



**HAL**  
open science

## Caractérisation vibratoire d'une plante : expériences et calculs

Christelle Der Loughian, Jean-Marc Allain, Emmanuel de Langre, Bruno Moulia

► **To cite this version:**

Christelle Der Loughian, Jean-Marc Allain, Emmanuel de Langre, Bruno Moulia. Caractérisation vibratoire d'une plante : expériences et calculs. CFM 2011 - 20ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2011, Besançon, France. hal-03421517

**HAL Id: hal-03421517**

**<https://hal.science/hal-03421517>**

Submitted on 9 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.

# Caractérisation vibratoire d'une plante : Expériences et calculs.

Christelle DER LOUGHIAN<sup>a</sup>, Jean-Marc ALLAIN<sup>b</sup>, Emmanuel DE LANGRE<sup>c</sup>,  
Bruno MOULIA<sup>d</sup>

a. Laboratoire d'Hydrodynamique, Ecole Polytechnique, 91128 PALAISEAU

b. Laboratoire de Mécanique des Solides, Ecole Polytechnique, 91128, PALAISEAU

c. Laboratoire d'Hydrodynamique, Ecole Polytechnique, 91128 PALAISEAU

d. PIAF, INRA Site de Crouël, 234 avenue de Brezet, 63100 CLERMONT-FERRAND

## Résumé :

*La dynamique d'une plante est caractérisée expérimentalement par stimulation mécanique à l'aide d'un pot vibrant imposant un balayage entre 0 et 40Hz. Les films issus de ces expériences sont traités par une méthode flux optique pour obtenir le champ de vitesse, qui est ensuite analysé par Décomposition Bi Orthogonale. On écrit ainsi le champ de vitesse comme une somme de structures spatio-temporelles à partir de laquelle on détermine l'existence d'un mode dans la plage de fréquence considérée ainsi que la déformée modale associée. D'autre part, un calcul éléments finis des modes à partir des caractéristiques réelles de la plante est effectué à l'aide de CAST3M2006 et les résultats sont comparés aux expériences. On observe que les modes de la plante sont localisés et organisés en modes de tige, de feuilles et d'apex.*

## Abstract :

*The dynamics of plant is experimentally investigated by mechanical stimulation with a vibrating pot by sweeps between 0 and 40 Hz. The movies from these experiments are processed through an optical flow method in order to obtain the velocity field which is then processed by Bi-Orthogonal Decomposition. The velocity field is then analyzed by Bi-Orthogonal Decomposition, that is to say, it is written as a sum of spatiotemporal structures from which we can determine the existence of a mode in a frequency range and the corresponding mode shape. Moreover, the vibration modes of the plant are computed from its real geometry and characteristics with finite elements method solved using CAST3M2006 and the results are compared with those of the experiments. We observed that the modes are localized and organized in stem, leaves and apex modes.*

**Mots clefs : Plante ; Localisation ; Modes**

## 1 Introduction

En conditions naturelles, les plantes peuvent être mises en mouvement par le vent. Des études sur la répartition de la réponse au vent dans un arbre ont été menées et il a été montré qu'il existait une compartimentation spatiale des modes et un étagement dense des fréquences modales [1]. De plus, les plantes sont capables de percevoir une stimulation mécanique et peuvent modifier leur croissance en conséquence, processus appelé thigmomorphogénèse [2], [3]. Ces phénomènes amènent à s'interroger quant à la perception des fréquences par les plantes et une éventuelle régulation. Nous cherchons donc à caractériser le comportement de la plante sur une large gamme de fréquences (0 et 40 Hz), afin de caractériser les zones de la plante impliquées dans le mouvement. A terme cette étude vise à orienter les recherches en biologie sur la localisation des tissus mécano-percepteurs chez les plantes.

Cette caractérisation est réalisée expérimentalement en excitant mécaniquement de jeunes peupliers, les résultats pourront être comparés aux modes de vibration compris entre 0 et 40 Hz de ces mêmes

plantes calculés par la méthode des éléments finis à partir des données expérimentales de géométrie et des caractéristiques mécaniques de la plante.

## 2 Matériels & Méthodes

### 2.1 Dispositif expérimental

Les expériences sont menées sur 7 jeunes peupliers (*Populus tremula\*alba*) non ramifiés. Chaque plante est stimulée mécaniquement à l'aide d'un pot vibrant (Excitateur électrodynamique modèle K2007E01, PCB Piezotronics) par balayage en fréquence à force imposée et filmée à l'aide d'une caméra rapide (Vosskuhler HCC-1000BGE) (Figure ). Afin de faciliter le post-traitement des vidéos, les balayages de fréquences sont réalisés par gamme de 2 Hz et les fréquences d'acquisition de la caméra sont adaptées en fonction de la fréquence à laquelle la plante est stimulée. On dispose donc pour chaque plante de 20 balayages par plages de 2 Hz pour lesquels nous avons un film et le signal de force imposée correspondant.

Par ailleurs, les géométries des plantes sont obtenues par technique de digitalisation 3D (Fastrack Polhemus Rochester USA), qui permet d'obtenir les coordonnées dans l'espace de points choisis par l'opérateur [4] ainsi que des mesures de diamètres ou d'épaisseur des organes faites au pied à coulisse. Pour finir, des essais de flexions statiques contrôlées de tiges sont réalisés dans le but d'obtenir la distribution de rigidité en flexion le long de la tige de la plante [5].

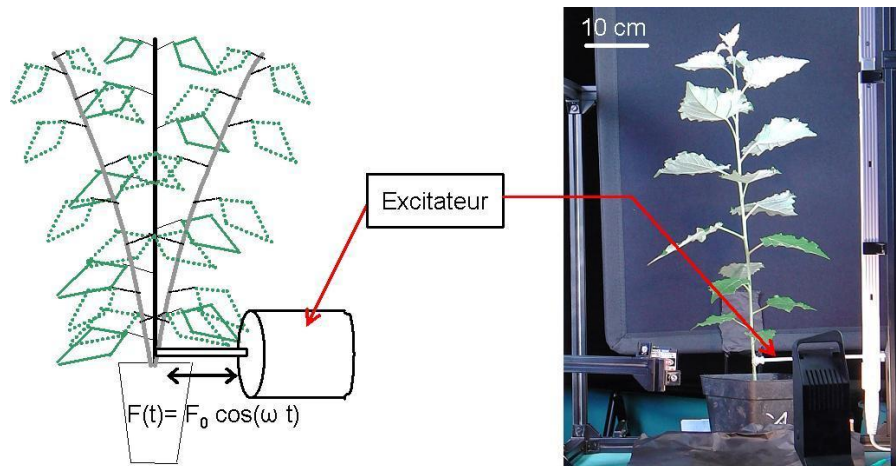


FIGURE 1 – Schéma et photographie du montage de vibration d'un peuplier non ramifié

### 2.2 Détermination des modes

Les vidéos obtenues pour chaque plante sont ensuite analysées afin de déterminer s'il existe un mode de vibration pour chaque plage de fréquences, et lorsque c'est le cas, la déformée modale associée. L'outil utilisé est le programme " CR-Toolbox " développée sous MatLab (2007a, The MathWorks) par J. Diener (<http://sites.google.com/site/crtoolbox/>). Elle permet de calculer le champ de vitesse spatio-temporel de la vidéo considérée (correspondant à une certaine plage de fréquence) de la manière suivante : (i) des points à repérer sont choisis la méthode de Tomasi-Kanade [6], (ii) ces points sont ensuite suivis entre les images par la méthode de flux optique de Lucas-Kanade [7] pour réaliser le suivi des points sur la vidéo, à partir duquel on déduit le champ de vitesse dépendant à la fois de l'espace et du temps. Une fois ce champ obtenu, il est traité par décomposition bi-orthogonale (BOD) [8]. Cet outil permet d'écrire le champ de vitesse comme une somme finie de structures spatio-temporelles :

$$\vec{V}(M, t) = \sum \alpha_k \Psi_k \mu_k \quad (1)$$

où  $M$  est le points de coordonnées  $(x, y)$ ,  $t$  est le temps. Les  $\Psi_k$  sont les fonctions spatiales, appelées topos et les  $\mu_k$  sont les fonctions temporelles appelées chronos. On appelle structure spatio-temporelle

un couple  $(\Psi_k, \mu_k)$  auquel on associe un facteur de poids  $\alpha_k$ . Le découpage des balayages en fréquence par plages de 2 Hz vise à n'obtenir qu'un mode majoritaire au sens de la BOD pendant le balayage, qui correspond au mode de vibration de la plante. Les chronos et topos associés au mode 1 au sens de la BOD obtenus pour une plante sont présentés figures 2 et 3.

L'existence d'un mode au sein de la plage de fréquences est déterminée à partir du déphasage entre le chronos et le signal de force correspondant.



FIGURE 2 – Topos du mode 1 au sens de la BOD

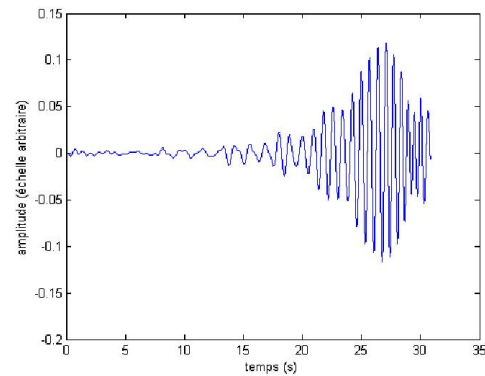


FIGURE 3 – Chronos du mode 1 au sens de la BOD

## 2.3 Calcul des modes de vibration

Les modes de vibration de la plante sont également calculés par la méthode des éléments finis, à l'aide de Cast3M2006 (Commissariat à l'Energie Atomique, site web <http://www-cast2m.cea.fr>), à partir de la géométrie et des caractéristiques réelles de la plante issues des mesures expérimentales (Figure 2.3). Les tiges et pétioles sont modélisés par des éléments poutres, et les feuilles par des éléments plaques. Le calcul donne les fréquences propres des différents modes ainsi que leurs déformées, qui pourront être comparées aux topos expérimentaux.

## 2.4 Résultats

À l'issue de la chaîne d'analyse des vidéos, on obtient pour chaque plage de fréquences : (i) s'il existe un mode, (ii) si oui, le champ de vitesse spatiale associé.

En ce qui concerne les calculs éléments finis, on obtient les modes de vibration de la plante caractérisés par leur fréquence modale et leur déformée modale, à partir de laquelle on déduit les vitesses de déplacement modales. Dans les deux cas, le même type de données à savoir (Existence d'un mode, Déformée modale en terme de vitesses associée) est alors obtenu, permettant une comparaison entre les deux.

## 3 Caractérisation vibratoire de la plante

Les résultats de l'analyse des expériences ainsi que ceux des calculs éléments finis permettent de distinguer 3 zones distinctes impliquées dans le mouvement (Figure 3) : la tige de la plante, les feuilles et enfin la partie supérieure de la plante, le bouquet terminal de jeunes feuilles et jeunes entrenœuds correspondant à une zone particulière appelée zone apicale, siège de la croissance en longueur.

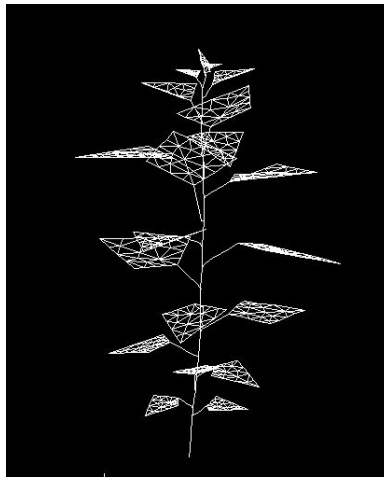


FIGURE 4 – Maillage éléments finis d'une plante pour la détermination de ses modes

Cette classification rend compte des différences de rigidité chez la plante. En effet, les essais de flexions statique contrôlées montrent que la zone apicale présente un module d'Young beaucoup plus faible que celui du reste de la tige (données non montrées). De même, les pétioles reliant la feuille à la tige ont eux aussi un module d'Young plus faible que celui de la tige. L'étude de la position du maximum

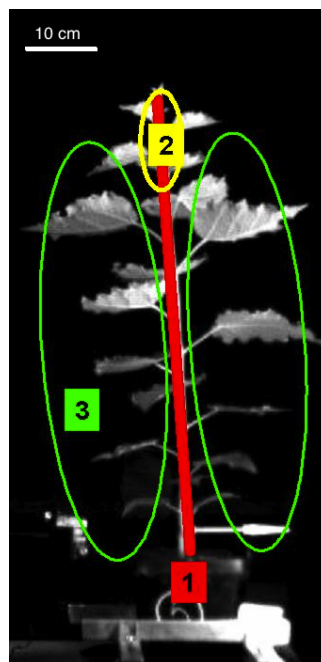


FIGURE 5 – : Localisation des 3 principales zones de mouvement : 1 :Tige, 2 : Apex, 3 : Feuilles

de la norme de la vitesse le long de la tige permet d'attribuer une des 3 zones Tige-Apex ou Feuilles à chaque plage de fréquences (Figure 6). Dans certains cas, des modes d'apex et de feuilles sont observés simultanément au sein d'un même essai. Finalement, pour chaque plante les résultats sont synthétisés sous la forme d'une " signature vibratoire " (Figure 7) , que l'on a donc obtenue soit à partir des expériences, soit des calculs. Les modes de vibration obtenus à l'issue de l'analyse des expériences sont en accord avec ceux obtenus par calculs, ce qui permet de valider la méthode d'analyse des vidéos de l'expérience.

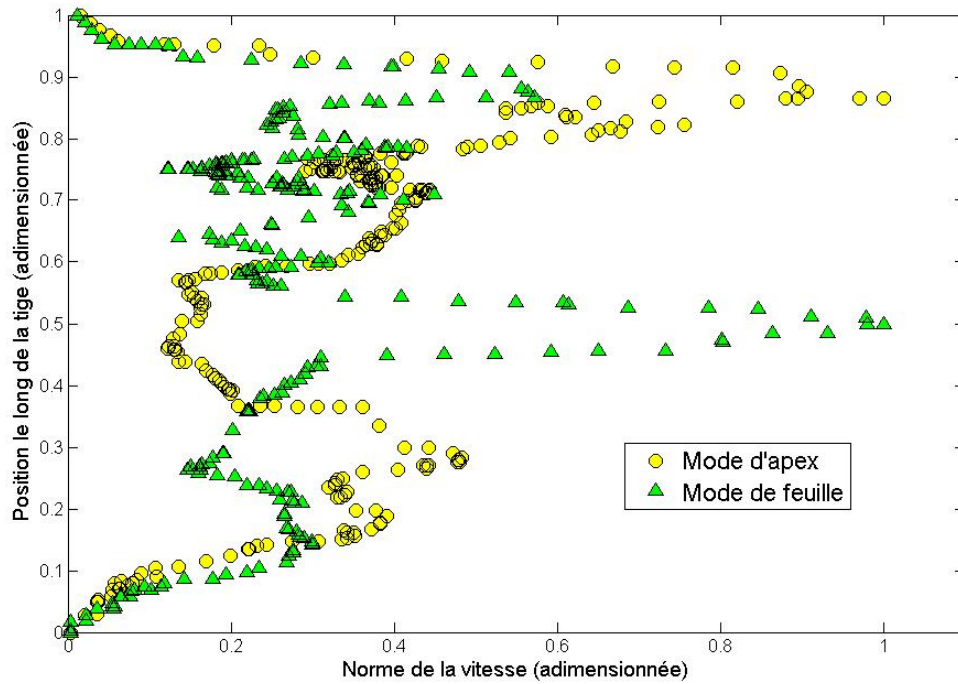


FIGURE 6 – Distribution de la norme de la vitesse le long de la tige. Cas d’un mode d’apex (en jaune) et d’un mode feuille (en vert).

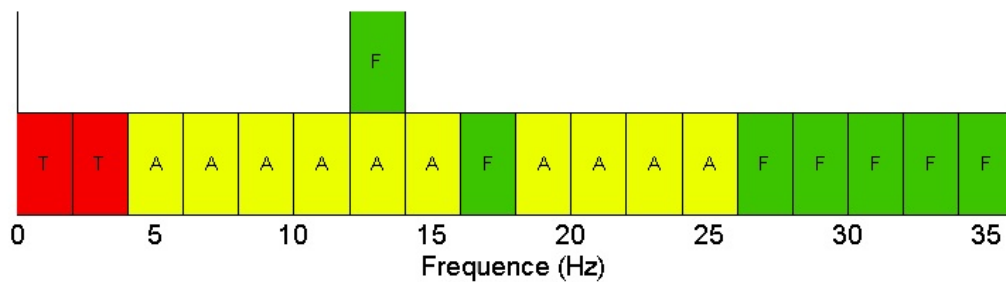


FIGURE 7 – Synthèse de l’analyse entre 0 et 36 Hz sous forme d’une signature vibratoire. A : mode d’Apex, T : mode de tige, F : mode de feuilles. Cas particulier d’une plante.

## 4 Conclusions

A partir d'expériences vibratoires, nous avons pu caractériser la dynamique modale d'un jeune peuplier. Nous avons observé que les modes propres de la plante sont organisés par son architecture et localisés selon 3 zones : des modes de tige, des modes d'apex et des modes de feuille. Les modes d'apex correspondants à des tissus en croissance, l'étude de ces modes peut s'avérer particulièrement intéressante dans le cadre de l'étude de la mécanoperception chez les plantes et de la régulation de leur croissance par thigmomorphogénèse.

## Références

- [1] Rodriguez M., De Langre E., Moulia B. 2008 A scaling law for the effects of architecture and allometry on tree vibration modes suggests a biological tuning to modal compartmentalization *American Journal of Botany*
- [2] Biddington NL. 1986 effects of mechanically-induced stress in plants - a review *Plant Growth Regulation*
- [3] Coutand C. 2010 Mechanosensing and thigmomorphogenesis, a physiological and biomechanical point of view *Plant Science*
- [4] Moulia B., Sinoquet H. -1993. Three-dimensional digitizing systems for plant canopy geometrical structure : a review. *Crop structure and light microclimate*
- [5] Moulia B., Fournier M., Guitard D. 1994 Mechanics and form of the maize leaf : in vivo qualification of flexural behaviour *Journal of Materials Science*
- [6] Tomasi C., Kanade T. 1991 Detection and Tracking of Point Features. *Carnegie Mellon University Technical Report CMU-CS-91-132*
- [7] Bouguet J.-Y. 2002 Pyramidal Implementation of the Lucas Kanade Feature Tracker : Description of the algorithm *Intel Corporation - Microprocessor Research Labs*
- [8] Aubry N., Guyonnet R., Lima R. 1991 Spatiotemporal Analysis of Complex Signals : Theory and Applications *Journal of Statistical Physics*