



Nanomotion active isolation system for heavy load

Ronan Le Breton, Guillaume Deleglise, Julie Allibe, Adrien Badel, Gael Balik,
Laurent Brunetti, Bernard Caron

► To cite this version:

Ronan Le Breton, Guillaume Deleglise, Julie Allibe, Adrien Badel, Gael Balik, et al.. Nanomotion active isolation system for heavy load. CFM 2013 - 21ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2013, Bordeaux, France. <hal-03440379>

HAL Id: hal-03440379

<https://hal.science/hal-03440379v1>

Submitted on 22 Nov 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

Système d'isolation active des nano-mouvements du sol pour masses importantes

R. LE BRETON^a, G. DELEGLISE^b, A. BADEL^a, J. ALLIBE^b, G. BALIK^b, L. BRUNETTI^b,
B. CARON^a, A. JEREMIE^b, J. LOTTIN^a, S. VILALTE^b

a. Université de Savoie, Laboratoire SYMME, BP 80439, 74944 Annecy le Vieux Cedex, France

b. LAPP-IN2P3-CNRS, Université de Savoie, BP 110, F-74941 Annecy-le-Vieux Cedex, France

Résumé :

Un système compact d'isolation active des nano-vibrations du sol a été développé. Ce système permet de stabiliser à l'échelle nanométrique des quadrupôles (ie. aimants) d'un futur accélérateur de particule linéaire (CLIC). Ces travaux présentent la conception électromécanique, en particulier l'implémentation des actionneurs piézoélectriques, et l'instrumentation de ce dispositif devant stabiliser des masses de plusieurs dizaines de kilogrammes au nanomètre. Un modèle précis du système est obtenu par la modélisation des différents sous-ensembles. L'identification des paramètres s'appuie sur la caractérisation dynamique expérimentale des éléments. A partir des modèles identifiés, une loi de contrôle est développée pour isoler la plateforme des mouvements du sol pour une bande passante de 12 Hz à 100 Hz. Les simulations du schéma de contrôle sont validées expérimentalement grâce à l'utilisation de plusieurs types de capteurs sismiques (accéléromètres et géophones) pour la mesure des nano-déplacements.

Abstract :

An active ground motion isolation system is presented in this work. This system provides vibrations isolation at the nanometer scale for magnets of a future particle accelerator (Compact Linear Collider - CLIC). The mechanical design and instrumentation of this novel compact isolation are investigated to reach subnanometer capabilities for heavy load (up to 50kg). The electromechanical design, including the implementation of piezoelectric actuators, is described. Along with this, the acquisition electronics and the choice of sensors with subnanometer capability are discussed. A dynamic characterization is performed. The different parts are individually identified and modeled. Based on the identified model, a control scheme is developed to attenuate ground motion and isolate a platform in a 12 Hz to 100 Hz frequency range. A simulation of attenuation is experimentally validated using the measurements from two types of seismic sensors (accelerometers and geophones).

Mots clefs : Isolation active de vibration ; nanomètre

1 Introduction

L'isolation active de vibration est une problématique rencontrée dans de nombreuses applications telles que la micro-fabrication et la métrologie. L'isolation passive ne permet pas toujours de répondre à l'augmentation des performances recherchées des instruments de haute précision. Des systèmes actifs d'isolation sont développés pour isoler des mouvements transmis par le support de ces équipements [6].

L'isolation active de précision trouve également des applications pour les instruments de la physique des hautes énergies comme les accélérateurs de particules. Le projet CLIC (Compact Linear Collider) est un accélérateur de particules linéaire de prochaine génération en cours de développement au sein d'une collaboration internationale coordonnée par le CERN (Organisation européenne pour la recherche nucléaire). Deux faisceaux, possédant des sections de l'ordre de quelques nanomètres, sont accélérés en ligne droite jusqu'au point d'interaction où la collision de haute énergie entre électrons et positrons

est observée par un détecteur. Afin d'obtenir les performances requises, le faisceau doit être stabilisé à l'échelle nanométrique [3]. CLIC est composé de différentes sections réalisées sous formes de modules comprenant des aimants (quadrupôles) servant au guidage et à la mise en forme des faisceaux. Pour le projet CLIC ces aimants nécessitent d'être stabilisés mécaniquement afin d'assurer la stabilisation du faisceau lui même. Les sections présentant ces quadrupôles à stabiliser sont : le Linac d'une longueur de deux fois 21 km où le faisceau est accéléré, et le Final Focus d'environ 3 km prolongeant le Linac et se terminant par deux aimants (QD0) de part et d'autre du point d'interaction.

A l'échelle nanométrique, il existe 3 principales sources de perturbations vibratoires : le mouvement du sol, le rayonnement acoustique et les vibrations internes des différents équipements (refroidissement liquide, moteurs, etc.). Le mouvement du sol représente une des sources principales et des plus étudiées [5]. Les vibrations induites par le sol sont particulièrement présentes en basse fréquence et diminuent fortement même à l'échelle nanométrique au delà de la centaine de Hertz [1]. De plus, l'évaluation des autres sources demeure difficile avant la réalisation des premiers prototypes de l'accélérateur.

Les performances requises pour la stabilisation des différents aimants s'expriment sous la forme de déplacements RMS partiels (RMS : valeur efficace). Cette grandeur, décrite dans l'équation 1, est définie par la racine carrée de l'intégrale de la densité spectrale de puissance, dans une bande de fréquence.

$$RMS_x(f_{min}) = \sqrt{\int_{f_{min}}^{\infty} PSD_x(f)df} \quad (1)$$

$RMS_x(f_{min})$ représente la racine carrée de l'énergie du signal x calculée dans la bande de fréquence $[f_{min}, +\infty[$. $RMS_x(0)$, représente ainsi la valeur efficace du signal x . Le mouvement du sol peut être caractérisé d'un point de vue fréquentiel par sa courbe ($RMS_{G_m}(f)$). Deux niveaux de performances sont nécessaires pour le projet CLIC : afin de garantir la collision au point d'interaction le déplacement RMS partiel vertical des deux derniers aimants QD0 ne doit pas excéder 0,2 nm à 4 Hz (i.e., $RMS_{u_{iso.}}(4) \leq 0.2$ nm) et celui des aimants présents le long du Linac 1,5 nm à 1 Hz (i.e., $RMS_{u_{iso.}}(1) \leq 1.5$ nm). Pour compléter ces ordres de grandeur, le déplacement du sol relevé sur des sites d'accélérateurs possède une valeur typique de 1 μ m à 0.1 Hz ($RMS_{u_{sol}}(0.1) = 1$ μ m [1]).

Plusieurs études ont précédemment porté sur la stabilisation pour des accélérateurs linéaires [5, 4]. Actuellement un prototype de système de stabilisation pour le Linac, avec des capacités de nano-positionnement, est également en cours de développement au CERN et validé expérimentalement pour deux degrés de libertés [2]. Le système présenté ici est plus compact avec une hauteur (≈ 53 mm) au minimum 3 fois plus faible que sur les dispositifs précédemment développés. Ces dimensions sont nécessaires afin de s'intégrer dans le final Focus où l'espace disponible est plus restreint.

La conception électromécanique du dispositif est décrite dans la seconde partie, en particulier : l'intégration des actionneurs, la conception mécanique et le choix des capteurs. La troisième partie est dédiée à la modélisation du système au travers d'une approche de modélisation des différents sous-ensembles. Le modèle ainsi reconstruit est validé expérimentalement. Un algorithme de contrôle utilisant des accéléromètres sismiques ainsi que la validation expérimentale des performances obtenues sont présentés dans la dernière section de l'article.

2 Conception électromécanique

Le système d'isolation possède 3 degrés de liberté : une translation verticale et les deux rotations autour d'axes dans le plan perpendiculaire à la translation. Seule l'isolation associée à la translation verticale est présentée ici. La figure 1 décrit les différents composants du système : une vue d'ensemble du système avec un support de quadrupôle sur la plaque isolée (1(a)) et une coupe schématique de la configuration utilisée lors de ces travaux (1(b)).

La génération de mouvement est réalisée par des actionneurs piézoélectriques PPA10M de CEDRAT Technologie. La rigidité souhaitée et l'effort maximum supporté par chaque actionneur ont conduit à la présence de 4 actionneurs bien que 3 seraient suffisants pour 3 degrés de liberté. En tenant compte des aspects dynamiques et des forces induites sur les actionneurs, le système est capable de déplacer une masse de 50 kg sur son amplitude maximale d'actionnement ($\Delta u_{max.} = 1,93$ μ m) jusqu'à 300 Hz.

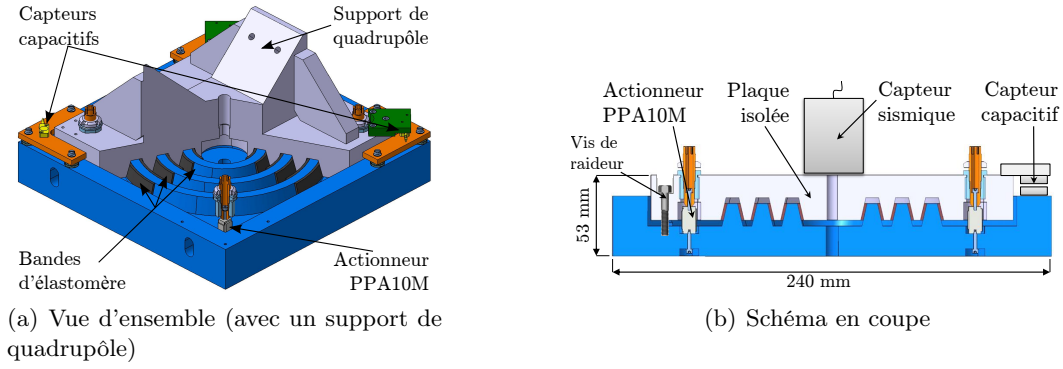


FIGURE 1 – VUES DU MODÈLE C.A.O.

Le guidage mécanique permettant ces trois degrés de liberté est obtenue *via* des formes concentriques et des bandes d'élastomère comme partie déformable (cf. figure 1).

Les actionneurs PPA10M utilisés possèdent un déplacement libre (u_{lib}) d'environ $9\text{ }\mu\text{m}$ pour une tension de commande crête à crête de 170 V . La résolution désirée du système en boucle ouverte est de $0,1\text{ nm}$. Cela conduit à une tension minimale au bornes de l'actionneur d'environ $1,8\text{ mV}$, ou $0,09\text{ mV}$ aux bornes de l'amplificateur ($\times 20$) commandant les actionneurs. Ce niveau de tension est inférieur aux niveaux de bruit couramment rencontrés dans les électroniques de commande. L'amplitude d'élongation d'un actionneur étant nettement supérieure à celle requise, il a été décidé d'ajouter une raideur en parallèle des actionneurs (k_r). Le déplacement maximal généré par l'actionneur est diminué mais en contrepartie la différence de tension nécessaire pour obtenir la résolution souhaitée est proportionnellement augmentée ce qui permet de conserver des électroniques de commande « standards ».

Pour dimensionner cette raideur, un facteur de réduction du déplacement de l'actionneur est fixée à 5 ($f_{redu} = 5$). L'ajout de cette raideur va définir, pour chaque tension appliquée, un point de fonctionnement sur la caractéristique de charge de l'actionneur. Ces points de fonctionnement sont déterminés lorsque la force générée par la raideur est contrebalancée par celle de l'actionneur. L'expression de cette égalité conduit à l'expression du facteur de réduction donné par l'équation (2), où k_{PE} est la raideur de l'actionneur :

$$f_{redu} = \frac{u_{libre}}{u_{pf}} = 1 + \frac{k_r}{k_{PE}} \quad \text{d'où :} \quad k_r = k_{PE} \cdot (f_{redu} - 1) = 347.65\text{ N}/\mu\text{m} \quad (2)$$

Dans la pratique, ces raideurs sont obtenus grâce à deux vis réusinées pour chaque actionneur.

De plus, l'ajout de ces raideurs tend à augmenter les fréquences des résonances mécaniques du système et à les éloigner de la plage de fonctionnement. Une analyse modale expérimental a permis de vérifier les fréquences des premier modes de vibration du système. Aucun mode n'est présent au dessous de 1500 Hz dans le cas où le système ne supporte pas de masse (pour une masse de 50 kg le mode « piston » du système se situe au environ de 880 Hz).

La mesure de nano-déplacements représente une des difficultés de ce type d'application. Du fait notamment qu'il n'existe pas de référence absolue pour la mesure des mouvements du sol. La seule mesure accessible demeure sa vitesse ou son accélération par des capteurs inertiels. Des capteurs issus de la sismologie, et dédiés à la mesure du déplacement du sol, permettent d'obtenir les résolutions nécessaires. L'accéléromètre sismique Wilcoxon 731A avec une sensibilité de 10 V/g possède une bande passante théorique de $[0,05\text{ }500]\text{ Hz} \pm 3\text{ dB}$, intéressante pour cette application. Cependant les meilleurs résolutions en basse fréquence sont obtenues grâce à des capteurs de vitesse (géophones) mais ces derniers possèdent une bande passante limitée en haute fréquence (max. 100 Hz). De manière générale ces capteurs sismiques sont conçus pour de la surveillance de sites et présentent des caractéristiques ne facilitant pas leur intégration dans des applications de contrôles (retards, attributs de la fonction de transfert, etc.)

Le dispositif possède également 4 capteurs capacitifs de déplacement, Physik Instrumente D-015, afin de mesurer le déplacement relatif de la plateforme isolée. Ces capteurs ont une résolution sub-

nanométrique. Ils ne sont pas utilisés dans le schéma de contrôle mais leur usage permet d'obtenir le modèle électromécanique du système. Les différences entre chaque actionneurs entraînent un défaut de rotation de la plateforme. Ce défaut d'orientation peut être évalué grâce à ces capteurs puis corrigé par l'ajustement du gain de commande de chaque actionneur.

3 Modélisation

En vue de son contrôle, il est nécessaire d'obtenir des modèles de conception et de simulation du système. La modélisation adoptée est sous forme de fonction de transfert. La figure 2 présente les différents éléments du système modélisés indépendamment :

- $H_{em.}$ est la fonction de transfert électromécanique entre la tension de commande ($v_{driv.}$) et l'élongation des actionneurs ($u_{iso.}$) (identifiée en utilisant les capteurs capacitifs dont la fonction de transfert $H_{capa.}$ est préalablement déterminé) ;
- $H_{acc.}$ est la fonction de transfert de l'accéléromètre sismique Wilcoxon 731A entre l'accélération de la partie isolée ($a_{iso.}$) et la tension ($v_{acc.}$) ;
- $H_{amp.}$ est la fonction de transfert de l'ampli/filtre d'instrumentation utilisé pour conditionner le signal de l'accéléromètre.

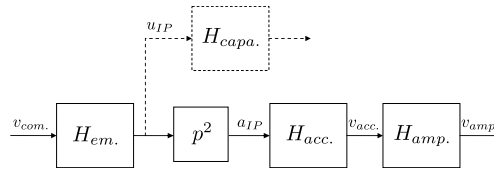


FIGURE 2 – SCHÉMA DU SYSTÈME EN BOUCLE OUVERTE

Les tensions de commande et les mesures issues des capteurs sont respectivement générées et acquises par une solution de prototypage rapide de loi de commande dSPACE dS1006. Les cartes d'entrées-sorties utilisées possèdent des convertisseurs analogique-numérique (dS2004) et numérique-analogique (dS2102) sur 16 bits avec un rapport signal sur bruit supérieur à 85 dB. Ce rapport, ainsi que celui de l'ensemble de la chaîne électromécanique a été expérimentalement validé et les résultats montrent que le système est capable de générer des déplacements inférieurs à 0,2 nm crête à crête (SNR de 0 dB).

L'identification des paramètres de $H_{em.}$ est réalisée grâce à la réponse fréquentielle obtenue par des essais avec une excitation harmonique [5 Hz 10 kHz] et des mesures grâce aux capteurs capacitifs. La fonction de transfert identifiée dans la bande de fréquence d'intérêt est exprimée sous la forme d'un produit de trois résonances et des deux antirésonances associées (cf. equation (3) et tableau 1) :

$$H_{em.}(p) = \frac{u_{IP}(p)}{v_{com.}(p)} = G_S \cdot \frac{\prod_{i=1}^2 \frac{1}{\omega_{ia}^2} p^2 + \frac{2 \cdot \xi_{ia}}{\omega_{ia}} p + 1}{\prod_{i=1}^3 \frac{1}{\omega_{ir}^2} p^2 + \frac{2 \cdot \xi_{ir}}{\omega_{ir}} p + 1} \quad (3)$$

L'accéléromètre piézoélectrique à mode de flexion Wilcoxon 731a possède une bande passante théorique

TABEAU 1 – RÉSONANCES ET ANTIRÉSONANCES ÉLECTROMÉCANIQUES.

	1 ^{ère} résonance	2 nd réso.	3 ^{ème} réso.	1 ^{ère} antirésonance	2 nd antiréso.
f_{ir} [Hz]	2500	3700	6950	2900	6076
$\omega_{ir/ia}$ [rad/s]	15708	23248	43668	18221	38177
$\xi_{ir/ia}$	0,08	0,01	0,01	0,1	0,1

de [0,05 500] Hz ± 3 dB. La conception des lois de commandes, notamment pour l'analyse de robustesse, nécessite de connaître sa fonction de transfert au delà de cette fréquence. Sa dynamique a été identifiée dans une bande de fréquence [100 3000] Hz par calibration sur un pot vibrant avec un accéléromètre possédant une plus grande bande passante. On a identifié : 2 résonances – $\omega_{A1r}=5215$ rad/s, $\xi_{A1r}=0.008$ et $\omega_{A2r}=15896$ rad/s, $\xi_{A2r}=0.01$ – et 1 antirésonance – $\omega_{A1a}=9871$ rad/s, $\xi_{A1a}=0.0022$. Au sein de l'électronique d'amplification de charge, est présent un filtre passe-haut de type RC avec une fréquence

de coupure à 0,05 Hz. De plus, il a également été identifié un phénomène de retard ($t_{ret.}$) évalué à 200 μ s. L'ensemble est modélisé dans la fonction de transfert (4) :

$$H_{acc.}(p) = \frac{v_{acc.}(p)}{a_{iso}(p)} = S_A \cdot \frac{\tau_{RC} \cdot p}{\tau_{RC} \cdot p + 1} \cdot \frac{\frac{1}{\omega_{A1a}^2} p^2 + \frac{2 \cdot \xi_{A1a}}{\omega_{A1a}} p + 1}{\prod_{i=1}^2 \frac{1}{\omega_{A1r}^2} p^2 + \frac{2 \cdot \xi_{A1r}}{\omega_{A1r}} p + 1} \cdot e^{-t_{del} \cdot p} \quad (4)$$

Le modèle global se compose des différentes fonctions de transfert en série (cf. figure 2). La figure 3 montre une bonne adéquation entre les réponses fréquentielles du modèle global et expérimental. Ces modèles validés permettent la conception et la simulation de lois de commande.

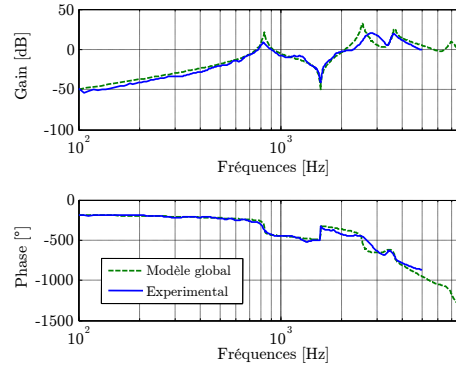


FIGURE 3 – COMPARAISON MODÈLE – EXPÉRIMENTAL

4 Contrôle et résultats expérimentaux

Le schéma de contrôle adopté est présenté figure 4(a). Pour décrire l'influence du mouvement du sol à travers le système isolé, le modèle électromécanique modélisant les résonances du système est utilisé. $H_{em.}(p)$ est corrigé pour obtenir un gain statique de 1. La conception du contrôleur est effectuée par une méthode de loop shaping sur le diagramme de Black-Nichols (cf. figure 4(b)). Le calcul du correcteur se fait avec les paramètres suivants : un gain maximal proche de 15 dB, une limite 0 dB basse fréquence en dessous de 10 Hz et haute fréquence au dessus de 100 Hz. La fonction de transfert de l'atténuation obtenue est donnée dans l'équation (5)

$$F_{attenu.} = \frac{u_{iso.}(s)}{u_{sol.}(s)} = \frac{\frac{H_{mec.}}{G_S}}{1 + H_{contr.} \cdot H_{mec.} \cdot H_{accel.} \cdot H_{amp.}} \quad (5)$$

Une validation expérimentale de ce contrôleur a été effectuée pour des déplacements réels du sol. Un second accéléromètre Wilcoxon 731A est utilisé pour mesurer le mouvement du sol. Les fonction de

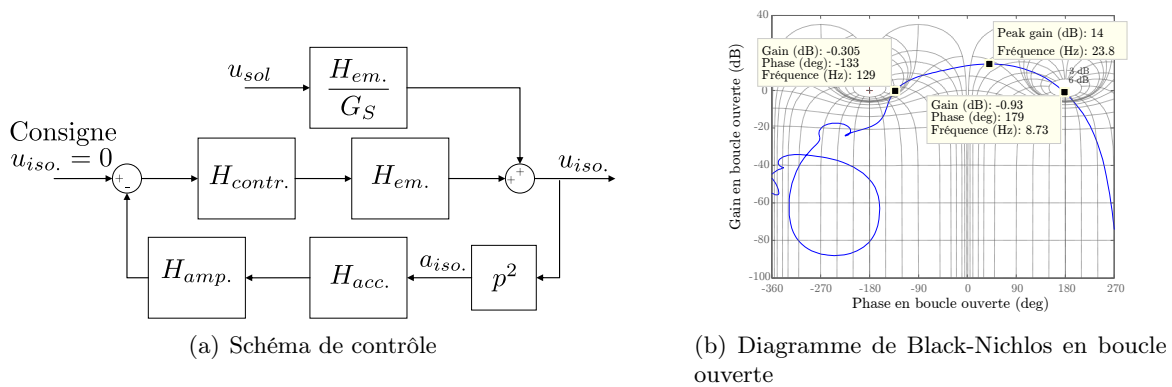


FIGURE 4 – CONCEPTION DU CONTRÔLEUR

transferts de l'atténuation prédite et expérimentale présentent une très bonne adéquation (cf. figure 5(a)). Une atténuation du mouvement du sol jusqu'à 13 dB est obtenue dans bande passante de [12 100] Hz. De plus, 2 géophones Güralp CMG-6T ont été utilisés comme références supplémentaires pour valider les mesures effectuées. La figure 5(b) montre le déplacement partiel RMS obtenu pour les 4 capteurs utilisés. La zone où est efficace le système d'isolation est clairement visible en comparant le déplacement RMS partiel du sol et celui de la plaque isolée. Pour les mesures issues des accéléromètres, l'augmentation rapide du déplacement RMS partiel en basse fréquence est dû au bruit présent sur ces capteurs. Néanmoins les performances du cahier des charges de CLIC ne sont pas atteintes. Ceci

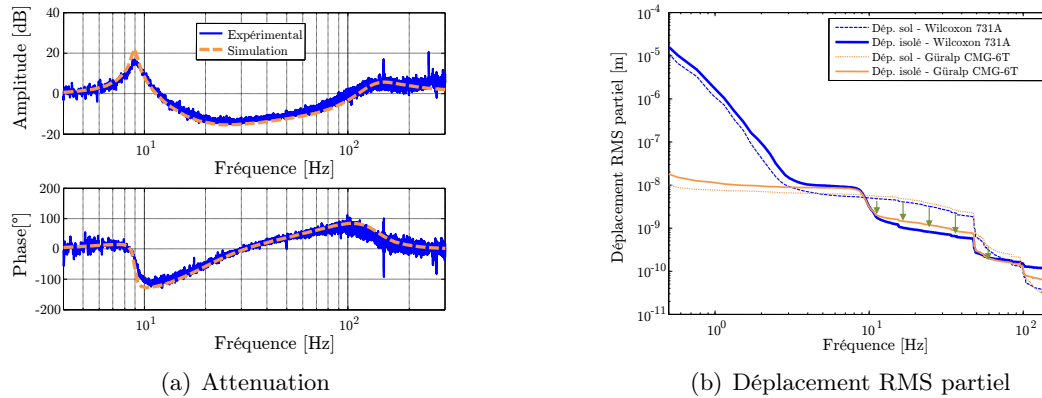


FIGURE 5 – VALIDATION EXPÉRIMENTALE

nécessiterait en particulier l'ajout d'effets en basses fréquences. A cette fin, l'utilisation de l'information conjointe issue de géophones (basses fréquences) et d'accéléromètres sismiques (hautes fréquences) associée à des contrôleurs avancés possédant des actions *feedforward* et des boucles de rétroactions est en cours de développement.

5 Conclusions

Un nouveau système actif d'isolation des nano-déplacements du sol pour accélérateur de particules est présenté dans ce travail. Des aspects de conception et de modélisation sont développés. Les performances attendues en terme de génération et mesure de nano-déplacements sont vérifiées expérimentalement. La faisabilité du contrôle actif d'isolation *via* l'utilisation de capteurs sismiques a été validée expérimentalement dans une bande de fréquence allant de 12 à 100 Hz. Bien que les performances définies au cahier des charges ne soient pas encore atteintes, l'utilisation conjointe de différentes technologies de capteurs avec des contrôleurs avancés permettra d'atteindre les objectifs fixés.

Références

- [1] Bialowons W., Amirikas R., Bertolini A., Kruecker D., Desy D. E. 2006 Measurement of ground motion in various sites *In European Particle Accelerator Conference, EPAC'06* pp. 2-4, Edinburgh, Grande-Bretagne
- [2] Collette C., Janssens S., Artoos K., Kuzmin A., Fernandez-Carmona P., Guinchard M., Leuxe R., Hauviller C. 2011 Nano-motion control of heavy quadrupoles for future particle colliders : An experimental validation *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A : Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* **643** pp. 95-101
- [3] Delahaye J. P. et C.T.F. Collaboration 2010 Towards Clic Feasibility. *In International Particle Accelerator Conference, IPAC'10* pp. 4769-4773, Kyoto, Japon
- [4] Frisch J., Chang A., Decker V., Doyle E., Eriksson L., Hendrickson L., Himel T., Markiewicz T., Partridge R., Seryi A. 2004 Vibration Stabilization of a Mechanical Model of a X- Band Linear Collider Final Focus Magnet. *In 22nd International Linear Accelerator Conference* pp. 684-686, Lubeck, Allemagne.
- [5] Redaelli S. 2003 Stabilization of Nanometre-Size Particle Beams in the Final Focus System of the Compact Linear Collider (CLIC). *Thèse* p. 184, Université de Lausanne
- [6] Yen J.-Y., Lan K.-J., Kramar J. a. 2005 Active vibration isolation of a large stroke scanning probe microscope by using discrete sliding mode control. *Sensors and Actuators A : Physical* **121** 243-250