

Filière PC - ENS de Cachan, Lyon et Paris - Session 2021

Page de garde du rapport de TIPE

NOM : <u>Elbouhadi</u>	Prénoms : <u>ADAM</u>
Classe : <u>942</u>	
Lycée : <u>du Parc</u>	Numéro de candidat <u>2314</u>
Ville : <u>LYON</u>	

Concours auxquels vous êtes admissible, dans la banque MP Inter-ENS (les indiquer par une croix) :

ENS Cachan	PC - Option Physique	☐	PC - Option Chimie	☐
ENS Lyon	PC	☒		☐
ENS Paris	PC - Option Physique	☐	PC - Option Chimie	☐

Matière dominante du TIPE (la sélectionner d'une croix inscrite dans la case correspondante) :

Physique	☒	Chimie	☐
----------	-------------------------------------	--------	--------------------------

Titre du TIPE : Rôle du TMD (Tuned Mass Damper) dans la protection des édifices contre les phénomènes sismiques et/ou météorologique.

Nombre de pages (à indiquer dans les cases ci-dessous) :

Texte	<u>10</u>	Illustration	<u>3</u>	Bibliographie	<u>1</u>
-------	-----------	--------------	----------	---------------	----------

Résumé ou descriptif succinct du TIPE (6 lignes, maximum) :

Afin de contrer les résonances mécaniques dues aux vents ou séismes, j'ai mis en place une maquette qui modélise un édifice qu'on va soumettre à des excitations extérieures. Ensuite j'analyse l'effet des amortisseurs harmoniques couplés sur l'amplitude des oscillations de l'ouvrage. Mais pour cela il a fallu mettre en place un oscillateur harmonique ayant une fréquence propre bien définie.

A Paris, Palaiseau

Le 28/06/2021

Signature du (de la) candidat(e)

Signature du professeur responsable de la classe préparatoire dans la discipline*

Cachet de l'établissement*

LYCÉE DU PARC
1 Boulevard Anatole FRANCE
69453 LYON CEDEX 08
Tél. 04 72 51 15 51 Courriel : lycee@lycee-parc.fr

* La signature du professeur responsable et le tampon de l'établissement ne sont pas indispensables pour les candidats libres (hors CPGE).

Introduction :

Les amortisseurs harmoniques sont des dispositifs qui trouvent leur intérêt dans les domaines où les phénomènes de résonance menacent la stabilité des structures. Ce n'est qu'à partir de la seconde moitié du XXe siècle que le génie civil s'intéressa à ces systèmes. La chute du pont de Tacoma en 1940 fut l'un des événements qui enclencha un intérêt pour ces dispositifs. Grâce au progrès des matériaux et de la science, cette période a également vu la naissance de structures de plus en plus audacieuses [7]. Dès lors on comprend pourquoi les ingénieurs se sont intéressés à ces systèmes d'absorption dynamique des vibrations, notamment pour des raisons de confort : des rafales de vent ou séismes peuvent entraîner des accélérations excessives des édifices qui peuvent endommager les structures et par extension créer des malaises chez les occupants. J'ai décidé de séparer les 2 types d'excitations possibles : une harmonique ce qui modélise le vent ou des rafales, l'autre excitation est brève modélisant un séisme par exemple.

Ces mécanismes s'inspirent le plus souvent de savoir-faire ayant déjà fait leur preuve dans le passé. C'est le cas du système du Shibanshira (poutre centrale installée au cœur des pagodes) dont le principe de fonctionnement est toujours utilisé dans des édifices modernes.[5] Ainsi les structures jouissant de ces installations peuvent être le fruit d'un travail urbaniste et architectural plus libre [2],[4].

L'un des mécanismes à être développé fut le TMD (Tuned Mass Damper) ou encore amortisseur harmonique. Ce système a commencé à voir le jour à partir des années 30 avec les travaux de Ormondroyd et Den Hartog. Il a été installé dans plusieurs tours à partir des années 70 [8]. Le fonctionnement du TMD repose sur une dissipation de l'énergie par un système souvent constitué d'une masse attachée à une structure par des ressorts et des amortisseurs, le tout pouvant ainsi osciller [2]. Pour dissiper efficacement l'énergie causée par une vibration il faut que ce système soit à masse accordée. Cela signifie que le système masse-ressort, décrit au-dessus, possède une fréquence propre identique à celle de la structure, condition sine qua non le TMD est sans utilité [1],[2],[3]. L'effet du TMD apparait lorsque l'on étudie la courbe du gain de la fonction de transfert de l'accélération du sommet d'une tour par rapport à l'excitation subie [1]. Cette courbe (fig.2 de [1]) montre que la présence d'un TMD semble diminuer l'amplitude d'oscillation d'une tour de manière remarquable.

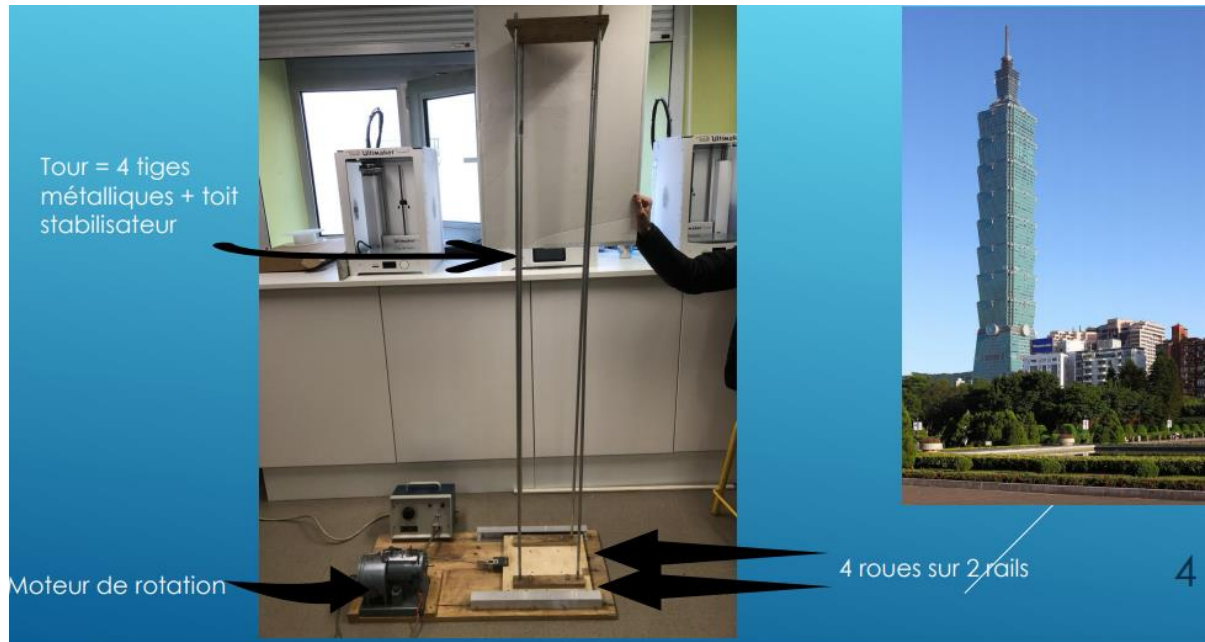
Les TMD installés peuvent prendre des formes variées et sont placés dans tout type d'infrastructure, tels des tours, citées précédemment, ou encore des ponts [6]. Ces infrastructures doivent faire face à des phénomènes météorologiques ou sismiques pouvant mettre en péril leur intégrité. Dans le cas du Millenium Bridge ce sont les phénomènes de résonance provoqués par la marche des piétons qui ont entraînés l'installation d'un TMD sous le pont [3].

On peut alors se demander dans quelle mesure un système tel que le TMD est essentiel pour une tour en permettant sa protection et en garantissant le confort de ses occupants. On peut également s'interroger sur l'importance d'avoir un système couplé pour assurer une efficacité optimale du TMD.

Ainsi, nous verrons premièrement l'excitation harmonique que l'on va « stopper » avec un système masse ressort. Ensuite on s'intéressera à une secousse brève que l'on contrera avec un pendule pesant à pulsation variable.

- I) Réponse à une excitation harmonique :
1) Présentation de la tour

La tour qu'on a construite est fortement inspirée de la tour de Taipei au TAIWAN



Ainsi on y voit 4 tiges métalliques avec au sommet un toit stabilisant, au sol on a une plaque vibrante qui peut osciller grâce à ses roues, le tout relié à un moteur dont la vitesse de rotation et donc d'oscillation est modifiable. On voit donc la similitude avec la tour de Taipei à droite.

Sur la tour de Taipei le TMD est placé au sommet et c'est ce que j'ai essayé de faire en plaçant le système masse ressort en dessous du toit stabilisateur.

2) Système masse ressort

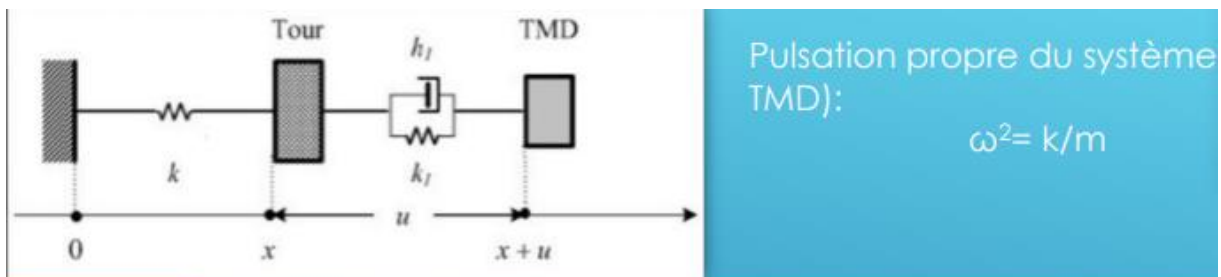


Ce système est constitué de 2 ressorts de même raideur ainsi que d'une masselotte de masse m .

Le choix de la raideur k n'est pas anodin. En effet le TMD est avant tout un système de transfert d'énergie afin de la dissiper et de stopper l'oscillation de la tour, Le calcul prouve qu'il faut que les 2 systèmes (la tour et le TMD) aient la même fréquence propre afin d'avoir un système couplé et accordé.

Ainsi afin de choisir la valeur numérique de la raideur et la masse, j'ai dû chercher la fréquence propre de la tour et pour se faire j'ai fait osciller cette dernière sous plusieurs fréquences et j'ai relevé la fréquence de résonance. La fréquence propre de la tour vaut 1.22Hz. On a donc adapté m et k afin d'avoir une fréquence propre du TMD à 1.22Hz. Ici $k=26\text{N/m}$ et $m=468\text{g}$.

Ce système peut être modélisé par ce schéma :



La tour est modélisée par un système oscillant (un ressort ici par exemple), et le TMD modélisé par un ressort et un amortisseur.

Mise en place du TMD sur la tour :



3) Problèmes rencontrés :

Tout n'a pas fonctionné idéalement au bout du premier jet. Suite à une excitation harmonique, on avait un problème de butté. En effet, notre ressort était à spire jointive, et n'était pas assez long pour fonctionner en traction, ceci a fait que la masse n'avait pas une oscillation harmonique et donc heurtait le bout du TMD à chaque fois.

C'est pourquoi on a contacté un artisan du ressort et qui nous a proposé une solution qui a bien marché et qui nous a suivis tout au long du TIPE.



On a donc opté pour des ressort à spires non jointives et qui nous évitait le problème de butté.

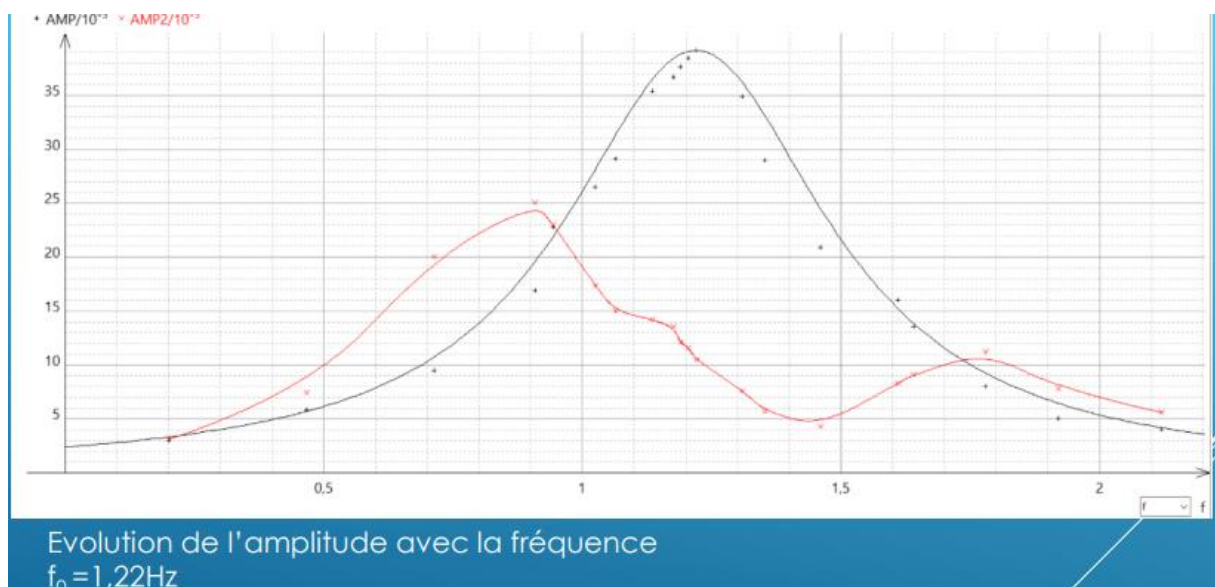
Ainsi on a pu tracer l'évolution de l'amplitude des oscillations en fonction de la fréquence d'excitation (la fréquence du vent qui tape sur la tour de Taipei par exemple).



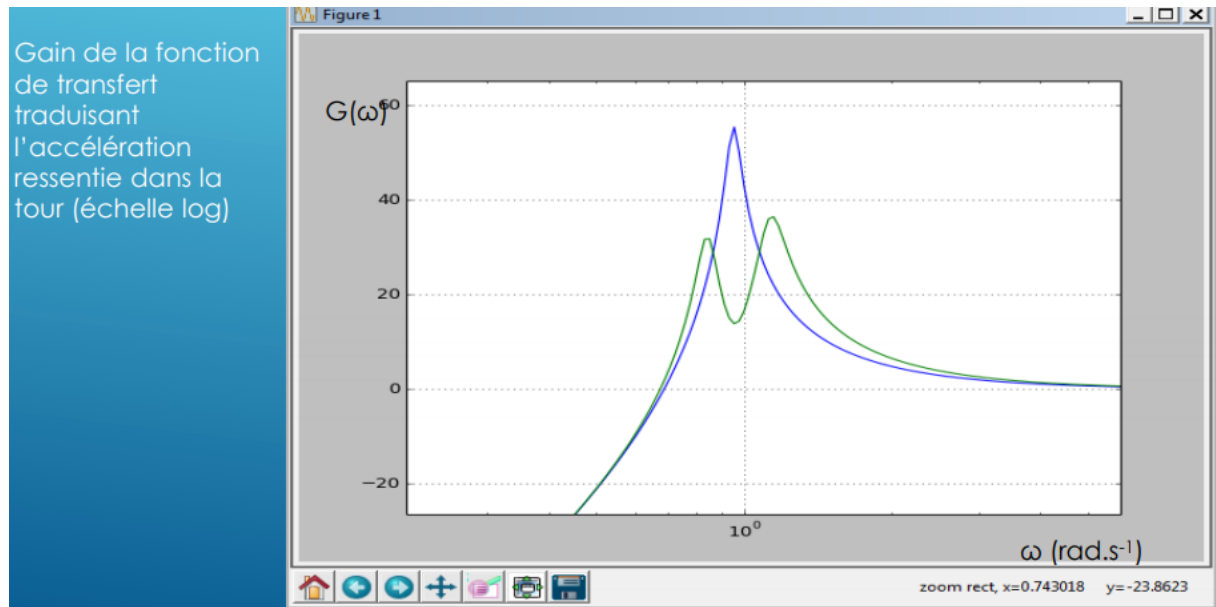
On voit bien ici l'oscillation en opposition de phase entre TMD et la tour et donc le transfert d'énergie ce qui a pour but de diminuer l'amplitude des oscillations.

4) Pratique contre théorie :

On a donc pu tracer la courbe de l'évolution de l'amplitude en fonction de la fréquence, chose qu'on a faite sur Python afin de confronter notre modèle à la réalité.



En Noir sans TMD et en rouge avec TMD on retrouve bien la fréquence de résonance de la tour a 1.22 Hz.



Et voilà ce qu'on retrouve sur Python.

On voit que la pratique se rapproche de la théorie et on retrouve la même allure de courbe ce qui est plutôt rassurant.

II) Excitation brève :

Après avoir traité des excitations harmoniques et donc après avoir proposé une solution pour éviter le malaise des personnes se situant au sommet des tours, nous nous intéresseront à la manière dont on peut contrer un séisme avec le même système.

Etant donné que ce qui nous intéresse est le fait d'avoir un système oscillant on a choisi cette fois (pour changer un peu) un pendule pesant et ce qui a conduit à ce système.

1) Présentation de pendule :



C'est un pendule pesant avec une masse qui peut être positionné librement sur la tige afin de calibrer la fréquence propre du système et on peut retrouver cette valeur en utilisant la formule de Borda par exemple car on n'est plus dans l'approximation des petits angles.

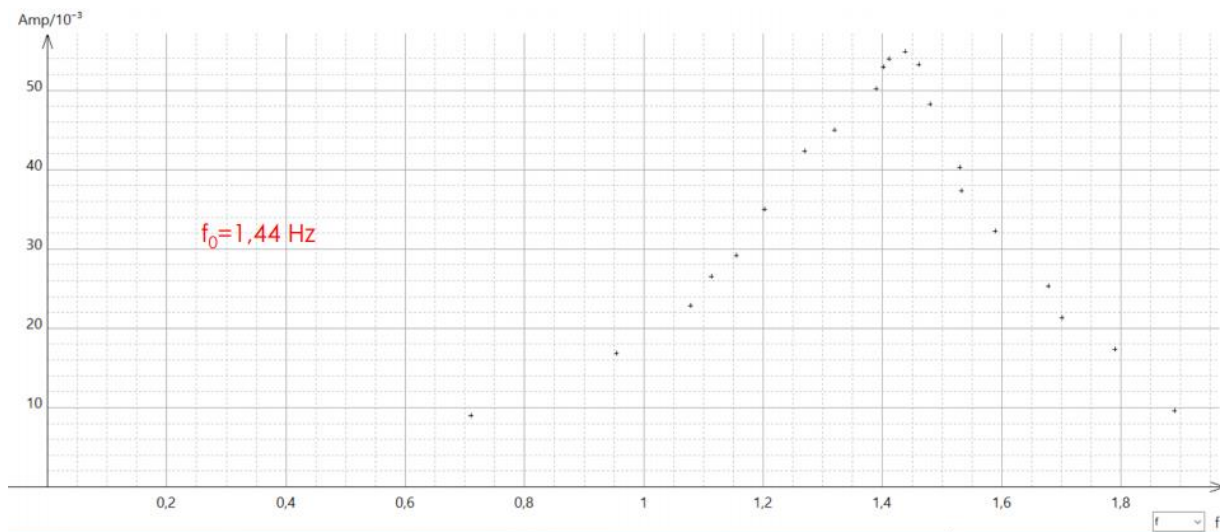
Là encore on devait voir l'influence du pendule face à une excitation brève qui consistait à tirer la tour en lui donnant une certaine amplitude initiale et la laisser osciller librement.

2) Expérience sans effet du pendule :

Afin de garder le même système et la même inertie pour trouver la réponse du système à une excitation en bloquant les oscillations du pendule, on a du bloquer ses oscillation grâce à des fils de fer de masses négligeables bien sûr.

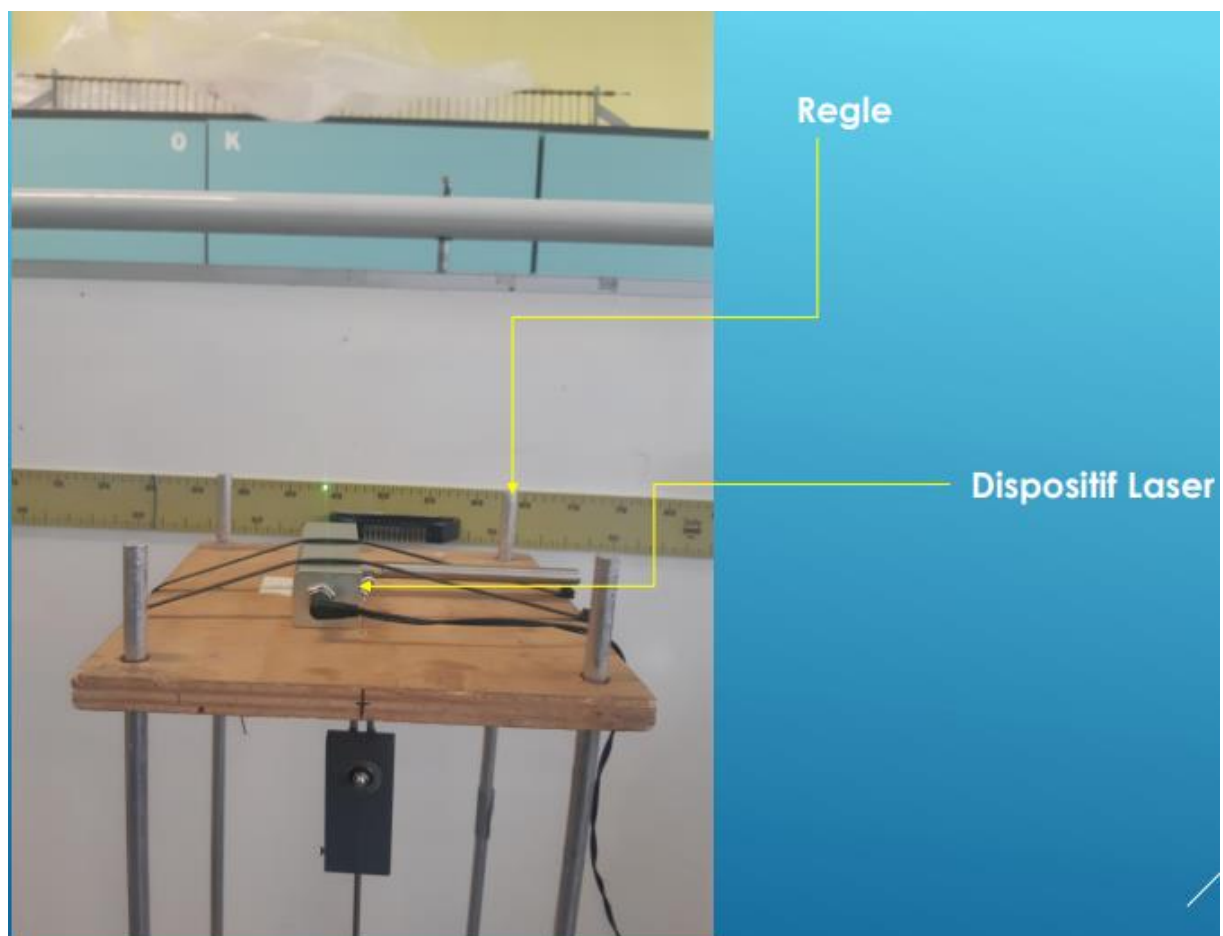


De la même manière on a retrouvé la courbe de résonance suivante :



La fréquence propre est plus élevée puisque l'inertie est plus faible cette fois (par rapport au système masse ressort).

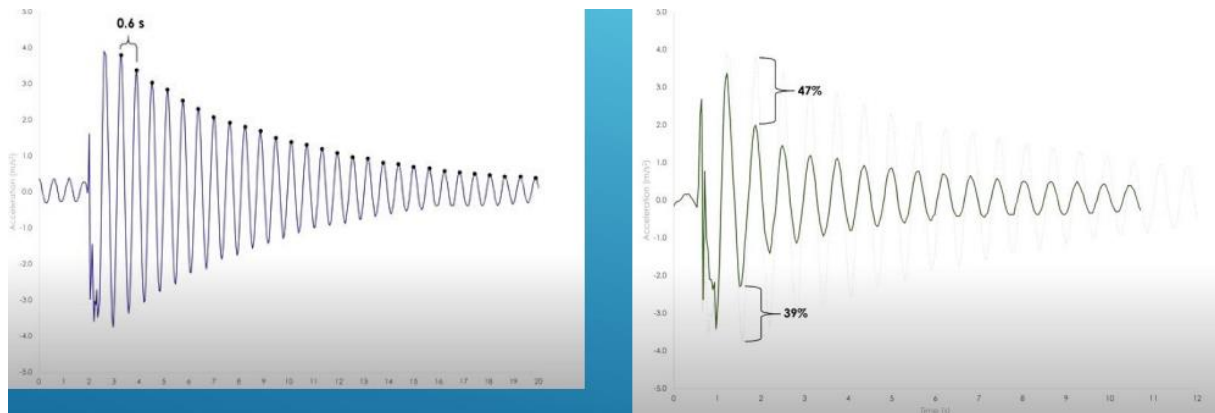
Maintenant on peut calibrer la position de la masse afin d'avoir une fréquence propre de 1,44 Hz et donc pour avoir un système couplé et accordé.



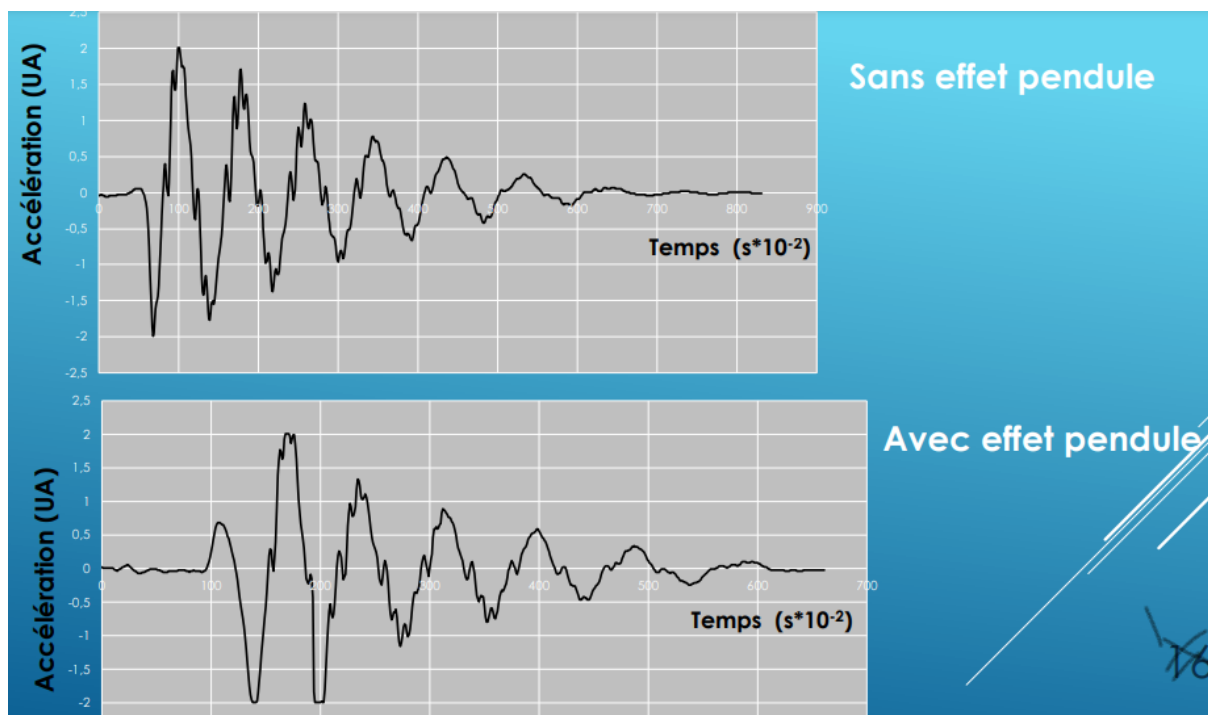
On a opté pour cette option pour tirer le système avec la même amplitude initiale, on néglige bien sur la masse du Laser et il devait toujours pointer sur la même valeur sur la règle placée sur un

tableau afin d'être sûr que l'on tire la tour avec la même amplitude et on veille à ne pas lui donner de vitesse initiale.

Ainsi « théoriquement » on devrait avoir les oscillation suivante (à titre de comparaison) :



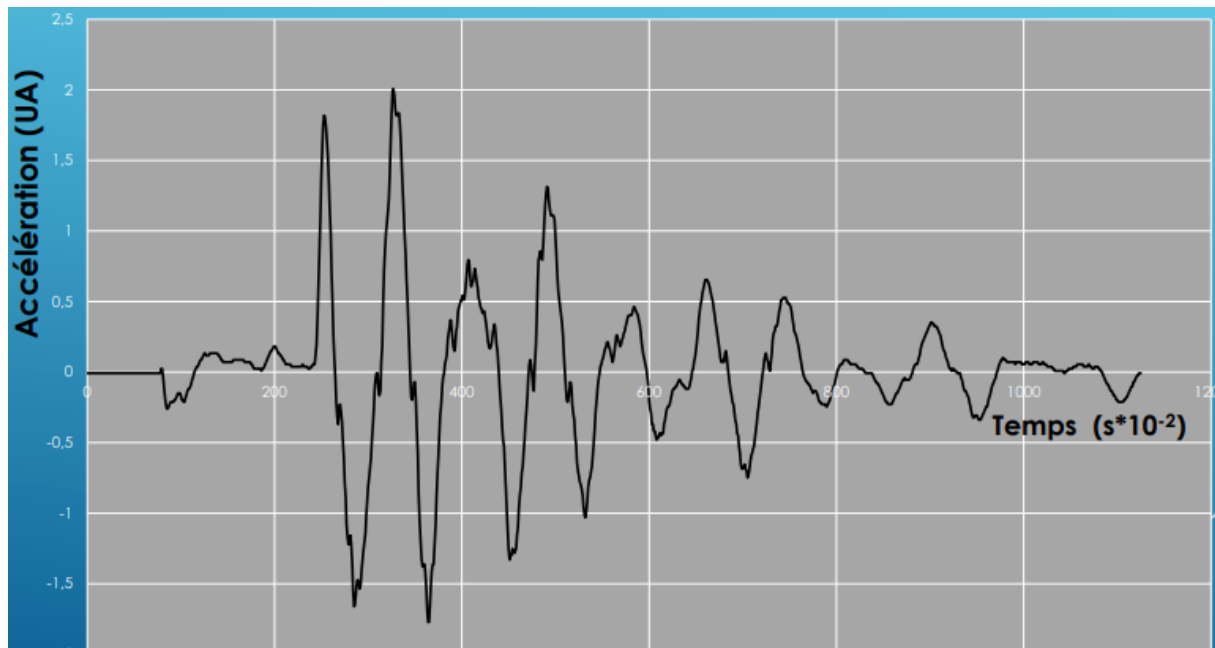
Source: Grady Hillhouse du site <https://practical.engineering>



Et voilà ce qu'on a eu en réalité, on y voit bien que l'amplitude des pseudos oscillation est plus faible et diminue plus rapidement, on peut affirmer que le décrément logarithmique est plus élevé.

On voit ici l'intérêt du TMD dans le transfert d'énergie. On a ici en plus de la première expérience une dissipation par frottement fluide ce qui est responsable de l'allure d'une enveloppe en exponentielle décroissante, c'est donc des frottements fluides, proportionnels à la vitesse.

Et avant de conclure, lorsqu'on n'avait pas un système couplé c'est-à-dire que la fréquence propre du pendule pesant n'était pas proche de celle de la Tour, on a remarqué un phénomène de battement ce qui s'est traduit par cette courbe :



Ainsi, la tour se mettait à osciller, s'arrête, ensuite reprend ses oscillations avec des amplitudes élevées, ce qui n'est pas du tout ce qu'on cherche. Ces battements prouvent encore une fois que le TMD repose essentiellement sur un transfert d'énergie afin de diminuer l'amplitude d'oscillation de la tour. On voit aussi la nécessité d'avoir un système rigoureusement accordé.

Conclusion :

Finalement c'est grâce à des systèmes mécaniques, simple en théorie mais complexes dans la réalité que l'Homme a pu construire des tours de plus en plus haute sans craindre leur chute. Le TMD est donc une très bonne solution qui réduit l'amplitude des oscillations des tours due à la résonance mécanique, et pour ouvrir le sujet on a vu que le but du TMD c'est de dissiper de l'énergie, chose qu'on recherche rarement en physique moderne, Ainsi pourquoi pas la récupérer en l'alimentant à un alternateur par exemple.

Références bibliographiques :

- [1] Sujet Mines Physique 2 MP 2007 : Physique des Gratte-ciels et des tours : concours mines pont
- [2] Annisa Allani : Thèse sur la « Conception et optimisation d'amortisseurs à masse accordée pour les structures du génie civil » : <https://www.iut.ubordeaux.fr/gc/augc07/index/pdf/CJC/CJC-Mekki.pdf>
- [3] Sujet Mines Physique 1 PC 2016 : Effet TMD sur le Millenium Bridge : concours mines pont
- [4] MAHI Mohammed Hichem BOUALI Adnan : Thèse sur « Application d'un Système (TMD) pour l'Amélioration de la Réponse Sismique des Structures Bâtiments » : <http://dSPACE.univtlemcen.dz/bitstream/112/9873/1/Ms.Gc.%20Mahi%2BBouali.pdf>

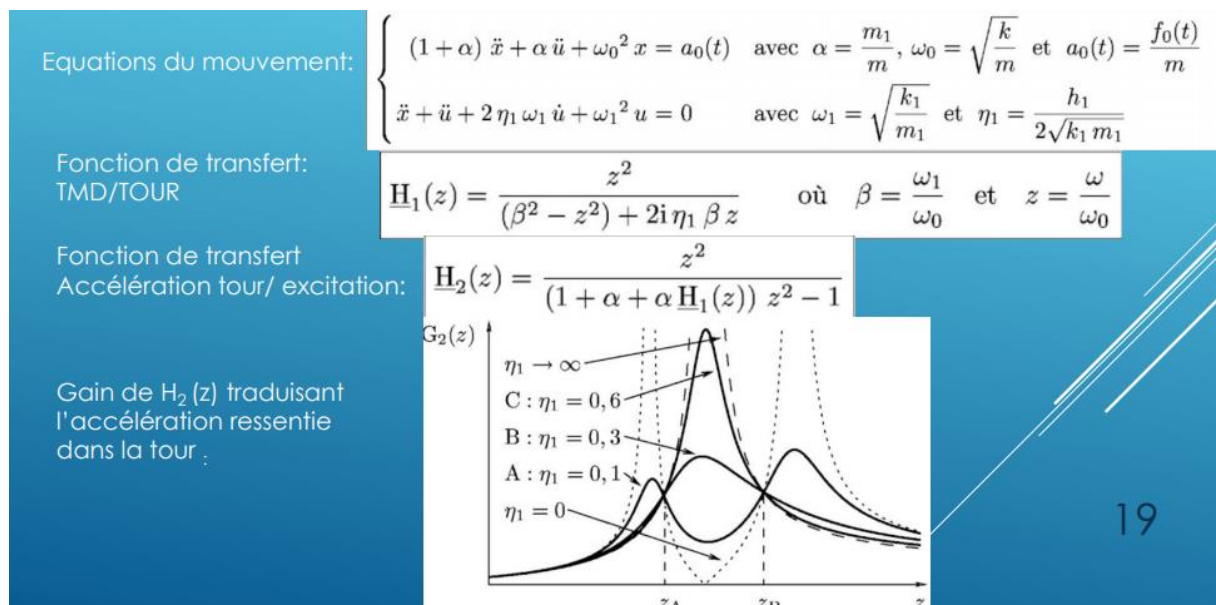
[5] Max Warburton Xavier Jourdain Hélène Horsin Molinaro : Constructions parasismiques : quelques solutions traditionnelles :
<https://eduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr/sti/files/ressources/pedagogiques/11706/11706-constructions-parasismiques-quelques-solutions-traditionnelles-ensps.pdf>

[6] Gerb : Vibration Protection for Structures, Buildings, Machinery and other Equipment with Tuned Mass Dampers : <http://pdfs.findtheneedle.co.uk/4746-GERB-Tuned-Mass-DamperBrochure.pdf>

[7] Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik : Pour la Science : Des tours qui chavirent : <https://www.pourlascience.fr/sd/physique/des-tours-qui-chavirent-2964.php>

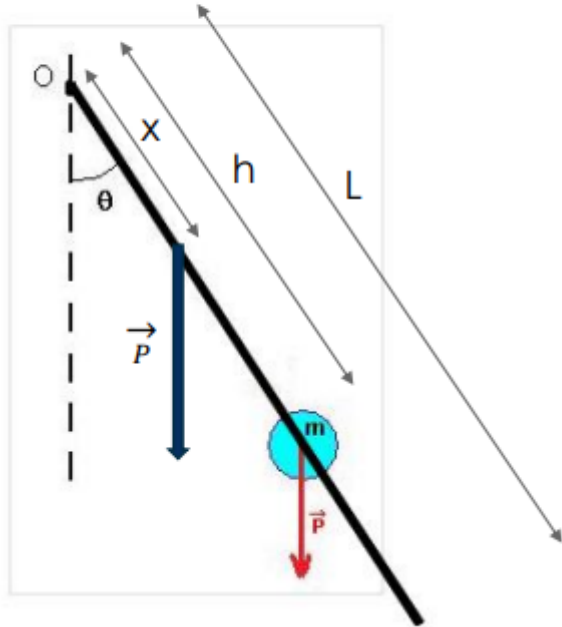
[8] Othman Ben Mekki : Amortissement Semi-actif des Structures Flexibles : Application au Contrôle des Grands Ponts : <https://www.iut.u-bordeaux.fr/gc/augc07/index/pdf/CJC/CJCMekki.pdf>

ANNEXE :



mise en équation du TMD de la première expérience

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{\frac{1}{3}ML^2 + mh^2}{mgh + Mgx}}$$



Données:

$$m = 150\text{g}$$

$$M = 50\text{g}$$

$$h = 13\text{cm}$$

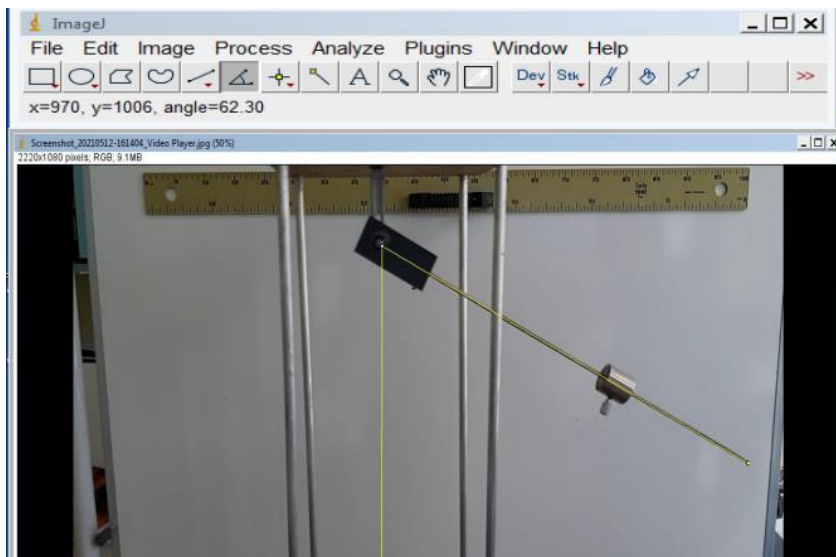
$$x = 12,5\text{cm}$$

$$L = 40\text{cm}$$

$$\theta_0 = 60^\circ$$

Mise en équation

de notre pendule



$$\frac{T}{T_0} \approx 1 + \frac{1}{16}\theta_0^2$$

Utilisation de la formule de Borda

tipe.py - D:\tipe.py (3.9.5)

File Edit Format Run Options Window Help

```
from matplotlib.pyplot import *
from numpy import *
from pylab import *
j=complex(0,1)
eta1=0.8
eta2=0.1
beta=0.953
alpha=0.1
def H11(z):
    return (z**2)/((beta**2)-(z**2)+2*j*eta1*beta*z)
def H12(z):
    return (z**2)/((beta**2)-(z**2)+2*j*eta2*beta*z)
def H21(z):
    return ((z**2)/((1+alpha+alpha*H11(z))*(z**2)-1))
def H22(z):
    return ((z**2)/((1+alpha+alpha*H12(z))*(z**2)-1))

puissance_z = arange(-2,3,0.01)
Z = 10**puissance_z
module1 = 20*log(abs(H21(Z)))
module2=20*log(abs(H22(Z)))
semilogx(Z,module1)
semilogx(Z,module2)
grid(True)
show()
```

le programme Python qui nous a permis de tracer le diagramme de Bode du système de l'expérience 1.