



HAL
open science

Pompage énergétique: conception, efficacité, expérimentation

Claude-Henri Lamarque, Emmanuel Gourdon, Stéphane Pernot

► To cite this version:

Claude-Henri Lamarque, Emmanuel Gourdon, Stéphane Pernot. Pompage énergétique: conception, efficacité, expérimentation. 8e Colloque national en calcul des structures, CSMA, May 2007, Giens, France. hal-01495629

HAL Id: hal-01495629

<https://hal.science/hal-01495629v1>

Submitted on 25 Mar 2017

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.

Public Domain

Pompage énergétique : conception, efficacité, expérimentation

Claude-Henri Lamarque* — Emmanuel Gourdon** — Stéphane Pernot *

* *Laboratoire GéoMatériaux (LGM),
Département Génie Civil et Bâtiment URA CNRS 1652
Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat
Rue maurice Audin, 69518 Vaulx en Velin Cedex
{lamarque, pernot}@entpe.fr*

** *LABoratoire des Sciences de l'Habitat (LASH)
Département Génie Civil et Bâtiment URA CNRS 1652
Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat
Rue maurice Audin, 69518 Vaulx en Velin Cedex
gourdon@entpe.fr Dépt*

RÉSUMÉ. Le pompage énergétique consiste en un transfert irréversible d'énergie d'une structure principale que l'on souhaite préserver vers une structure auxiliaire essentiellement non linéaire conçue pour créer ce transfert grâce à une localisation d'un mode non linéaire. Sur la base de travaux récents nous proposons de faire le point sur le pompage énergétique, en abordant les questions suivantes: efficacité, optimalité, régimes transitoires ou forcés, robustesse, comparaison avec les absorbeurs linéaires classiques, pompage énergétique et comportement multi-modal, etc. Nous illustrons le propos à l'aide de résultats expérimentaux obtenus sur modèles analogiques (circuits électroniques) ou sur modèles mécaniques réduits.

ABSTRACT. Energy pumping consists in irreversible transfer of energy from a main structure, to be isolated, towards an auxiliary, essentially nonlinear structure designed to create this transfer owing to localisation of a nonlinear normal mode. Based on recent works, this study deals with energy pumping particularly the efficiency, the optimisation, the transient and stationary regimes, the robustness, the comparison with classical tuned mass damper, energy pumping and multi-modal behaviour. The study is illustrated with the help of experimental results obtained with analogical models (electronic circuits) or with reduced-scale mechanical models.

MOTS-CLÉS : contrôle passif, pompage énergétique, absorbeur non linéaire de vibrations, modes normaux non linéaires, modèle réduit de bâtiment, séismes, paramètres incertains, échelles multiples, complexification.

KEYWORDS: passive control, energy pumping, nonlinear energy sink, nonlinear normal modes, reduced-scale building model, earthquakes, multiple scales, complexification .

1. Contexte

Le pompage énergétique est le transfert irréversible de l'énergie vibratoire d'une structure principale, que l'on désire protéger des perturbations extérieures, vers une structure auxiliaire couplée que l'on vient rajouter. Le point important est d'introduire une forte nonlinéarité dans la conception de la structure ajoutée. Ce concept de pompage énergétique est un phénomène dynamique innovant qui a été très récemment introduit par la communauté scientifique. Cependant, de nombreuses questions théoriques restent à traiter pour mieux comprendre ce phénomène notamment en ce qui concerne la faisabilité avant de pouvoir l'appliquer à des structures réelles. Pour citer quelques-uns de ces problèmes on peut souligner le fait qu'il faut encore régler les points suivants : comprendre et étudier le phénomène en développant les études théoriques, tester la faisabilité de ce pompage, optimiser les différents paramètres et le phénomène...

Le concept de "pompage énergétique" a donné naissance à une nouvelle génération d'absorbeurs : (Gourdon et Lamarque, 2006 ; Gourdon *et al.*, 2007 ; Manevitch *et al.*, 2005) et aussi (Gourdon *et al.*, 2006 ; Manevitch *et al.*, 2007 ; Gourdon et Lamarque, 2005a ; Gourdon et Lamarque, 2005b ; Gendelman *et al.*, 2005). Le phénomène de pompage énergétique provoque une soudaine décroissance et une rapide diminution d'amplitude des vibrations de la structure. Contrairement à ses homologues linéaires, les absorbeurs non linéaires peuvent posséder d'intéressantes caractéristiques : ils peuvent être automatiquement réglés sur la fréquence du système qui doit être atténuée (ils s'adaptent à la fréquence naturelle du système primaire) et ils fonctionnent à la fois sous sollicitation périodique ou transitoire. La gamme fréquentielle où l'absorption est efficace est très large contrairement à un absorbeur linéaire qui est conçu pour atténuer une seule fréquence bien précise (Gourdon *et al.*, 2006).

Le seul inconvénient est que le système primaire doit vibrer suffisamment pour déclencher le pompage énergétique. Avoir une meilleure connaissance de leur comportement apparaît aussi crucial pour atteindre un compromis optimal entre les avantages et inconvénients pour des applications réelles. Le couplage peut aussi être modélisé par un "type" de ressort à comportement non linéaire. Dans le cas du Génie Civil, la structure linéaire peut ainsi être un tablier de pont qui vibre et la structure non linéaire un câble que l'on vient coupler à la structure linéaire. A l'aide de ce couplage, on veut donc construire des modes non linéaires de manière à privilégier les vibrations de la petite masse ajoutée en diminuant les vibrations de la structure initiale. Compte-tenu de la littérature émergente, ce dernier point paraissait réalisable. Mais il restait à régler les points suivants : utiliser au mieux la notion de modes non linéaires des systèmes réguliers pour accroître la quantité d'énergie transférée ; tester l'apport de différentes nonlinéarités (voir du "chaos transitoire") (Gourdon et Lamarque, 2005b) ; tester (dans le but d'augmenter) l'efficacité de l'amorçage du pompage énergétique ; tester la faisabilité de ce pompage énergétique théorique sur des cas pratiques concrets (structures réelles) (Gourdon *et al.*, 2007) ;

optimiser les différents paramètres ce qui a fait l'objet de publications (Manevitch *et al.*, 2007 ; Manevitch *et al.*, 2005). Un des principaux objectifs était alors de pouvoir appliquer cette méthode à des structures concrètes, de pouvoir passer de la théorie à l'expérimentation. En effet, on veut pouvoir réaliser, avec cette méthode, l'atténuation des vibrations de tabliers de ponts (ou d'immeubles) en venant ajouter une petite structure non linéaire (câble, "ascenseur") qui serait couplée au tablier par de faibles ressorts afin de pomper l'énergie. Cependant, pour pouvoir réaliser ce passage de la théorie à l'expérimentation, plusieurs aspects importants n'avaient pas encore été pris en compte dans la théorie.

2. Points traités : études analytiques, numériques et expérimentales

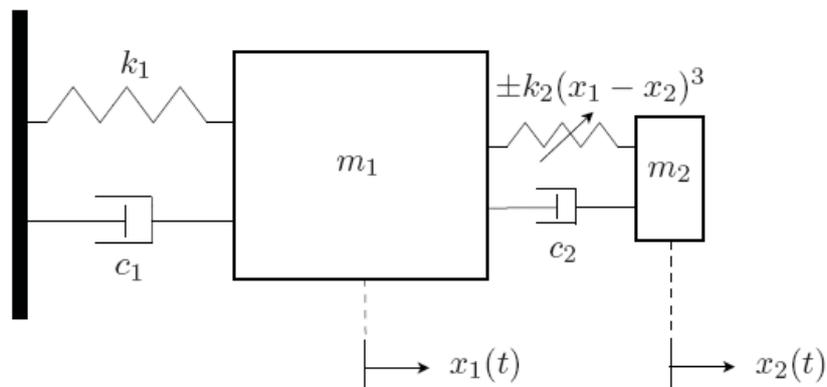


Figure 1. Exemple de système considéré : système avec un couplage non linéaire

Nous avons déterminé les conditions exactes sur l'efficacité du pompage énergétique (avec une augmentation de cette efficacité). Un pompage optimal a été défini. Le rôle de chaque paramètre (avec une optimisation) et la façon de concevoir le couplage (en pratique) ont été étudiés. Le rôle de l'amortissement a aussi été étudié. La robustesse de la méthode (étude vibrations aléatoires/stochastiques) a été analysée (Gourdon et Lamarque, 2006). Le cas des vibrations instationnaires, forcées, ceci dans un cadre déterministe dans un premier temps et stochastique dans un deuxième temps, a été abordé. Nous nous sommes alors intéressés au problème du niveau minimal d'énergie nécessaire (un pompage énergétique à "changement de vitesses" a été défini (Gourdon et Lamarque, 2005a). La notion de pompage énergétique en présence de nonlinéarités irrégulières (systèmes affines par morceaux, ou autres termes irréguliers) pour accroître l'efficacité a été abordée. Les applications traitées sont nombreuses et variées : application du pompage énergétique pour l'isolation sismique de bâtiments ainsi que l'ont montré nos travaux (Gourdon et Lamarque, 2005b) et (Gourdon et al., 2007) ; et application du pompage énergétique sur des modèles analogiques (circuits électroniques).

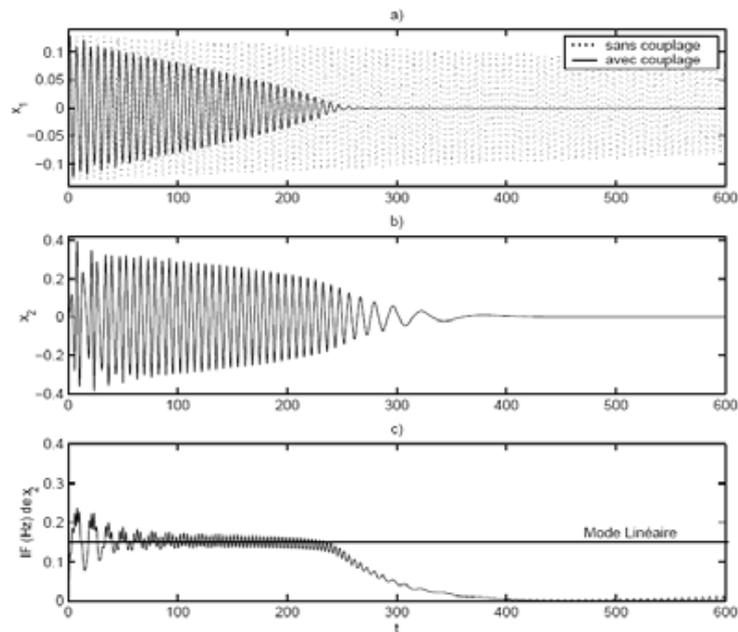


Figure 2. *Phénomène de pompage énergétique grâce à une résonance 1 : 1 , a)atténuation des vibrations de l'oscillateur linéaire, b)résonance de l'oscillateur non linéaire, c)fréquence instantanée de l'oscillateur non linéaire.*

3. Pompage énergétique

3.1. Principe et premiers exemples

Dans un premier temps, le principe et des premiers exemples du pompage énergétique sont traités afin de mieux comprendre le phénomène. En effet, après un développement du principe du phénomène de pompage énergétique en régime instationnaire, une analyse des travaux existants sur le sujet permet d'énoncer des problèmes ouverts qui restaient à résoudre. C'est ainsi que des évidences numériques sont apportées afin de comprendre ce principe de pompage énergétique.

3.2. Régime instationnaire

Dans un deuxième temps, on s'intéresse au pompage énergétique en régime instationnaire, c'est-à-dire pendant le temps transitoire. L'objectif du pompage énergétique est d'être en mesure de concevoir un absorbeur non linéaire d'énergie efficace pour atténuer les vibrations transitoires. On se consacre ainsi à ce transfert d'énergie qui peut être décrit et expliqué par l'étude des modes normaux non linéaires. Des méthodes numériques, analytiques et des vérifications expérimentales permettent ainsi de mieux comprendre le phénomène pour l'absorption passive des vibrations pendant le régime instationnaire. La robustesse du phénomène est notamment étudiée pour pouvoir envisager des applications réelles.



Figure 3. *Modèle de bâtiment à 4 étages avec une nonlinéarité géométrique*

3.3. Régime stationnaire

La structure annexe étant conçue pour atténuer les vibrations de façon optimale pendant le temps transitoire, on s'intéresse alors à ce phénomène pendant le temps stationnaire (régime établi à long terme) pour voir si l'atténuation est toujours efficace. Cela permet de pouvoir effectuer des comparaisons avec les absorbeurs de vibrations classiques linéaires déjà utilisés dans l'industrie mais qui ont de nombreux inconvénients. On s'intéresse ainsi au phénomène de pompage pendant le régime stationnaire, à savoir à long terme sous excitation périodique. Les informations obtenues permettent d'obtenir les caractéristiques sur l'absorbeur de vibrations ainsi construit. Des vérifications expérimentales permettent de pouvoir envisager des applications pratiques.

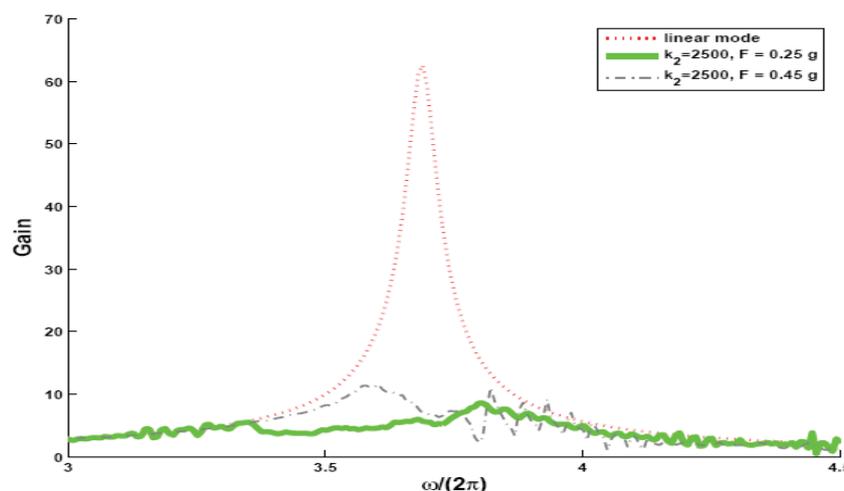


Figure 4. *Courbes de réponses en fréquence expérimentales avec et sans absorbeur*

3.4. Optimisation

Après avoir étudié le phénomène du pompage énergétique dans les sections précédentes, l'objectif de cette partie est alors l'optimisation afin de pouvoir appliquer le principe du pompage énergétique sur des structures réelles. Cette optimisation passe par l'optimisation des paramètres dans un premier temps et le choix optimal de ces paramètres en vue d'une application pratique. Dans un deuxième temps l'optimisation du phénomène lui-même est envisagée : l'objectif est une meilleure amorce du pompage et un intervalle d'amplitudes plus grand où le phénomène de pompage est activé avec l'utilisation de multiples modes non linéaires.

Le phénomène de pompage énergétique semble intéressant en vue d'une application réelle sur des bâtiments ou des tabliers de ponts par exemple, car il permet l'atténuation passive des vibrations. Sans avoir à injecter de l'énergie extérieure, ce phénomène transfère de façon irréversible l'énergie d'une structure primaire à isoler vers une petite structure annexe que l'on vient concevoir.

4. Bibliographie

- Gendelman O., Gourdon E., Lamarque C.-H. (2005). « Quasiperiodic Energy Pumping in Coupled Oscillators under Periodic Forcing », *Journal of Sound and Vibration*, 294 (2006) 651–662.
- Gourdon E., Lamarque C.-H. (2005a). « Energy Pumping for a larger span of Energy », *Journal of Sound and Vibration*, 285, Issue 3 :711–720.
- Gourdon E., Lamarque C.-H. (2005b). « Energy Pumping with Various Nonlinear Structures : Numerical Evidences ». *Nonlinear Dynamics*, 40 :281–307.
- Gourdon E., Lamarque, C.-H. (2006). « Nonlinear Energy Sink with Uncertain Parameters ». *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*, July 2006, volume 1, Issue 3, 187-195.
- Gourdon E., Lamarque C.-H., Pernot, S. (2006). « Contribution to Efficiency of Irreversible Passive Energy Pumping with a Strong Nonlinear Attachment ». *Nonlinear Dynamics*, in press (accepted in 2006).
- Gourdon E., Taylor C., Alexander N., Lamarque C.-H., Pernot S. (2007). « Nonlinear Energy Pumping under Transient Forcing with Strongly Nonlinear Coupling : Theoretical and Experimental Results ». *Journal of Sound and Vibration*, 300: 522-551.
- Manevitch L., Gourdon E., Lamarque C.-H. (2005). « Towards the design of an optimal energetic sink in a strongly inhomogeneous two-degree-of-freedom system ». *Journal of Applied Mechanics*, accepted (in press).
- Manevitch L., Gourdon E., Lamarque C.-H. (2007). « Parameters optimization for energy pumping in strongly nonhomogeneous 2dof system ». *Chaos, Solitons and Fractals*, 31 (2007), 900-911.