

# Sécurisation de bâtiment par amortisseur harmonique

FRAMBOURT Mateïs

Numéro de candidat:  
42185

# Introduction



Figure 1 – Tuned mass damper sur l'Infinity bridge

TMD = Tuned mass damper

Figure 2 – Pendule de la tour Taipei 101 à Taiwan



# Objectifs

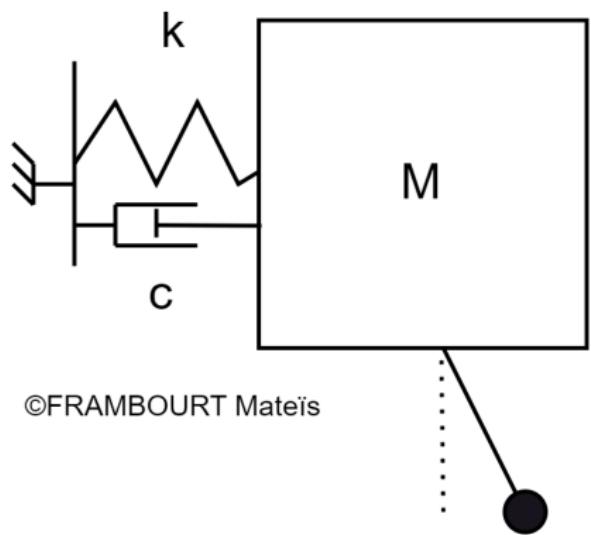
Problématique : Quelle est l'influence du TMD sur la stabilité de la tour ?

Objectifs du TIPE :

- Maquettiser un immeuble
- Élaborer une excitation sinusoïdale de fréquence paramétrable
- Mesurer la position relative de l'immeuble

## Plan

- 1 Modèle théorique
  - 2 Maquettisation de l'immeuble
  - 3 Création de l'axe d'excitation
  - 4 Élaboration de l'ensemble des capteurs



©FRAMBOURT Mateïs

PDF à la masse :  
 $M\ddot{x} = -kx - c\dot{x} + f(t)$   
On a donc sans le pendule :  
$$H = \frac{1}{1+j\frac{c}{k}\omega - \frac{M}{k}\omega^2}$$

Figure 3 – Schéma de la modélisation

# Modélisation du système avec pendule

Oscillations linéaires , on peut modéliser le pendule par un système masse ressort

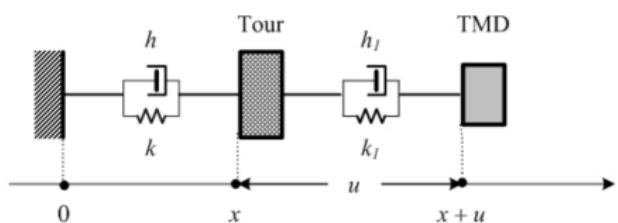


Figure 4 – Modèle équivalent du système

- $m$ =Masse du pendule
- $M$ =Masse de la tour
- $k_1$ =Coefficient de raideur élastique du pendule
- $k$ =Coefficient de raideur élastique (Baguettes + bouchons dans notre modèle)
- $h_1$ = coefficient de frottement du pendule
- $h$ =coefficient de frottement de la tour

# Équations du système

L'excitation extérieure est modélisée par une force  $f_0(t)$  appliquée à la tour

PFD à *tour + TMD* :

$$M\ddot{x} + m(\ddot{x} + \ddot{u}) + h\dot{x} + kx = f_0(t) \quad (1)$$

PFD au TMD uniquement :

$$m(\ddot{x} + \ddot{u}) + h_1\dot{u} + k_1u = 0 \quad (2)$$

# Fonctions de transfert du système

$$\begin{cases} H1(\omega) = \frac{U}{X} = \frac{m\omega^2}{k_1 + jh_1\omega - m\omega^2} \\ H2(\omega) = \frac{X}{\frac{F_0}{k}} = \frac{1}{1 + j\frac{h}{k}\omega - \frac{(M+m)}{k}\omega^2 - \frac{H1(\omega)}{k}\omega^2} \end{cases}$$

H2 représente le rapport de l'amplitude de l'accélération ressentie par les occupants de la tour et de l'amplitude de l'accélération extérieure que subit la tour

# Objectif de la Maquettisation

- Objectif : Obtenir un comportement similaire
- étude de différente solution

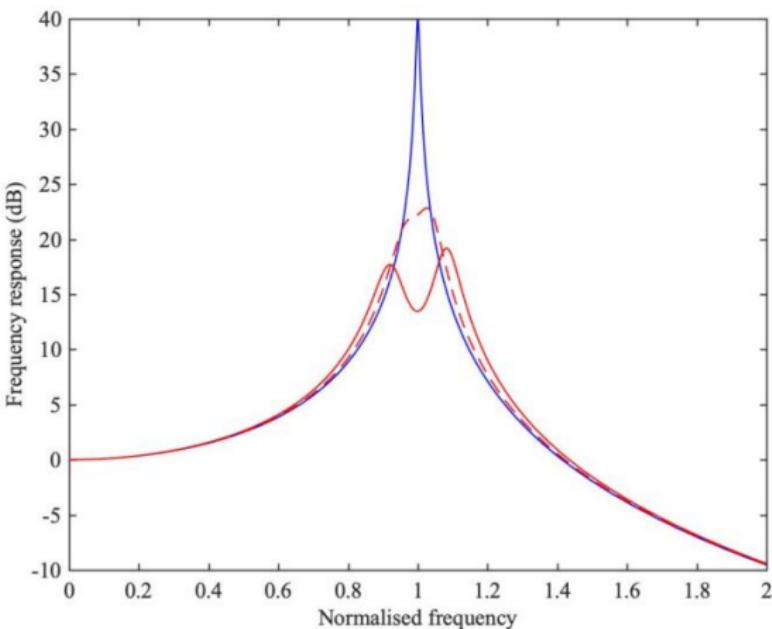
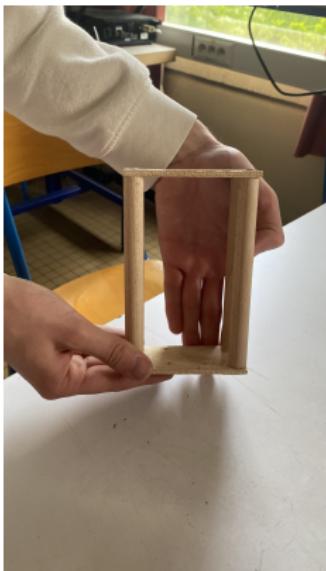


Figure 5 – ©euphonics.org

# modèle naïf



- Rapide à construire
- trop rigide

# Modèle flexible

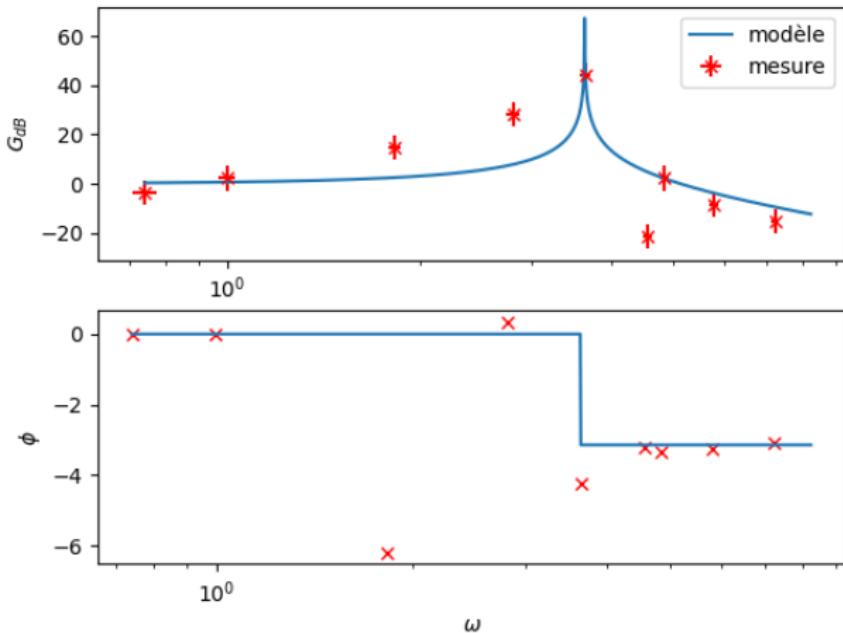


Figure 6 – Tour flexible

## Contrainte :

- Fonctionnement linéaire
- Résonance dans l'intervalle [0.5,7Hz]
- facilement modifiable

## Limite imposée :

- faible amplitude d'oscillations
- surface minimale

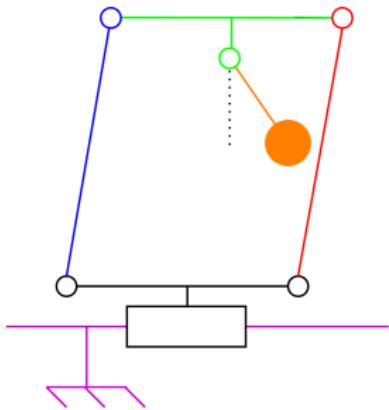


Figure 8 – Schéma global

# problème de non-linéarité



Figure 9 – Problème de torsion



Figure 10 – Cause de la torsion

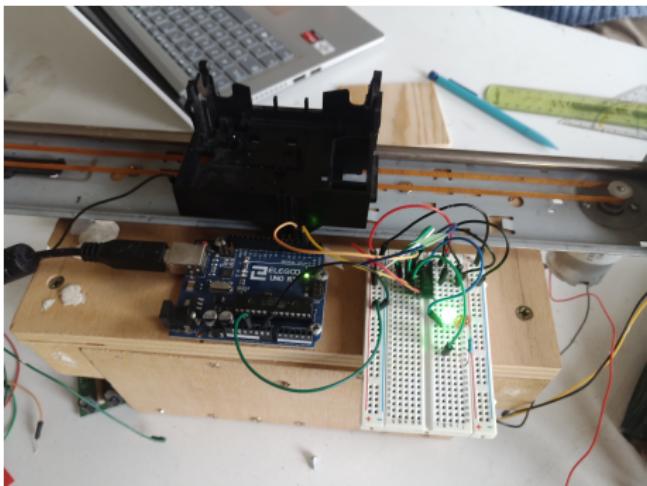
# Pendule réglable



Contrainte :

- Minimum de frottement
- Centre de gravité réglable
- masse réglable

# Premier guidage



Avantages :

- Déjà construit

Inconvénients :

- Hystérésis
- Frottement non négligeable
- Asservissement à réaliser

Figure 12 – Guidage récupéré d'un ancien TIPE

# Guidage récupéré

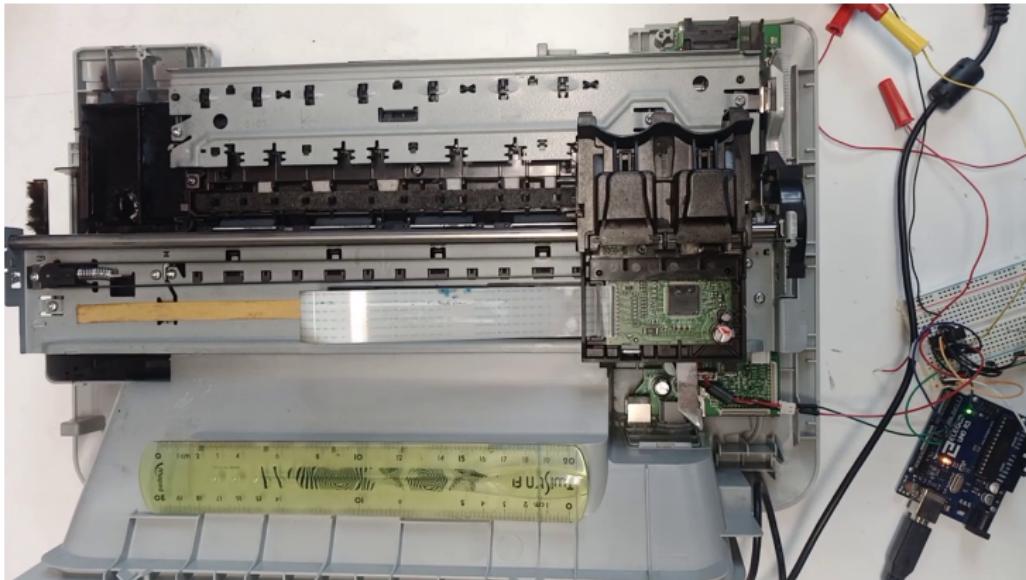


Figure 13 – Axe d'une imprimante jets d'encre



Figure 14 – début des oscillations



Figure 15 – fin des oscillations

# solution à ces problème



Figure 16 – Solution au décalage

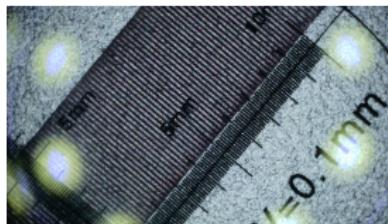


Figure 17 – Mesure du ruban zébré de l'imprimante

$$d = 0.2 \pm 0.05 \text{ mm}$$

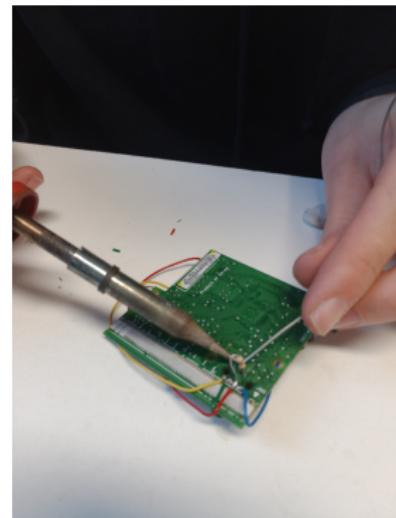


Figure 18 – Tentative de récupération du capteur

# Conclusion sur cet axe

## Avantages :

- Gratuit
- Solution mécanique déjà construite

## Inconvénients :

- Asservissement à réaliser
- Dépendance entre la charge et le déplacement
- Moteur faible

# Axe imprimé en 3D

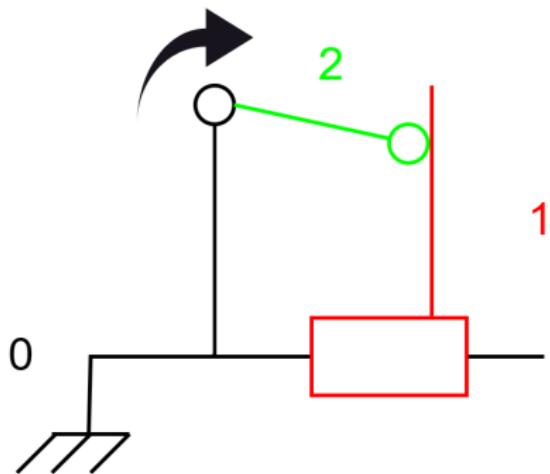


Figure 19 – Schéma cinématique de l'axe

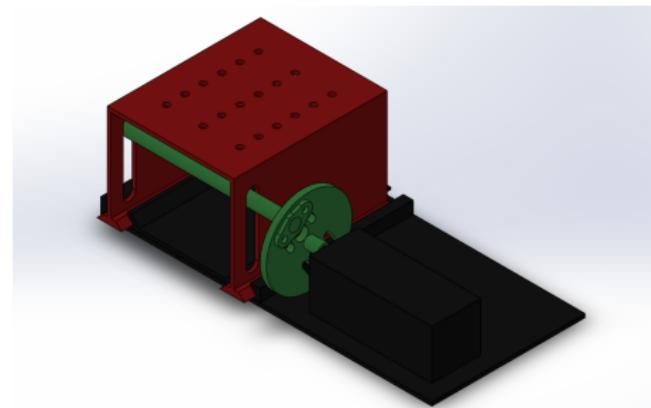


Figure 20 – Montage sur Solidwork

# Hystérésis

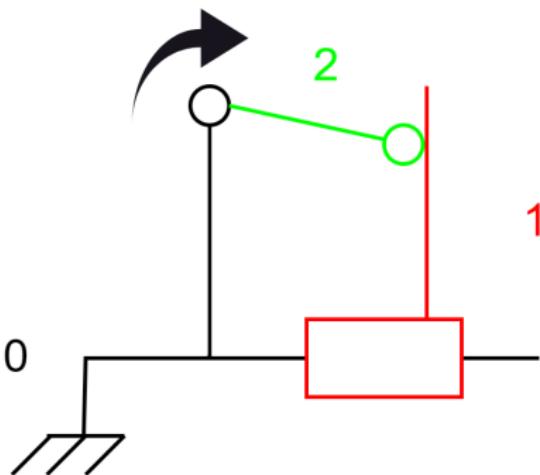


Figure 21 – Schéma cinématique de l'axe à droite

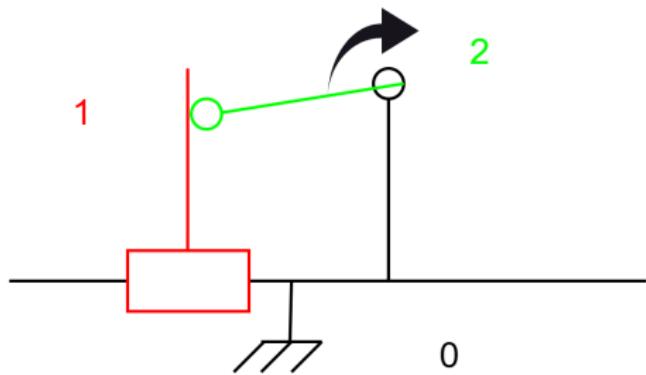


Figure 22 – Schéma à gauche

# Conclusion sur cet axe

## Avantages :

- Modulaire
- Précise sans Asservissement
- facilement réglable en fréquence

## Inconvénients :

- Pièce fragile à l'usure
- Plateforme limitée en taille
- Hystérésis

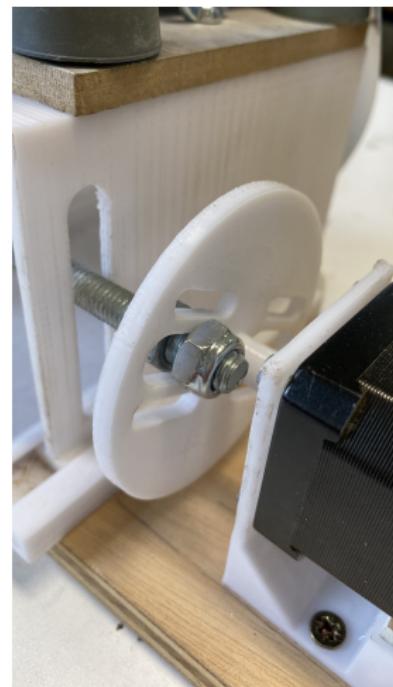


Figure 23 – Réalisation

# Capteurs



Figure 24 – Accéléromètre  
du socle

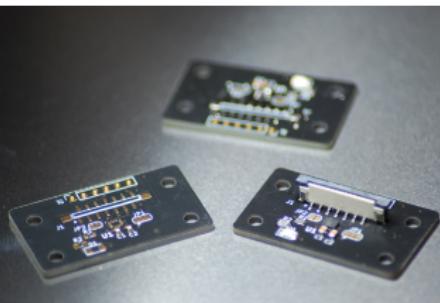


Figure 25 – Accéléromètre  
du haut

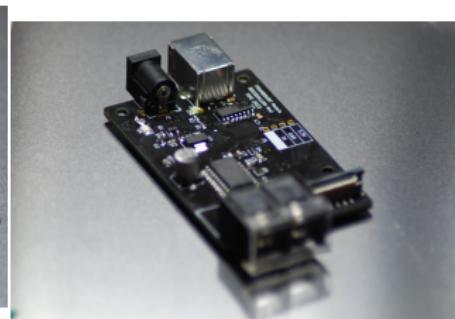


Figure 26 – Carte fixe

Pour les réponses sinusoïdales :

- Amplitude minimale
- Fréquence entre [0.5 ; 5Hz]
- Mesure en régime établit

# Première expérience : Réponse à une excitation sinusoïdale

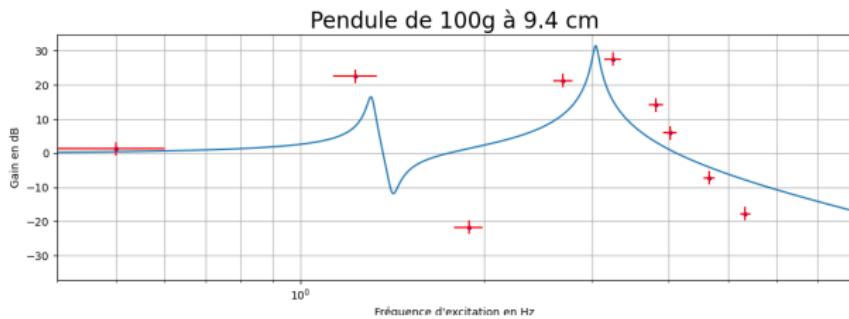
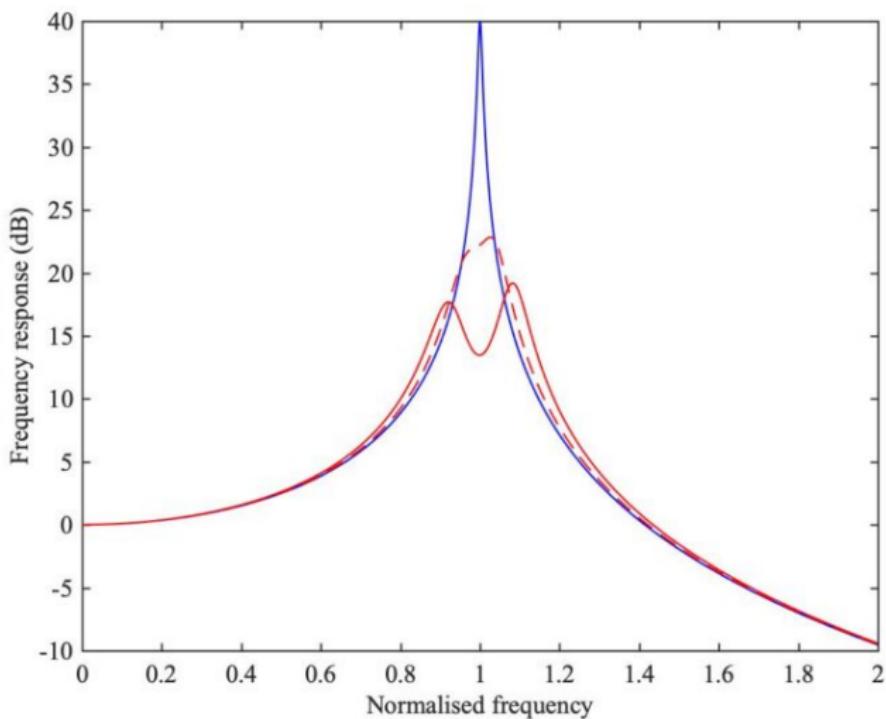


Figure 27 – Réponse du système à une excitation sinusoïdale pour une masse de 100g à 9.4 cm

## Observations :

- Réduction de l'amplitude des oscillations
- Influence du centre de gravité du pendule
- Décalage de la fréquence de résonance



# Première expérience : Réponse à une excitation sinusoïdale

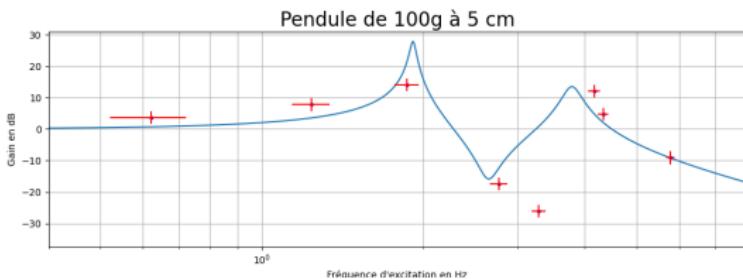


Figure 28 – Même réponse en montant la masse à 5cm

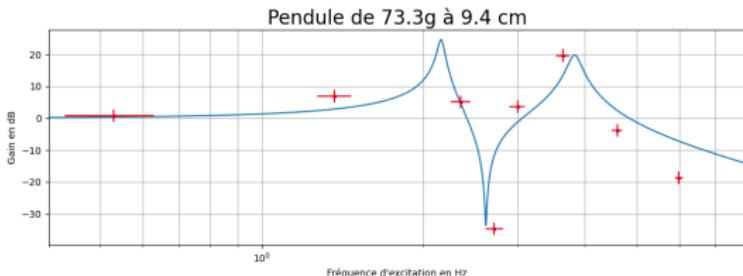


Figure 29 – cette fois ci en prenant 73.3g à 9.4cm

# Deuxième expérience : Dirac

Simulation d'une rafale de vent

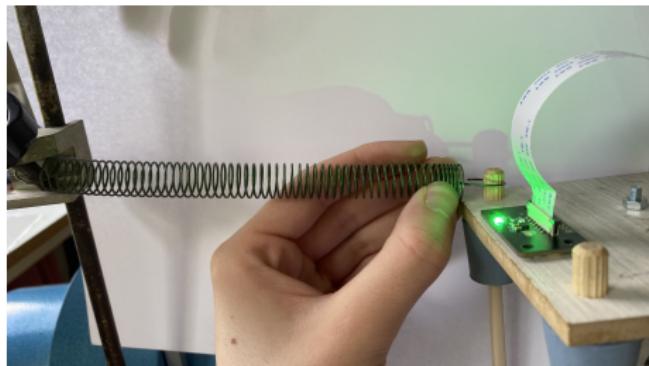


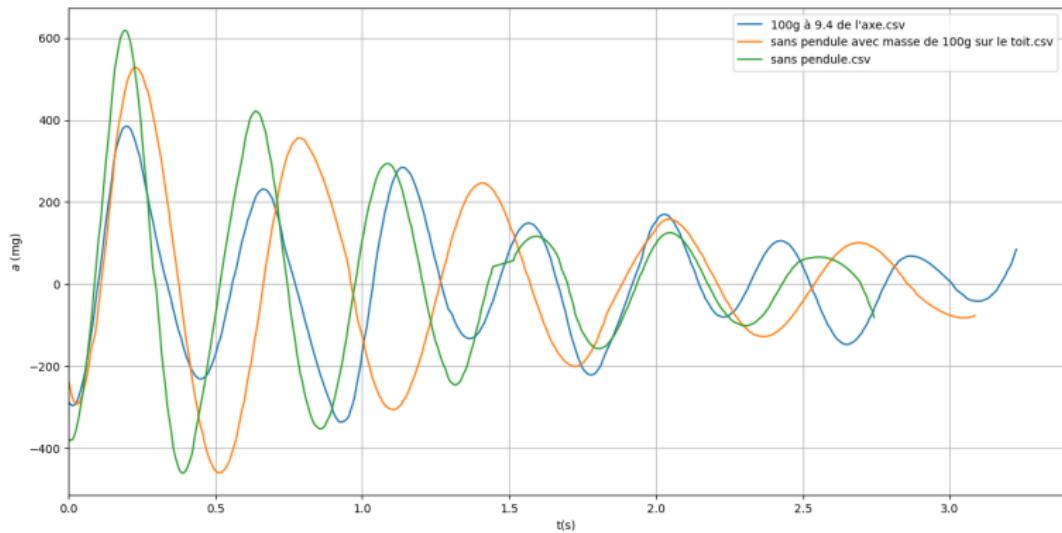
Figure 30 – Excitation brève

Conditions de l'expérience :

- Dirac avec un ressort
- Oscillations dans un seul plan

# Deuxième expérience : Réponse à une excitation brève

## Résultats



# Limites du modèle

- Dimensions peu assimilables au réel
- Élasticité trop importante
- Cependant Résultats comparable au réel.

# Caractéristique des TMD en introduction



Figure 32 – ©supertalls.fr

- Masse : 660 Tonnes
- diamètre : 5,5m
- amplitude maximale : 1,5m
- amortissement : jusqu'à 40% maximum
- prix : 4 millions de dollars

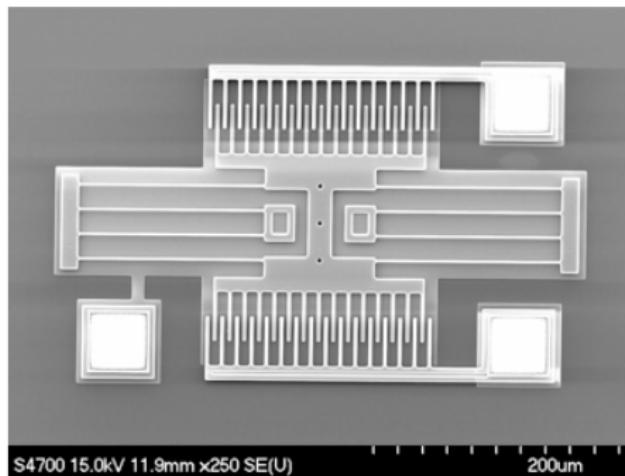
## Caractéristique des TMD en introduction



- Localisation : Stockton-on-Tees
- Masse : 700 Kg
- Nombre : 7 sur l'entiereté du pont

Figure 33 – ©JohnYeadon

## Accéléromètre utilisé



- LSM6DS3
- 6 degré de liberté
- $\pm 2/\pm 16 \text{ g}$
- $U(a) = 0.122 \text{ mg}$
- $N(a) = 90 \frac{\mu\text{g}}{\sqrt{\text{Hz}}}$

Figure 34 – ©www.mems-exchange.org

## Caractéristique du raspberry pi pico W



Figure 35 – Pico W

- Programmable en C++/Python
- 15€
- 2 Coeurs M0+ 133 MHz
- FPU intégré
- Wifi 2.4 GHz

# Circuit imprimé fixe

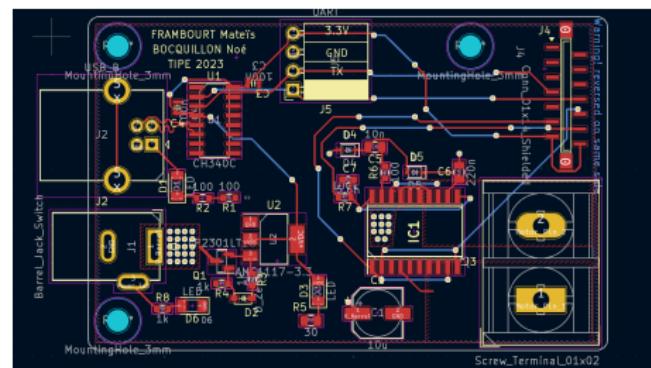
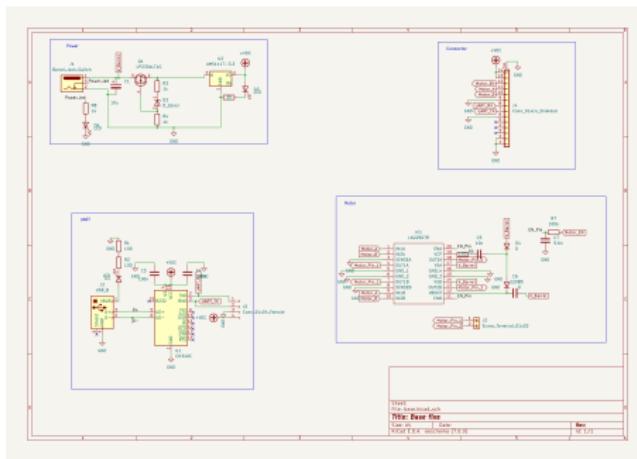


Figure 37 – PCB base fixe

FRAMBOUT Mateis

# Circuit imprimé principal

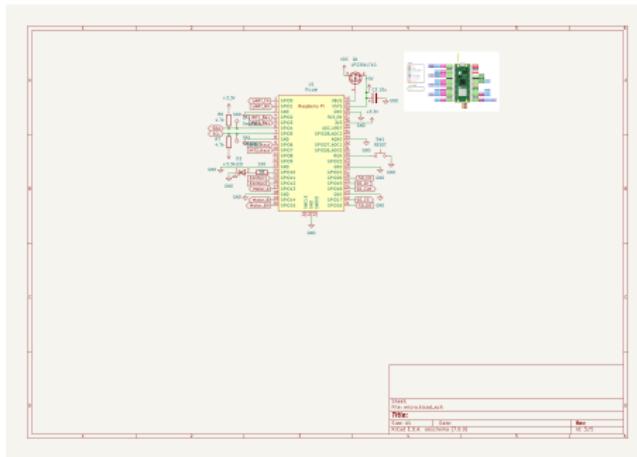


Figure 38 – Branchement Carte mère

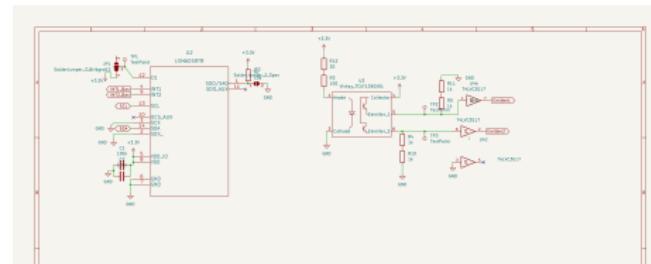


Figure 39 – Capteur de la carte mère

# Schéma PCB

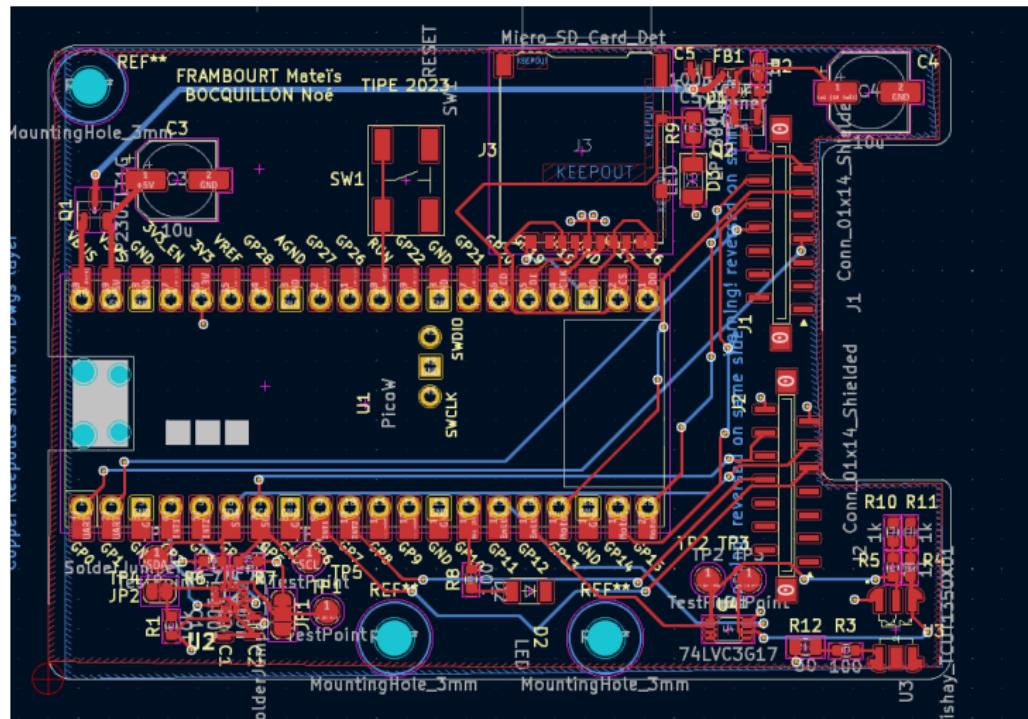


Figure 40 – PCB carte mère