

# Conception et commande d'une interface haptique utilisant le confinement par métamatériaux

Mondher OUARI, Anis KACI, Christophe GIRAUD-AUDINE, Frédéric GIRAUD, Betty LEMAIRE-SEMAIL  
Univ. Lille, Arts et Métiers Institute of Technology, Centrale Lille, Junia, ULR 2697 - L2EP, F-59000 Lille, France

**RÉSUMÉ** – Ce papier présente une méthode pour confiner un mode de vibration sur une plaque en utilisant des métamatériaux constitué par un réseau périodique de piliers à base rectangulaire. La méthodologie consiste à accorder la fréquence de résonance du mode de flexion des piliers à celle du mode à confiner. Ces piliers sont alignés sur deux côtés opposés d'une même face de la plaque. Nous abordons la modélisation et la commande de ce mode confiné.

**Mots-clés** – Confinement des vibrations, Commande, Piézoélectricité, Haptique.

## 1. INTRODUCTION

Les écrans tactiles sont utilisés au quotidien pour interagir avec nos téléphones ou nos tablettes. La tendance actuelle est de les implanter dans des interfaces automobiles ou de machines outils. Ils peuvent alors être source de danger en mobilisant excessivement la vision. Pour pallier ce problème, il est nécessaire d'avoir un retour haptique.

Une solution envisagée consiste à moduler le frottement entre le doigt et la surface tactile, pour donner l'illusion de toucher une surface texturée [1, 2]. Cette lubrification active utilise des ondes ultrasonores et permet de produire l'illusion de toucher des textures [14]. Cette solution est aujourd'hui opérationnelle pour des écrans de dimension finie, mais des verrous sont à lever lorsque la surface active est grande, car il faut alors une grande dépense énergétique pour propager la vibration, ou lorsque les conditions aux limites sont mal maîtrisées. Une solution consiste à confiner la vibration dans une zone bien définie en utilisant des méthodes acoustiques.

Ainsi, [3] et [4] arrivent à localiser le retour tactile en utilisant les ondes évanescences qui limitent la vibration autour de l'actionneur. Ce confinement est basé sur une géométrie spécifique de la zone tactile.

Une autre approche consiste à imposer un encastrement aux limites de la plaque, en agissant sur la structure du stimulateur tactile. Mais, en pratique, assurer des conditions vibratoires nulle s'avère difficile à mettre en œuvre dans la gamme de fréquences utiles ( $> 25$  kHz).

Les avancées dans le domaine des métamatériaux acoustiques permettent de contrôler ou atténuer la propagation des ondes [5]. Pour une application haptique, [6] a utilisé des métamatériaux sous la forme d'un réseau de piliers cylindriques, placés périodiquement. Ce réseau a la capacité d'atténuer la propagation de l'onde dans une bande de fréquence appelée "bande interdite". La longueur de l'onde stationnaire à cette fréquence est déterminée par la périodicité des cristaux phononiques. Cependant, en fonctionnement, les conditions optimales ne sont plus garanties, car le doigt de l'utilisateur constitue une perturbation non prise en compte par les auteurs.

Cet article propose une méthodologie pour concevoir un métamatériau, sous forme d'un réseau périodique de piliers, permettant de confiner un mode de vibration choisi. Ceci permet de se rapprocher de la conception des stimulateurs sans confinement. Ensuite, un modèle du mode de vibration est établi afin de pouvoir le commander via des céramiques piézoélectriques afin d'obtenir des bonnes performances en fonctionne-

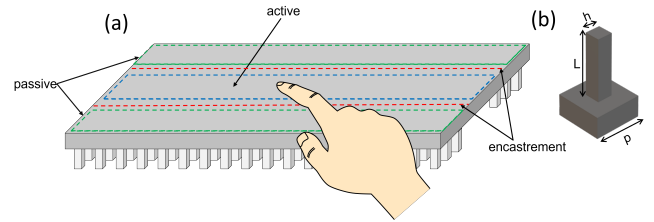


FIG. 1. (a) Schéma du prototype étudié. En marron, la zone active de vibration. (b) représentation du pilier ainsi que de la cellule périodique.

ment, constantes dans l'usage et le temps.

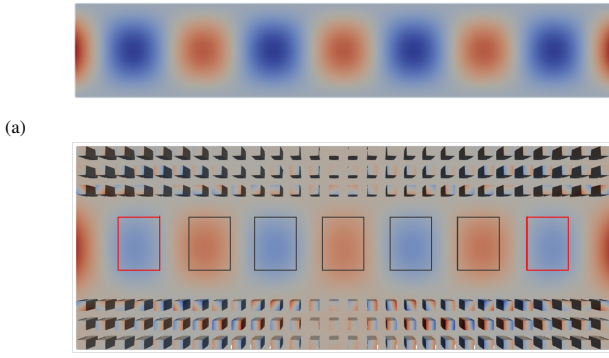
## 2. PRINCIPE ET MÉTHODOLOGIE

La Fig. 1.a représente le prototype envisagé dans ce papier. L'objectif est de pouvoir produire des vibrations et donc un retour haptique dans une partie de la surface de la plaque appelée 'active' (délimitée en bleu). Pour ce faire, des piliers sont rajoutés, à l'opposé des surfaces appelées 'passives' (délimitées en vert) où il n'y est pas censé avoir d'effet de lubrification. Sous certaines conditions, le rôle de ces piliers est d'atténuer les vibrations sur les surfaces 'passives' pour dans l'idéal empêcher toute propagation dans la bande de fréquence qui sera exploitée pour réaliser la modulation de friction.

Le but recherché est l'utilisation de l'ensemble des piliers pour créer un encastrement aux frontières entre la surface 'active' et les deux surfaces 'passives'. En effet, si les piliers rajoutés possèdent un mode de vibration de flexion à la même fréquence que le mode qu'on désire confiner dans la surface 'active', un transfert d'énergie aura lieu entre les deux modes (conversion de mode). Ce transfert limite la propagation de vibration et permet donc pour des paramètres géométriques bien choisis le confinement de vibration pour ce mode [7].

Le dimensionnement de ce dispositif est complexe et ne comporte pas de solutions analytiques. On procède donc à un prédimensionnement dans lequel on considère séparément le dimensionnement des piliers et de la plaque. La méthode se décompose en trois étapes :

- Dimensionner la zone 'active', en l'isolant des deux zones 'passives'. Les deux frontières entre les surfaces sont considérées comme encastrees lors de la simulation. Ce dimensionnement a comme cahier des charges l'obtention d'un mode de flexion dont la fréquence de résonance est entre 25 kHz et 50 kHz et une demi-longueur d'onde inférieure à la largeur d'un doigt qui est estimé à 20 mm.
- Partant de la fréquence de résonance obtenue précédemment, dimensionner les piliers pour obtenir la coïncidence de la résonance de la plaque avec un mode d'un pilier (considéré seul). Dans le cas présenté ici, pour des raisons pratiques, les piliers sont prismatiques à base carrée. Il s'agit donc en réalité de deux déformées modales identiques (selon chacun des deux axes de symétrie). Pour



(b)  
FIG. 2. Résultats de simulations. (a) le mode de vibration de la poutre en condition encastré-libre. (b) La simulation de la plaque avec un confinement de mode vue de face opposée, les carrés noirs encadrent les actionneurs et les rouges encadrent les capteurs

limiter les dimensions, le premier mode de flexion est considéré, et de plus, à l'interface piliers/plaque, les déplacements sont imposés : on considère donc également des conditions encastré-libre [8].

- Déterminer la périodicité des piliers (définie par la dimension  $p$  d'une cellule élémentaire, cf. Fig.1.b) par simulation.

Une fois la longueur d'onde du mode est déterminé, des céramiques piézoélectriques sont placées de sorte à maximiser le couplage avec le mode de vibration sélectionné, tout en évitant l'excitation des modes voisins [9].

### 3. DIMENSIONNEMENT ET CONCEPTION DU PROTOTYPE

Le dimensionnement du système comprend une étape de calculs analytiques préalables pour déterminer la fréquence de résonance des modes utiles. Ce calcul est basé sur la théorie des poutres d'Euler-Bernoulli.

La simulation par éléments finis sous Salome-Meca (Code aster) permet d'affiner le prédimensionnement, aboutissant à une plaque de dimensions  $115.5 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$  avec un mode de flexion à une fréquence  $38\,356 \text{ Hz}$  (cf. Fig.5a) et des piliers de dimensions  $6.4 \text{ mm} \times 2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$  pour une fréquence de  $36\,561 \text{ Hz}$ .

En ayant les dimensions des piliers et de la zone active, il reste à déterminer la périodicité des piliers. Afin d'aboutir à un bon confinement et en se basant sur l'étude réalisée par [6], plusieurs simulations par éléments finis ont été réalisées. Ses simulations ont permis de choisir la périodicité, égale au double de la largeur du pilier, et d'utiliser trois rangées de picots.

Fig.5b montre le résultat de simulation du prototype conçu. La simulation montre un bon confinement du mode de vibration recherché, illustré en Fig.5a. Cependant, ce mode est retrouvé à une fréquence plus basse ( $32\,001 \text{ Hz}$  au lieu de  $38\,356 \text{ Hz}$ ), ce qui peut s'expliquer en partie par l'ajout des céramiques piézoélectriques. Cette baisse de fréquence n'a pas d'influence sur l'application.

La méthodologie de conception du dispositif complet validée par simulation, nous abordons dans la partie suivante, la modélisation et la commande du mode de vibration.

### 4. MODÉLISATION ET COMMANDE D'UN MODE DE VIBRATION

Pour produire un retour tactile 'haute fidélité', il est important de contrôler la vibration de la zone active - qui est à l'origine de la lubrification active - afin d'une part de rendre le système robuste à la présence d'un doigt, d'autre part d'assurer une dynamique importante afin de suivre des références d'amplitude vibratoire. Pour cela, un modèle de comportant de la vibration

est proposé, en se basant sur le principe de la projection modale [10], un mode excité par un actionneur piézoélectrique, autour de sa fréquence de résonance, est modélisé par un système masse-ressort-amortisseur. la dynamique de l'amplitude de vibration peut donc être exprimée comme suit :

$$\ddot{w} + 2\xi\omega_n\dot{w} + \omega_n^2 w = gv \quad (1)$$

où  $w$ ,  $\xi$ ,  $\omega_n$ ,  $g$ , et  $v$  sont respectivement le déplacement modal, mesuré par les capteurs représentés en Fig.5b, le facteur d'amortissement modal, la pulsation de résonance du mode et le gain de conversion piézoélectrique et la tension d'alimentation.

Dans le repère naturel de la vibration, la variable  $w(t)$  est sinusoïdale à plusieurs dizaines de kilohertz. Or, le suivi de référence sinusoïdal n'est pas simple, et c'est pourquoi comme c'est le cas pour les machines électriques, nous utiliserons une projection sur un repère tournant.

En supposant que  $v$  et  $w$  sont des fonctions purement sinusoïdales, la représentation complexe est utilisée [11] :

$$\underline{w} = (W_d + jW_q) e^{j\omega t} \quad (2)$$

$$\underline{V} = (V_d + jV_q) e^{j\omega t} \quad (3)$$

$$\underline{\dot{w}} = (U_d + jU_q) e^{j\omega t} \quad (4)$$

où  $W_d$  et  $W_q$  sont respectivement la partie réelle et imaginaire de l'amplitude modale,  $U_d$  et  $U_q$  sont respectivement la partie réelle et imaginaire de la vitesse modale,  $V_d$  et  $V_q$  sont respectivement la partie réelle et imaginaire de la tension d'entrée,  $\omega$  est la fréquence d'excitation.

En remplaçant (2), (4) et (3) dans (1), on peut représenter le système sous un espace d'état comme suit :

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \dot{U}_d \\ \dot{U}_q \\ \dot{U}_d \\ \dot{U}_q \end{bmatrix}}_{\dot{x}} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \omega^2 - \omega_n^2 & 2\xi\omega\omega_n & -2\xi\omega_n & 2\omega \\ -2\xi\omega\omega_n & \omega^2 - \omega_n^2 & -2\omega & -2\xi\omega_n \end{bmatrix}}_A \underbrace{\begin{bmatrix} U_d \\ U_q \\ \dot{U}_d \\ \dot{U}_q \end{bmatrix}}_x + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -g\omega_n \\ g\omega_n & 0 \end{bmatrix}}_B \underbrace{\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix}}_u \quad (5)$$

La commande désirée a pour objectifs d'éliminer l'erreur statique et de pouvoir rejeter les perturbations. Ceci nécessite une augmentation du système d'état. Cette augmentation du système se traduit par l'introduction de l'intégral de la sortie  $\int U_d dt$  et  $\int U_q dt$ . Le système devient :

$$\underbrace{\begin{bmatrix} U_d \\ U_q \\ \dot{U}_d \\ \dot{U}_q \\ \int U_d \\ \int U_q \end{bmatrix}}_{\dot{x}} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & & & & \\ 0 & 0 & & & & \\ 0 & 0 & & & & \\ 0 & 0 & & & & \end{bmatrix}}_A \underbrace{\begin{bmatrix} U_d \\ U_q \\ \dot{U}_d \\ \dot{U}_q \end{bmatrix}}_x + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -g\omega_n \\ g\omega_n & 0 \end{bmatrix}}_B \underbrace{\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix}}_u \quad (6)$$

La commande donc s'écrit par :

$$\hat{u} = -K\hat{x} \quad (7)$$

Le gain  $K$  est calculé sur la base de la méthode de la commande

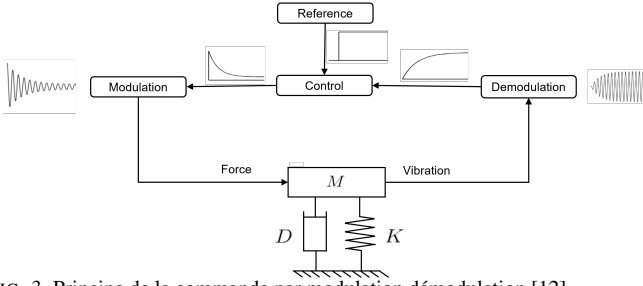


FIG. 3. Principe de la commande par modulation démodulation [12]

optimale LQR. Ce retour d'état peut être réécrit comme un régulateur PID [12] pour simplifier son implémentation sur un microprocesseur DSP avec la méthode détaillée en [11]. Ainsi, nous utilisons la commande de type modulation démodulation (Commande vectorielle). En simplifiant la synthèse de la commande, La méthode assure qu'un contrôleur stable dans la base démodulée garantit la stabilité du système. Le principe de la commande par modulation/démodulation est illustré à la figure 3.

#### 4.1. Implémentation

Le contrôle du dispositif haptique est implémenté dans un processeur de signal numérique de type de STM32f446. Il est utilisé pour synthétiser et mesurer des signaux sinusoïdaux ultrasonores via ses entrées de convertisseur analogique-numérique (ADC) et génère une tension de sortie via son convertisseur numérique-analogique (DAC). la tension générée est amplifiée par un amplificateur linéaire (NF Corporation HSA4052).

Le contrôle implémenté dans ce dispositif est similaire à celui décrit dans [13] qui implique deux processus asynchrones. Un processus rapide, la synthèse numérique directe (DDS), à une fréquence de 250 kHz ( $T_s = 4 \mu s$ ), génère la référence de tension (Fig.4) qui est ensuite amplifiée pour alimenter les actionneurs. la tension est générée en considérant uniquement la partie réelle de la tension décrite en (3) :

$$v(t_k) = V_d \cos(\omega t_k) - V_q \sin(\omega t_k) \quad (8)$$

où  $t_k = kT_s$  est le  $k^{\text{ième}}$  échantillon.

La tension  $v(t)$  est donc échantillonnée et bloquée à 250 kHz.

Le processus le plus lent, à une fréquence de 5 kHz, génère la sortie de référence de tension. Le schéma en boucle fermée qui fonctionne avec les deux processus est représenté dans Fig.4.

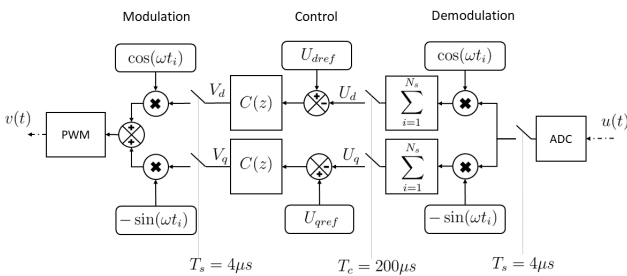


FIG. 4. Schéma de contrôle en boucle fermée dans le repère tournant.

## 5. VALIDATION EXPÉRIMENTALE

Le prototype a réalisé par impression 3D à base d'aluminium. Pour exciter le mode de vibration, cinq céramiques piézoélectriques (Noliac) ( $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ ) ont été utilisées. De plus, deux céramiques ( $10 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ ) ont été placées au bord du prototype. En utilisant l'effet piézoélectrique direct, la tension mesurée est proportionnelle au déplacement, constituant ainsi capteur pour la commande en boucle fermée. Le prototype est illustré dans la figure Fig.5.

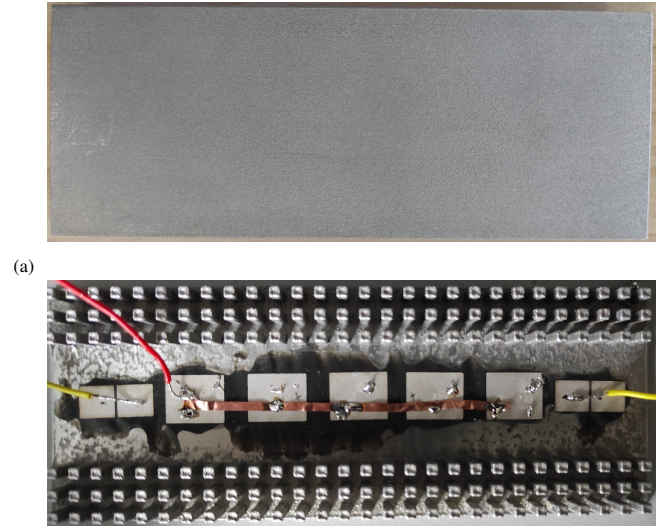


FIG. 5. Prototype réalisé. (a) Vue d'au-dessus (b) Vue d'au-dessous

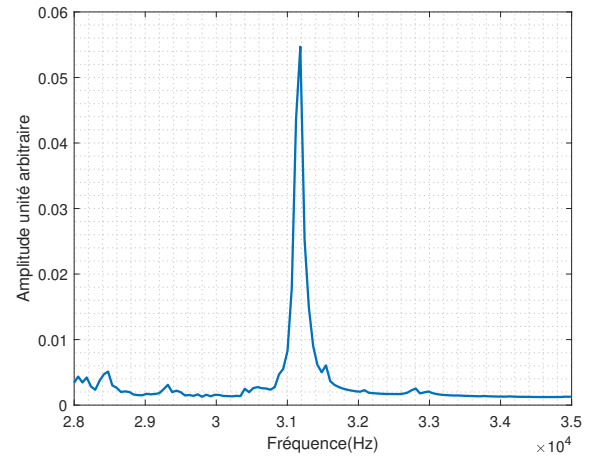


FIG. 6. Spectre de la plaque.

#### 5.1. Validation expérimentale de confinement de vibration

Un balayage par une tension d'alimentation variable consistant en un sinus modulé linéairement en fréquence (de 28 kHz à 35 kHz) a été réalisé avec l'analyseur de dynamique (SR785 STANFORD RESEARCH). Sur la Fig.6 est représentée la réponse d'un capteur durant ce test. Le spectre comporte un pic autour de 31 kHz qui valide la présence du mode à cette fréquence, soit un écart de 3 % par rapport aux simulations.

Une cartographie à l'aide d'un vibromètre laser a été réalisé à la fréquence retrouvée précédemment. la cartographie confirme l'existence du mode désiré confiné. Fig.7 conformément à la simulation de la Fig.2.

Étant donné la validation de confinement du mode et afin de pouvoir le commander, dans ce qui suit l'identification des paramètres du mode de vibration est présentée.

#### 5.2. Identification des paramètres du mode

Dans le but d'identifier les paramètres dynamiques de la vitesse ( $g$ ,  $\xi$  et  $\omega_n$ ), un balayage en fréquence a été réalisé pour avoir la réponse fréquentielle du mode. Ensuite, un algorithme basé sur les moindres carrés a été appliqué pour estimer ces paramètres. Fig.8 montre la réponse fréquentielle du balayage réalisé, ainsi que la réponse fréquentielle à partir des paramètres estimés. L'identification réalisée montre un résultat satisfaisant. On note cependant que la courbe expérimentale comporte des



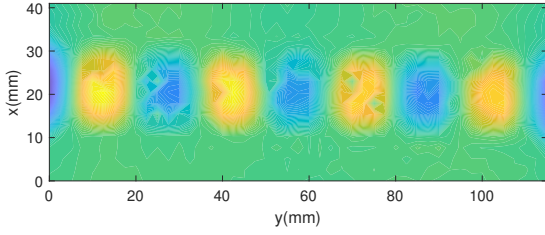


FIG. 7. Cartographie du mode de vibration.

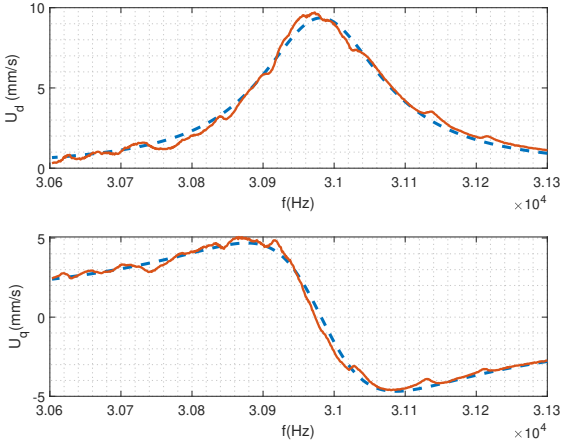


FIG. 8. Résultat du balayage en fréquence. En rouge, mesure expérimentale, en bleu, modèle identifié.

variations de gain et de phase qui peut être expliquée par la dispersion des dimensions des piliers liée au procédé de fabrication.

Après avoir identifié les paramètres du mode, on peut passer à la synthèse du contrôle et de la validation expérimentale de la commande.

### 5.3. Validation de la commande

À partir des paramètres identifiés précédemment, le correcteur a été synthétisé. Le régulateur PI a été choisi pour avoir un temps de réponse de 1.5 ms, assez rapide pour permettre une bonne fidélité sur les textures qui peuvent être générée par le prototype.

La figure Fig.9 montre la réponse indicielle pour une référence directe non nulle et une réponse en quadrature nulle ( $U_d = 4500$  et  $U_q = 0$ ). Les vitesses suivent leurs références sans dépassement ni erreur statique.

## 6. CONCLUSIONS

Dans ce travail, le confinement d'un mode de vibration sur une plaque, a été présenté. Le confinement est atteint en utilisant des métamatériaux sous forme de réseau périodique de piliers à base rectangulaire, placés de part et d'autre de la plaque. La méthodologie proposée, pour concevoir un prototype qui confine le mode de vibration, consiste à ajuster la fréquence de résonance des piliers à celle du mode cible. Cet ajustement permet le transfert d'énergie et donc le confinement. Cette méthodologie a été validée par simulation et expérimentalement. Ensuite, La modélisation et la commande d'un mode de vibration ont été présentées. Elles permettent l'amélioration de la dynamique par la boucle fermée.

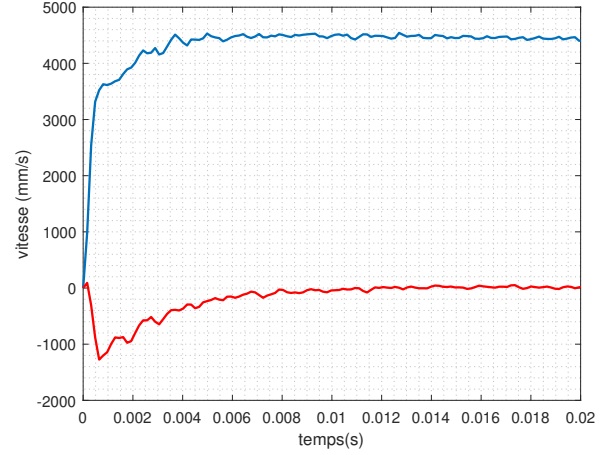


FIG. 9. Réponse indicielle du système. En bleu  $U_d$  et en rouge  $U_q$

## 7. REMERCIEMENTS

Ce travail est dans le cadre du projet HASAMé sous convention ANR-21-CE33-0020.

Ce travail est soutenu par l'IRCICA (Institut de Recherche sur les Dispositifs Logiciels et Matériels pour l'Information et la Communication Avancée, USR CNRS 3380).

## 8. RÉFÉRENCES

- [1] C. Basdogan, F. Giraud, V. Levesque, and S. Choi, "A Review of Surface Haptics : Enabling Tactile Effects on Touch Surfaces," IEEE Trans. Haptics, vol. 13, no. 3, pp. 450–470, Jul. 2020, doi : 10.1109/TOH.2020.2990712.
- [2] E. Vezzoli et al., "Friction Reduction through Ultrasonic Vibration Part 1 : Modelling Intermittent Contact," IEEE Transactions on Haptics, vol. 10, no. 2, pp. 196–207, Apr. 2017, doi : 10.1109/TOH.2017.2671432.
- [3] A. B. Dhiab and C. Hudin, "Confinement of Vibrotactile Stimuli in Narrow Plates : Principle and Effect of Finger Loading," IEEE Transactions on Haptics, vol. 13, no. 3, pp. 471–482, Jul. 2020, doi : 10.1109/TOH.2020.2986727.
- [4] C. Hudin, "Local friction modulation using non-radiating ultrasonic vibrations," 2017 IEEE World Haptics Conference (WHC), Munich, Germany, 2017, pp. 19–24, doi : 10.1109/WHC.2017.7989850.
- [5] Z. Liu, "Locally resonant sonic materials," Science, vol. 289, no. 5485, pp. 1734–1736, 2000.
- [6] Daunizeau, Thomas, et al. "Phononic Crystals Applied to Localised Surface Haptics." IEEE Transactions on Haptics, vol. 14, no. 3, July 2021, pp. 668–74, https://doi.org/10.1109/TOH.2021.3072566.
- [7] A. Colombi, P. Roux, et M. Rupin, «Sub-wavelength energy trapping of elastic waves in a metamaterial», The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 136, n° 2, p. EL192-EL198, août 2014, doi : 10.1121/1.4890942.)
- [8] Matthieu Rupin. Cavit  réverb rante et r sonateurs sub-longueur d'onde : approches numériques et expérimentales. Physique [physics]. Universit  de Grenoble, 2014. Français. NNT : 2014GREN082. tel-01558859
- [9] Kaci, Anis, et al. "Closed loop control of vibration field transient : Application to wave focusing." Mechanical Systems and Signal Processing 167 (2022) : 108285.
- [10] G radin, Michel, and Daniel J. Rixen. Mechanical vibrations : theory and application to structural dynamics. John Wiley & Sons, 2014.
- [11] Giraud, Frédéric, and Christophe Giraud-Audine. Piezoelectric Actuators : Vector Control Method : Basic, Modeling and Mechatronic Design of Ultrasonic Devices. Butterworth-Heinemann, 2019.
- [12] Kaci, Anis, et al. "LQR based MIMO-PID controller for the vector control of an underdamped harmonic oscillator." Mechanical Systems and Signal Processing 134 (2019) : 106314.
- [13] Ghenna, Sofiane, et al. "Vector control of piezoelectric transducers and ultrasonic actuators." IEEE Transactions on Industrial Electronics 65.6 (2017) : 4880-4888.
- [14] Garbuio, Lauric. Etude du phénomène de lubrification électroactive  

l'aide d'actionneurs piézoélectriques. Application à la réduction des forces de frottement sec dans un moteur à combustion interne. Diss. Institut National Polytechnique de Toulouse-INPT, 2006.