

Chapitre 5

Commande linéarisante d'actionneurs piézoélectriques

5.1 Introduction

La commande des actionneurs piézoélectriques, c'est à dire l'étude des grandeurs ou des lois de commande permettant le contrôle des déplacements et/ou des forces générés, est une problématique à part entière qui semble parfois éclipsée par la relative facilité de mise en œuvre d'une commande traditionnelle en tension¹. Cette dernière est la plus utilisée dans le monde industriel mais le transfert entre la tension appliquée aux bornes l'actionneur et la déformation de celui-ci n'est cependant pas linéaire (figure 5.1). Il est alors nécessaire de développer des commandes adaptées à ce type d'actionneurs, en particulier pour compenser les non-linéarités. A ce sujet, nous rappelons dans la première partie de ce chapitre les non-linéarités fréquemment rencontrées dans les matériaux piézoélectriques, à savoir :

- les variations des paramètres physiques du matériau (coefficients diélectriques, mécaniques et piézoélectriques) en fonction des grandeurs telles que le champ électrique, la contrainte, la température ou même l'humidité (Zhou 2001) ;
- la dérive lente de la déformation en fonction du temps ;
- et l'hystérésis entre la tension appliquée aux bornes de l'actionneur et la déformation du matériau.

Il serait vain, ou tout au moins fastidieux, de vouloir étudier et compenser les variations de tous les paramètres d'un matériau tant les influences sont multiples et tant la reproductibilité d'un échantillon à un autre est faible. Pour ces raisons, nous n'allons pas plus loin concernant ce point qui dépasse le cadre de cette étude.

En revanche, nous abordons plus en détail le phénomène de dérive lente de la déformation en fonction du temps, couramment appelé "*creep*" (terminologie anglo-saxonne)

1. Nous entendons par "*commande en tension*", l'application d'une différence de potentiel connue entre les électrodes d'un actionneur piézoélectrique, provoquant ainsi un déplacement et/ou une force.

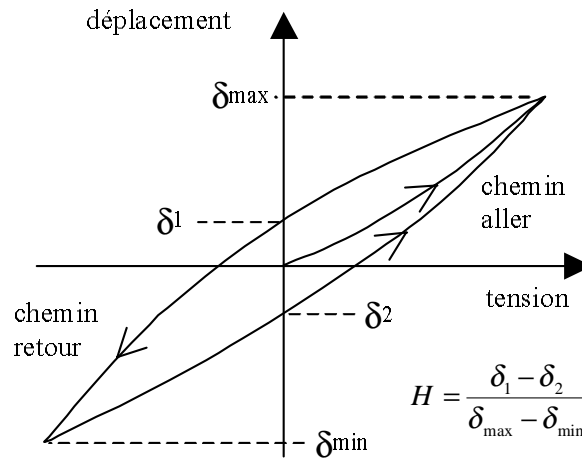


FIG. 5.1 – Cycle d'hystérésis d'un actionneur piézoélectrique commandé en tension

et le phénomène d'hystérésis vis à vis desquels il est envisageable d'améliorer le comportement des actionneurs piézoélectriques.

Commande des actionneurs piézoélectriques - généralités :

Actuellement, les actionneurs et micro-actionneurs piézoélectriques connaissent un grand essor, notamment dans le domaine du micro et nanositionnement (motorisé par ces actionneurs). Les applications de ce type de systèmes sont en particulier :

- la micromanipulation et le micro-assemblage ;
- le nanositionnement de levier pour la microscopie en champ proche (AFM, STM).

D'une manière générale, les actionneurs piézoélectriques et les systèmes qui les utilisent, actuellement disponibles sur le marché, sont commandés :

- soit en boucle ouverte, directement en tension (figure 5.2.a) ;
- soit en boucle fermée (asservissement de position), avec une consigne de position et une commande de l'actionneur en tension (figure 5.2.b).

Dans le premier cas, il s'agit d'une commande très simple où l'on applique directement une tension aux bornes de l'actionneur piézoélectrique, qui réagit en se déformant (figure 5.2.a). L'inconvénient majeur de cette méthode est que le comportement statique de l'actionneur qui lie la déformation (donc le positionnement) à la tension, présente une hystérésis qui peut atteindre typiquement 20 % pour les céramiques douces.

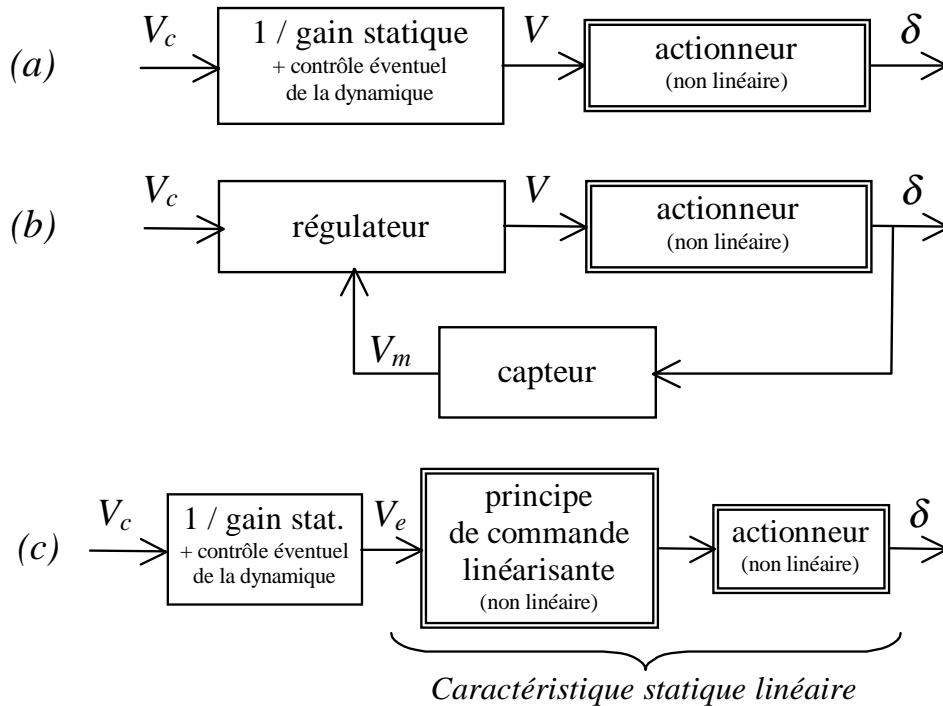


FIG. 5.2 – Différents type de commande d'actionneurs piézoélectrique : (a) commande en tension en boucle ouverte ; (b) commande en tension en boucle fermée ; (c) commande linéarisante en boucle ouverte

Prenons un exemple : considérons un actionneur piézoélectrique dont la course est de $25 \mu\text{m}$. L'hystérésis (figure 5.1), définie par :

$$H = \frac{\delta_1 - \delta_2}{\delta_{\max} - \delta_{\min}} \quad , \quad (5.1)$$

est considérée égale à 20 %. L'erreur maximale de positionnement avec une commande en tension en boucle ouverte sera alors de $5 \mu\text{m}$, ce qui est très dommageable à la précision du positionnement.

Compte tenu de ce problème de précision, une idée logique consiste à mettre en œuvre un asservissement de position (figure 5.2.b), permettant de s'affranchir des problèmes de non-linéarités liées à l'hystérésis et au creep. Ceci fonctionne très bien et permet d'obtenir une très grande précision de positionnement, mais génère un surcoût très important de l'ensemble, par l'adjonction d'un capteur de position à très haute précision et du système de régulation approprié².

Il existe cependant des solutions alternatives aux systèmes asservis qui assurent une commande linéaire et stable en boucle ouverte, conduisant ainsi à une amélioration sen-

2. le prix de vente d'un axe de positionnement piézoélectrique équipé d'un capteur peut être doublé, voire triplé en fonction du type de capteur utilisé (fondé sur des jauges de déformation, un principe capacitif ou magnétique) par rapport au même produit piloté en boucle ouverte.

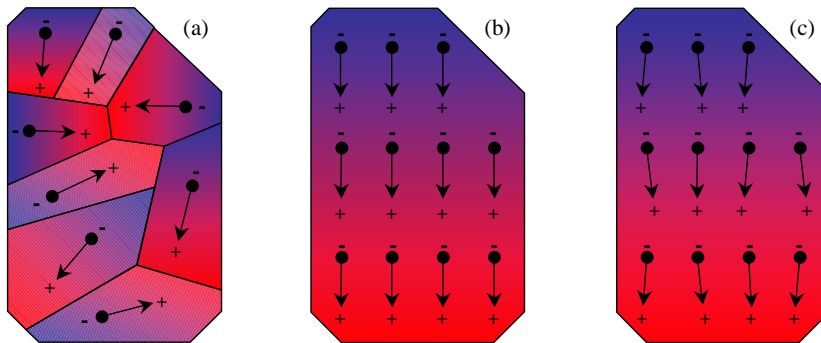


FIG. 5.3 – Domains polarisés d'un matériau piézoélectrique : (a) matériau non polarisé ; (b) matériau en cours de polarisation ; (c) matériau polarisé

sible du comportement de l'actionneur (figure 5.2.c). Parmi ces solutions, nous pouvons citer les commandes linéarisantes fondées sur :

- des modèles de comportement ;
- l'application d'une quantité de charges électriques contrôlée.

Après avoir détaillé les non-linéarités dans la section suivante, nous poursuivons ce chapitre par quelques éléments d'état de l'art concernant ces techniques de commande en boucle ouverte des actionneurs piézoélectriques. Nous décrivons ensuite la commande linéarisante en boucle ouverte que nous avons développée, appelée “commande Q/V ”. Enfin, notons qu'un glossaire des notations utilisés dans ce chapitre est présent à la page 139.

5.2 Phénomènes non-linéaires dans les actionneurs piézo-électriques

Comme nous l'avons mentionné précédemment, nous nous intéressons désormais à deux types de non-linéarités observés dans les matériaux piézoélectriques :

- la dérive lente de la déformation en fonction du temps ;
- et l'hystérésis entre la déformation du matériau et la tension de commande.

5.2.1 Dérive lente de la déformation en fonction du temps

Une céramique, rendue piézoélectrique par des traitements électriques et thermiques appropriés, présente une polarisation moyenne qui résulte de l'orientation d'une multitude de domaines polarisés³ (figure 5.3). Lorsqu'un champ électrique est appliqué, l'actionneur se déforme rapidement avec des constantes de temps de l'ordre de quelques

³. Les domaines piézoélectriques désignent des zones du matériau pour lesquelles la polarisation est uniforme.

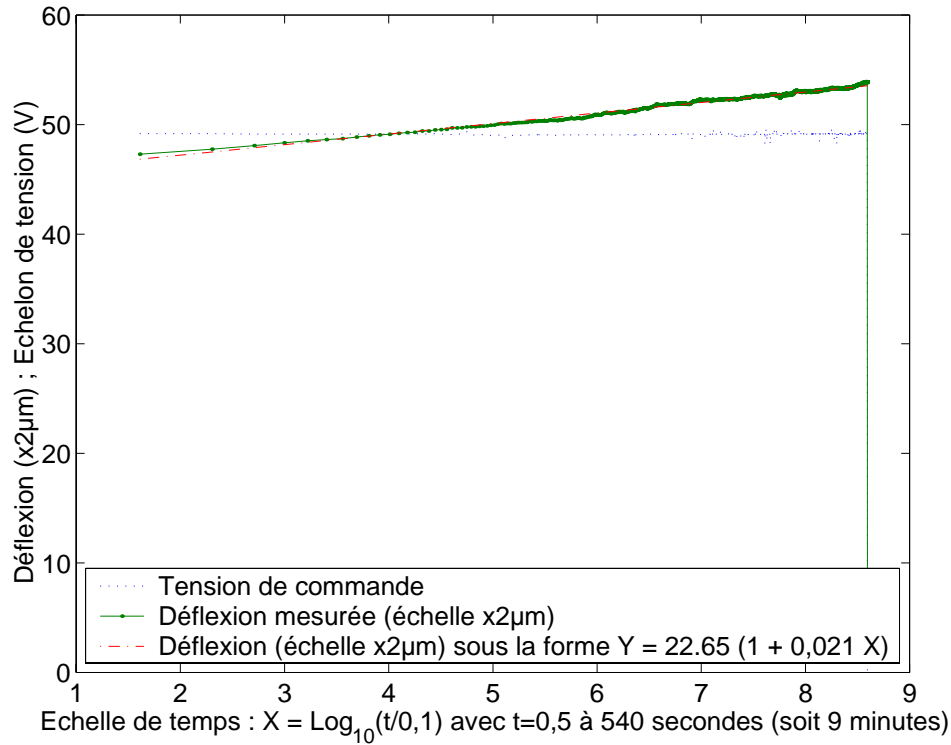


FIG. 5.4 – *Dérive lente des actionneurs piézoélectriques (Creeping): exemple de dérive en fonction du temps observée pour la déflexion d'un doigt de pince soumis à un échelon de tension*

centaines de microsecondes à plusieurs millisecondes selon le type d'actionneur, conformément à l'effet inverse de la piézoélectricité. Il s'ensuit alors un alignement progressif des domaines piézoélectriques en fonction du temps, modifiant ainsi l'aptitude du matériau à se déformer. Ceci occasionne alors un mouvement lent (sur plusieurs dizaines de secondes) qui est donné par la relation (Jung 2000, Physik Instrumente 1998):

$$\Delta L(t) = \Delta L_{(t=0,1)} \cdot \left\{ 1 + \gamma \cdot \log \left(\frac{t}{0,1} \right) \right\} \quad (5.2)$$

avec : $\Delta L_{(t=0,1)}$, déplacement à $t = 0,1$ s après déformation complète de l'actionneur ;
 γ , facteur de dérive.

Le facteur de dérive γ dépend des propriétés du matériau. Les constructeurs annoncent typiquement des variations de 1 à 2 % de ce paramètre par décade de temps. La figure 5.4 présente la dérive de la déflexion d'un doigt d'une micropince soumis à un échelon de tension de 50 V environ. Nous identifions dans cette exemple $\Delta L_{(t=0,1)} = 22,65 \mu\text{m}$ et $\gamma = 2,1 \%$.

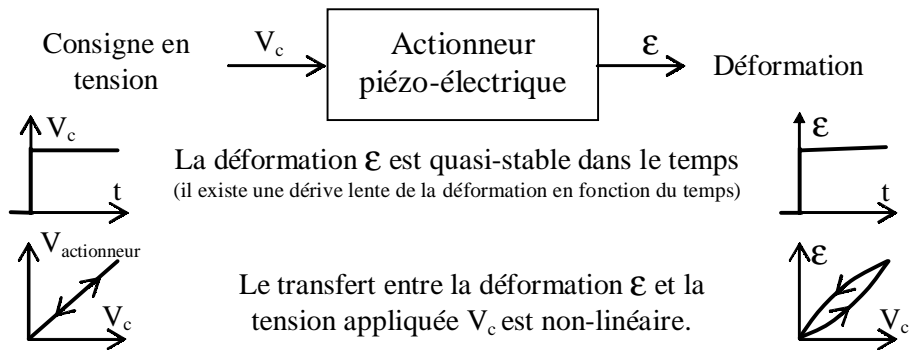


FIG. 5.5 – Commande à tension constante d'un actionneur piézoélectrique

5.2.2 L'hystérésis dans les matériaux piézoélectriques

Les actionneurs piézoélectriques présentent une hystérésis entre la tension appliquée et la déformation engendrée (figure 5.5). Cette non-linéarité peut atteindre 15 à 20 % pour des céramiques “douces” et de l'ordre de 10 à 15 % pour des matériaux “durs”. Par conséquent, comme le montre la figure 5.1, les déformations ou déplacements d'un actionneur piézoélectrique ne sont pas les mêmes lorsque l'on applique une tension croissante (chemin aller) et une tension décroissante (chemin retour).

Les raisons physiques de ce phénomène hystérétique dans les matériaux piézoélectriques sont complexes. Deux effets au moins (par ailleurs couplés) expliquent ce comportement non linéaire :

- la réorientation des domaines élémentaires polarisés ;
- et la non-linéarité des charges libres, donc du champ électrique, par rapport à la tension appliquée.

* * *

Note aux lecteurs : malgré tous nos efforts de présentation et de simplification, les explications qui suivent peuvent être perçues de prime abord comme complexes. Elle requièrent une grande attention et une petite gymnastique d'esprit. Aussi, il est conseillé de les suivre calmement mais scrupuleusement. Elles sont présentées sous la forme d'étapes numérotées, lesquels numéros sont reportés sur chacune des figures citées en référence.

Rappelons qu'un glossaire des notations utilisées dans la suite de ce chapitre est présent à la page 139.

* * *

Préambule

Rappelons tout d'abord la forme (D, S) des relations fondamentales de la piézoélectricité (équations 5.3) :

$$\begin{aligned} S_p &= s_{pq}^E \cdot T_q + d_{kp} \cdot E_k \\ D_i &= d_{ip} \cdot T_q + \varepsilon_{ik}^T \cdot E_k \end{aligned} \quad (5.3)$$

avec : S_p , déformation relative ;
 D_i , déplacement électrique ;
 T_q , contrainte ;
 E_k , champ électrique ;
 s_{pq}^E , tenseur des souplesses à champ électrique constant ;
 ε_{ik}^T , tenseur des permittivités diélectriques à température constante ;
 d_{kp} , tenseur des coefficients piézoélectriques.

A contrainte T_q nulle (actionneur non chargé mécaniquement), la déformation S_p est proportionnelle au champ électrique E_k . Il convient de préciser que ce dernier correspond au champ total composé de E_P , le champ équivalent à la polarisation du matériau, et de E_{ext} , le champ externe du aux charges libres présentes sur les électrodes, soit :

$$E_k = E_P + E_{ext} \quad (5.4)$$

Nous posons :

$$E_P = E_{P_0} + \Delta E_P \quad (5.5)$$

où E_p est le champ correspondant à la polarisation initiale à champ extérieur nul et à contrainte nulle et ΔE_P est la variation de E_p lorsque l'on sollicite le matériau.

Dans la suite, nous nous plaçons à contrainte constante T_0 . La sollicitation électrique du matériau est assurée par l'application de E_{ext} . Ainsi pour $T = T_0$, les relations 5.3, 5.4 et 5.5 donnent :

$$\begin{aligned} S &= s \cdot T_0 + d \cdot (E_{P_0} + \Delta E_P + E_{ext}) \\ S &= S_0 + d \cdot (\Delta E_P + E_{ext}) \end{aligned} \quad (5.6)$$

avec : $S_0 = s \cdot T_0 + d \cdot E_{P_0}$

Dans la suite, nous ne prenons pas en compte S_0 , qui constitue une déformation initiale constante.

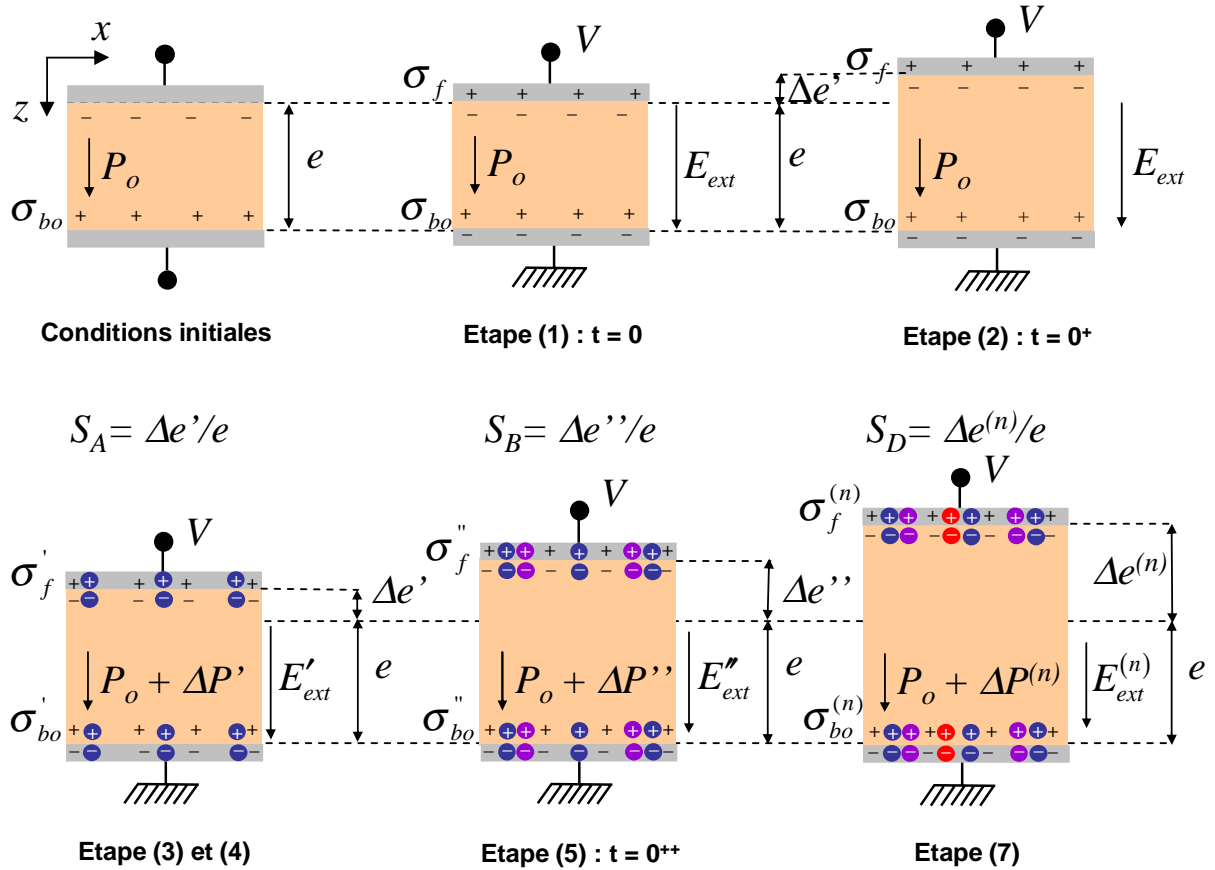


FIG. 5.6 – Evolution des évènements utiles à la compréhension du phénomène d'hystérésis

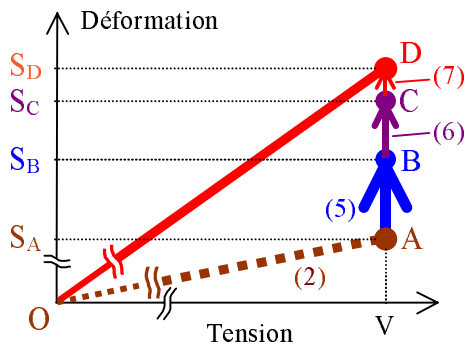


FIG. 5.7 – Vue de détail de la déformation en fonction de la tension appliquée

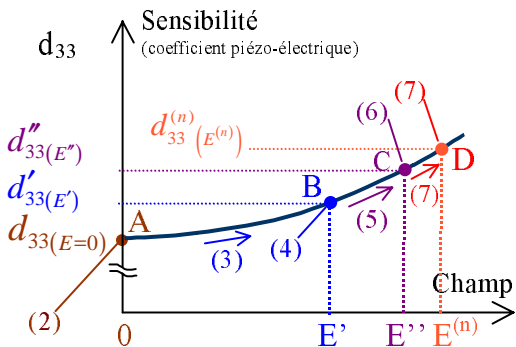


FIG. 5.8 – Relation entre le paramètre piézoélectrique d_{33} et le champ appliqué E_3

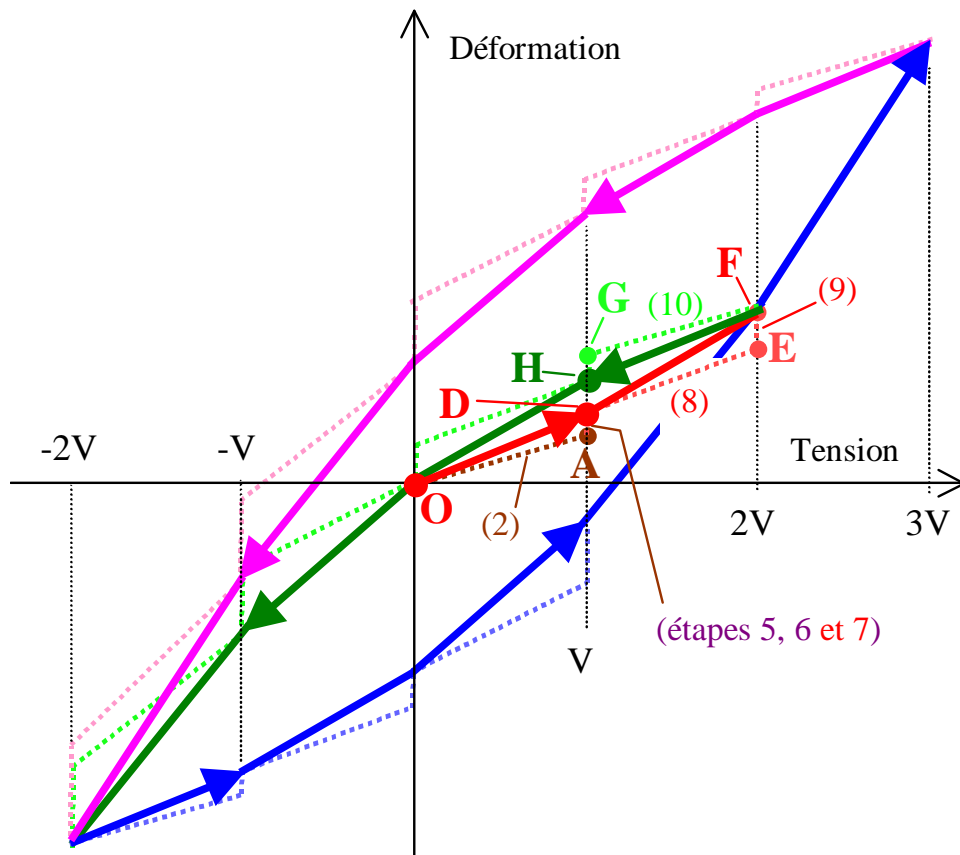


FIG. 5.9 – Vue globale de la courbe de déflexion en fonction de la tension appliquée

Présentation des figures

La figure 5.6 illustre l'évolution des événements utiles à la compréhension du phénomène d'hystérésis. Les figures 5.7 et 5.9 représentent deux graphes de la déformation en fonction de la tension appliquée. La première est une vue localisée autour du premier incrément de tension de 0 à V afin de bien comprendre le mécanisme de base expliqué dans la suite. La seconde est une vue plus globale du phénomène pour lequel la commande appliquée varie par pas de tension et décrit quatre cycles d'hystérésis (de 0 à $2 \cdot V$, de $2 \cdot V$ à $-2 \cdot V$, de $-2 \cdot V$ à $3 \cdot V$, puis de $3 \cdot V$ à $-2 \cdot V$). La figure 5.8 montre la relation qui existe entre les paramètres piézoélectriques d et le champ total E (Hall 2001, Comeaga 1999). Cette non-linéarité traduit en particulier l'effet de réorientation des domaines et nous est utile pour mener à bien nos explications. Enfin, la figure 5.10 représente les charges libres et liées auxquelles nous faisons référence dans les explications qui suivent.

Précisons tout de même que le cheminement proposé ci-après est purement une vue de l'esprit qui a pour principal objectif d'expliquer le phénomène d'hystérésis pas à pas qui, en pratique, est continu et quasi-instantané.

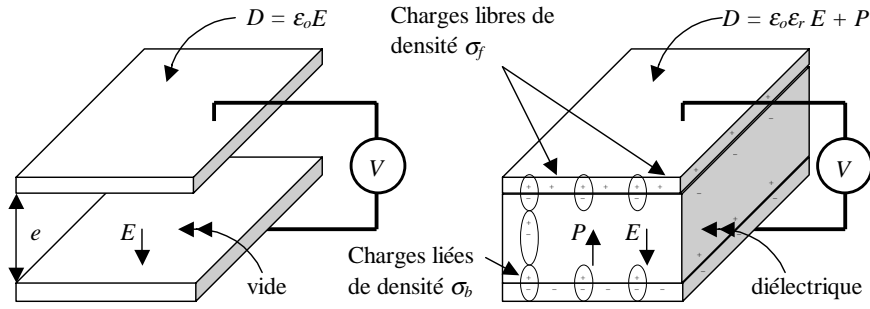


FIG. 5.10 – Représentation des charges libres σ_f et liées σ_b dans un diélectrique

Description du phénomène d'hystérésis

Considérons une céramique piézoélectrique (figure 5.6, conditions initiales) d'épaisseur e et de permittivité diélectrique ϵ_{33} , initialement polarisée par une polarisation \vec{P}_0 qui induit une densité de charges, dites "liées", σ_{b_0} . La déformation en fonction de la tension aux bornes de la céramique se comporte comme suit :

- Etape (1) : une tension $v(t) = V$ est appliquée à $t = 0$ (auparavant $v(t) = 0$) ; un champ électrique \vec{E}_{ext} apparaît alors sur le diélectrique, ainsi qu'une densité surfacique de charges, dites "libres", σ_f sur les électrodes, qui équilibre σ_{b_0} (figure 5.6, étape 1) ;
- Etape (2) : à $t = 0^+$, $\Delta E_P = 0$ et, conformément aux relations 5.3 de la piézoélectricité, qui s'expriment sur l'axe 3⁴, à contrainte nulle :

$$S = d_{33} \cdot E = d_{33} \cdot E_{ext}$$

Le champ implique une déformation S_A (figure 5.6, étape 2) proportionnelle au coefficient $d_{33(E=0)}$ (figure 5.8), représentée par la droite en pointillé (OA) sur les figures 5.7 et 5.9 ;

- Etape (3) : les domaines ont alors tendance à se réorienter et les mailles cristallines à se déformer sous l'effet du champ électrique, modifiant ainsi la polarisation $P_{(t=0^+)} = P_0 + \Delta P'$ (figure 5.6, étape 3). D'autre part, la sensibilité du matériau tend vers $d'_{33(E' \neq 0)} > d_{33(E=0)}$ (figure 5.8).

$\Delta P'$ est matérialisé par des charges liées supplémentaires de densité surfacique $\Delta \sigma'_b$ sur la figure 5.6, étape 3, qui conduit à l'apparition de nouvelles charges libres de densité surfacique $\Delta \sigma'_f = \epsilon_r \cdot \Delta \sigma'_b$ pour maintenir la tension V constant aux bornes de la céramique ;

4. Afin d'alléger les notations, la déformation et le champ électrique sont notés S et E alors qu'ils désignent S_3 et E_3 selon l'axe z .

Etape (4) : dans les milieux diélectriques, la polarisation P vaut :

$$P = \varepsilon_0 \cdot \chi \cdot E$$

avec : ε_0 , la permittivité du vide ; (5.7)
 χ , la susceptibilité diélectrique.

Conformément à la relation 5.7, si P augmente, le champ électrique total E augmente d'autant pour passer à E' :

$$E' = E + \Delta E_P = \sigma'_f / \varepsilon_0 \varepsilon_{33}$$

avec : $\sigma'_f = \sigma_f + \Delta \sigma_f$

Etape (5) : à $t = 0^{++}$, une élévation du champ E' ($E' > E$), implique une nouvelle déformation S_B telle que $\Delta S_b = S_B - S_A \ll S_A$ (point B sur la courbe de la figure 5.7) et tend vers une sensibilité $d''_{33(E'')}$ (figure 5.8), un peu supérieure à celle de la première déformation $d'_{33(E')}$.

Etape (6) : de nouveau, si la polarisation P augmente suite à l'augmentation de la déformation, le champ augmente à $E'' > E'$ (idem pour σ''_f qui augmente) conduisant à une nouvelle déformation S_C telle que $\Delta S_c = S_C - S_B < \Delta S_b$ (point C sur les courbes des figures 5.7 et 5.9).

Etape (7) : ce processus se répète et s'épuise peu à peu pour converger vers un champ $E^{(n)}$ (et une densité de charge libre $\sigma_f^{(n)}$), pour atteindre le point D sur les figures 5.7 et 5.9, ainsi qu'une sensibilité $d^{(n)}_{33(E^{(n)})} > d''_{33(E=0)}$ (figure 5.8) ;

Remarque : comme nous l'avons déjà mentionné, le chemin emprunté $OABCD$ est purement une vue de l'esprit. En pratique, le passage du point 0 au point D serait plutôt une ligne courbe, représenté ici par la droite OD en trait plein sur la figure 5.9, qui s'exécute de manière continue et quasi-instantanée.

Etape (8) : le saut indiciel de $v(t) = V$ à $v(t_1) = 2.V$ conduit à la même logique que celle décrite précédemment avec pour sensibilité initiale $d_{33 E^{(n)}}$ (figure 5.8), d'où la droite initiale (DE) en pointillée sur la figure 5.9, dans le prolongement de la déformation précédente⁵ (droite (OD)) ;

Etape (9) : selon la même logique décrite par les étapes 2 à 7, il en résulte le chemin direct décrit par la droite (DF) sur la figure 5.9 ;

Etape (10) : un moment d'attention est encore nécessaire pour imaginer le cas où $v(t)$ décroît de $2.V$ à V . Le comportement est similaire à une tension croissante à une nuance près : conformément aux lois expérimentales édictées par Rayleigh, reprises par exemple par Damjanovic (1996) pour décrire les phénomènes d'hystérésis, la diminution du point F au point G est la même que l'accroissement de celle-ci du point 0 au point A (figure 5.9, pente (10) = pente (2)).

5. N.B. : les droite OA et DE n'ont pas la même pente.

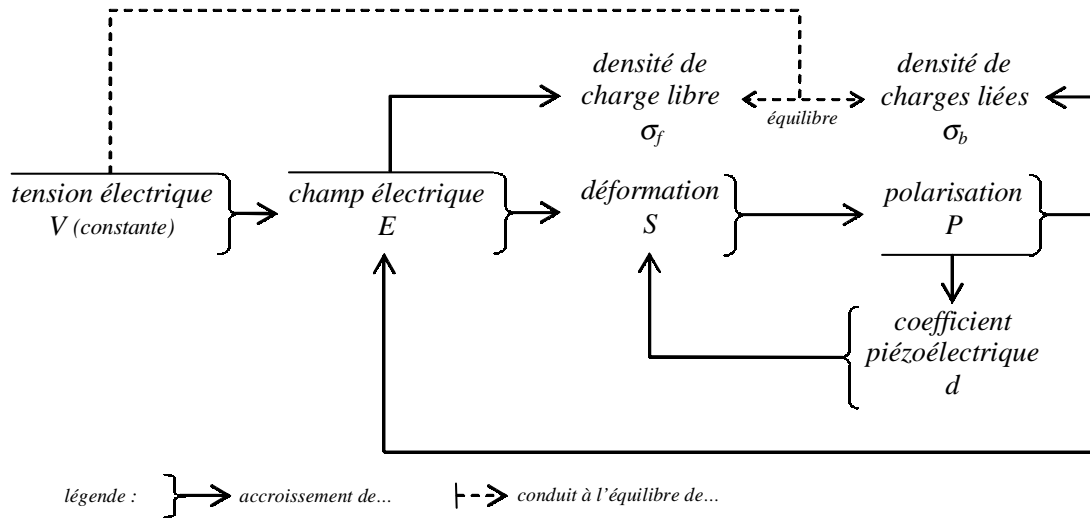


FIG. 5.11 – Relation (itérative) entre des grandeurs E , S , P , d et σ conduisant au phénomène d'hystérésis

Etape (11) : au final, la déformation résultante (après convergence de l'itération décrite ci-dessus) est donnée par le point H .

Le cycle se poursuit comme expliqué ci-dessus pour chaque pas de tension de telle sorte que la déformation décrit le cycle total d'hystérésis de la figure 5.9. Ces étapes peuvent être synthétisées par le graphe de la figure 5.11.

Après ces explications sur l'origine de l'hystérésis dans les matériaux piézoélectriques, nous dressons un état de l'art concernant les méthodes qui permettent de réduire ce phénomène, mais aussi, pour certaines de ces techniques, de limiter l'influence du phénomène de dérive lente dans le temps de ces actionneurs.

5.3 Etat de l'art des commandes linéarisantes en boucle ouverte d'actionneurs piézoélectriques

Au delà des pratiques courantes, souvent restreintes à une commande classique en tension, il existe différentes manières de piloter et de compenser en boucle ouverte (ou tout au moins d'atténuer) les effets indésirables des actionneurs piézoélectriques (hystérésis et creep). Ces commandes peuvent être classées selon deux catégories fondées sur :

- des modèles de comportement parmi lesquels nous pouvons citer les modèles de *Preisach* (Ge 1997, Robert 2001), de *Maxwell* (Goldfarb 1997) ou encore un modèle fondé sur un jeu d'équations polynomiales (Comeaga 1999) ;
- l'application d'une quantité de charges électriques contrôlée (Comstock 1981, Newcomb 1982, Newton 1996, Janocha 1996).

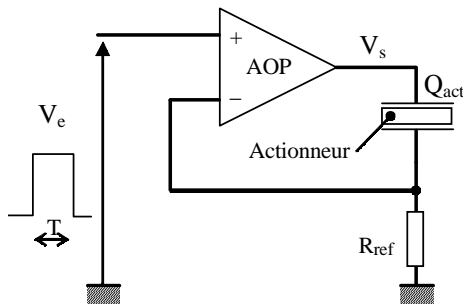


FIG. 5.12 – Schéma de principe simplifié d'une commande en charge ($Q = I \cdot T$) selon Newcomb (1982)

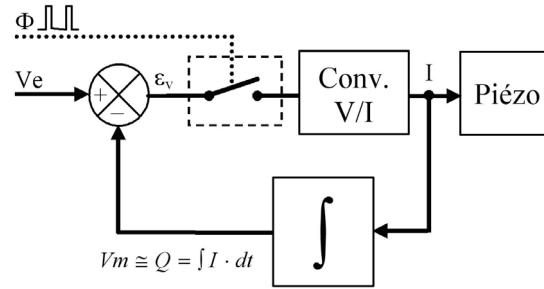


FIG. 5.13 – Schéma fonctionnel d'une commande en charge par intégration du courant selon Newton (1996)

Quelle approche choisir? En préambule à notre réponse, nous pensons que les méthodes fondées sur des modèles de comportement, bien que performantes, souffrent d'un manque de robustesse de la linéarisation vis à vis des variations du comportement de l'actionneur d'un point de vue industriel. En effet, même s'il est possible de prendre en compte une certaine plage d'incertitudes sur les paramètres des modèles⁶, les contraintes liées aux applications visées et en particulier les échelles mises en jeu (notamment une résolution nanométrique) imposent un calage systématique de ces paramètres pour chacun des actionneurs produits. Cette calibration, nécessaire, coûteuse et parfois pas toujours facile à mettre en œuvre pour déterminer tel ou tel paramètre dans une configuration d'actionneur donnée, dissuade généralement les initiatives industrielles dans ce domaine. Ainsi, nous n'aborderons pas les méthodes fondées sur des modèles inverses pour s'intéresser plutôt à une approche fondée sur une électronique de commande, que nous tentons de rendre la plus universelle possible, destinée à une large gamme d'actionneurs.

Plusieurs auteurs proposent des commandes linéarisantes en boucle ouverte fondées sur l'application d'une quantité de charges électriques constante sur les électrodes d'un actionneur piézoélectrique. Les différences d'un auteur à un autre résident dans la grandeur de commande permettant de générer la quantité de charges souhaitée. Nous rencontrons des montages de conversion tension/charge; d'autres réalisations sont fondées sur l'intégration d'un courant ou, à courant constant, la grandeur de commande est le temps d'intégration.

Un principe de commande en charge, présenté à la figure 5.14, a déjà été décrit par Comstock (1981) dans le cadre d'un brevet américain. Ce principe a été repris dans un article de Main (1995), appliqué à la commande d'un empilement piézoélectrique. Ces deux références abordent la compensation de l'hystérésis mais ne traitent pas de la dérive lente dans le temps.

6. L'ingénierie cristallographique a fait d'énormes progrès dans l'élaboration de nouveaux produits, tant sur les procédés de fabrication qu'en termes de caractéristiques intrinsèques des actionneurs. Cependant, la dispersion des caractéristiques de ces matériaux est encore grande: elle peut valoir de l'ordre de 10 % sur un même lot et atteindre 20 % entre deux lots (Physik Instrumente 1998).

Newcomb (1982) propose l'intégration d'un courant constant dans une fenêtre de temps donnée pour aboutir à une quantité de charge $Q_{pzt} = I \cdot T$ avec $I = V_e/R_{ref}$ (figure 5.12). Dans ce cas, il est clair que la charge ne sera pas maintenue constante dans le temps une fois l'impulsion de courant terminée en raison principalement des pertes dans le matériau. Newton (1996) repousse les limites de ce principe par la mesure de la quantité de charge appliquée sur l'actionneur via un intégrateur (figure 5.13). Cependant, cette configuration présente une dérive liée à la perte de charge lors d'un fonctionnement quasi-statique de l'actionneur. Janocha (1996) présente une solution technique équivalente à celle présentée à la figure 5.13, à la différence que l'intégration du courant est réalisée autour d'une structure microprogrammée. Cependant, l'intégration numérique limite la bande passante de ces actionneurs piézoélectriques à une centaine de Hertz alors qu'ils peuvent prétendre travailler au delà du KiloHertz.

5.4 Commande en charge d'actionneurs piézoélectriques

Comme déjà indiqué, la littérature scientifique présentée dans l'état de l'art des commandes linéarisantes fait souvent référence à la commande en charge (dite encore à charge électrique constante). Il nous semble alors indispensable de nous attarder quelques instants sur ce point. Tout d'abord, nous expliquons pourquoi cette commande offre une déformation linéaire en fonction de la charge électrique appliquée. Ensuite, nous attirons l'attention sur les limites de ce type de commande.

5.4.1 Pourquoi la déformation est linéaire en fonction de la charge électrique?

Pour répondre à cette question, on utilise la forme (D, S) des relations fondamentales de la piézoélectricité (équations 5.3). Par souci de simplification, considérons une structure piézoélectrique plane soumise à un champ électrique colinéaire à sa polarisation (axe z d'indice 3 conformément à la convention). Cette structure se déforme préférentiellement selon l'axe x (d'indice 1). Par élimination du champ E_3 dans les équations 5.3, la déformation S_1 vaut :

$$S_1 = \left(s_{11}^E - \frac{d_{31}^2}{\varepsilon_{33}^T} \right) \cdot T_1 + \frac{d_{31}}{\varepsilon_{33}^T} \cdot D_3 \quad (5.8)$$

D'après la loi de Gauss :

$$\int_{Surface} D \cdot ds = Q_f \quad , \quad (5.9)$$

où ds est l'élément de surface, et Q_f est la quantité de charges libres accumulées sur les électrodes (de surface A) de l'actionneur, nous pouvons écrire :

$$Q_f = D_3 \cdot A \quad (5.10)$$

Et, par substitution de D_3 dans l'équation 5.8 à partir de la relation 5.10, il vient :

$$S_1 = \left(s_{11}^E - \frac{d_{31}^2}{\varepsilon_{33}^T} \right) \cdot T_1 + \frac{d_{31} \cdot Q_f}{\varepsilon_{33}^T \cdot A} \quad (5.11)$$

Cette relation montre bien une dépendance linéaire entre la déformation et la quantité de charges libres appliquée. En résumé, le pilotage en tension contrôle toutes les charges⁷, conduisant à l'hystérésis tension-déformation, tandis qu'une commande en charge ne contrôle que les charges libres, dont le nombre est proportionnel à la déformation.

5.4.2 Problème de la commande à charge électrique constante

Comme nous venons de le voir, l'application d'une quantité de charges constante Q_{pzt} sur les électrodes d'un actionneur piézoélectrique permet d'obtenir un comportement linéaire entre cette commande et la déformation générée, ou plus exactement, de diminuer de manière sensible l'hystérésis, typiquement par un facteur 10. Un exemple de montage électronique couramment utilisé pour appliquer une quantité de charge contrôlée par V_e est représenté à la figure 5.14.

Pour analyser ce montage, considérons un amplificateur opérationnel (AOP) et un condensateur de référence de capacité C_{ref} parfaits, recevant une quantité de charge Q_{ref} proportionnelle à la tension à ses bornes $V_{C_{ref}}$. Ces hypothèses nous permettent d'écrire $V^+ = V^-$ et $i^- = 0$. Il en résulte : $V_{C_{ref}} = V_e$ et $Q_{ref} = C_{ref} \cdot V_e$. Comme $Q_{pzt} = Q_{ref}$, nous aboutissons au résultat :

$$Q_{pzt} = C_{ref} \cdot V_e \quad (5.12)$$

Ainsi, ce montage permet d'appliquer une quantité de charge définie sur l'actionneur piézoélectrique, proportionnelle à la tension de commande V_e et à la capacité du condensateur de référence C_{ref} .

A notre connaissance, cette commande n'est pas utilisée industriellement, vraisemblablement parce que cette méthode présente l'inconvénient majeur de perdre les charges électriques au travers des imperfections du matériau, équivalentes en première approximation à une résistance de fuite d'un point de vue électrique.

7. C'est à dire les charges libres et les charges de polarisation, dites liées.

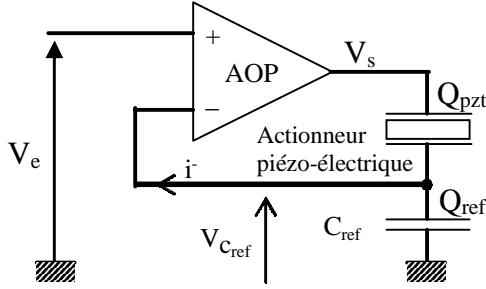


FIG. 5.14 – Circuit de commande en charge d'un actionneur piézoélectrique

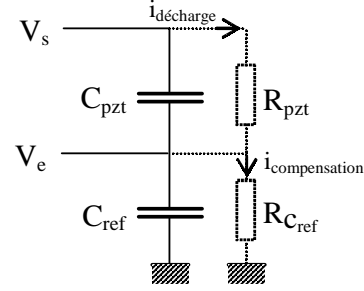


FIG. 5.15 – Circuit équivalent à l'actionneur piézoélectrique et au condensateur de référence

Faisons alors apparaître les imperfections : la maille composée de l'actionneur piézo-électrique et du condensateur de référence est remplacée par le schéma équivalent de la figure 5.15. R_{pzt} et $R_{c_{ref}}$ y représentent respectivement les résistances de fuite de l'actionneur et du condensateur de référence. Si nous considérons le cas d'un amplificateur opérationnel idéal ($V_{c_{ref}} = V_e$), la fonction de transfert $\mathcal{V}_s/\mathcal{V}_e$ ⁸ est donnée par la relation :

$$\frac{\mathcal{V}_s(p)}{\mathcal{V}_e(p)} = \frac{R_{c_{ref}} + R_{pzt}}{R_{c_{ref}}} \cdot \frac{1 + \frac{R_{c_{ref}} R_{pzt}}{R_{c_{ref}} + R_{pzt}} (C_{c_{ref}} + C_{pzt}) p}{1 + R_{pzt} C_{pzt} \cdot p} \quad (5.13)$$

D'après cette fonction de transfert, la valeur initiale du gain entre $V_s(t)$ et $V_e(t)$ (échelon de tension) est $k_i = (C_{c_{ref}} + C_{pzt})/C_{pzt}$ et la valeur du gain en régime permanent est $k_f = (R_{c_{ref}} + R_{pzt})/R_{c_{ref}}$.

Nous serions légitimement tentés d'égaliser les relations k_i et k_f afin de parvenir à une compensation optimale, à l'instar des sondes oscilloscopiques :

$$\frac{C_{c_{ref}} + C_{pzt}}{C_{pzt}} = \frac{R_{c_{ref}} + R_{pzt}}{R_{c_{ref}}} \quad , \text{ soit : } \quad \frac{C_{pzt}}{C_{c_{ref}}} = \frac{R_{c_{ref}}}{R_{pzt}} \quad (5.14)$$

Or, les pertes diélectriques modélisées ici en première approximation par une résistance de fuite constituent une représentation trop simpliste qui a juste le mérite de bien rendre compte du comportement du montage. En fait, une telle compensation serait inefficace puisque ces pertes peuvent varier au fil du temps dans des proportions importantes en fonction de nombreuses sollicitations telles que le champ électrique appliqué, la contrainte exercée, la température du matériau, etc.

8. $\mathcal{V}_e(p)$ et $\mathcal{V}_s(p)$ sont les transformées de Laplace de $V_e(t)$ et $V_s(t)$.

En pratique, le condensateur de référence C_{ref} est de meilleure qualité d'un point de vue de son diélectrique qu'un actionneur piézoélectrique qui lui est optimisé avant tout pour son principe actif de déformation. Il est alors raisonnable de considérer $R_{C_{ref}} \gg R_{pzt}$ et la fonction de transfert du montage de commande en charge se simplifie au profit de la relation :

$$\frac{V_s}{V_e} = \frac{1 + R_{pzt} (C_{ref} + C_{pzt}) p}{1 + R_{pzt} C_{pzt} p} \quad (5.15)$$

L'évolution de la tension de sortie en fonction du temps pour un échelon de tension d'entrée d'amplitude V_e peut être déterminée par la transformée inverse de Laplace de l'équation 5.15 précédente :

$$V_s = \underbrace{\frac{1 + R_{pzt} (C_{ref} + C_{pzt}) p}{1 + R_{pzt} C_{pzt} p}}_{\text{fonction de transfert}} \cdot \underbrace{\frac{V_e}{p}}_{\text{échelon de tension}}, \quad (5.16)$$

et vaut :

$$V_s(t) = V_e \cdot \left\{ 1 + \left(\frac{C_{ref} + C_{pzt}}{C_{pzt}} - 1 \right) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \right\}$$

avec : $\tau = R_{pzt} C_{pzt}$ (5.17)

La figure 5.16 montre l'évolution de la tension V_s en sortie de l'amplificateur opérationnel (équation 5.17) en réponse à un échelon de tension V_e de 1 V sur une durée d'une seconde pour $R_{pzt} = 10 \text{ M}\Omega$, $C_{pzt} = 10 \text{ nF}$ et $C_{ref} = 50 \text{ nF}$ ⁹. Sur ce graphique, la tension V_s regagne la tension de consigne V_e selon une loi exponentielle de constante de temps τ ce qui implique, à terme, une tension égale à zéro aux bornes de l'actionneur et, par voie de conséquence, conduit à une déformation nulle de ce dernier. La figure 5.17 confirme par l'expérience la dérive du déplacement de l'extrémité d'une poutre bimorphe piézoélectrique.

En conclusion, ce montage ne permet pas le maintien à long terme des charges initialement appliquées et donc le maintien d'une déformation constante de l'actionneur.

9. Ces données numériques, réalistes mais arbitraires, sont choisies pour visualiser la totalité du phénomène (notamment la décroissance de la tension de sortie V_s vers la valeur de la tension d'entrée V_e)

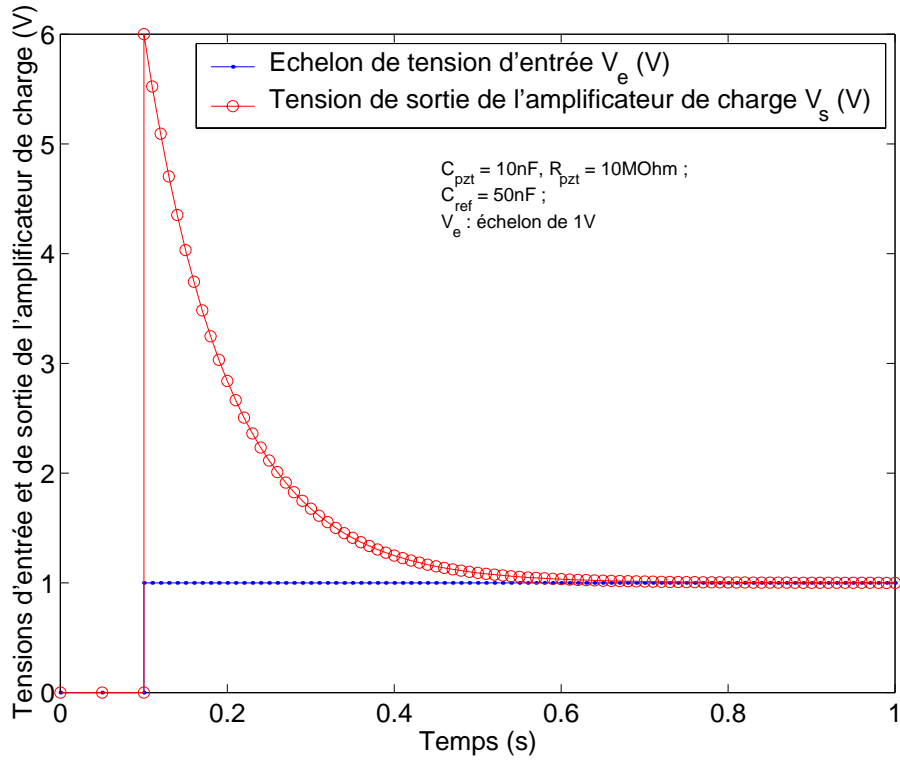


FIG. 5.16 – Commande à charge constante d'un actionneur piézoélectrique

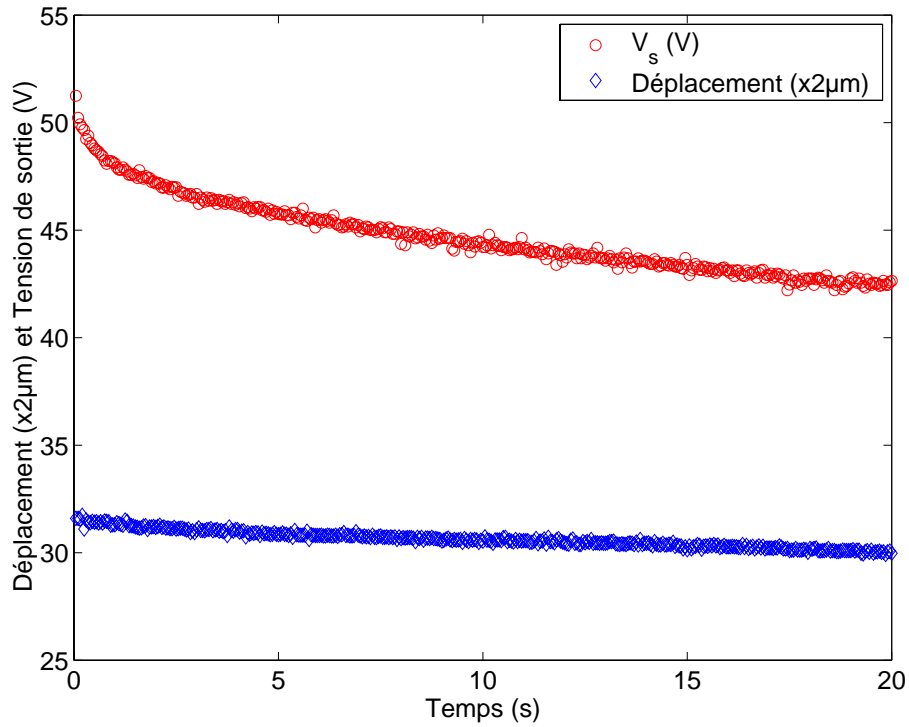


FIG. 5.17 – Evolution de la tension aux bornes de l'actionneur et de sa déflexion en fonction du temps

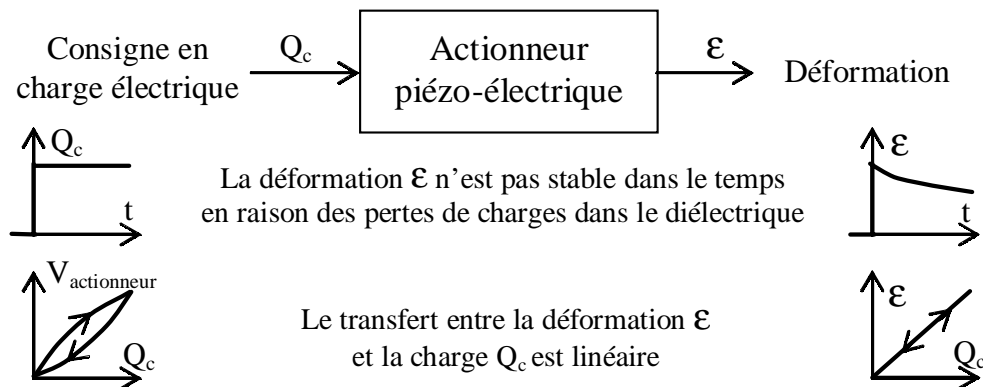


FIG. 5.18 – Commande à charge constante d'un actionneur piézoélectrique

5.5 Une commande linéarisante: la commande Q/V

L'objectif que nous nous sommes fixés dans le cadre de cette étude consiste à trouver un principe de commande aboutissant à un comportement linéaire fiable d'un actionneur piézoélectrique quelconque. Pour cela, deux problèmes sont à résoudre qui sont en fait les inconvénients des deux méthodes de commande en tension et en charge :

– *le problème de la commande à tension constante*

Comme nous l'avons maintes fois mentionné, la commande en tension d'actionneurs piézoélectriques présente une hystérésis entre la tension appliquée et les déformations engendrées.

Le problème à résoudre dans ce cas consiste donc à linéariser la commande de ce type d'actionneur en l'absence de capteur ;

– *le problème de la commande à charge constante (figure 5.18)*

Nous avons vu à la section précédente qu'il existe une dérive inéluctable de la position que l'on souhaiterait pourtant maintenir en fonction du temps (constante de temps de la décharge de l'ordre de quelques centaines de millisecondes à quelques dizaines de secondes selon les actionneurs).

Par conséquent, le problème à résoudre ici consiste en particulier à empêcher les pertes de charges ou à compenser les charges perdues.

5.5.1 Principe de fonctionnement et mise en œuvre d'une commande Q/V

Le cadre qui suit présente le principe général de la commande que nous avons développée, nommée "*commande Q/V*", permettant d'obtenir un comportement statique linéaire en boucle ouverte entre la déformation d'un actionneur piézoélectrique et son signal de commande. Pour ce faire, nous utilisons une méthode de commande mixte, en charge et en tension, bénéficiant ainsi des avantages de chacune d'entre elles.

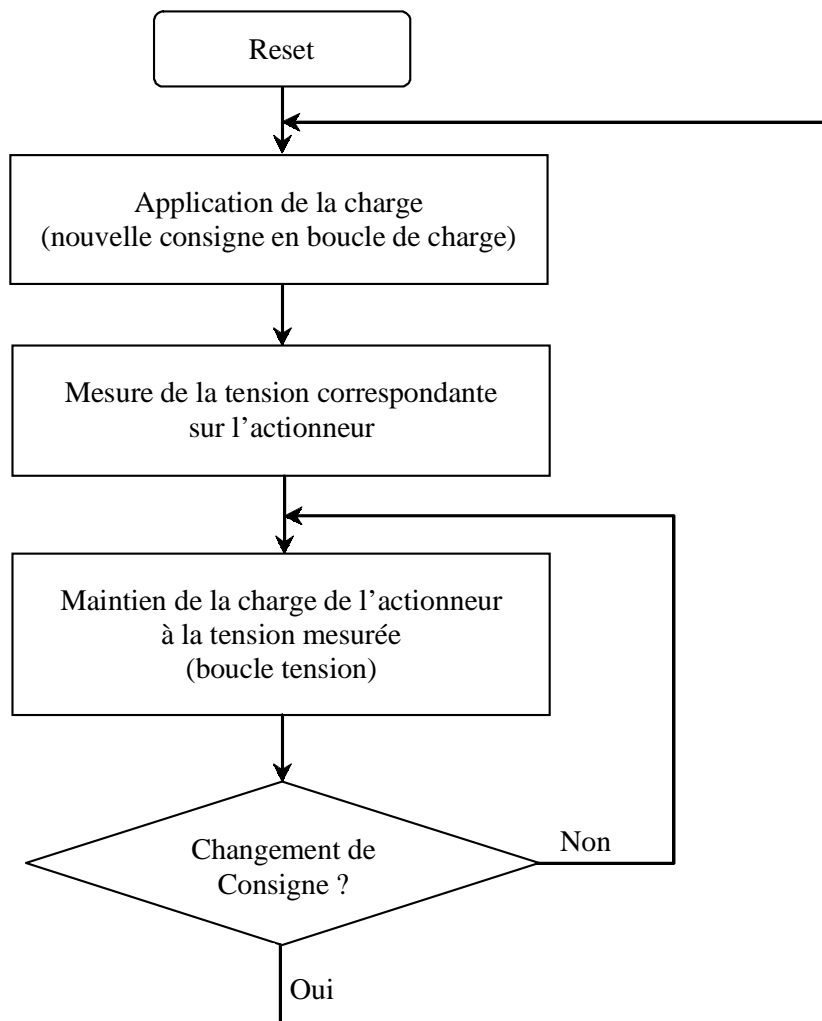


FIG. 5.19 – Organigramme de fonctionnement d'une commande Q/V

La figure 5.19 présente l'organigramme de fonctionnement de cette commande. Elle se décompose en quatre étapes :

1. l'application d'une quantité de charges sur les électrodes de l'actionneur correspondant à une déformation souhaitée, conformément à une commande en position ;
2. la mesure de la tension aux bornes de l'actionneur correspondant à la quantité de charge appliquée précédemment ;
3. le maintien de la quantité des charges électriques présente sur les électrodes de l'actionneur ;
4. enfin, si la consigne a changé, le circuit recommence ces trois premières séquences en appliquant une nouvelle quantité de charge ; sinon, il maintient la charge jusqu'à l'apparition d'une nouvelle consigne.

Pour aboutir à ce résultat, plusieurs solutions sont envisageables. Nous avons notamment entrevu deux manières concurrentes permettant de maintenir la charge constante sur l'actionneur (troisième étape de l'organigramme, figure 5.19). Ces solutions aboutissent à deux types de commande Q/V permettant le maintien de la déformation de l'actionneur :

- par l'application d'une tension continue, ce qui conduit à une commande que nous appelons "Commande Q/V à maintien" ;
- ou, par la compensation des charges perdues, méthode que nous dénommerons "Commande Q/V à compensation".

Linéarisation et maintien de la déformation de l'actionneur par application d'une tension continue : "Commande Q/V à maintien"

La mise en œuvre de cette solution consiste à basculer en temps utile entre un premier montage appliquant une quantité de charge contrôlée sur les électrodes de l'actionneur et un second appliquant une tension continue correspondant à la charge précédemment appliquée et permettant ainsi de la maintenir.

Le schéma de la figure 5.22 permet, comme nous l'avons vu à la section 5.4.2, page 125, d'appliquer une quantité de charges Q_{pzt} sur l'actionneur proportionnelle à la tension d'entrée V_e et à la capacité de référence C_{ref} , soit $Q_{pzt} = C_{ref} \cdot V_e$ (mode charge). Quant au montage de la figure 5.23, il impose une tension aux bornes de l'actionneur proportionnelle à la tension V_c et au gain défini par les résistances R_1 et R_2 par la relation : $V_s = (1 + R_1/R_2) \cdot V_c$ (mode tension).

La figure 5.20 propose la solution que nous avons développée et expérimentée permettant de commuter entre une commande en charge et une commande en tension par le jeu d'interrupteurs analogiques I_1 à I_3 contrôlés par le signal logique Φ . L'interrupteur I_4 , commandé par φ , est positionné sur 'Reset' avec $V_c = 0$ et I_1 à I_3 en "mode tension" pour imposer les conditions initiales du dispositif ($V_{pzt} = 0V$, $Q_{C_{ref}} = 0C$). La mesure de la tension de sortie de l'amplificateur V_s est réalisée par le bloc fonctionnel B_r , composé d'un gain G_m , pour aboutir à V_m , l'image de la tension V_s .

La figure 5.21 présente une série de chronogrammes qui illustre le fonctionnement du montage. Lorsqu'on applique une tension d'entrée V_{e1} en "mode charge", le circuit impose une quantité de charges $Q_1 = C_{ref} \cdot V_{e1}$. A cette charge correspond une tension V_{s1} en sortie de l'amplificateur opérationnel. Si nous restons dans l'état, il s'ensuivrait une décharge de V_s provoquant par la même une dérive de la position de l'actionneur¹⁰. En revanche, une fois la position atteinte (au bout d'un temps dépendant de la dynamique du système), on mesure V_{s1} pour ensuite appliquer ce potentiel en 'mode tension', ce qui permet de maintenir aussi longtemps qu'on le souhaite la quantité de charges Q_1 sur l'actionneur et, par conséquent, sa déformation. Ainsi, on bénéficie d'une commande linéaire par la charge appliquée en ne perdant aucune charge électrique par le basculement en "mode tension".

10. Les raisons de ce phénomène sont expliquées à la section 5.4.2, page 125

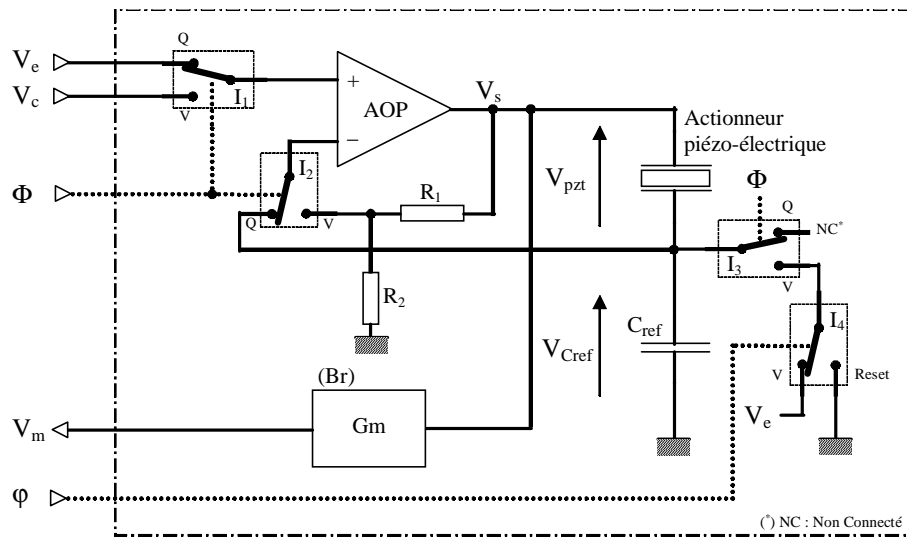


FIG. 5.20 – Schéma de principe d'une commande Q/V

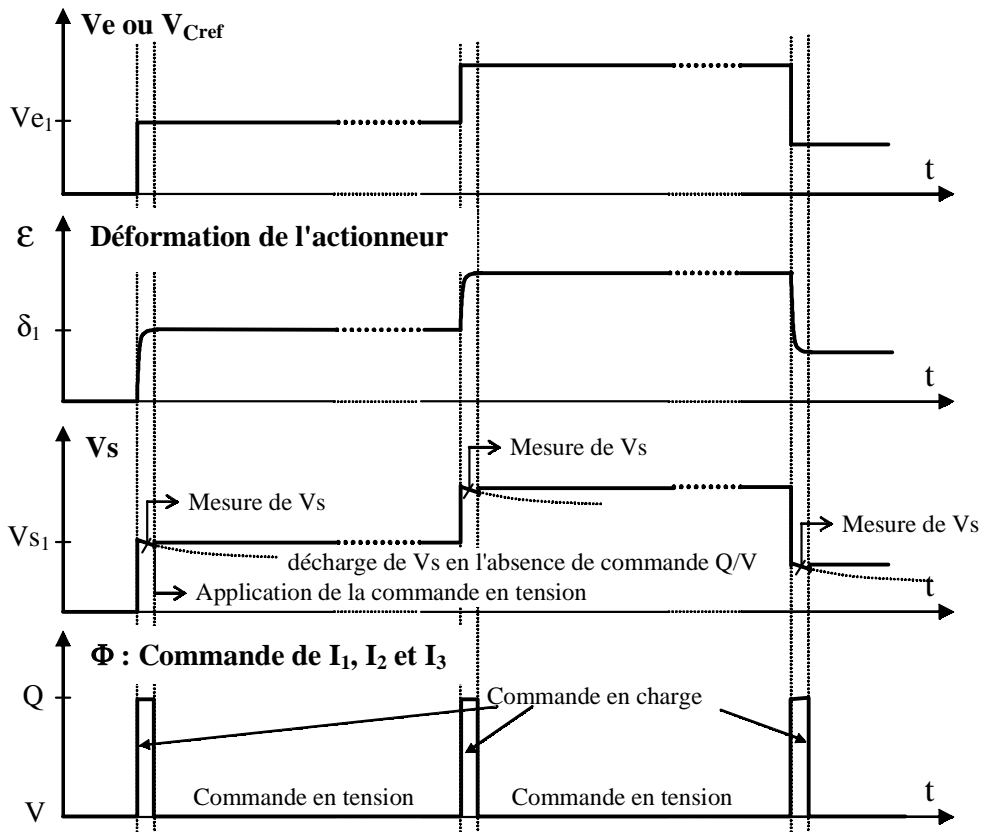
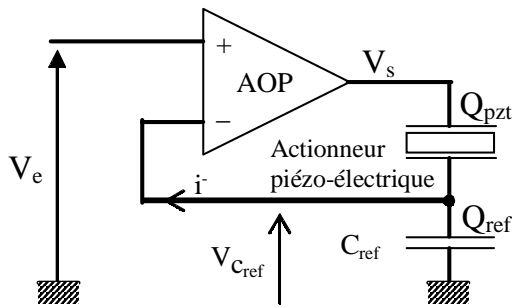
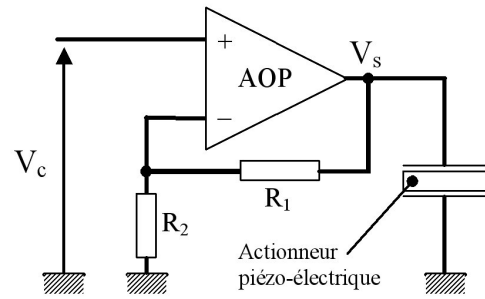


FIG. 5.21 – Chronogrammes de fonctionnement d'une commande Q/V

FIG. 5.22 – *Circuit de commande en charge d'un actionneur piézoélectrique*FIG. 5.23 – *Circuit de commande en tension d'un actionneur piézoélectrique*

Les figures 5.24 et 5.25 présentent respectivement les déflexions libres obtenues lors d'une commande en tension puis d'une commande Q/V pour un bimorphe piézoélectrique dont les caractéristiques sont mentionnées sur les graphes. La commande en tension de l'actionneur aboutit à une hystérésis de 20,8 % de l'amplitude totale de la déflexion et, pour la commande Q/V, l'hystérésis résiduelle est réduite à 3,4 %. Dans cet exemple, la mesure de V_s , image de la quantité de charges Q_{pzt} , et la commutation du mode "commande en charge" au mode "commande en tension" s'effectuent dans un délai de 20 ms après l'application de la charge, correspondant au temps d'établissement de la déflexion de l'actionneur.

D'autres essais ont été menés dans le cadre d'une collaboration franco-suisse¹¹ concernant la commande d'actionneurs piézoélectriques monolithiques¹² (APM). Ces actionneurs, commandés en tension, montrent une hystérésis de l'ordre de 7 à 10 %, plus faible que pour des bimorphes (typiquement la vingtaine de pour-cents). L'exploitation d'une commande linéarisante Q/V sur ce type d'actionneur donne lieu à une hystérésis résiduelle qui vaut 2 à 2,6 % (Perez 2001, Perez 2002).

Pour être complet, un résultat intéressant à mentionner est celui de la figure 5.26. Ce graphique montre la relation entre le signal de commande, image de la charge appliquée, et la tension aux bornes de l'actionneur durant l'application de la commande Q/V. Cette dépendance correspond à l'hystérésis inverse de celle observée pour la déformation. Ainsi, comme le montre la figure 5.27, la non-linéarité est explicitement localisée autour de la capacité équivalente de l'actionneur : l'expérience nous montre que $Q_{pzt} \neq C_{pzt} \cdot V$.

11. Il s'agit d'une collaboration s'intégrant dans le programme INTERREG II de coopération transfrontalière Franche-Comté / Cantons de Berne, Vaud, Neuchâtel et Jura. Le contrat est intitulé "Caractérisation et optimisation du fonctionnement de structures piézoélectriques monolithiques pour des applications en nanotechnologies". Il est entré en vigueur le 1er décembre 1999 et s'est conclu le 31 décembre 2001.

12. Ces actionneurs ont été cités au chapitre 2, brièvement décrits à la section 2.5 et illustrés à la figure 2.15, page 54

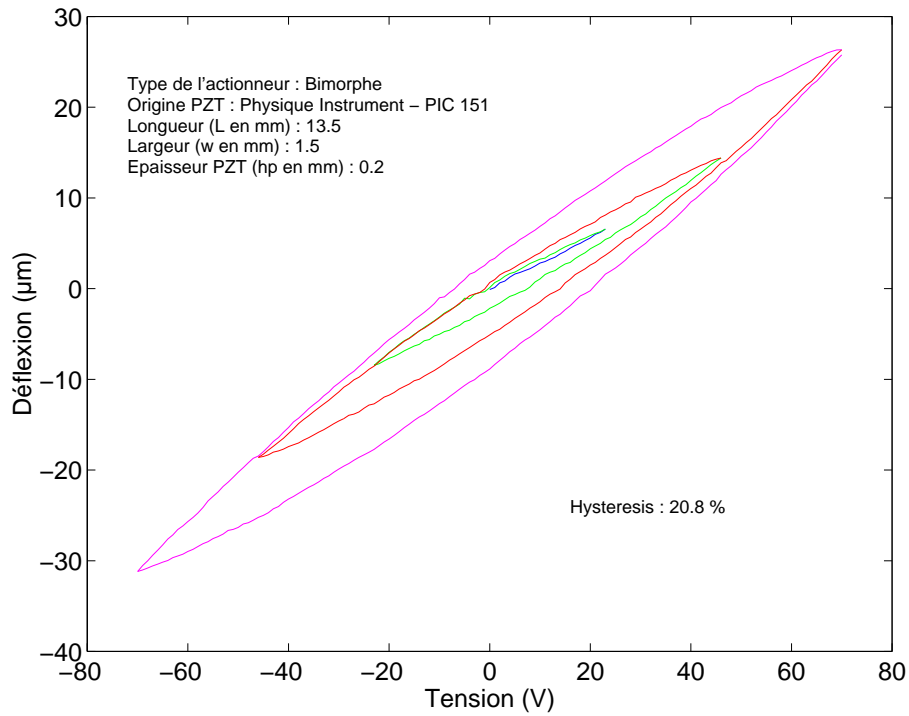


FIG. 5.24 – Déflexion d'un bimorphe en fonction de la tension appliquée par une commande en tension classique

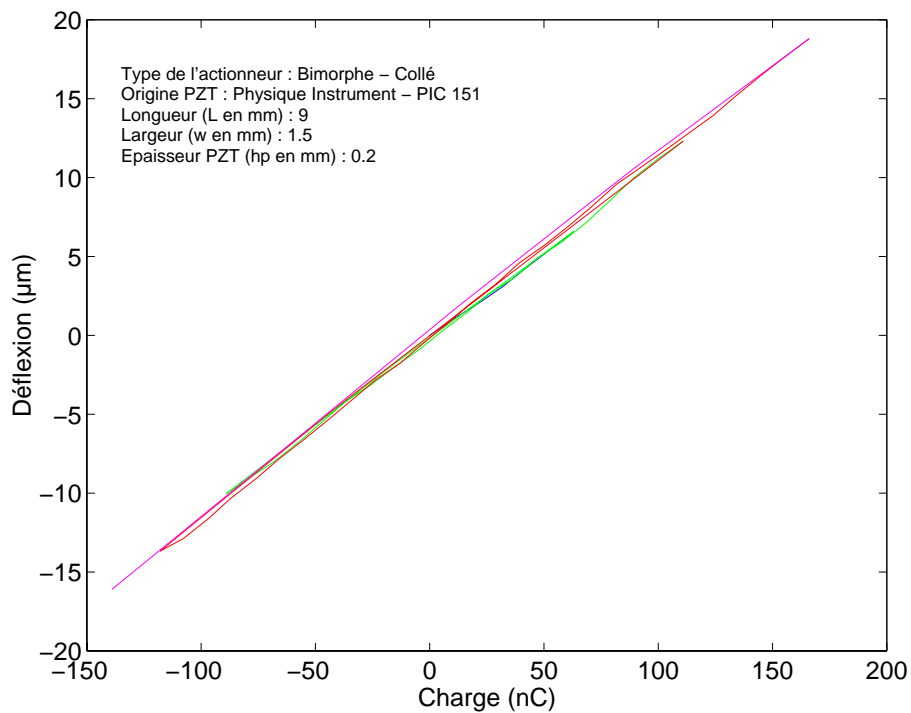


FIG. 5.25 – Déflexion d'un bimorphe en fonction de la charge appliquée par une commande Q/V

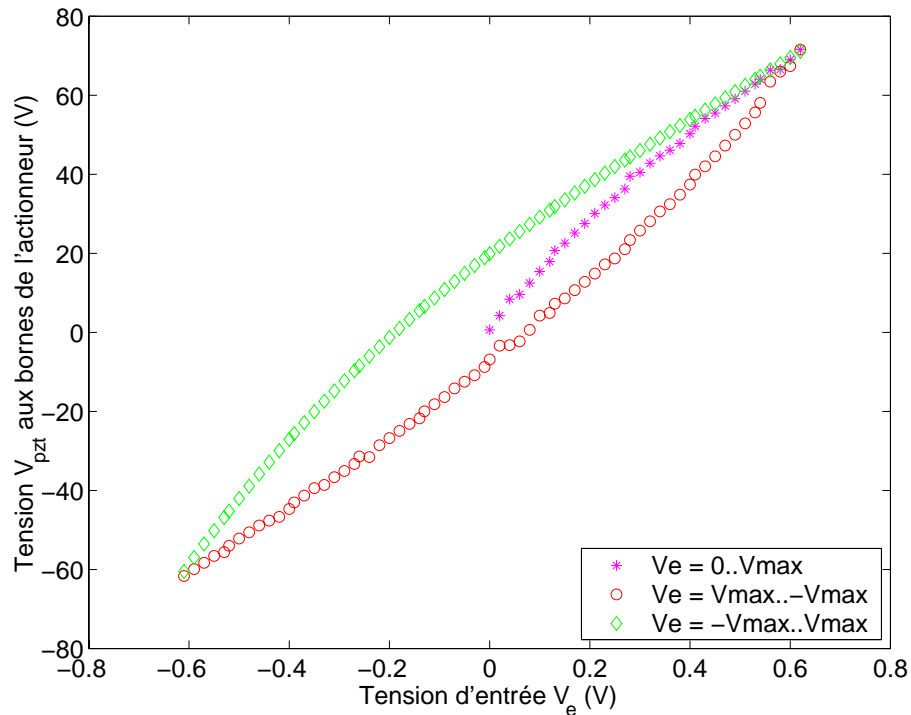


FIG. 5.26 – Tension aux bornes de l'actionneur en fonction de la tension de consigne

Linéarisation et maintien de la déformation de l'actionneur par compensation des charges perdues : "Commande Q/V à compensation"

Comme nous l'avons déjà vu précédemment, les matériaux piézoélectriques ne sont pas parfaits. Ils présentent en première approximation une résistance de fuite (notée R_{pzt} sur la figure 5.15, page 126). Une idée simple consiste à compenser ces charges en drainant dans une résistance un courant $i_{compensation}$ égal au courant de fuite $i_{decharge}$ du matériau (figure 5.15). Si l'on remplace la résistance $R_{C_{ref}}$ (défaut négligeable du condensateur) par une résistance de compensation R_{comp} (composant discret supplémentaire), l'équilibre de ce pont est satisfait lorsque $C_{pzt}/C_{ref} = R_{comp}/R_{pzt}$. Cette solution n'est cependant pas sérieusement envisageable pour une raison déjà évoquée, à savoir que C_{pzt} est variable en fonction de nombreux paramètres et en particulier en fonction de la tension appliquée (figures 5.27 et 5.26).

Nous pourrions imaginer rendre cette résistance de compensation R_{comp} variable dans le but de satisfaire la condition d'équilibre mais cela nécessite alors un modèle.

Le montage présenté à la figure 5.28, permet de drainer des petites quantités de charges à chaque fermeture de l'interrupteur commandé par Φ . Si R_{comp} est inférieur à $(C_{pzt}/C_{ref}) \cdot R_{pzt}$, la tension V_s est sujette à une dérive croissante en fonction du temps. En revanche, lorsque l'interrupteur est ouvert, la tension de sortie est soumise à une décharge comme nous l'avons déjà expliqué à la section 5.4.2, page 125. L'ouver-

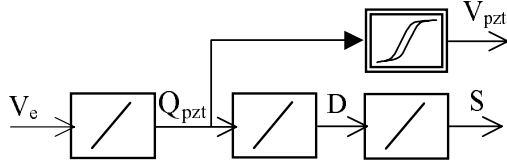


FIG. 5.27 – Interdépendance entre les grandeurs V_e , Q_{pzt} , D , S et V_{pzt}

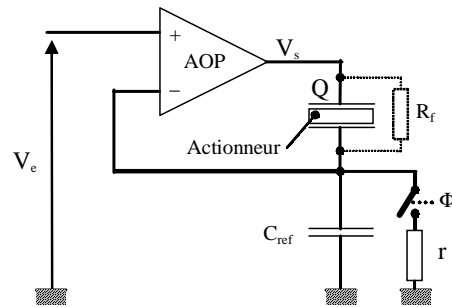


FIG. 5.28 – Circuit de commande en charge dit "à compensation de charges"

ture/fermeture rapide de l'interrupteur Φ permet alors le contrôle en tension V_s .

Ainsi une solution consiste à réutiliser le principe de base de la commande en charge et d'exploiter la compensation par R_{comp} afin de maintenir la tension constante après la mesure de la charge. La méthode reste la même, à savoir : l'application de la charge, la mesure de la tension V_s correspondante et enfin la commande de Φ pour conserver V_s constant, ce qui permet le maintien de la charge initiale appliquée.

Cette solution technique est ici présentée pour montrer qu'il existe différentes manières de concevoir une commande linéarisante de type Q/V . Nous n'avons cependant pas expérimenté cette solution.

5.6 Conclusion

Nous avons exposé dans ce chapitre le principe d'une commande linéarisante, appelée commande Q/V , qui exploite les avantages des commandes à charge constante (Q) et à tension constante (V). Elle permet ainsi de linéariser la position de l'actionneur en fonction d'une tension de consigne en garantissant le maintien des charges sur les électrodes de l'actionneur. Cette méthode est pratique à utiliser car elle ne nécessite pas de modèle et fonctionne par conséquent pour tout actionneur piézoélectrique, dans la limite des possibilités du montage électronique. Les deux seuls paramètres utiles pour la mise en œuvre de cette commande sont la valeur de la capacité au repos de l'actionneur et le temps de réponse à un échelon (ou bande passante). Notons que ces deux paramètres sont des caractéristiques facilement disponibles dans les catalogues des fabricants d'actionneurs piézoélectriques.

Le tableau 5.1 résume les avantages et inconvénients en terme de performance en positionnement et de coût pour les différentes solutions : les commandes en tension, en boucle ouverte et fermée, et la commande Q/V .

La commande en tension en boucle ouverte est un principe très simple et "peu coûteux", mais qui présente une hystérésis entre la déformation et la tension appliquée. Dans

TAB. 5.1 – *Comparaison des différents types de commande d'actionneurs piézoélectriques*

<i>Type de commande</i>	<i>Performances en positionnement</i>	<i>Coût</i>
Commande en tension (en boucle ouverte)	médiocres	très faible
Commande Q/V (en boucle ouverte)	bonnes	faible
Commande en boucle fermée : asservissement de position	très bonnes	élevé

ces conditions, pour les applications de micro/nanopositionnement, applications privilégiées de ce type d'actionneurs, on ne peut en aucun cas garantir une grande précision du positionnement.

La commande en tension en boucle fermée, si elle donne de très bons résultats, est pénalisante principalement en raison du surcoût engendré par un système composé d'un capteur et du régulateur adéquat (le surcoût est variable en fonction du type de capteur utilisé : jauges de déformation, principe capacitif ou magnétique).

La solution que nous proposons, la commande Q/V, est "intermédiaire" entre les deux solutions existantes. Elle permet en effet d'améliorer considérablement la précision de positionnement du système en diminuant très fortement l'hystérésis, et ce tout en restant en boucle ouverte, c'est à dire sans capteur de position et sans système de régulation de cette position.

Reprenons l'exemple de l'actionneur piézoélectrique évoqué en introduction de ce chapitre dont la course est de $25 \mu\text{m}$. Commandé en tension en boucle ouverte et moyennant une hystérésis de 20 %, l'erreur maximale en position est de $5 \mu\text{m}$. En considérant une commande Q/V, laissant une hystérésis résiduelle de 2 %, l'erreur maximale de positionnement sera de $0,5 \mu\text{m}$, ce qui est dix fois plus précis qu'avec une commande en tension simple.

Ainsi, on améliore de manière importante la précision de positionnement du système, avec un surcoût a priori faible par rapport à la commande en tension en boucle ouverte, lié notamment à l'électronique de la commande Q/V, plus complexe que l'électronique de commande en tension. En revanche, ce surcoût est bien moindre que celui lié à la mise en œuvre d'un asservissement de position (capteur et régulateur).

Les domaines d'applications de ce principe de commande sont par exemple la micro-manipulation, le micro-assemblage et le nanopositionnement de levier pour la microscopie en champ proche (microscope à force atomique...). Au vu de ces marchés potentiels,

cette commande innovante a reçu le soutien du *CNRS* dans le cadre d'un dépôt de brevet français (Agnus 2003b, brevet n° 03 00532).

A ce jour, plusieurs sociétés ont manifesté leur intérêt pour ce principe de commande. Certaines d'entre elles se satisfont d'une hystérésis résiduelle de 2 % mais d'autres affichent un intérêt pour une commande en boucle ouverte avec une précision de positionnement en deçà de 0.5 % de la course totale.

Les remarques et les attentes de ces industriels nous amènent à nous poser la question sur l'existence (ou non) d'une limite quant à la réduction de l'hystérésis avec une commande Q/V. Pour répondre à cette question, il nous semble alors nécessaire de nous intéresser à l'influence de la contrainte sur l'hystérésis que nous n'avons pas pris en compte dans cette étude.

Enfin, même si nous n'avons pas privilégié les méthodes de linéarisation par modèle inverse, il nous semble intéressant de revenir sur ce point en particulier pour tenter d'établir un modèle de récurrence qui prendrait en compte le phénomène d'hystérésis comme expliqué pas à pas dans ce chapitre. Nous pourrions alors l'utiliser dans le but de linéariser les déformations de l'actionneur en fonction de la tension appliquée à ses bornes.

★ ★ ★

Glossaire des notations utilisées dans ce chapitre

S_p	déformation relative d'un actionneur piézoélectrique .
D_i, D	déplacement électrique.
T_q	contrainte appliquée.
E_k, E	champ électrique total appliqué au matériau piézoélectrique .
s_{pq}^E	tenseur des souplesses à champ électrique constant.
ε_{ik}^T	tenseur des permittivités diélectriques à température constante.
d_{kp}	tenseur des coefficients piézoélectriques.
P_0	polarisation initiale du matériau piézoélectrique.
S_0	déformation d'un matériau piézoélectrique après polarisation.
E_P, E_{P_0}	champ électrique équivalent à la polarisation d'un matériau piézoélectrique.
ΔE_P	variation du champ de polarisation, image d'une modification de la polarisation d'un matériau piézoélectrique.
σ_b	densité de charges liées induit par la polarisation du matériau piézoélectrique.
$v(t)$	tension appliquée sur la céramique piézoélectrique.
V	valeur des pas de tension de $v(t)$ (figure 5.9, page 119).
E_{ext}	champ électrique induit par l'application d'un potentiel $v(t)$.
σ_f	densité de charges libres sur les électrodes de l'actionneur piézoélectrique.
ε_0	permittivité du vide.
χ	suceptibilité diélectrique.
e	épaisseur du matériau piézoélectrique.
Q_f	quantité de charges libres (pages 124 et 125).
A	surface des électrodes en regard d'un actionneur piézoélectrique (pages 125 et 125).
Q_{pzt}	quantité de charges libres accumulée sur les électrodes d'un actionneur piézoélectrique (page 125).
C_{pzt}	capacité au repos d'un actionneur piézoélectrique (page 125).
C_{ref}	capacité de référence (page 125).
$R_{pzt}, R_{C_{ref}}$	résistance de fuite du matériau piézoélectrique et du condensateur de référence (page 126).
τ	constante de temps électrique $R_{pzt} \cdot C_{pzt}$ d'un actionneur piézoélectrique (page 127).
V_s	tension de sortie des amplificateurs contenu dans les montages proposés dans ce chapitre.
V_e	tension de consigne en position appliquée en entrée des montages proposés dans ce chapitre.

$V_{C_{ref}}$	tension aux bornes du condensateur de référence C_{ref} dans les montages proposés dans ce chapitre.
V_{pzt}	tension aux bornes de l'actionneur piézoélectrique dans les montages proposés dans ce chapitre.
V_c	tension d'entrée en "mode tension" appliqué sur le montage de commande Q/V (figure 5.20, page 132).
V_m	tension image de la tension de sortie V_s (figure 5.20, page 132).
I_1 à I_4	Interrupteur permettant de sélectionner le "mode tension" ou le "mode charge" d'une commande Q/V (figure 5.20, page 132).
Φ, φ	Signal de commande des interrupteurs ananalogiques I_1 à I_4 (figure 5.20, page 132).