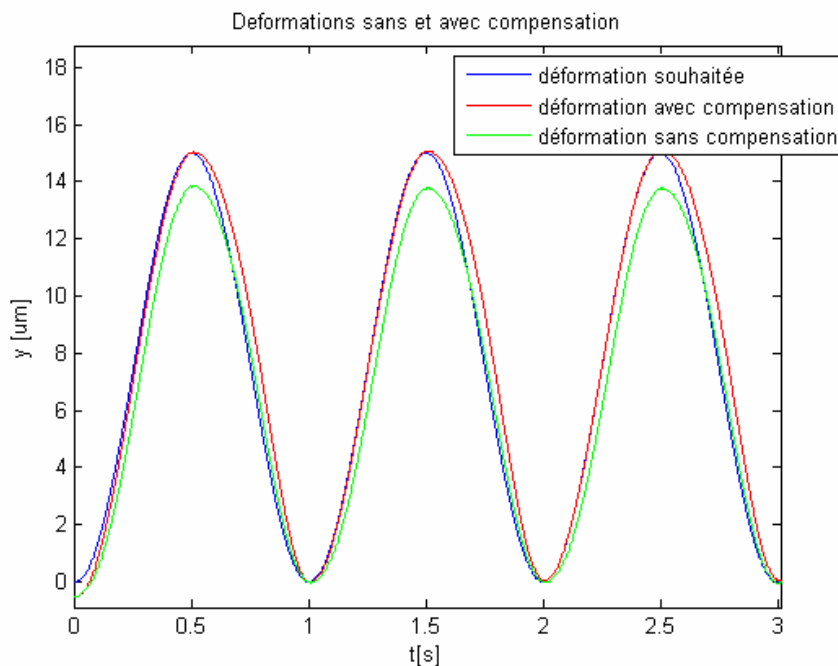
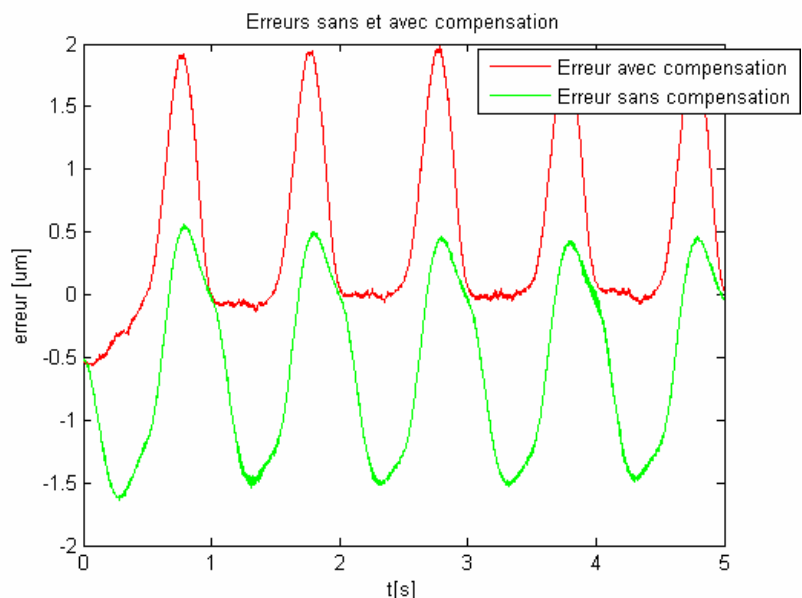


Figure 36 : Déformations obtenues en simulation avec et sans le système de compensation pour une consigne sinusoïdale de 7.5 μm d'amplitude. On semble constater que le système avec compensation est meilleur, cependant ce n'est pas vraiment le cas comme on peut le voir dans la figure 37.

Figure 37 : Erreur entre le signal de sortie et la consigne avec ou sans le système de compensation. On constate que la compensation ne se déroule pas parfaitement lorsque la consigne diminue, ce qui entraîne une erreur non négligeable. Ceci est navrant car l'algorithme semble très bien se comporter sur les pentes ascendantes.



La technique de compensation utilisée nécessiterait assurément quelques améliorations supplémentaires pour être efficace. Quelques tests à l'aide d'un signal de Kolmogorov ont également été effectués, mais ils n'ont pas permis une amélioration notable du comportement en boucle ouverte sans compensation de l'hystérèse.



## 5 Conclusion

Malgré les quelques problèmes rencontrés lors du transfert de l'algorithme sur le prototype, on peut affirmer que le modèle de Preisach offre une bonne précision. Par ailleurs, la technique d'inversion utilisée ne nécessite pas trop de calculs supplémentaires, ce qui permet une compensation de l'hystérèse en temps réel.

Pour implémenter durablement un tel algorithme sur l'actuateur qui compensera les perturbations atmosphériques, il serait cependant nécessaire de se pencher sur quelques problèmes qui empêchent la bonne marche du système. Il faudrait tout d'abord trouver une technique permettant une prise en compte de la fréquence de la consigne afin de modifier la compensation en conséquence. Une éventuelle possibilité serait l'utilisation non pas d'un diagramme en 2D, mais d'un diagramme en 3D contenant la fréquence dans la dimension supplémentaire. Il se pose cependant toujours le problème de la mesure de la fréquence, comme le signal que l'on poursuit n'a aucune logique. La seule chose que l'on puisse tirer des valeurs reçues est une tendance (augmentation ou diminution), ce qui ne semble pas suffisant pour en déduire une fréquence.

Un autre problème rencontré lors de l'utilisation du prototype est l'absence de modélisation du « creep » (glissement). Cette caractéristique des piézoélectriques qui n'est pas comprise dans le modèle de Preisach rendait la comparaison entre les différentes méthodes difficiles, une translation des données étant nécessaire pour que les courbes se superposent. Il serait utile d'incorporer cette propriété dans le modèle pour permettre des comparaisons plus sûres.

Il est par ailleurs difficile de savoir quel est l'état initial de l'actuateur à son démarrage. En effet, lorsque la tension est coupée, le piézoélectrique ne reste pas constamment à sa position finale. Celle-ci est lentement modifiée notamment par le « creep ». L'idéal serait donc d'effectuer une série d'initialisations avant d'envoyer à l'actuateur le signal à compenser. Une approche de genre a été tentée mais n'a pu vraiment aboutir faute de temps.

Sans être utopique, nous pouvons espérer améliorer cette méthode de compensation pour parvenir à diminuer l'erreur que le régulateur doit annuler. On ne peut cependant pas prétendre que la possibilité de compenser entièrement un signal de Kolmogorov grâce à cette méthode existe. La phase de la fonction de transfert  $G(s)$  modifiant toujours la déformation réelle de l'actuateur.

## 6 Remerciements

Je souhaite remercier Yvan Michellod pour ses conseils, sa disponibilité et sa bonne humeur durant toute la durée du projet. Un grand merci également à Philippe Müllhaupt pour ses conseils relatifs à la méthode du premier harmonique, ainsi que pour ses judicieuses remarques lors des présentations orales. Je remercie également Dragan Damjanovic pour ses explications sur l'origine de l'hystérèse, pour le temps qu'il m'a consacré et pour les références intéressantes qu'il m'a transmises.

Lausanne, le 2 juillet 2007

## 7 Bibliographie

### Livres

- [1] Kenji Uchino, *Piezoelectric actuators and ultrasonic motors*, Kluwer Academic Publishers, Boston, 1997, 349 p.
- [2] Roland Longchamp, *Commande numérique de systèmes dynamiques*, PPUR, Lausanne, 2006, 765 p.
- [3] Philippe Müllhaupt, *Introduction à l'Analyse et à la Commande des Systèmes Non Linéaires*, Polycopié EPFL, 2007, 182 p.

### Comportement des matériaux piézoélectriques

- [3] G. Robert, D. Damjanovic, N. Setter, "Piezoelectric hysteresis analysis and loss separation", *Journal of Applied Physics*, 90, 4668-75 (2001).
- [4] D. Damjanovic, "Stress and frequency dependence of the direct piezoelectric effect in ferroelectric ceramics", *Journal of Applied Physics*, 82, 1788-97 (1997).
- [5] D. Damjanovic, S.S.N. Bharadwaja, N. Setter, "Toward a unified description of nonlinearity and frequency dispersion of piezoelectric and dielectric responses in Pb(Zr,Ti)O<sub>3</sub>", *Materials Science and Engineering B*, 120, 170-174 (2005).

### Modèles de représentation

- [6] M. Goldfarb, N. Celanovic, "Modeling Piezoelectric Stack Actuators for Control of Micromanipulation", *IEEE Control Systems Magazine*, 17, 69-79 (1997).
- [7] H.M.S. Georgiou, R. Ben Mrad, "Electromechanical Modeling of Piezoceramic Actuators for Dynamic Loading Applications", *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control : Transactions of the ASME*, 128, 558-567 (2006).
- [8] P. Ge, M. Jouaneh, "Modeling hysteresis in piezoceramics actuators", *Precision Engineering*, 17, 211-221 (1995).
- [9] P. Ge, M. Jouaneh, "Generalized preisach model for hysteresis nonlinearity of piezoceramic actuators", *Precision Engineering*, 20, 99-111 (1997).
- [10] D. Song, C.J. Li, "Modeling of piezo actuator's nonlinear and frequency dependent dynamics", *Mechatronics*, 9, 391-410 (1999).
- [11] H. Hu, R. Ben Mrad, "On the classical Preisach model for hysteresis in piezoceramics actuators", *Mechatronics*, 13, 85-94 (2003).

### Compensation de l'hystérèse

- [12] S. Chonan, Z. Jiang, T. Yamamoto, "Nonlinear Hysteresis Compensation of Piezoelectric Ceramics Actuators", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 7, 150-156 (1996).
- [13] H. Janocha, K. Kuhnen, "Real-time compensation of hysteresis and creep in piezoelectric actuators", *Sensors and Actuators A: Physical*, 79, 83-89 (2000).

- [14] P. Ge, M. Jouaneh, "Tracking Control of a Piezoelectric Actuator", *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 40, 209-216 (1996).
- [15] D. Croft, G. Shedd, S. Devasia, "Creep, Hysteresis, and Vibration Compensation for Piezoactuators: Atomic Force Microscopy Application", *Proceedings of the American Control Conference*, 3, 2123-28 (2000).
- [16] K.K. Leang, S. Devasia, "Design of hysteresis-compensating iterative learning control for piezo-positioners: Application to atomic force microscopes", *Mechatronics*, 16, 141-158, (2006).

**Sites internet**

- [17] [www.pi.ws](http://www.pi.ws)