

Chapitre 6

Résultats expérimentaux

6.1 Introduction

Dans ce chapitre on présente la mise en oeuvre expérimentale et quelques résultats expérimentaux relatifs à l'amortissement à travers un contrôle passif puis un contrôle semi-actif de l'oscillation libre de la maquette du pont. La maquette est contrôlée par l'actionneur électromécanique "TMD pendulaire couplé avec un alternateur". Les études expérimentales ont été faites pour vérifier la validité de la théorie de la procédure d'optimisation des paramètres de l'actionneur pour le contrôle passif et de la loi de contrôle semi-actif, définies dans les précédents chapitres. Ces études comportent principalement trois parties. La première partie a été consacrée au contrôle passif du mode de torsion de la maquette du pont et de l'étude de l'influence des paramètres optimaux de l'actionneur sur la réponse de la maquette en introduisant un seul actionneur électromécanique. Dans la deuxième partie on a étudié l'amortissement de plusieurs modes de vibration de la maquette du pont en introduisant trois actionneurs. Des films représentatifs de ces deux parties sont illustrés dans un CD-ROM. Dans la troisième partie on a étudié le contrôle semi-actif du mode de torsion de la maquette du pont en présentant la loi de contrôle introduite dans le cinquième chapitre. Dans cette partie on s'est limité à l'introduction de la loi de contrôle pour maintenir l'actionneur durant plusieurs étapes de construction de la maquette du pont : la maquette telle qu'elle est construite, représente l*i*ème étape de construction, l*i*ème plus une étape de construction est modélisée en ajoutant une masse concentrée. L'application de la loi de contrôle pour faire varier les paramètres de l'actionneur selon les types d'excitations n'est pas faite dans le cadre de ce travail.

6.2 Dispositif expérimental

6.2.1 Matériels utilisés

La maquette représente le démonstrateur d'un pont en construction. Elle est réalisée de manière à avoir des fréquences propres de l'ordre de 1Hz. La maquette est constituée de, figure (6.1) :

- Un tube cylindrique inférieur de diamètre extérieur 45 mm, d'épaisseur 2 mm et de hauteur 1035 mm.
- Une barre cylindrique supérieure pleine de diamètre 45 mm et de hauteur 1215 mm.
- Une masse cylindrique mobile, située sur le tube supérieur, de diamètre 100 mm et de longueur 200 mm, soit une masse de 12,25 kg.
- Une poutre creuse, à section rectangulaire de dimension 150 mm x 50 mm, avec une épaisseur de 3 mm et une longueur de 6 m.
- Une plaque de base de dimension 22 mm x 40 mm x 15 mm.

Le tube inférieur et la barre cylindrique supérieure forment le pylône. La poutre creuse représente le tablier de la maquette. La maquette du pont est en acier (module d'Young $E=210$ Gpa, coefficient de Poisson $\nu = 0,3$ et masse volumique $\rho = 7800$ kg/m³). La masse totale de la maquette est d'environ 108 kg. La liaison du pylône au sol est réalisée par l'intermédiaire d'une plaque bien fixée au sol au moyen de quatre vis ; cette liaison a été modélisée par une liaison encastrement. La liaison entre le tablier et le pylône est réalisée au moyen d'un profilé en U, figure (6.2) ; aussi cette liaison a été modélisée par une liaison encastrement. Par ailleurs, il faut noter que le tube creux est emmanché, aussi bien au niveau de la plaque que du profilé en U. La masse mobile est serrée sur le tube supérieur au moyen de trois vis et peut être déplacée sur le long de ce tube afin de découpler les deux premiers modes : premier mode vertical et premier mode horizontal, qui sont très proches en fréquences.

Pour mesurer la réponse de la maquette du pont, on utilise des accéléromètres PCB qui sont fixés sur la maquette. Les principales caractéristiques d'utilisation des ces accéléromètres sont fournies par le constructeur et sont rapportées dans le tableau (6.1).

Les accéléromètres sont, après conditionnement, connectés à la carte d'acquisition DSPACE 1103 dotée de Convertisseurs Analogiques Numériques (CAN), de Convertisseurs Numériques Analogiques (CNA) et d'un composant DSP (Digital Signal Processor) placé sur



FIG. 6.1 – Maquette du pont.



FIG. 6.2 – Liaison centrale de la maquette.

Etendues de mesure (m/s^2)	± 1000
Domaine fréquentiel d'utilisation (Hz)	0 à 150
Etendues des températures d'utilisation ($^{\circ}C$)	-40 à +85
Masse (g)	12
Coefficient de sensibilité normal ($mV/(m/s^2)$)	$0.95e^2$ à $1.1e^2$

TAB. 6.1 – Caractéristiques des accéléromètres PCB.

l'ordinateur qui pilote l'ensemble du système. L'ordinateur est équipé du logiciel MATLAB Simulink qui permet de travailler sur les signaux en provenance de la carte DSPACE. La maquette est contrôlée par un actionneur électromécanique qui est formé par un pendule couplé avec un réducteur et un alternateur comme est indiqué sur la figure (6.3).

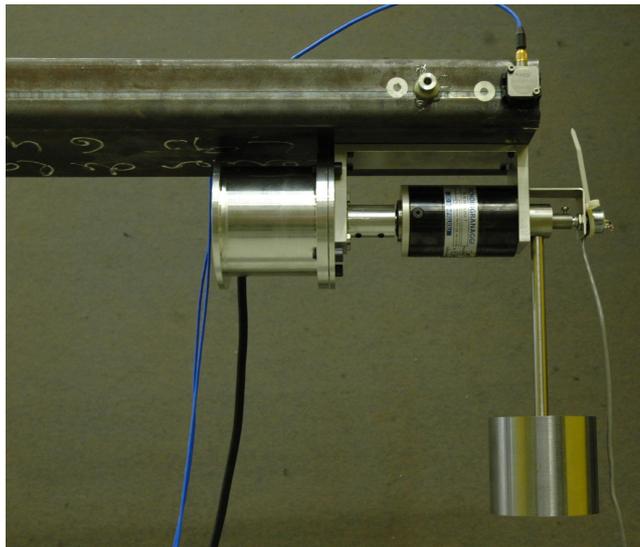


FIG. 6.3 – Actionneur électromécanique.

Pendule

Les paramètres du pendule sont donnés par le tableau (6.2). La longueur du pendule et

Longueur équivalente: l	17,57 cm
Masse du pendule: m_2	2,89 Kg

TAB. 6.2 – paramètres du pendule.

le coefficient d'amortissement optimaux ont été déterminés en appliquant le critère d'optimisation du taux de décroissance exponentiel dont la masse totale de l'actionneur est $M_{ap} = 6Kg$. A l'axe de rotation du pendule est fixé un capteur potentiométrique pour mesurer son angle de vibration.

Réducteur

Le rapport du multiplicateur de vitesse de l'alternateur, rapport d'engrenage, a été fixé dans le quatrième chapitre à $\beta = 252$ de manière que l'alternateur produise du courant pour des petites oscillations. Mais afin que le couple d'entrée soit minimal, ce rapport est fixé, dans ce cas, à $\beta = 10$.

Alternateur

L'alternateur utilisé est triphasé à couplage étoile avec aimants permanents dont les principales caractéristiques techniques sont rapportées dans le tableau (6.3). Les paramètres internes de cet alternateur ont été identifiés dans le deuxième chapitre et sont rappelés dans le tableau (6.4).

Puissance apparente	45 VA
Vitesse	2000 tr/min
fréquences	66,7 Hz

TAB. 6.3 – *Caractéristiques techniques de l'alternateur.*

Résistance interne par phase (r)	0,85 Ω
Inductance interne par phase (L_e)	0,0036 Henry
Coefficient de la force électromotrice (K_e)	0,06 $Vrad^{-1}s$
Coefficient du couple électromécanique (K_c)	5 $Vrad^{-1}s$

TAB. 6.4 – *Paramètres internes de l'alternateur.*

A la sortie de l'alternateur est attachée une résistance : lorsque elle est fixée, le contrôle est appelé passif et lorsqu'elle est pilotée via une carte électronique dissipant l'énergie électrique de manière variable en fonction du temps, le contrôle est appelé semi-actif.

Amortissement interne

Pour utiliser cet actionneur il est nécessaire de déterminer son coefficient d'amortissement propre C_{ap} . Ce coefficient a été identifié dans le deuxième chapitre. Mais comme la liaison pendule-alternateur est changée, en remplaçant le petit et grand pignon par un réducteur, le coefficient d'amortissement est identifié de nouveau en utilisant le même essai et la même méthode. La valeur de ce coefficient identifié est $C_{ap} = 0,035 Kg/s$ qui correspond à un amortissement réduit de 2,48%.

6.2.2 Placement des capteurs

Le mouvement de la maquette est mesuré ponctuellement à l'aide d'un nombre limité de capteurs. L'information qu'ils donnent est donc l'accélération en plusieurs points. L'optimisation de leur placement a été le but de plusieurs travaux [15, 61]. L'utilisation d'une approximation modale conduit au vecteur d'observation de la forme :

$$Y(t) = [y_1^N(x_1, t), \dots, y_q^N(x_q, t), \dots, y_Q^N(x_Q, t)]^T, \quad (6.1)$$

avec

$$y_q^N(x_q, t) = \sum_{i=1}^N \alpha_i(t) \varphi_i(x_q) \cdot \underline{f}_q \quad (6.2)$$

où x_q est l'abscisse du $q^{\text{ème}}$ capteur, $q \in (1, \dots, Q)$, $\varphi_i(x_q)$ est le vecteur de l'ième mode propre au point x_q , $\alpha_i(t)$ est l'ième contribution modale du déplacement et \underline{f}_q est le

vecteur position du $q^{\text{ème}}$ capteur : c'est à dire $\underline{f}_q = \mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2$ ou \mathbf{a}_3 .

Si on considère le cas de la maquette du pont instrumentée par une configuration des capteurs mais sans actionneur, le système d'état en considérant les six premiers modes est défini comme suit :

$$\begin{cases} \dot{Z}(t) = [\mathbf{A}]Z(t) \\ Y(t) = [\mathbf{C}]Z(t) \end{cases} \quad (6.3)$$

Avec $Z = [\alpha_i(t), \dot{\alpha}_i(t)]^T$ pour $i=1, \dots, 6$, $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} O_{6,6} & I_{6,6} \\ -\lambda_i & O_{6,6} \end{bmatrix}$ et $\mathbf{C} = [\underline{\varphi}_i(x_q) \cdot \underline{f}_q, O]_{Q \times 12}$.

$\lambda_i, i=1, \dots, 6$, est l'ième valeur propre de la maquette du pont.

Lors de l'utilisation des accéléromètres, l'équation d'observation devient :

$$\ddot{Y}(t) = [\mathbf{C}][\mathbf{A}]^2 Z(t) \quad (6.4)$$

Pour chercher le placement optimal des accéléromètres sur la maquette du pont, on est servi de deux algorithmes de placement de capteurs disponible dans SDTools [4] :

- Algorithme de "independence effective" (EFI)
- Algorithme de "maximum response sequence" (Mseq)

Le premier algorithme (EFI) garantit l'indépendance linéaire des modes mesurés. Partant d'un nombre initial de capteurs, la méthode les élimine un par un jusqu'à en obtenir le nombre désiré. Cependant, le deuxième algorithme consiste à placer les capteurs là où l'amplitude des modes est la plus importante.

Pour voir la corrélation entre les modes pour une configuration donnée des capteurs, on présente la notion du MAC (Modal Assurance Criterion), qui est le critère de calcul-essai le plus utilisé car il est simple à implémenter. L'expression du MAC entre les modes j et k est défini par [21] :

$$MAC_{jk} = \frac{[(\underline{\varphi}_t^T)_j (\underline{\varphi}_a)_k]^2}{(\underline{\varphi}_t^T \underline{\varphi}_t)_j (\underline{\varphi}_a^T \underline{\varphi}_a)_k} \quad (6.5)$$

$\underline{\varphi}_t$ représente la forme modale analytique et $\underline{\varphi}_a$ représente la forme modale expérimentale. Une corrélation parfaite entre deux modes résulte en un MAC de 100%. Les modes sont jugés être corrélés entre eux pour un $MAC > 90\%$, en deçà la corrélation est jugée douteuse jusqu'à 70%, les modes sont considérés non corrélés pour $10\% < MAC < 70\%$ et parfaitement orthogonaux pour un $MAC \leq 10\%$.

Le placement des capteurs, ainsi que le MAC obtenu pour les deux méthodes (EFI et Mseq), en mettant six capteurs pour observer les six premiers modes, sont représentés respectivement sur les figures (6.4) et (6.5).

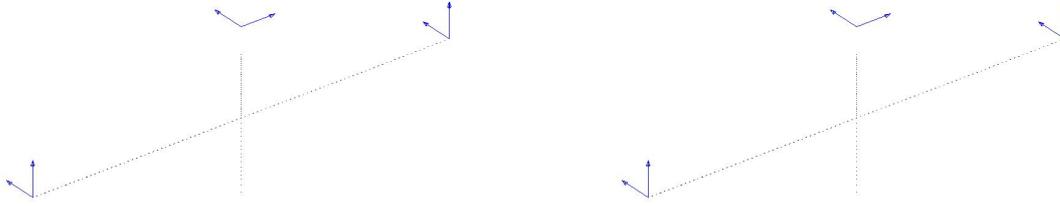


FIG. 6.4 – Placement des capteurs pour la maquette du pont suivant les méthodes Mseq (à gauche) et EFI (à droite).

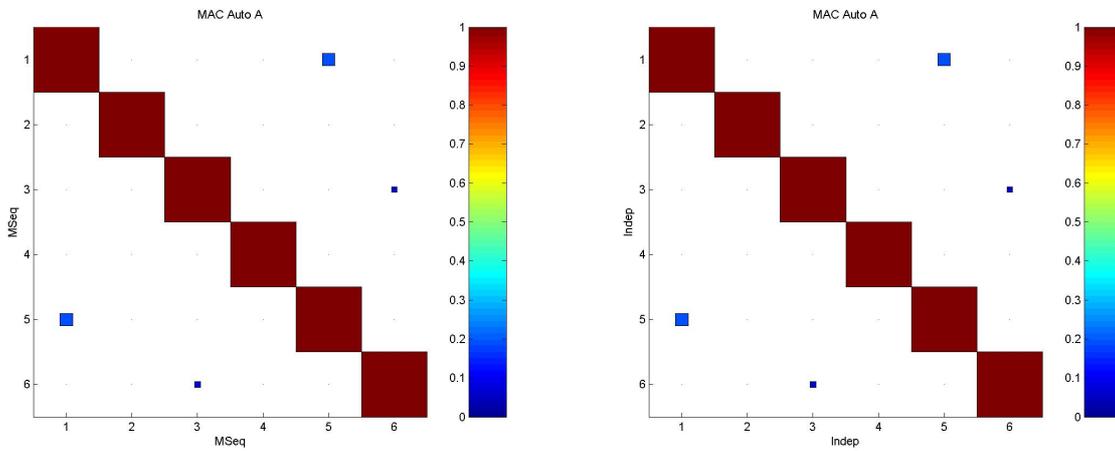


FIG. 6.5 – MAC correspondant au placement des capteurs pour la maquette du pont suivant les méthodes Mseq (à gauche) et EFI (à droite).

On remarque que les deux méthodes donnent la même estimation du MAC et le même emplacement des capteurs. Cet emplacement est aussi la configuration la plus évidente. La corrélation entre les modes donnée par les deux méthodes est très faible. En effet pour l'observabilité, on a tendance à vouloir mettre les capteurs là où le déplacement est maximal, c'est à dire en bout du tablier et au haut du pylône. Par ailleurs, on prend cette configuration des capteurs pour pouvoir effectuer par la suite le contrôle passif et semi-actif de la maquette du pont. Mais pour quantifier la visibilité des modes par les accéléromètres, on propose d'étudier le grammien d'observabilité qui est maintenant une démarche courante pour le contrôle. Son expression est définie comme suit [51] :

$$G(T) = \int_0^T e^{\mathbf{A}^T t} (\mathbf{A}^2)^T \mathbf{C}^T \mathbf{C} \mathbf{A}^2 e^{\mathbf{A} t} dt \quad (6.6)$$

Dans l'expression de ce grammien, on a utilisé \mathbf{A}^2 car on a introduit des accéléromètres pour mesurer la réponse de la maquette. $G(T)$ permet de quantifier l'énergie récupérée par les accéléromètres indépendamment des conditions initiales. Pour quantifier la visibilité mode par mode, il est possible de calculer un coefficient associé à chaque mode comme suit :

$$\lambda_i^* = (\underline{\psi}_i)^T G(T) \underline{\psi}_i \quad \text{pour } i = 1, \dots, 6 \quad (6.7)$$

avec $\underline{\psi}_i = (\varphi_i(x_1), \underline{f}_1, \dots, \varphi_i(x_6), \underline{f}_6, O_{1,6})^T$. Les valeurs de λ^* pour les six premiers modes sont représentées dans la figure (6.6). On remarque que les six modes sont bien observables.

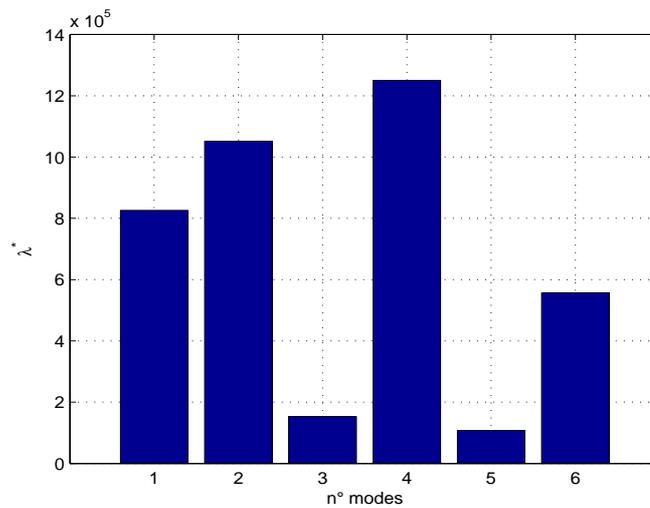


FIG. 6.6 – Grammien d'accélération pour six accéléromètres placés sur la maquette du pont pour six modes ciblés.

Remarques

- Comme on s'intéresse aux six premiers modes de vibration et qu'on souhaite utiliser une estimation d'accélération par filtrage modal, il convient d'avoir au moins autant d'accéléromètres que de contributions modales à identifier. Pour cela, on a pris six accéléromètres.
- Dans ce cas, on ne s'intéresse pas à la visibilité des modes supérieurs en utilisant cette configuration des capteurs car le problème du spill-over ne se pose pas pour le contrôle passif et semi-actif.

6.2.3 Estimation d'état

L'état d'un système est composé des contributions modales du déplacement et des contributions modales de la vitesse. Lors de l'utilisation des accéléromètres, les contributions modales d'accélération seront obtenues en utilisant un filtre modal. Les contributions modales de déplacement et de vitesse seront obtenues par intégrations numériques des signaux des contributions modales d'accélération.

On considère la décomposition modale de l'accélération de la maquette du pont sur les six premiers modes. Le filtre modal permet de convertir en temps réel les six accélérations mesurées par les accéléromètres, en contributions modales d'accélération. Il donne un résultat correct si la réponse réelle coïncide avec sa projection sur les six premiers modes :

$$[\ddot{\alpha}_1^6(x_1,t), \dots, \ddot{\alpha}_6^6(x_6,t)]^T = [\mathbf{F}][\ddot{y}_1^6(x_1,t), \dots, \ddot{y}_6^6(x_6,t)]^T \quad (6.8)$$

$[\mathbf{F}]$ est la matrice de filtre modal définie comme suit :

$$[\mathbf{F}] = [\underline{\varphi}_i(x_q) \cdot \underline{f}_q]^{-1}, \quad \text{pour } i = 1, \dots, 6 \quad \text{et } q = 1, \dots, 6 \quad (6.9)$$

\underline{f}_q est le vecteur position du $q^{\text{ème}}$ capteur: c'est à dire $\underline{f}_q = \mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2$ ou \mathbf{a}_3 . Les propriétés de cette méthode ont été introduites dans [24, 25]. Les méthodes d'identifications modales sont nombreuses en mécanique [4, 34], elles permettent d'identifier les formes modales aux points de placement des capteurs.

6.2.4 Identification modale

L'analyse modale de la maquette du pont a été le but d'un stage de DEA (Diplôme d'Etudes Approfondies) [28]. L'identification modale a été étudiée par la méthode en output-only en utilisant la toolbox COSMAD, qui est fondée sur la méthode des sous espaces [7]. Cependant il a été montré que les fréquences propres identifiées expérimentalement du modèle réel sont très proches de celles calculées par éléments finis et que l'amortissement modal est très faible et même négligeable. Dans le tableau (6.5) sont reportées les fréquences propres des six premiers modes de la maquette du pont.

Mode	1	2	3	4	5	6
fréquences (Hz)	1,3046	1,348	2,36	6,90	7,44	11,77

TAB. 6.5 – Les valeurs des six premières fréquences propres obtenues expérimentalement.

6.2.5 Filtre fréquentiel et dérivation numérique

La chaîne d'acquisition et de traitement des signaux est composée d'appareils fonctionnant sur une certaine plage de fréquence ; au delà et en deçà, le signal est filtré par des filtres passe bas et passe haut. Ces derniers sont soit intégrés dans les appareils, soit rajoutés par l'utilisateur. La dérivation d'un signal amplifie énormément les bruits de hautes fréquences et le signal est souvent noyé au milieu de ces bruits. Pour remédier à ce problème on propose un calcul de la dérivée complété par filtrage fréquentiel passe bas [86]. Soit u le signal d'entrée d'un filtre dérivateur, v le signal de sortie et w le signal intermédiaire. La première opération est la véritable dérivation : $w = \dot{u}$, puis vient le filtrage. On prend un filtre dit du second ordre tel que les composantes du signal avant la fréquence de coupure soient conservées et les suivantes soient éliminées. On définit v comme la solution de

$$\ddot{v} + 2\xi_c\omega_c\dot{v} + \omega_c^2v = \omega_c^2w, \quad (6.10)$$

où ω_c est la pulsation de coupure, ξ_c le coefficient du filtre pris égal à $\frac{1}{\sqrt{2}}$ pour ne pas avoir de résonance.

Pour modéliser ces deux opérations, on utilise les transformées de Fourier, on note w la pulsation, on obtient les équations suivantes :

$$W(\omega) = j\omega U(\omega) \quad \text{et} \quad \omega_c^2V(\omega) - \omega^2V(\omega) + 2j\omega\xi_c\omega_cV(\omega) = \omega_c^2W(\omega). \quad (6.11)$$

D'où

$$\frac{V(\omega)}{U(\omega)} = \frac{j\omega\omega_c^2}{\omega_c^2 - \omega^2 + 2j\omega\xi_c\omega_c} \quad (6.12)$$

La fréquence de coupure est choisie pour limiter au mieux les signaux que l'on ne souhaite pas voir. Dans un modèle à six modes, la fréquence du sixième mode est de 11,77 Hz. Pour cela, on a pris une fréquence de coupure $f_c = 15Hz$.

6.3 Contrôle passif

Tous les essais ont été réalisés en vibration libre de la maquette du pont : cas du lâché. On considère un état initial déséquilibré qui conduit à des oscillations [86]. Pour cela, on propose de déformer le tablier afin de lui donner un déplacement initial. Ainsi, on tire l'extrémité du tablier pour le déplacer de six centimètres puis on le lâche en laissant le contrôle agir. On tire horizontalement : lâché horizontal, lorsqu'on cherche à exciter les modes horizontaux et verticalement : lâché vertical, lorsqu'on cherche à exciter les modes

verticaux. La simulation est lancée juste avant le lâché du tablier.

Dans cette partie on présente le contrôle passif de la maquette du pont : la résistance attachée aux bornes de l'alternateur est fixée. Lorsque l'actionneur est attaché à l'extrémité du tablier on cherche à contrôler le mode de torsion. Par contre lorsqu'il est attaché à l'extrémité du pylône et suivant le plan de vibration du pendule, on cherche à amortir le premier mode ou le mode de balancement de la maquette.

6.3.1 Contrôle du mode de torsion de la maquette du pont

On considère durant cette section un lâché horizontal. On représente dans la figure (6.7) l'oscillation libre expérimentale de la contribution modale de l'accélération du mode de torsion de la maquette du pont sans actionneur. On remarque que l'amortissement propre de ce mode est très faible, comme a été montré lors de l'analyse modale ; il est identifié à 0.1%. Par ailleurs, l'amortissement interne a une influence négligeable sur les paramètres optimaux de l'actionneur.

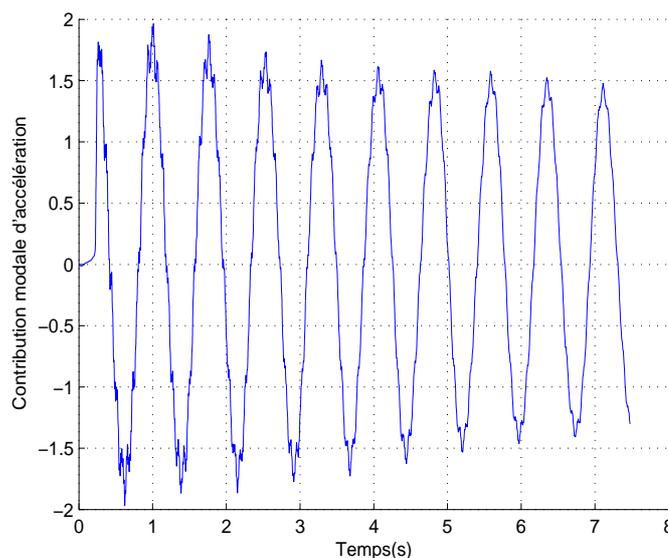


FIG. 6.7 – Oscillation libre expérimentale de la contribution modale de l'accélération du mode de torsion de la maquette du pont sans actionneur

Afin d'amortir ce mode de torsion, l'actionneur est attaché à l'extrémité du tablier où le déplacement est maximal, comme est indiqué sur la figure (6.8). Le coefficient d'amortissement total optimal de l'actionneur a été déterminé à partir du critère d'optimisation du

taux de décroissance exponentiel. Lorsqu'une résistance est attachée aux bornes de l'alternateur, l'amortissement est la somme d'un amortissement purement mécanique et d'un amortissement électrique, dû à la résistance. La valeur de cette dernière est déterminée par la méthode de moindre carrée et elle est fixée à une résistance totale de $4,5\Omega$.

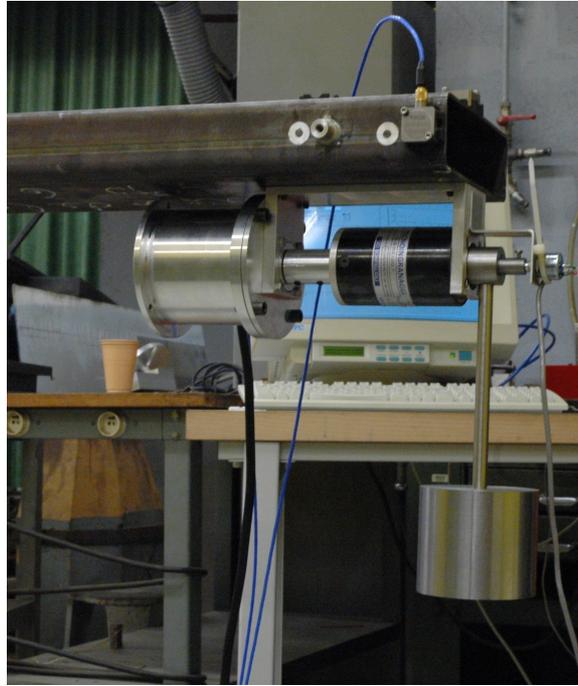


FIG. 6.8 – *Dispositif de contrôle du mode de torsion de la maquette du pont.*

L'oscillation libre expérimentale de la contribution modale de l'accélération du mode de torsion de la maquette du pont est représentée sur la figure (6.9). On remarque que l'utilisation d'un tel actionneur électromécanique avec des paramètres optimaux permet de bien amortir ce mode de vibration de la maquette du pont. Par contre, il n'est pas aussi efficace quant à l'amortissement des petites oscillations, vu que le rapport d'engrenage utilisé est très faible. De cette figure, on remarque aussi l'apparition des hautes fréquences des modes horizontaux sur la réponse du mode de torsion, vu qu'un lâché horizontal excite tous les modes horizontaux.

Pour comparer les études expérimentales et numériques, on représente dans la figure (6.10) l'oscillation libre numérique de la contribution modale de l'accélération du mode de torsion de la maquette du pont en introduisant les mêmes paramètres de l'actionneur utilisés expérimentalement. On remarque que les deux courbes, numérique et expérimentale, ont presque le même tracé et la même décroissance. D'où, une bonne corrélation entre la simulation numérique et le résultat expérimental.

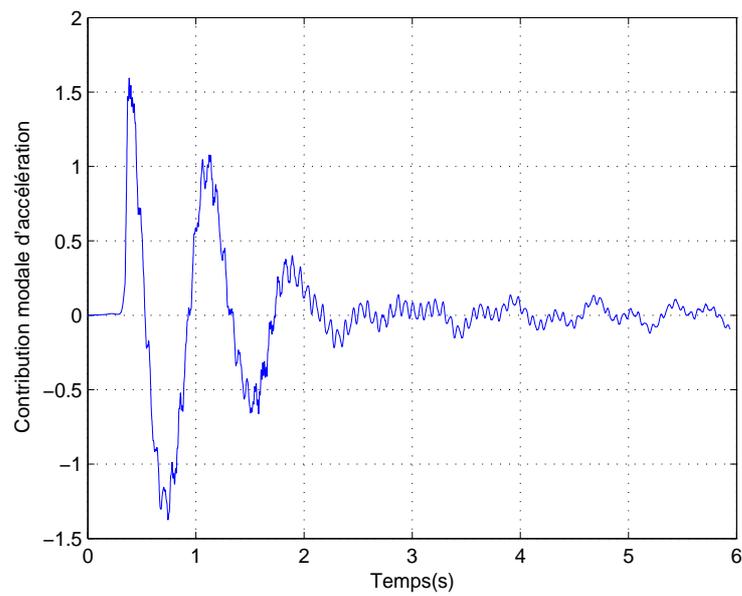


FIG. 6.9 – Oscillation libre expérimentale de la contribution modale de l'accélération du mode de torsion de la maquette lorsque l'actionneur est à paramètres optimaux.

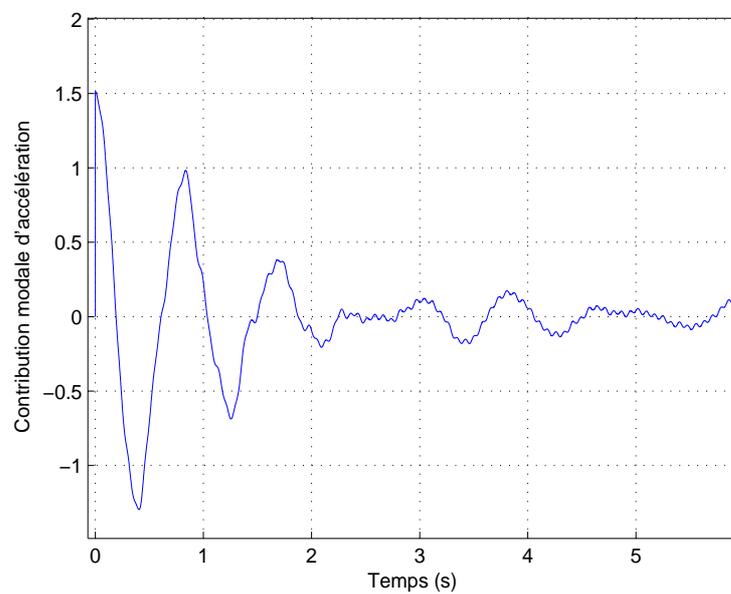


FIG. 6.10 – Oscillation libre numérique de la contribution modale de l'accélération du mode de torsion de la maquette lorsque l'actionneur à paramètres optimaux.

Pour voir l'influence de l'actionneur, lors d'un lâché horizontal, sur tous les modes, on représente dans la figure (6.11) l'oscillation libre expérimentale des six premières contributions modales des accélérations de la maquette du pont en utilisant l'actionneur à paramètres optimaux.

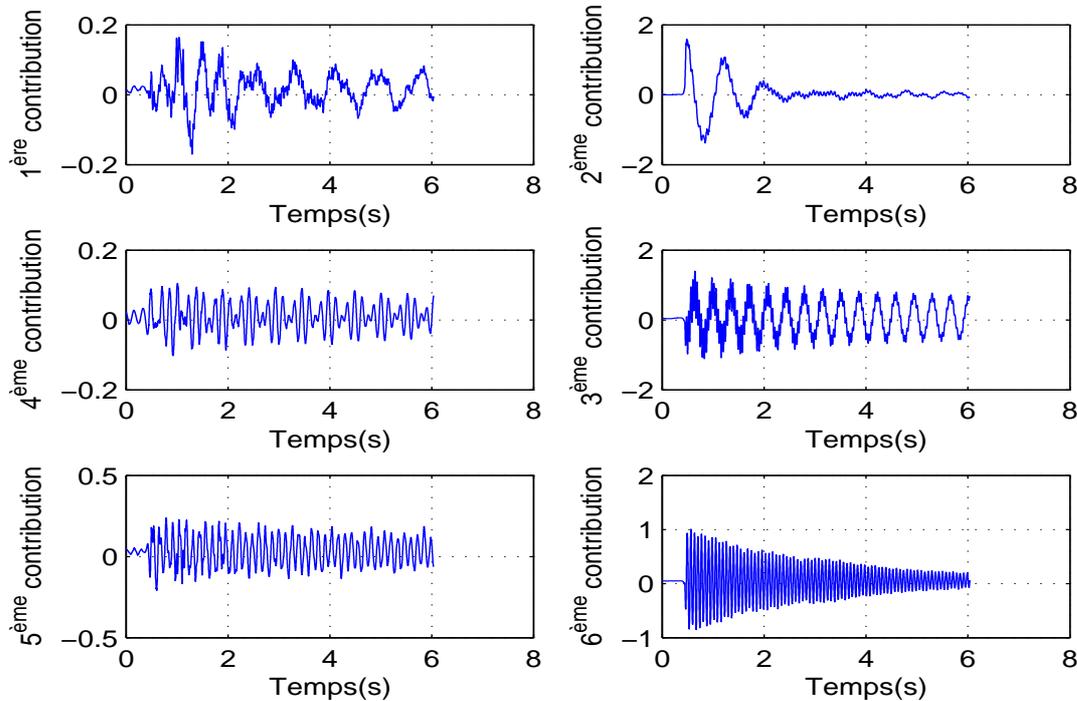


FIG. 6.11 – Oscillation libre expérimentale des six premières contributions modales des accélérations de la maquette du pont avec actionneur à paramètres optimaux.

Dans cette figure les contributions modales des accélérations des modes horizontaux et du mode de balancement sont représentées à droite et celles des modes verticaux sont représentées à gauche. En plus du mode de torsion, l'actionneur permet d'amortir le sixième mode de vibration, alors que son influence sur le troisième mode est minimale. Pour amortir ce mode de balancement, un actionneur devrait être placé à l'extrémité du pylône. Les modes verticaux sont très peu excités et ne sont pas amortis.

Afin de montrer expérimentalement l'importance des paramètres optimaux, on considère toujours le même actionneur : actionneur électromécanique attaché à l'extrémité du tablier, en variant premièrement la résistance externe puis la longueur du pendule en maintenant la masse totale de l'actionneur fixe.

6.3.1.1 Variation de la résistance externe

Dans cette section, on fait varier la résistance externe à partir de sa valeur optimale. La longueur du pendule prise en condition de synchronisation reste fixe. Dans la figure (6.12) est représentée l'oscillation libre expérimentale de la contribution modale de l'accélération du mode de torsion de la maquette du pont en pointillé lorsque l'actionneur est en circuit ouvert et en trait plein lorsque l'actionneur est à paramètres optimaux. Dans cette

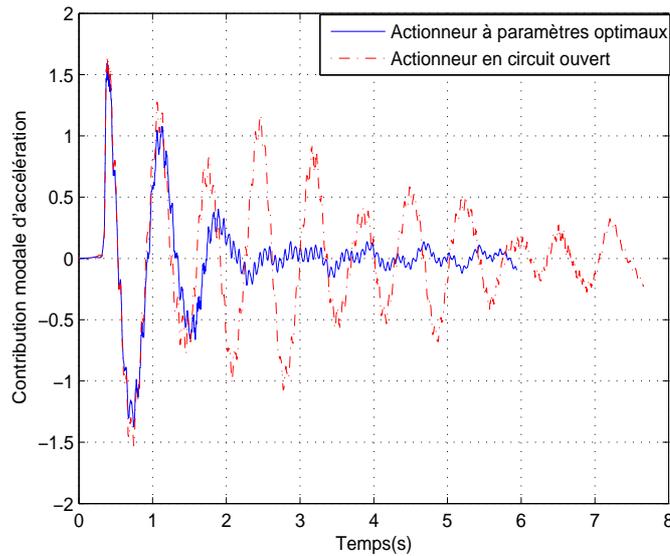


FIG. 6.12 – Oscillation libre expérimentale de la contribution modale de l'accélération du mode de torsion de la maquette du pont en pointillé lorsque l'actionneur est en circuit ouvert et en trait plein lorsque l'actionneur est à paramètres optimaux.

figure, lorsque l'actionneur est en circuit ouvert, il est clairement visible le phénomène des battements qui est dû à la présence de double pôles complexes conjugués dont leurs parties réelles sont presque coïncidées et leurs parties imaginaires sont très peu éloignées. Si on augmente la résistance, l'oscillation libre expérimentale de la contribution modale de l'accélération du même mode est représentée en pointillé lorsque $R = 2R^{opt}$ et en trait plein lorsque $R = R^{opt}$ dans la figure (6.13). On remarque que l'oscillation libre de la contribution modale de l'accélération lorsque $R = 2R^{opt}$ est moins amortie par rapport au cas où $R = R^{opt}$. Les battements ne sont plus visibles dans ce cas, les parties imaginaires des pôles complexes conjugués du système sont égaux et leurs parties réelles sont très éloignées.

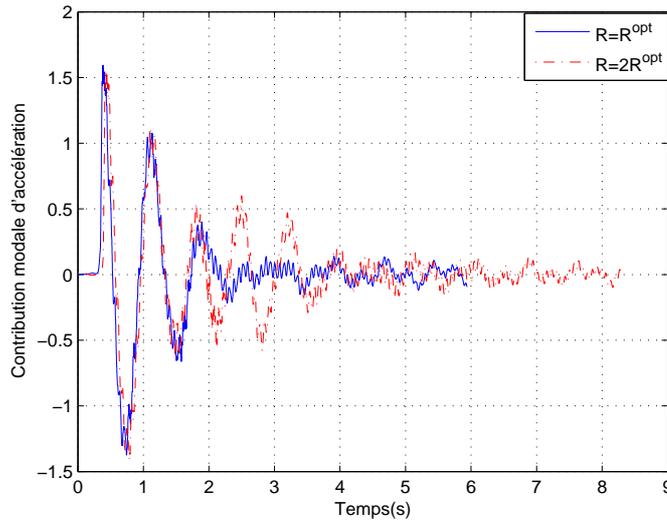


FIG. 6.13 – Oscillation libre expérimentale de la contribution modale de l'accélération du mode de torsion de la maquette du pont en pointillé lorsque $R = 2R^{opt}$ et en trait plein lorsque $R = R^{opt}$.

6.3.1.2 Variation de la longueur du pendule

Dans cette section, on maintient la résistance externe fixe $R = R^{opt}$ et on fait varier la longueur du pendule à partir de sa valeur optimale. En particulier, dans la figure (6.14) est représentée l'oscillation libre expérimentale de la contribution modale de l'accélération du mode de torsion de la maquette du pont en pointillé lorsque $l = 13,5cm$ et en trait plein lorsque $l = l^{opt} = 17,57cm$, alors que, dans les figures (6.15) et (6.16), la longueur du pendule utilisée est supérieure à sa valeur optimale. Dans la figure (6.15) est représentée l'oscillation libre expérimentale de la contribution modale de l'accélération du mode de torsion de la maquette du pont en pointillé lorsque $l = 25cm$ et en trait plein lorsque $l = l^{opt}$. De même, dans la figure (6.16) est représentée l'oscillation libre expérimentale de la contribution modale de l'accélération du même mode en pointillé lorsque $l = 34,5cm$ et en trait plein lorsque $l = l^{opt}$. Sur ces figures, on remarque que plus la longueur du pendule s'éloigne de la longueur optimale, moins l'oscillation de la contribution modale est amortie. D'où, l'importance de la condition de synchronisation.

Après avoir montré expérimentalement l'importance des paramètres optimaux de l'actionneur pour contrôler le mode de torsion de la maquette du pont, on cherche dans une deuxième partie à amortir la vibration du premier et du troisième mode de vibration de la maquette du pont.

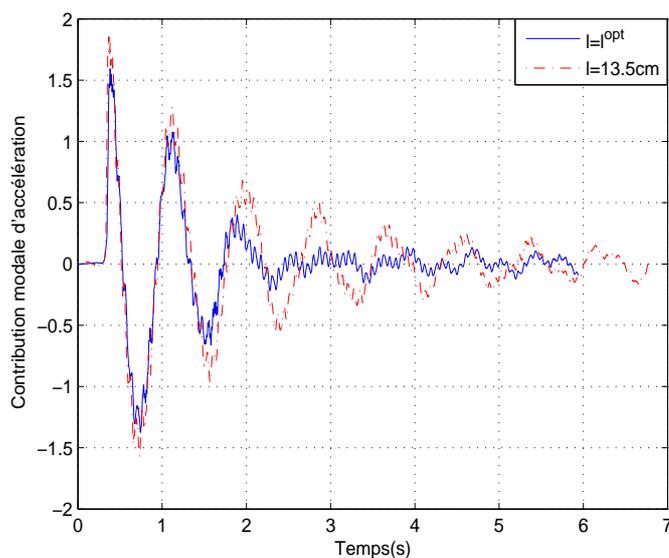


FIG. 6.14 – Oscillation libre expérimentale de la contribution modale de l'accélération du mode de torsion de la maquette du pont en pointillé lorsque $l = 13,5cm$ et en trait plein lorsque $l = l^{opt}$.

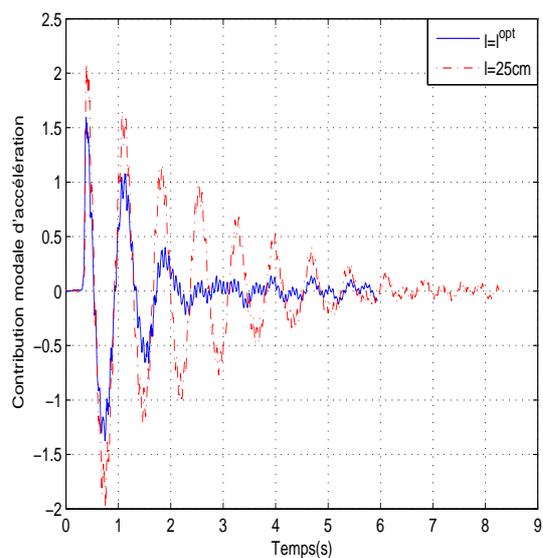


FIG. 6.15 – Oscillation libre expérimentale de la contribution modale de l'accélération du mode de torsion de la maquette du pont en pointillé lorsque $l = 25cm$ et en trait plein lorsque $l = l^{opt}$.

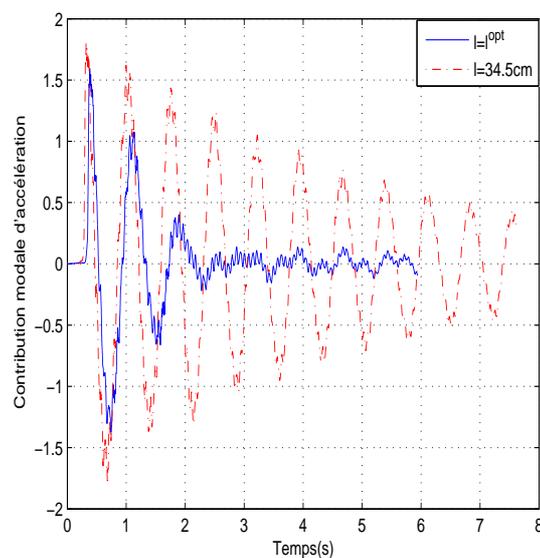


FIG. 6.16 – Oscillation libre expérimentale de la contribution modale de l'accélération du mode de torsion de la maquette du pont en pointillé lorsque $l = 34,5cm$ et en trait plein lorsque $l = l^{opt}$.

6.3.2 Contrôle du premier et du troisième mode de vibration de la maquette du pont

Comme on a indiqué dans le quatrième chapitre, pour amortir le premier mode et le mode de balancement de la maquette du pont, l'actionneur doit être attaché à l'extrémité du pylône : le premier mode est amorti lorsque le pendule vibre dans le plan (OXZ) alors que le mode de balancement est amorti lorsque le pendule vibre dans le plan (OYZ).

6.3.2.1 Contrôle du premier mode de vibration de la maquette du pont

L'actionneur est attaché à l'extrémité du pylône dont le pendule vibre dans le plan (OXZ) comme est indiqué par la figure (6.17). L'actionneur électromécanique utilisé expérimentalement, dans ce cas, n'est pas à paramètres optimaux, car on a utilisé un motoréducteur à courant continu dont on ne connaît pas ses caractéristiques. La longueur du pendule est choisie en condition de synchronisation $l = 15,6\text{cm}$. En considérant un lâché vertical, l'oscillation libre expérimentale de la contribution modale de l'accélération du premier mode de la maquette du pont, lorsque le motoréducteur est en court circuit, est représentée dans la figure (6.18) . On remarque que l'amortissement n'est pas optimal vu



FIG. 6.17 – Contrôle du premier mode de vibration de la maquette du pont.

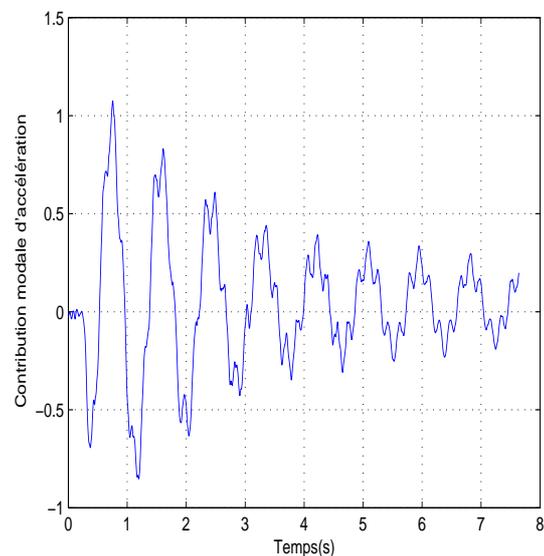


FIG. 6.18 – Oscillation libre expérimentale de la contribution modale de l'accélération du premier mode de la maquette du pont lorsque le motoréducteur est en court circuit.

que l'actionneur utilisé n'est pas à paramètres optimaux. Mais l'idée est de montrer que ce mode est amorti lorsque l'actionneur est attaché à l'extrémité du pylône.

L'excitation considérée dans la suite de ce chapitre est un lâché horizontal.

6.3.2.2 Contrôle du mode de balancement de la maquette du pont

L'actionneur est toujours attaché à l'extrémité du pylône mais le pendule vibre dans le plan (OYZ) comme est indiqué par la figure (6.19). L'actionneur utilisé expérimentalement dans ce cas est aussi à paramètres non optimaux, car on a utilisé le même actionneur que le cas précédent en variant seulement la longueur du pendule et son plan de vibration. La longueur du pendule est choisie en condition de synchronisation $l = 6,8cm$. Dans la figure (6.20) est représentée l'oscillation libre expérimentale de la contribution modale de l'accélération du mode de balancement de la maquette du pont lorsque le motoréducteur est en court circuit.



FIG. 6.19 – Contrôle du premier mode de vibration de la maquette du pont.

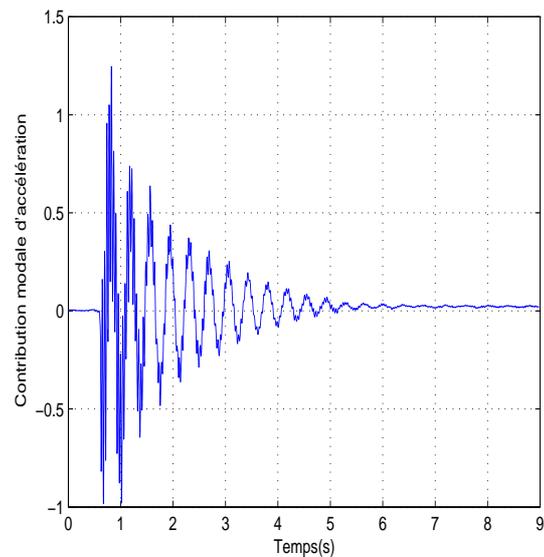


FIG. 6.20 – Oscillation libre expérimentale de la contribution modale de l'accélération du mode de balancement de la maquette du pont lorsque le motoréducteur est en court circuit.

On remarque que ce mode de balancement est amorti pour cette configuration de l'actionneur.

Dans cette section on a utilisé deux actionneurs électromécaniques : un attaché à l'extrémité du tablier et l'autre à l'extrémité du pylône comme est indiqué par le figure (6.19).

L'excitation est toujours la même; on tire l'extrémité du tablier et on lâche à vitesse nulle. En effet, ce lâché excite tous les modes horizontaux et le mode de balancement de la maquette du pont. Par ailleurs, on représente dans la figure (6.21) l'oscillation libre expérimentale des trois contributions modales des accélérations des deux premiers modes horizontaux et du mode de balancement de la maquette du pont lorsque l'actionneur attaché à l'extrémité du tablier est à paramètres optimaux et le motoréducteur est en court circuit.

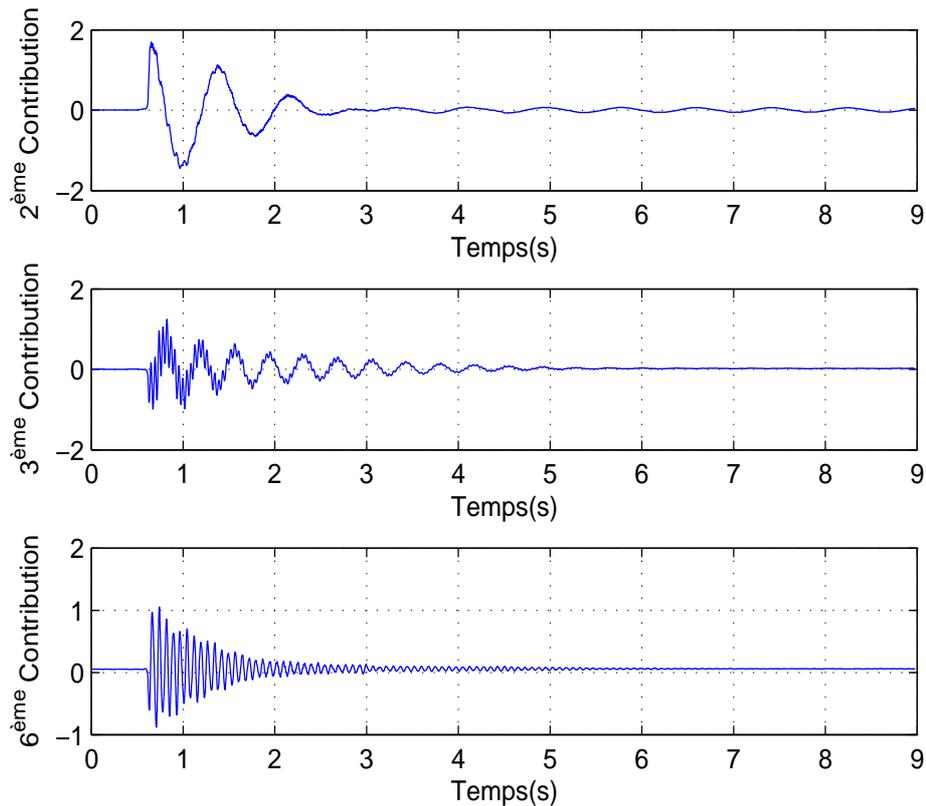


FIG. 6.21 – Oscillation libre expérimentale des trois contributions modales des accélérations des deux premiers modes horizontaux et du mode de balancement de la maquette du pont lorsque l'actionneur attaché à l'extrémité du tablier est à paramètres optimaux et le motoréducteur est en court circuit.

On remarque que les oscillations de ces trois modes sont bien amorties.

Par suite, on peut tirer comme conclusion partielle, que l'utilisation des trois actionneurs électromécaniques dont un est attaché à l'extrémité du tablier et les deux autres sont attachés à l'extrémité du pylône permettent d'amortir le premier mode vertical, les deux premiers modes horizontaux et le mode de balancement de la maquette du pont.

6.4 Contrôle semi-actif

Dans cette partie on présente la mise en oeuvre expérimentale de la loi de contrôle semi-actif sur la maquette du pont introduite dans le cinquième chapitre. On se limite à l'introduction de la loi de contrôle pour maintenir l'actionneur durant plusieurs étapes de construction de la maquette du pont. La maquette telle quelle est construite, représente l*i*ème étape de construction e_i , l*i*ème plus une étape de construction e_{i+1} est modélisée en ajoutant une masse concentrée. Les paramètres optimaux de cette nouvelle étape seront obtenus en faisant varier la résistance en temps réel selon la loi de contrôle semi-actif introduite dans le chapitre précédent. Cette résistance est pilotée via une carte électronique dissipant l'énergie électrique de manière variable en fonction du temps.

6.4.1 Schéma de la boucle de rétroaction

Le contrôle de la maquette du pont est réalisé grâce à un ensemble capteurs-contrôleur-actionneur. La maquette du pont est instrumentée avec 6 accéléromètres, qui permettent de mesurer les mouvements du pont. De plus un potentiomètre est placé sur l'axe de rotation du pendule qui, couplé à un alternateur, fait office d'actionneur. Les capteurs sont, après conditionnement, connectés à la carte d'acquisition placée sur l'ordinateur qui pilote l'ensemble du système. L'actionneur est piloté via la carte électronique dissipant l'énergie électrique de manière variable. La figure (6.22) présente la boucle de rétroaction.

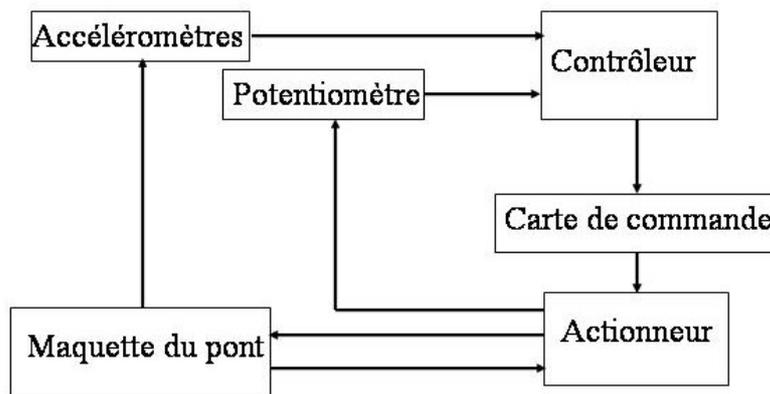


FIG. 6.22 – Boucle de rétroaction.

En supposant que les paramètres de l'étape de construction e_{i+1} sont connus, la loi de

contrôle introduite dépend seulement du rapport $\theta/\dot{\theta}$. L'angle de vibration du pendule θ est proportionnel à la mesure du potentiomètre, la vitesse angulaire $\dot{\theta}$ est obtenue par dérivation numérique de l'angle θ .

La carte de commande est un switch électronique, dont le schéma est fourni par la figure (6.23), composé d'un pont triphasé qui redresse le signal en tension monophasée, puis d'un transistor mosfet qu'on peut modéliser comme un interrupteur ouvert ou fermé en série avec une très faible résistance. Lorsque le transistor est conducteur, l'alternateur est

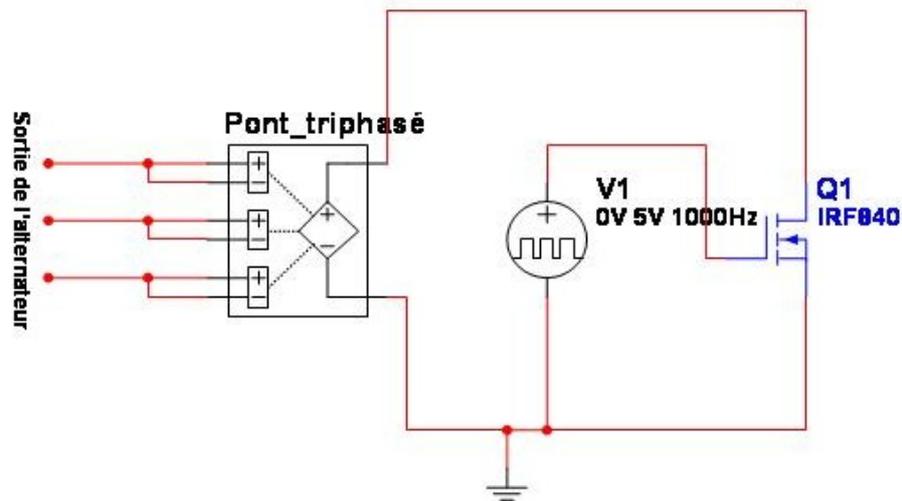


FIG. 6.23 – *Switch électronique.*

alors court-circuité et lorsqu'il est bloqué, l'alternateur est en circuit ouvert. Par suite, l'amortissement est variable selon le rapport cyclique à une fréquence fixée. Ce switch est donc commandé par un signal de commande à rapport cyclique variable de période T . Soit une résistance en série avec un interrupteur commandé par un rapport cyclique variable. L'interrupteur est fermé pendant la durée a et ouvert pendant $T-a$. On applique une tension U continue et constante aux bornes de la résistance. La quantité de charge qui passe à travers la résistance pendant une période est $Q=(U/r)a$. Or cela correspond à une résistance équivalente R telle que $Q=(U/R)T$. On en déduit $R=rT/a$.

La résistance r a été déterminée expérimentalement en testant la carte électronique lorsque l'actionneur est monté sur un support fixe. On a déterminé la résistance équivalente R pour différents rapports cycliques T/a . Il résulte que $r = 11,25\Omega$: cette valeur représente la résistance interne de la carte électronique.

Le signal à rapport cyclique variable est obtenu par la comparaison entre un signal trian-

gulaire et une consigne qui dépend de la valeur de la résistance R déterminée par la loi de contrôle semi-actif (5.24). Cette consigne est définie comme suit:

$$c = A - A \frac{r}{R} \quad (6.13)$$

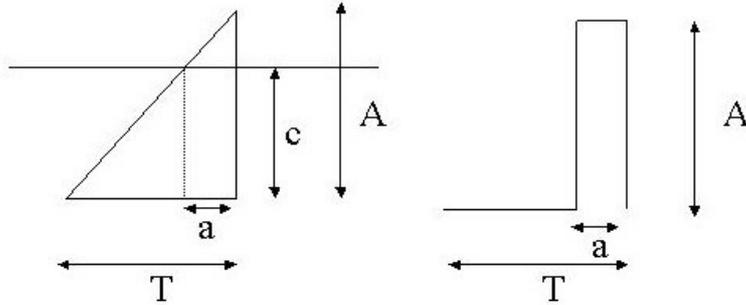


FIG. 6.24 – Génération du signal de commande.

Lorsque l'amplitude du triangle A est inférieure à la consigne c , le signal de commande vaut 0 et le switch est bloqué (circuit ouvert). Dans le cas contraire, le signal de commande vaut A et le switch est passant (circuit fermé). Ainsi on obtient un signal à rapport cyclique variable selon la valeur de c , la consigne, image de la valeur de la résistance issue de la loi de contrôle. La résistance est fixe sur une période T . Cette période est choisie très faible de telle façon à simuler une résistance continue dans le temps.

6.4.2 Résultats de contrôle semi-actif

La loi de contrôle semi-actif (5.24) introduite dans le chapitre précédent a pour but de maintenir l'actionneur durant plusieurs étapes de construction de la maquette du pont afin d'amortir le mode de torsion. Dans cette étude et pour des raisons de simplification, les grandeurs mécaniques, tels que les masses modales et les fréquences propres, sont calculées d'avance par éléments finis. Mais, ces grandeurs peuvent être déterminés aussi en temps réel par identification modale.

On considère que la maquette du pont telle qu'elle est construite, représente l'étape de construction e_i , l'étape de construction e_{i+1} est modélisée en ajoutant une masse concentrée de $1,2kg$ à extrémité du tablier : extrémité de la troisième poutre, selon la modélisation du quatrième chapitre. Dans la figure (6.25) est représentée l'oscillation libre de la

contribution modale d'accélération du mode de torsion de la maquette des deux étapes de construction. L'actionneur utilisé dans l'étape e_i est l'actionneur passif à paramètres optimaux. Cet actionneur est maintenu sans changement de ses paramètres durant l'étape e_{i+1} . On remarque, comme on a montré dans le chapitre précédent, que l'amortissement

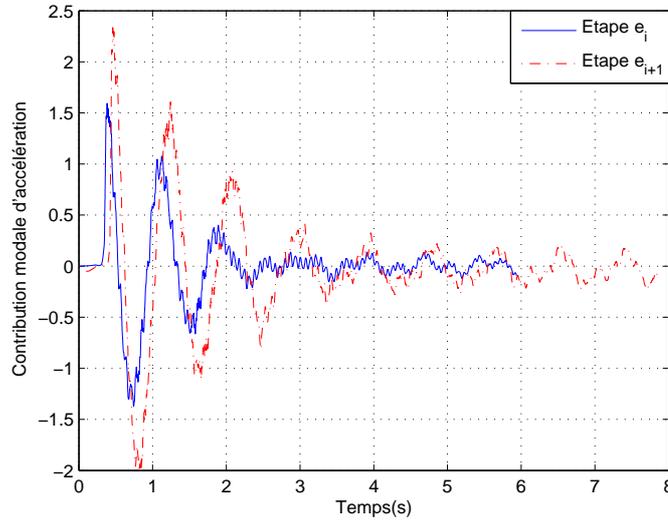


FIG. 6.25 – Oscillation libre expérimentale de la contribution modale d'accélération du mode de torsion de la maquette du pont à l'étape e_i et à l'étape e_{i+1} en maintenant le même actionneur.

de l'oscillation de la contribution modale du mode de torsion diminue en fonction de l'évolution de la maquette. Par suite, l'efficacité de l'actionneur électromécanique passif utilisé diminue lorsque la structure évolue au cours du temps.

Par ailleurs, pour confirmer l'avantage de la loi de contrôle semi-actif introduite dans le chapitre précédent, on cherche à maintenir le même actionneur, en faisant varier ses paramètres en temps réel selon la loi de contrôle appliquée sur la résistance externe, durant quatre étapes de construction de la maquette du pont : la maquette telle qu'elle est construite représente l'étape e_i , l'étape e_{i+1} est modélisée en ajoutant une masse concentrée de $1,2kg$, l'étape e_{i+2} est représentée en ajoutant une masse concentrée de $3kg$ et l'étape e_{i+3} est représentée en ajoutant une masse concentrée de $4,2kg$ toujours à l'extrémité libre de la troisième poutre. L'oscillation libre de la contribution modale du mode de torsion de ces quatre étapes est représentée par la figure (6.26). On remarque que les quatre courbes sont presque confondues. D'où, la loi de contrôle permet d'adapter l'actionneur de manière à conserver sa performance indépendamment de l'évolution de la structure : l'actionneur permettant une adaptation en temps réel aux évolutions de la structure.

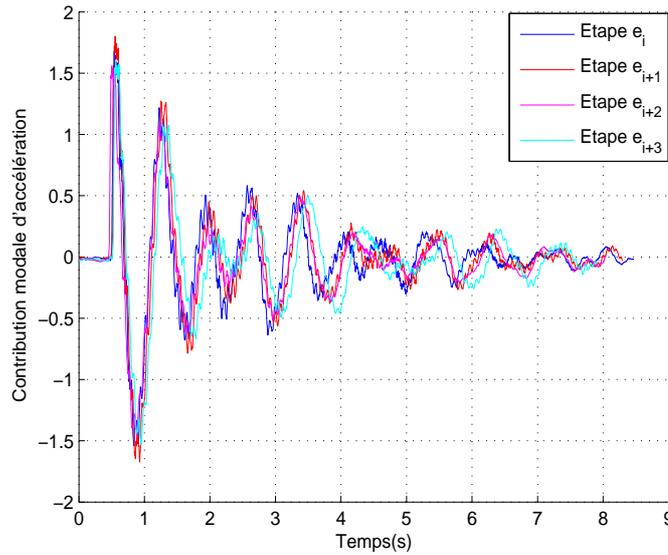


FIG. 6.26 – Oscillation libre expérimentale de la contribution modale d'accélération pour quatre étapes du mode de torsion de la maquette du pont en utilisant le contrôle semi-actif.

Par contre, de cette dernière figure on observe le phénomène des battements qui est dû à la résistance interne de la carte électronique qui est très élevée par rapport à la résistance optimale. Cette résistance interne est due à la présence des diodes pour redresser le courant alternatif.

6.5 Conclusion

L'étude expérimentale, développée dans ce chapitre, valide l'efficacité importante de l'actionneur électromécanique utilisé pour stabiliser les vibrations de la maquette du pont. Par ailleurs, les résultats obtenus expérimentalement en contrôle passif confirment la validité du critère d'optimisation du taux de décroissance exponentiel introduit dans le quatrième chapitre. Aussi, ils montrent l'importance majeure des paramètres optimaux de l'actionneur sur l'amortissement.

L'utilisation des trois actionneurs électromécaniques dont un est attaché à l'extrémité du tablier et les deux autres à l'extrémité du pylône permet d'amortir le premier mode vertical, les deux premiers modes horizontaux et le mode de balancement de la maquette du pont. Cependant il faut noter que les paramètres des deux actionneurs attachés à l'extrémité du pylône ne sont pas choisis d'une manière optimale.

Les résultats expérimentaux en contrôle semi-actif confirment l'avantage de la loi de contrôle qui permet d'adapter l'actionneur de manière à conserver sa performance indépendamment de l'évolution de la structure.