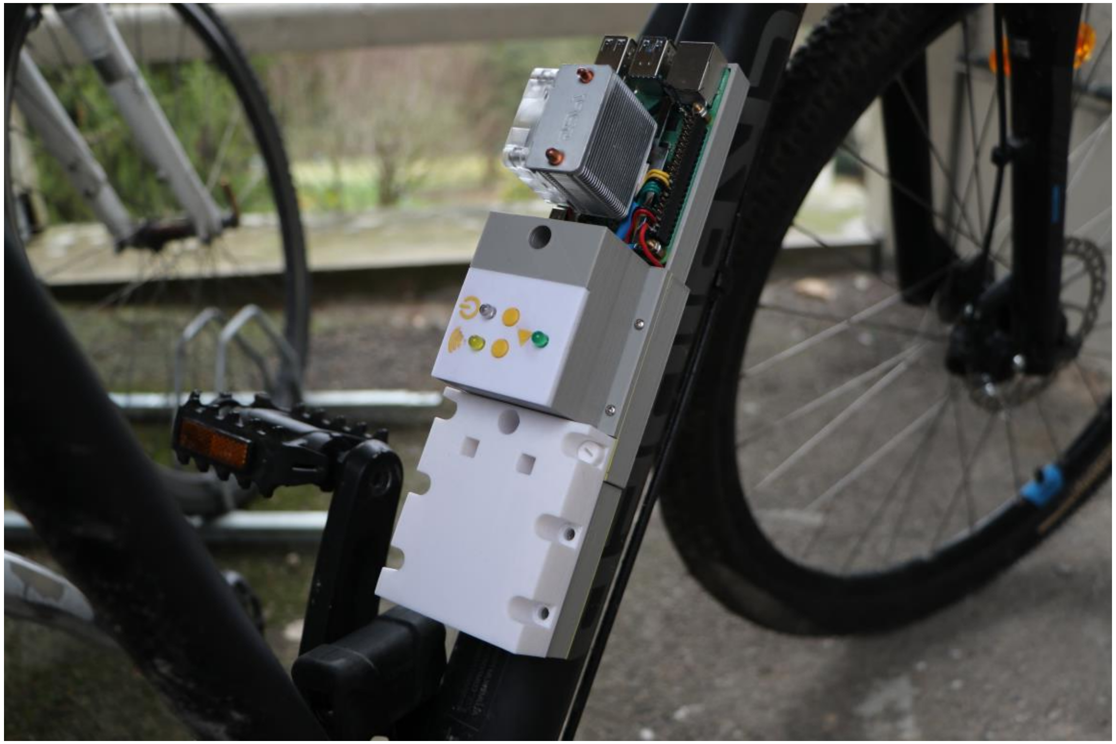
TIPE 2022-2023 La ville

Mise en place d'un système embarqué captant des signaux physiques, traitant des données en temps réel et récupérant les vibrations de ce dernier sous forme d'énergie électrique.

Victor Peccenini

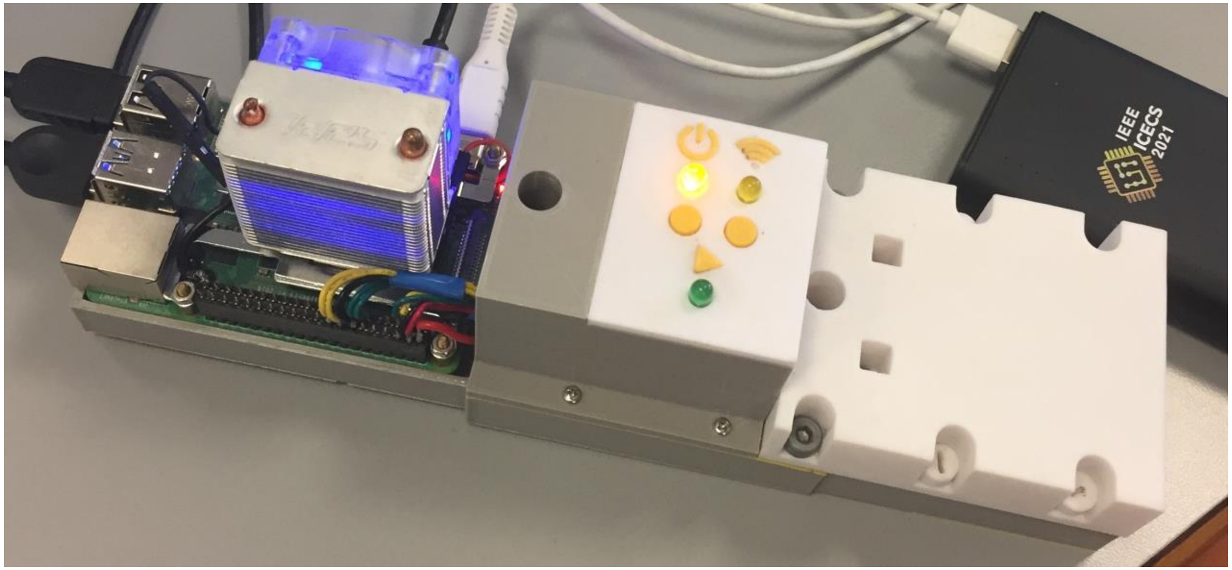
N°18461



Problématique

Dans quelle mesure peut-on récupérer de l'énergie électrique en roulant en ville en vélo lorsque le système est soumis à des vibrations ? Un tel système serait-il rentable et efficace ?

Système étudié :



Démarche Suivie

Dans quelle mesure peut-on récupérer de l'énergie électrique en roulant en ville en vélo lorsque le système est soumis à des vibrations ? Un tel système serait-il rentable et efficace ?

0 – Introduction au phénomène piézoélectrique

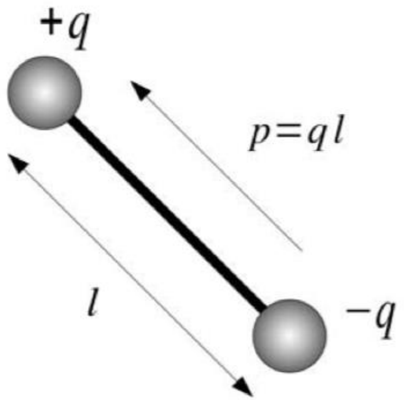
1 – Présentation du système embarqué

2 – Vérification des performances du système

3 – Justification de l'utilité du système

4 – Limites et améliorations du système

0. Phénomène piézoélectrique



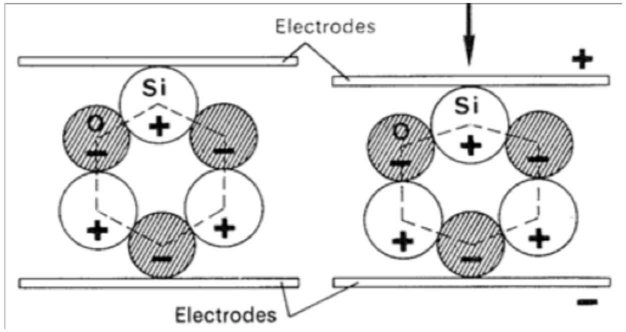
Moment dipolaire

Fonctionnement :

- Force ➔ déformation ➔ tension

- Force ➔ Déplacement des atomes (chargés + ou -), intérieur matériaux piézoélectriques, pas de centre de symétrie.

- Barycentres de charges positives et négatives différents ➔ polarisation électrique ➔ création d'un moment dipolaire ➔ génère une tension.



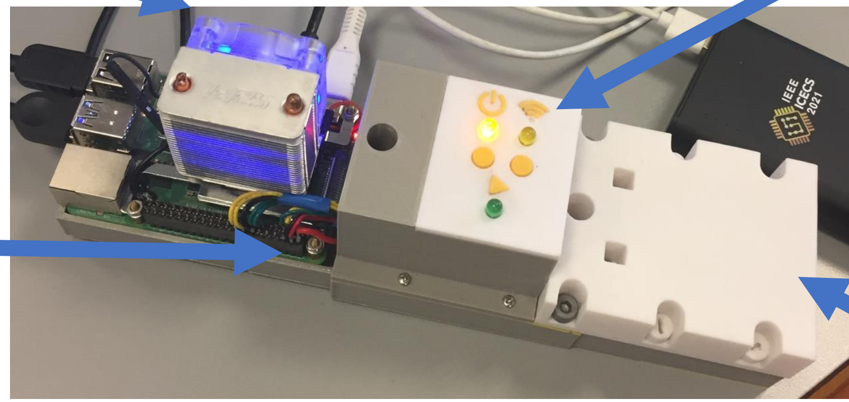
Source : http://electroacoustique.univ-lemans.fr/cours/pdf/grain_34.pdf

1 - Présentation du système

Raspberry Pi

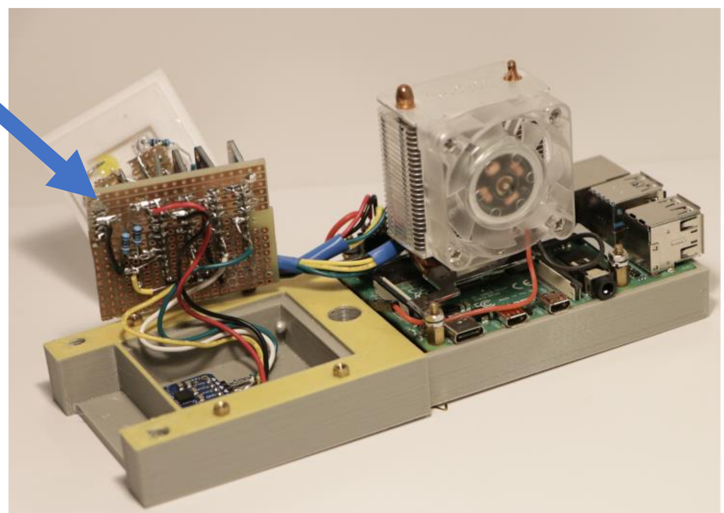
Interface utilisateur :
- 2 boutons
- 3 LED (script, données, wifi)

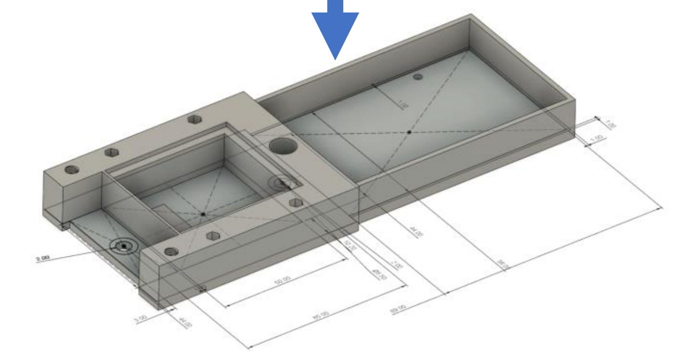
Le circuit électronique relié à l'accéléromètre



Coiffe piézoélectrique

Plaque du convertisseur analogique numérique





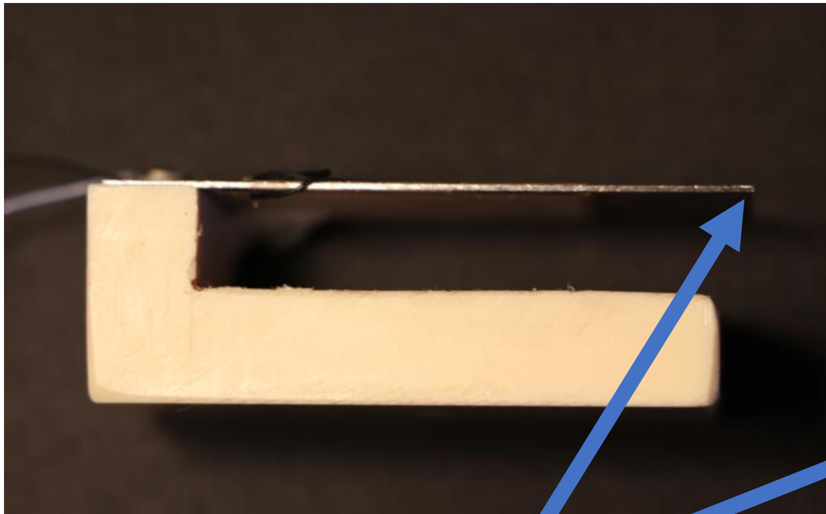
Source : Rapport de stage Sorbonne Université

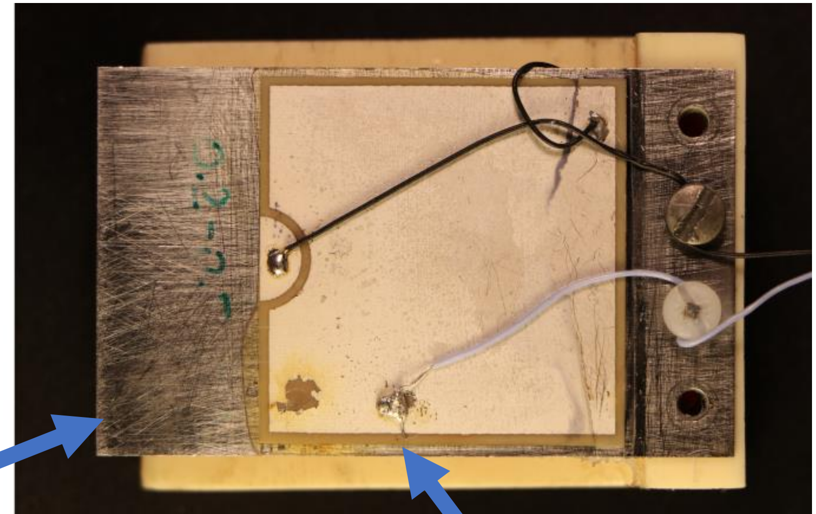
1 - Présentation du système

- Assurer une liaison rigide entre le vélo, le piézo-électrique et l'accéléromètre. ✅
- Maintenir fermement la Raspberry Pi ✅
- Permettre d'accéder facilement aux composants sur le tube diagonal ✅

- Assurer une liaison rigide entre le vélo et la batterie ☹

1.1 - Description des composants





Plaque en métal rigide
Fixée sur un support plastique rigide

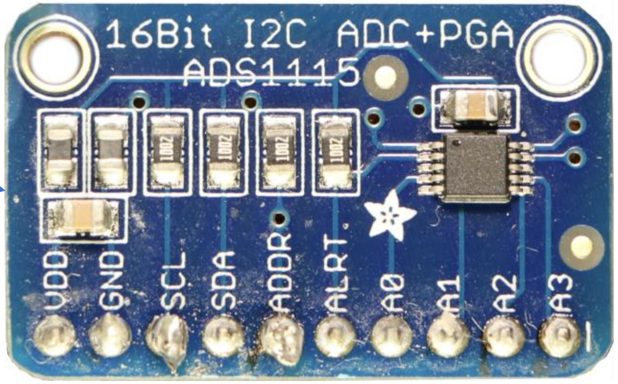
<u>Dipôle piézo-électrique</u>

- Capteur piézo-électrique ⇔ générateur de tension alternative

Source : Rapport de stage Sorbonne Université

1.1 - Description des composants

<u>Le convertisseur analogique numérique (ADC)</u>



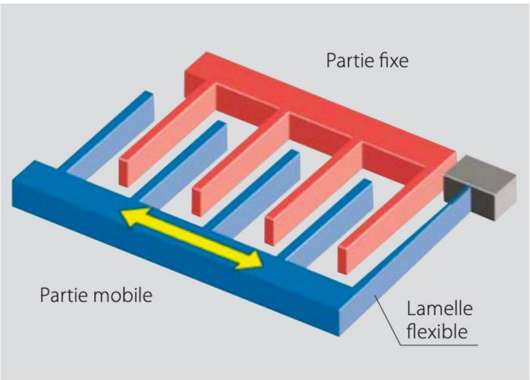
ADS1115 vu de dessus

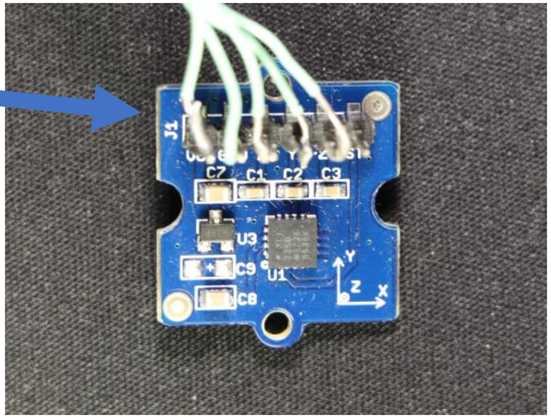
Les convertisseurs analogiques numériques ⇔ voltmètres miniatures.

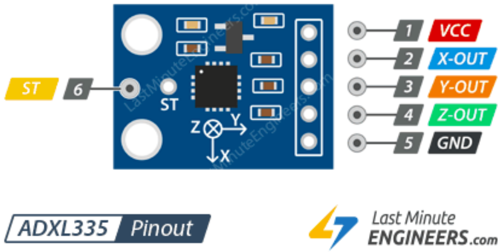
Source : Rapport de stage Sorbonne Université

1.1 - Description des composants

<u>L’accéléromètre analogique</u>







Variation vitesse

➔ accélération

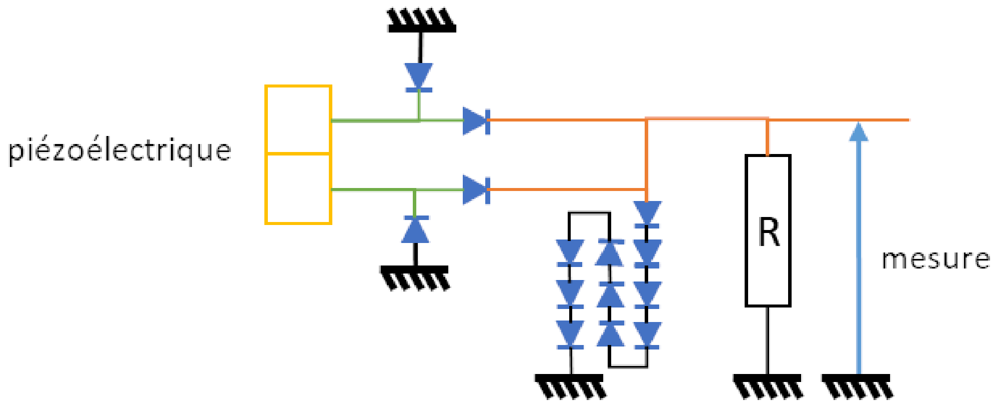
➔ déplacement du peigne mobile de quelques dizaines de nanomètres. Modification de la capacité électrique équivalente.

➔ signaux analogiques dont les amplitudes sont proportionnelles à l’accélération

Source:https://eduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr.sti/files/ressources/techniques/1386/1386-172-p54.pdf

1.2 - Montage initial

<u>Montage électronique</u>



- Le signal est redressé par un pont de Graetz ➔ perte de 1,2V sur la mesure

<u>Objectif du pont de Graetz :</u>

- Redressement à double alternance ➔ rendre l'alimentation linéaire

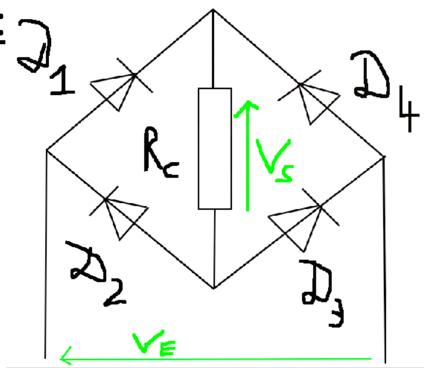
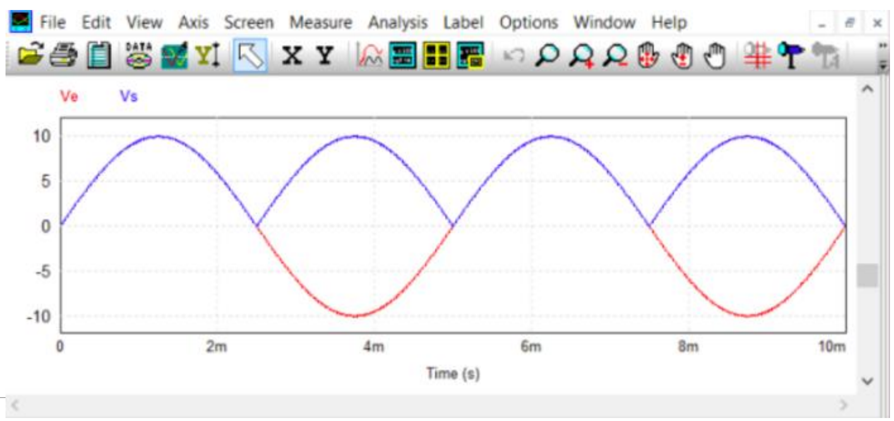


Figure réalisée sur Paint représentative du circuit sur PSIM



Redressement à l'aide de PSIM

1.2 - Montage initial

Montage informatique :

Etudiants Sorbonne : Le Raspberry Pi + programme informatique

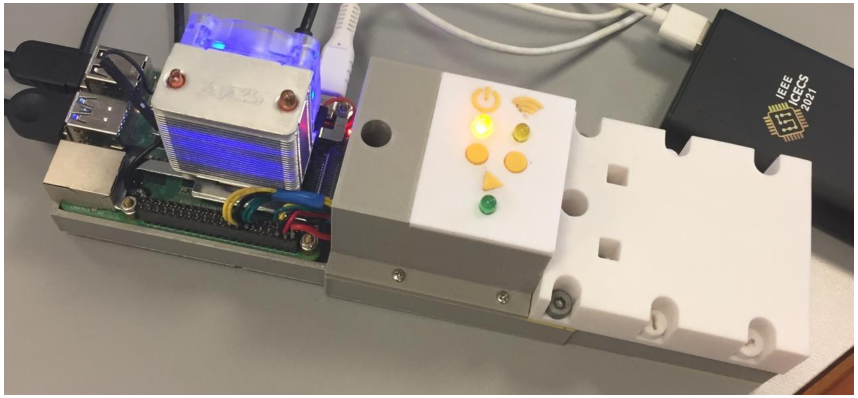
Programme = un seul fichier :

- Se déclencher au démarrage du Raspberry Pi
- Créer les fichiers contenant les résultats
- Ecrire les mesures du système dans ces fichiers résultats.

Aucune modification dans le code de récupération seulement celui de l’analyse

Boite et assemblage :

Récupéré comme tel :



1.3 Présentation du programme initial

Le programme initial:

Permet de :
- Lire le fichier csv
- Changer les cellules en float
- Passage des unités binaires du processeur aux unités physiques
- Tout afficher en graphe

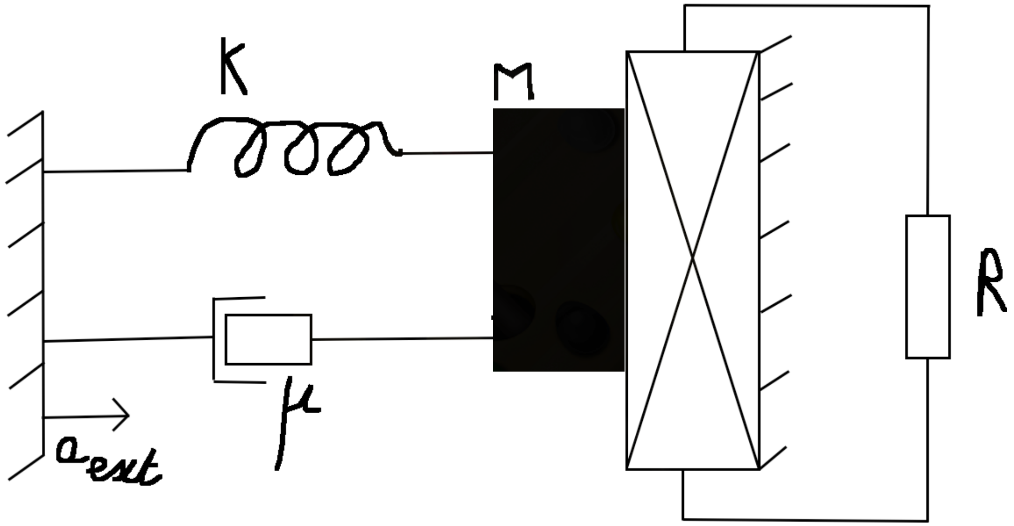
ANNEXE 1 *Le programme a été écrit sur Visual Studio Code*

Le programme qui suit :

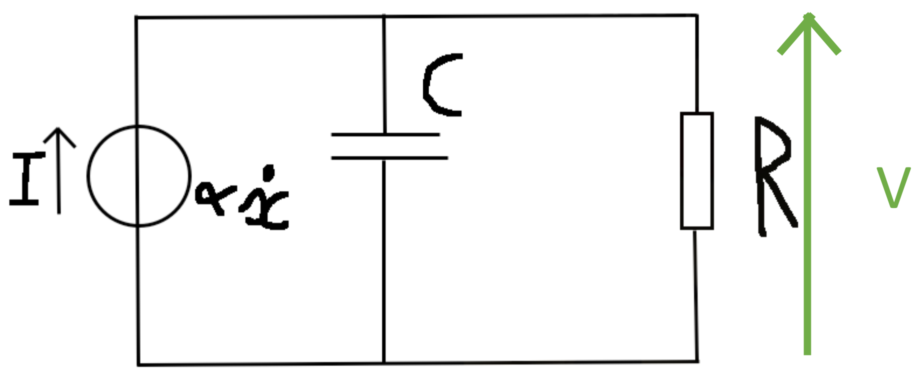
Développer à l'aide du modèle du couplage électromécanique qui suit.

1.4 - Couplage électromécanique

Modèle mécanique du circuit :



Modèle électrique :



Figures réalisées sur Paint

<u>Modèle électrique :</u>

D'après la loi des nœuds :

I = $I_1 + I_2$

$$\boxed{C\frac{dV}{dt} + \frac{V}{R} = \frac{dx}{dt}\alpha}$$

Car :

q = C× V ⇔ $\frac{dq}{dt} = \boxed{I_1 = C\frac{dV}{dt}}$

Et d'après la loi d'Ohm :

V = RI_2 ⇔ $\boxed{I_2 = \frac{V}{R}}$

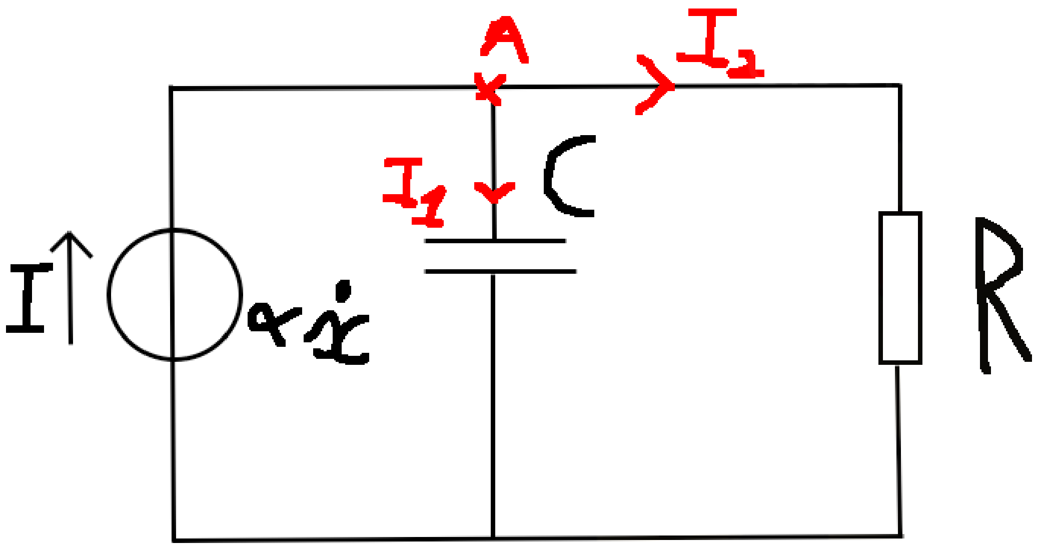
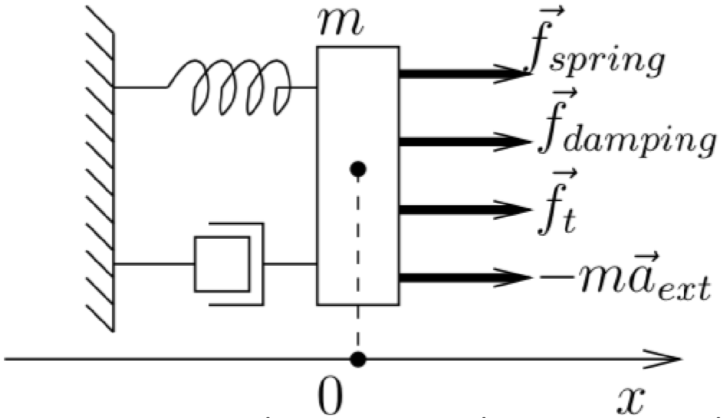


Figure réalisée sur Paint

1.4 - Modèle mécanique

Hypothèses :

- Référentiel terrestre supposé galiléen
- Transducteur approximé à un point ponctuel



Source : More than Moore: Vibration energy harvesting cours Sorbonne, Dimitri Galayko

On isole : Le transducteur

Bilan des forces :

- Force élastique du ressort : $\overrightarrow{F_{élastique}} = -kx\,\overrightarrow{u_x}$
- Force de frottement : $\overrightarrow{F_{frottement}} = -\mu\dot{x}\,\overrightarrow{u_x}$
- Accélération extérieure : $\overrightarrow{F_{ext}} = -ma_{ext}\,\overrightarrow{u_x}$
- Une force du transducteur : $\overrightarrow{F_t} = \alpha_{\dot{x}} V\,\overrightarrow{u_x}$

D'après le PFD appliqué au transducteur :

$$\boxed{\sum \overrightarrow{F_{ext}} = m\vec{a}}$$

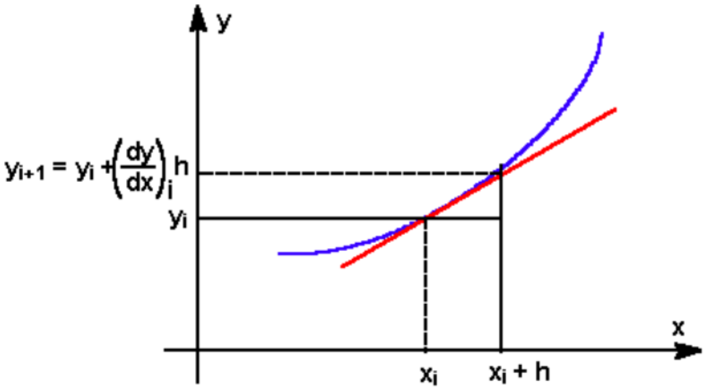
En projection selon $\overrightarrow{u_x}$

$$\boxed{-kx - \mu\dot{x} - ma_{ext} + F_t = m\ddot{x}}$$

1.4 - Résolution couplage électromécanique

<u>Méthode d'Euler explicite :</u>

- Méthode numérique itérative
- Obtention d'une solution d'une équation différentielle à partir des conditions initiales

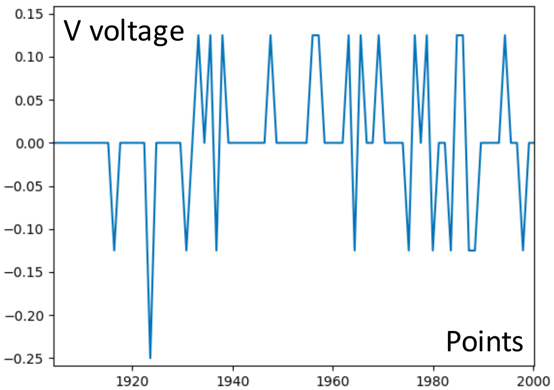


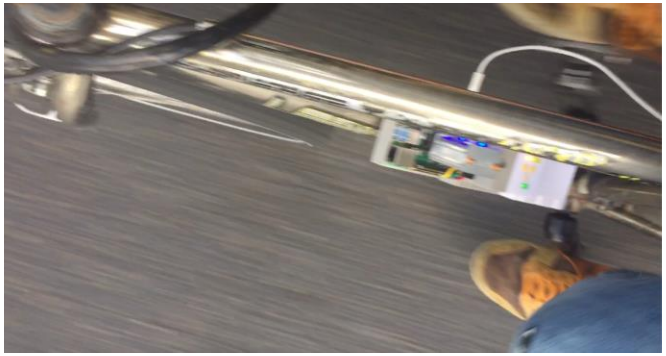
ANNEXE 2 et 3

Source : https://www4.ac-nancy-metz.fr/physique/ancien_site/divers/MethodNum/euler/EULER.htm

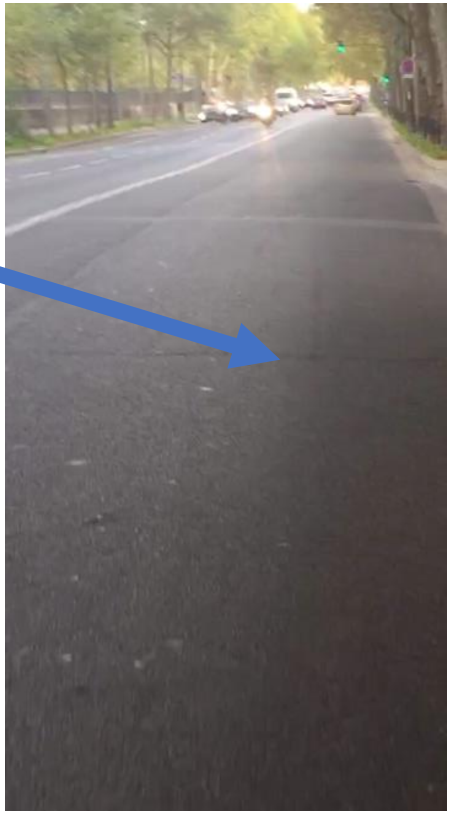
2 – Vérification des performances

Résultats des mesures:





Route de type bitume



Interprétation des mesures:

Échec sur le bitume :

- Les données sont inexploitables
- tension de bruit sûrement

Annexe 4 et 5

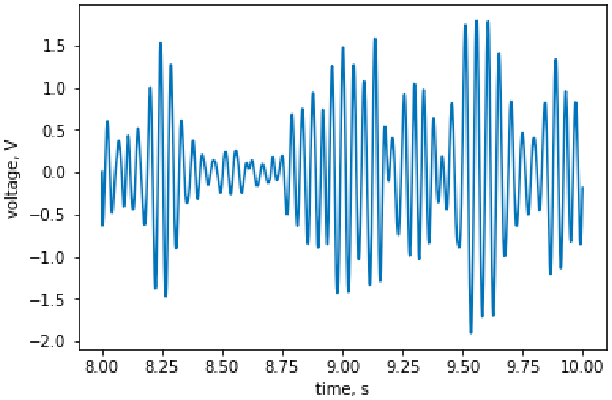
Première limite du système :

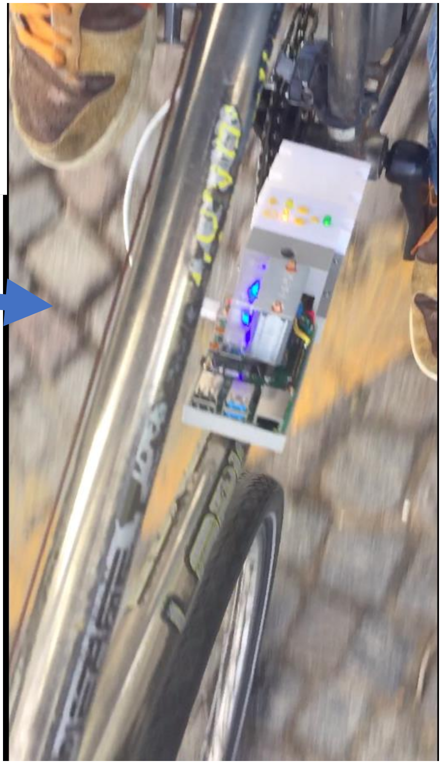
- Le pont de Graetz empêche toute mesure
- La vibration de la route est trop faible

Source : Rapport de Stage la Sorbonne

2 - Vérification des performances

Résultats des mesures :





Route de type pavé

Interprétation des résultats :

- Malgré le pont de Graetz, tension délivrée
- Tension de pics réutilisables

Deuxième limite du système :

- Tension délivrée faible à récupérer

Annexe 6

3 - Vérification de l’efficacité du système

Etude du modèle de poutre en flexion :

Données :

- Longueur, largeur, épaisseur : 5cm, 3cm, 0,5mm
- Matériau : Acier
- Raideur du support >> raideur piézo
- Support uniquement pour modélisation mécanique
- Masse ajoutée au bout de la poutre : 10-20g (max 50g)
- K la raideur et m la masse

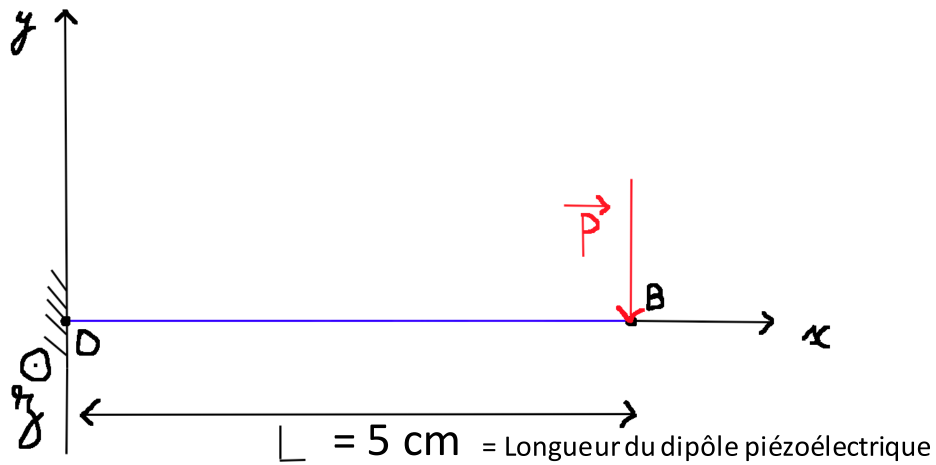


Figure réalisée avec Paint

Hypothèses de la RDM :

- Sur le matériau
- Navier–Bernouili (section de droites ⊥)
- Petites déformations
- Barré Saint Venant
- Géométrie du solide (facteur 5)

3.1 - Etude de la raideur maximale

Objectif : Détermination du torseur de cohésion

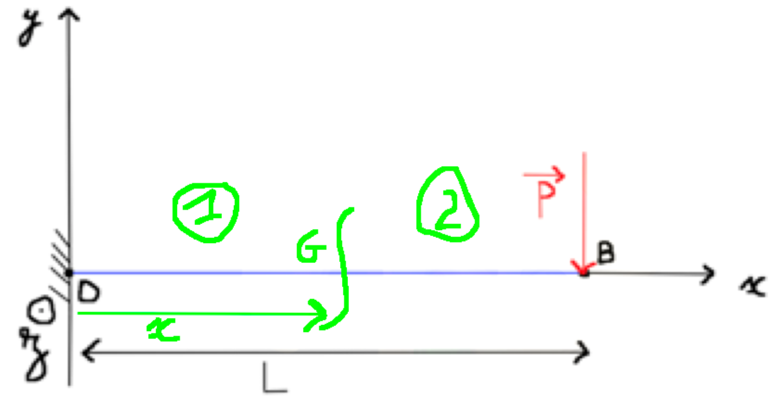


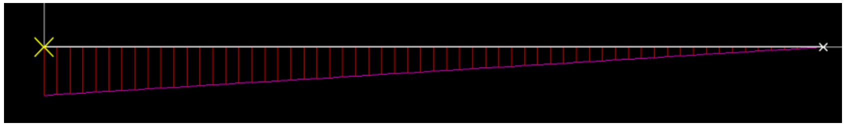
Figure réalisée sur Paint

On isole : Le tronçon 2

$$\{\tau_{coh}\} = \left\{\tau_{ext\to\boxed{2}}\right\}_G = \left\{\begin{matrix} \vec{R}_{ext\to\boxed{2}} \\ \vec{M}_{G,ext\to\boxed{2}} \end{matrix}\right\}_G$$

D'où $$\{\tau_{coh}\} = \left\{\begin{matrix} -P\vec{u}_y \\ -P(L-x)\vec{u}_z \end{matrix}\right\}_G$$

Le moment fléchissant : $$\boxed{M_{f_z} = -P(L-x)}$$



Moment fléchissant : max MFZ = 2.50 N.cm

max : Poutre 1 - X = 0.00 cm

Valide comparé à la modélisation

L'équation de la déformée : $$\boxed{\frac{d^2u_y}{dx^2} = \frac{M_{f_z}}{EI_{(G,\vec{z})}}}$$

3.1 - Etude de la raideur maximale

<u>Objectif :</u> Détermination de la raideur max en flexion :

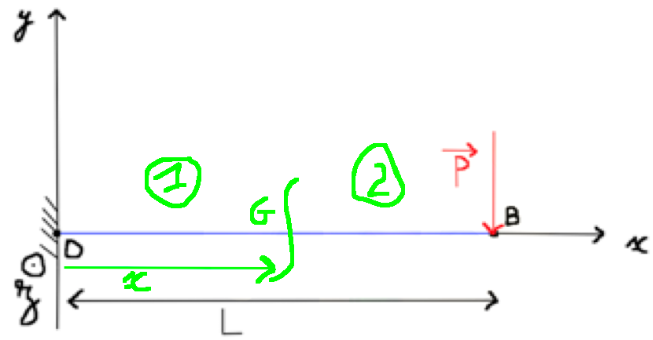


Figure réalisée sur Paint

<u>Equation de la déformée après deux intégrations :</u>

$$\boxed{EI_{(G,\vec{z})}u_y(x) = -\frac{P}{6}(L-x)^3 + C_1x + C_2}$$

<u>Grâce aux conditions initiales :</u> $C_1 = -\frac{PL^2}{2}$ $\quad$ $C_2 = -\frac{PL^3}{6}$

<u>L'équation de la déformée devient :</u>

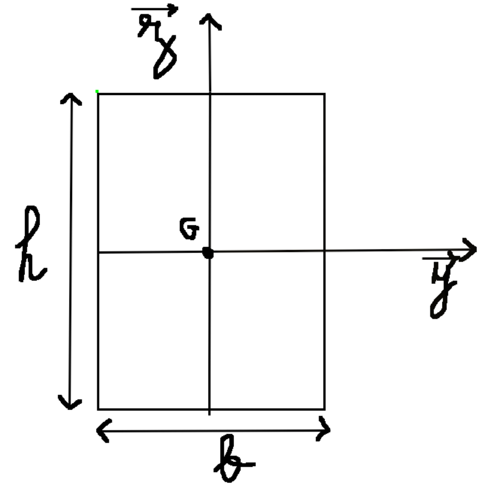
$$\boxed{u_y(x) = \frac{1}{EI_{(G,\vec{z})}}\left(-\frac{P}{6}(L-x)^3 - \frac{PL^2}{2}x + \frac{PL^3}{6}\right)}$$

<u>La flèche :</u> $\delta = u_y(L_0) = -\frac{PL_0^3}{3EI_{(G,\vec{z})}}$

<u>La raideur max :</u> D'après la loi de Hooke : $\boxed{k_{flex} = \frac{P}{|\delta|} = \frac{3EI_{(G,\vec{z})}}{L_0^3}}$

3.1 - Etude de la raideur maximale

Objectif : Détermination de la raideur max en flexion :



$$k_{flex} = \frac{P}{|\delta|} = \frac{3EI_{(G,\vec{z})}}{L_0^3}$$

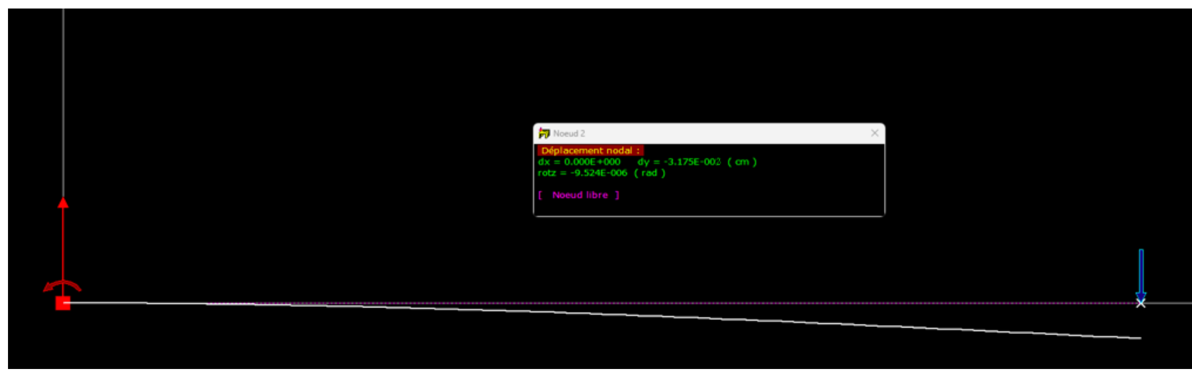
Application numérique :

$$E_{acier} = 210GPa$$

$$I_{(G,\vec{z})} = \frac{bh^3}{12} \Leftrightarrow \boxed{I_{(G,\vec{z})} =^{AN} 0{,}3125\ mm^4}$$

Avec h=0,5mm et b = 3cm

$$\boxed{k_{flex\,max} = 1{,}57\ N.mm^{-1}}$$



Interprétation :

On a : $\boxed{|\delta| = 3{,}175 \times 10^{-2}\ cm}$

$$\boxed{k_{flex\,max} = \frac{P}{|\delta|} =^{AN} 1{,}574\ N.mm^{-1}}$$

Source : RDM 7.04 Ossatures

3.2 Vérification de l’énergie récupérable

Expression énergie récupérable :

$$E_{récupérable} = P \times t$$

$$E_{récupérable} = \sum VIdt$$

D’après la loi d’ohm : V = RI

$$\boxed{E_{récupérable} = \sum \frac{V^2}{R}}$$

$$\boxed{E_{récupérable} =^{AN} 4{,}70 \times 10^{-6} J}$$

Expression de la puissance :

$$\boxed{P_{moy} = \frac{E_{récupérable}}{(b-a)}}$$

$$\boxed{P_{moy} =^{AN} 2{,}35 \times 10^{-6} W}$$

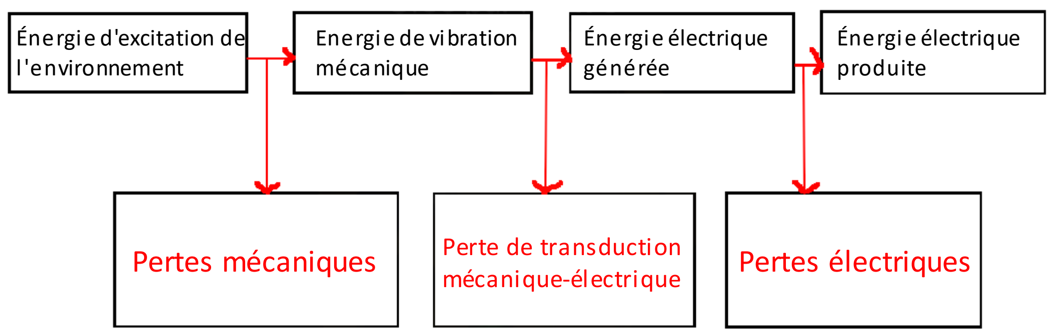
```
alpha = 0.4e-4
V0=0
C=10e-9
R=10e6

a=8
b=10
p=0.001
tel, V = euler_explicite(dV, a, b, 0, p)

Wr_ab=0
for val in V:
    Wr_ab=Wr_ab+val**2/R*p

Pr_ab=Wr_ab/(b-a)
print('Energie recoltée : {:1.2e} J, Puissance moyenne entre a et b : {:1.2e}'.format(Wr_ab, Pr_ab))
```

```
Energie recoltée : 4.70e-06 J, Puissance moyenne entre a et b : 2.35e-06
```



CONCLUSION

- Travailler la géométrie du transducteur

- Adapter les paramètres électromécaniques

- Récupérer petite partie d'énergie présente dans l'environnement,
  l'objectif n'est jamais de récupérer l'énergie totale.

- Efficacité relative comparée à ce qu'aurait pu récupérer un système idéal

Annexes

Victor
Peccenini

N°18461

Annexe1 : Présentation du code initial

```
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
import PyQt5
import math
import scipy.integrate
import numpy as np
%matplotlib notebook
pd.options.mode.chained_assignment = None  # default='warn'




file_csv='/Users/pecce.victor/Desktop/prepa TIPE velo piezo/data_1667399308.csv'

# lire le fichier .csv dans la frame base
base=pd.read_csv(file_csv, sep=',', skipinitialspace=True, encoding="utf-8")

#Changer les types des cellules en float
for field in base.columns:
    base[field] = base[field].astype(float)



print(base[0:100])

# passage des unités binaires processeurs aux unités physiques
for i in base.index:
    base['Delta T (ms)'][i]= base['Delta T (ms)'][i]/1000000.0
    base['Time (s)'][i]= base['Time (s)'][i]/1000000.0
    base['Accel X (m/s^2)'][i]= (base['Accel X (m/s^2)'][i]-13130.0)*0.0202199
    base['Accel Y (m/s^2)'][i]= (base['Accel Y (m/s^2)'][i]-13130.0)*0.0202199
    base['Accel Z (m/s^2)'][i]= (base['Accel Z (m/s^2)'][i]-13130.0)*0.0202199
    base['Volt (V)'][i]= base['Volt (V)'][i]*0.000125

print(base[0:9])
```

```
# Les valeurs "temps accélération" utilisées dans la simulation

az=base['Accel Z (m/s^2)']
taz=base['Time (s)']/1000
```

```
plt.figure(1)
plt.plot(base['Time (s)'], base['Accel X (m/s^2)'])
plt.legend(['Ax'])
plt.figure(2)
plt.plot(base['Time (s)'], base['Accel Y (m/s^2)'])
plt.legend(['Ay'])
plt.figure(3)
plt.plot(base['Time (s)'], base['Accel Z (m/s^2)'])
plt.legend(['Az'])

#plt.figure(3)
#plt.plot(base['Time (s)'], base['Accel X (m/s^2)'])
#plt.plot(base['Time (s)'], base['Accel Y (m/s^2)'])
#plt.plot(base['Time (s)'], base['Accel Z (m/s^2)'])
#plt.legend(['Ax', 'Ay', 'Az'])



plt.figure(4)
#plt.plot(base['Time (s)'], base['Accel X (m/s^2)'])
#plt.plot(base['Time (s)'], base['Accel Y (m/s^2)'])
#plt.plot(base['Time (s)'], base['Accel Z (m/s^2)'])
plt.plot(base['Time (s)'], base['Volt (V)']*1000)
```

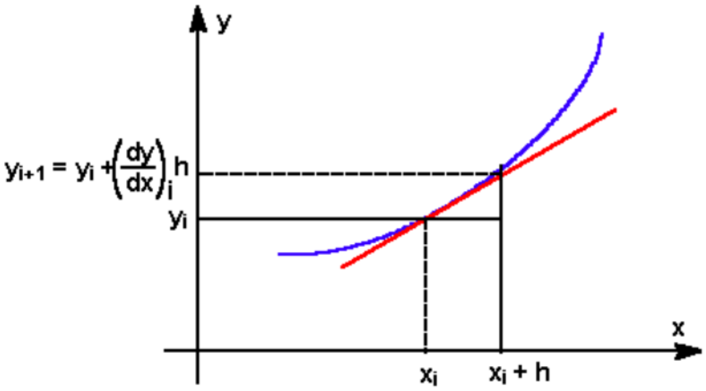
Code réalisé sous Visual code Studio

Annexe 2 – Euler explicite

Cas d'une équation différentielle du premier ordre dont la forme mathématique est : $\frac{dy}{dx} = f(x,y)$

A partir de la connaissance de la valeur de y = y_0 pour une valeur de x = x_0,

Calcul de la valeur : $\frac{dy}{dx}$ en ce point $\left(\frac{dy}{dx}\right)_0$



La valeur estimée de y pour x = x_0 + dx sera prise égale à : $y_0 + dy = y_0 + \left(\frac{dy}{dx}\right)_0 \times dx$

Appelons h le pas d'intégration

La valeur y_{i+1} est déterminée en ajoutant dy_i à la valeur y_i :

$y_{i+1} = y_i + dy_i = y_i + h\ f(x_i,y_i)$

Source : https://www4.ac-nancy-metz.fr/physique/ancien_site/divers/MethodNum/euler/EULER.htm

Annexe 3 – Euler explicite

```
#paramètres du résonateur
m=5e-3
k=100
Q=10
mu=math.sqrt(m*k)/Q

# La force exerne en fonction du temps
# retourne la valeur de l'accélératin multiplié par la masse
# A partir des données expérimentales, en utilisant la fonction interpolation
def Fext(t):
#    if t>0:
#        return 1
#    else :
#        return 0
#
    return np.interp(t, taz, -m*az)


def func(t,gamma):
    return [gamma[1], 1/m*(Fext(t)-mu*gamma[1]-k*gamma[0])]


#Création d'un objet "intégrateur d'équation différentielle dot gamma = func (gamma)"
r = scipy.integrate.ode(func)
# on définit les conditions initiales
r.set_initial_value([0,0], 0)

# On integre : la solution entre 0 et t1, avec un pas d'intégration de 0.0001 s
t1 = 10
dt = 0.0001
# on créé les tablaeux vides pour les solutions
x=[]
v=[]
t=[]
# On intègre l'équation pas par pas
while r.successful() and r.t < t1:
    gamma=r.integrate(r.t+dt)
    tx=np.append(t,r.t+dt)
    x=np.append(x,gamma[0])
    v=np.append(v,gamma[1])
```

```
def dV(V,C,R,i):
    return(( i - V/R)*(1/C))

def euler_explicite(dV, a, b, V0, p):
    V = V0
    tlist = [a]
    Vlist = [V0]
    for j in range(round((b-a)/p)):
        dVdt = dV(V, C, R, alpha*np.interp(j*p+a, tx, v))
#        dVdt = dV(V, C, R, 1)
        V = V + dVdt*p
        Vlist.append(V)
        tlist.append(p*j +a)
    return tlist, Vlist

alpha = 0.4e-4
V0=0
C=10e-9
R=10e6

a=8
b=10
p=0.001
tel, V = euler_explicite(dV, a, b, 0, p)
```

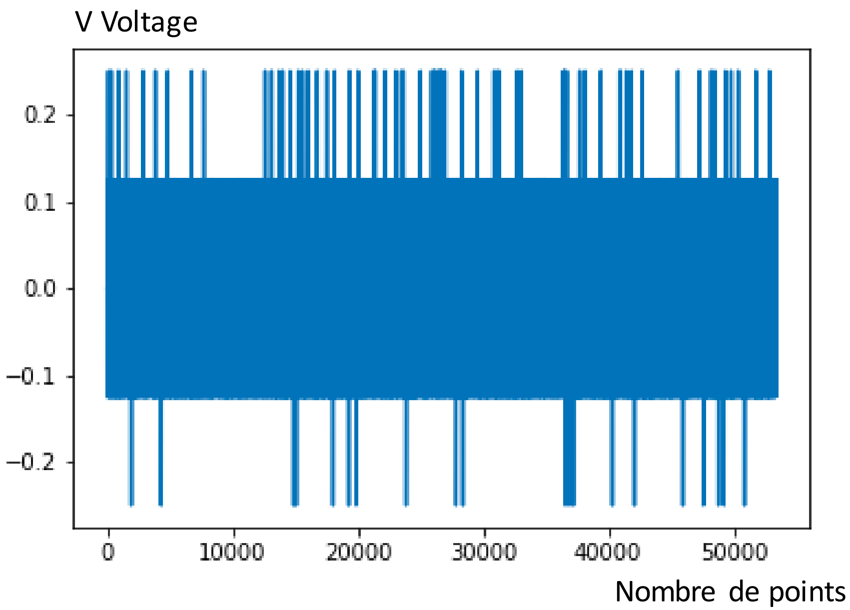
Annexe 4 – Mesures sur le bitume

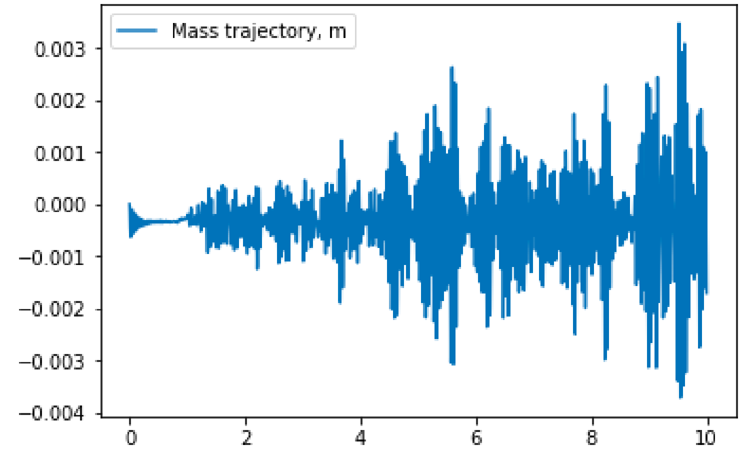
Les mesures sous forme de tableau :

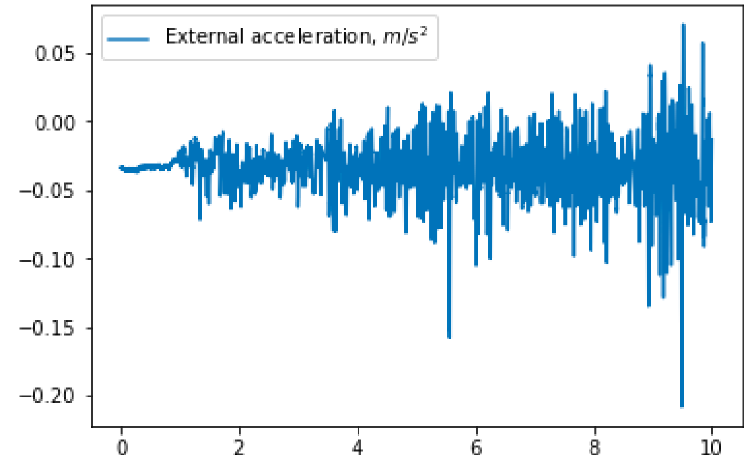
```
[79]
... Output exceeds the size limit. Open the full output data in a text editor
          Time (s)  Delta T (ms)  Accel X (m/s^2)  Accel Y (m/s^2)  \
0    2965269.0     2965269.0          13080.0          13480.0
1    4628549.0     1663280.0          13078.0          13481.0
2    6331776.0     1703227.0          13080.0          13471.0
3    7920908.0     1589132.0          13080.0          13482.0
4    9508687.0     1587779.0          13090.0          13484.0
5   11096263.0     1587576.0          13078.0          13478.0
6   12684728.0     1588465.0          13081.0          13477.0
7   14269451.0     1584723.0          13082.0          13472.0
8   15897862.0     1628411.0          13084.0          13483.0
9   17483419.0     1585557.0          13084.0          13480.0
10  19069438.0     1586019.0          13081.0          13476.0
11  20650677.0     1581239.0          13080.0          13481.0
12  22233769.0     1583092.0          13086.0          13482.0
13  23814509.0     1580740.0          13083.0          13476.0
14  25396952.0     1582443.0          13086.0          13478.0
15  26999943.0     1602991.0          13087.0          13487.0
16  28582387.0     1582444.0          13084.0          13484.0
17  30163200.0     1580813.0          13086.0          13479.0
18  31748497.0     1585297.0          13088.0          13478.0
19  33329106.0     1580609.0          13089.0          13479.0
20  34909808.0     1580702.0          13087.0          13477.0
21  36507778.0     1597970.0          13083.0          13475.0
22  38111399.0     1603621.0          13086.0          13477.0
23  39713167.0     1601768.0          13091.0          13475.0
...
5 -0.000125
6  0.000000
7 -0.000125
8  0.000000
```

Il ne s'agit que d'un échantillon ➔ voir le problème

Annexe 5 – Mesures sur le bitume



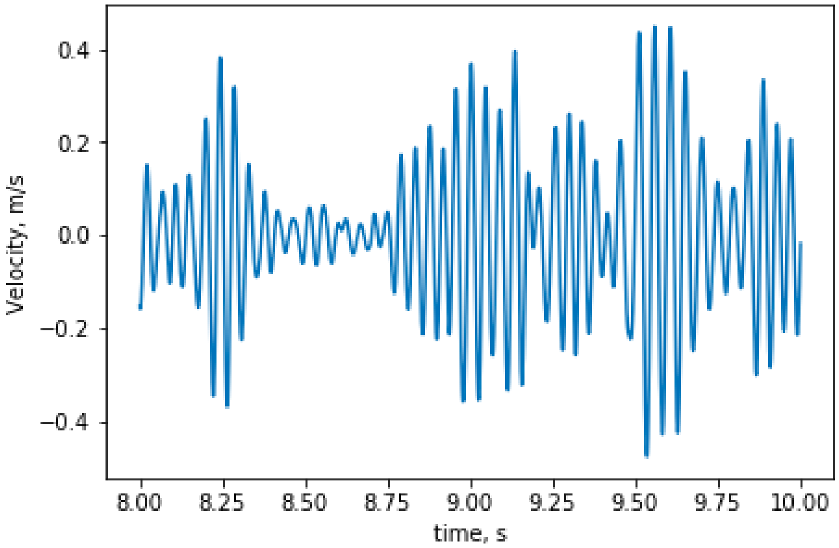


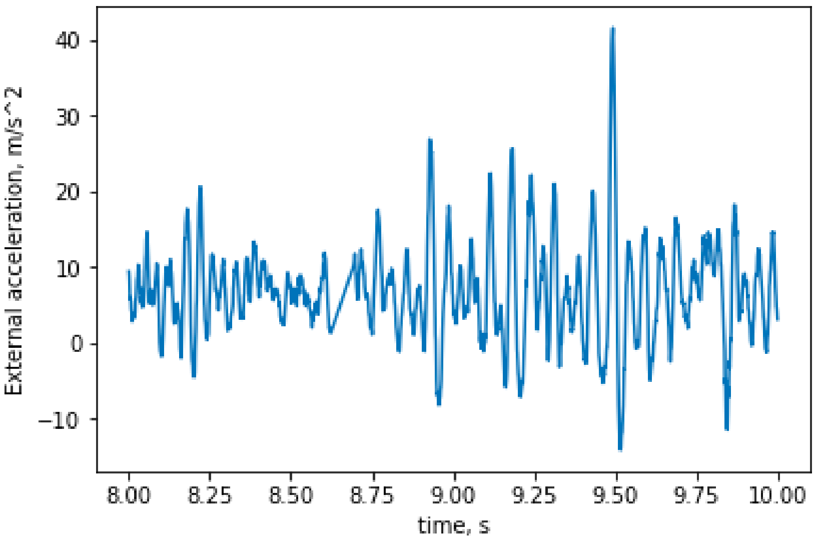


<u>Interprétation graphique des tensions :</u>

- 50 000 points ➔ phénomène de bruit visible, pas du sol

Annexe 6 – Mesures sur les pavés

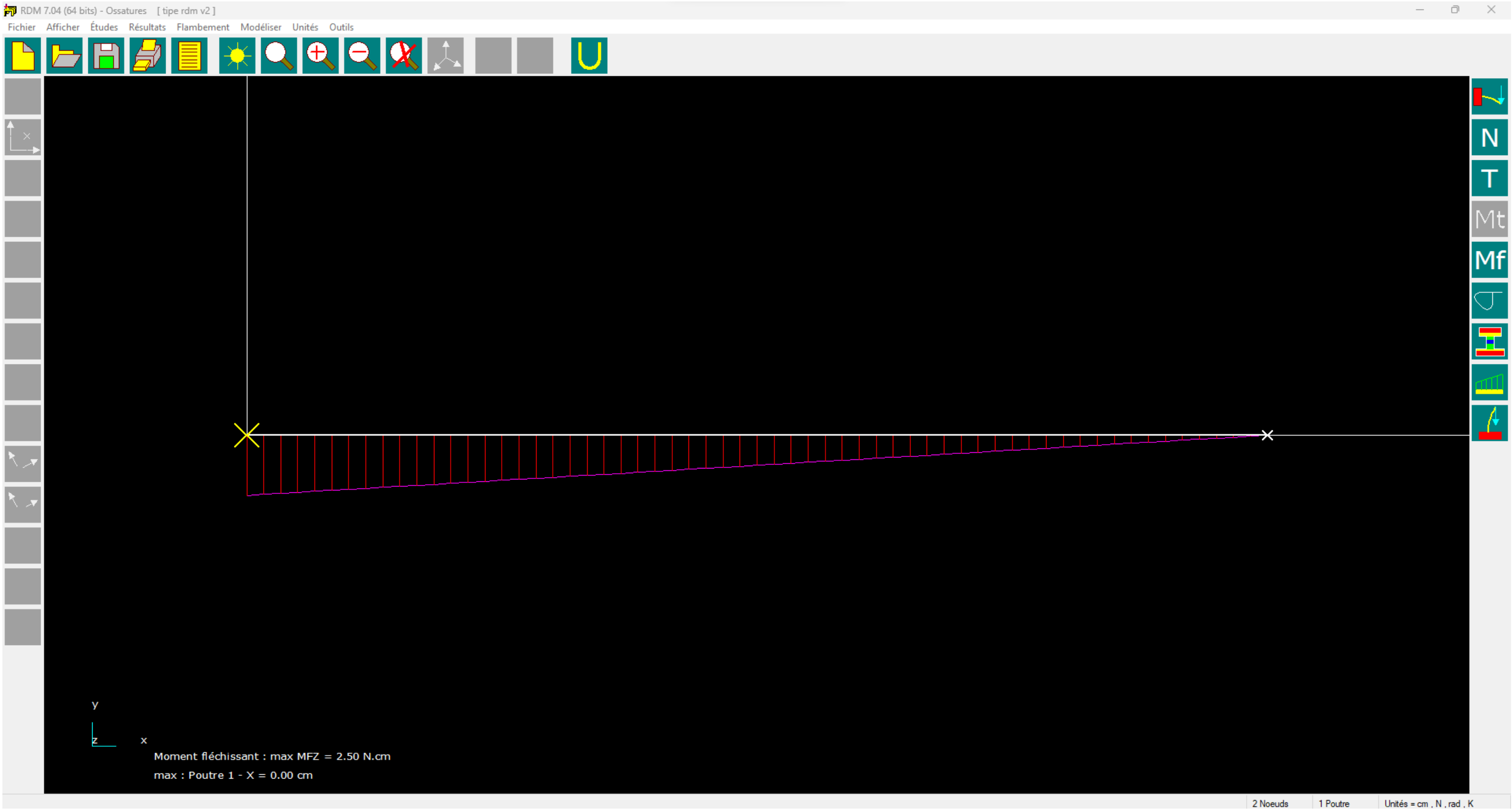




Interprétation :

- Des pics à |4m/s|.
- Des pics à plus de |10m/s^2|.

Annexe 7 – Modélisation poutre flexion



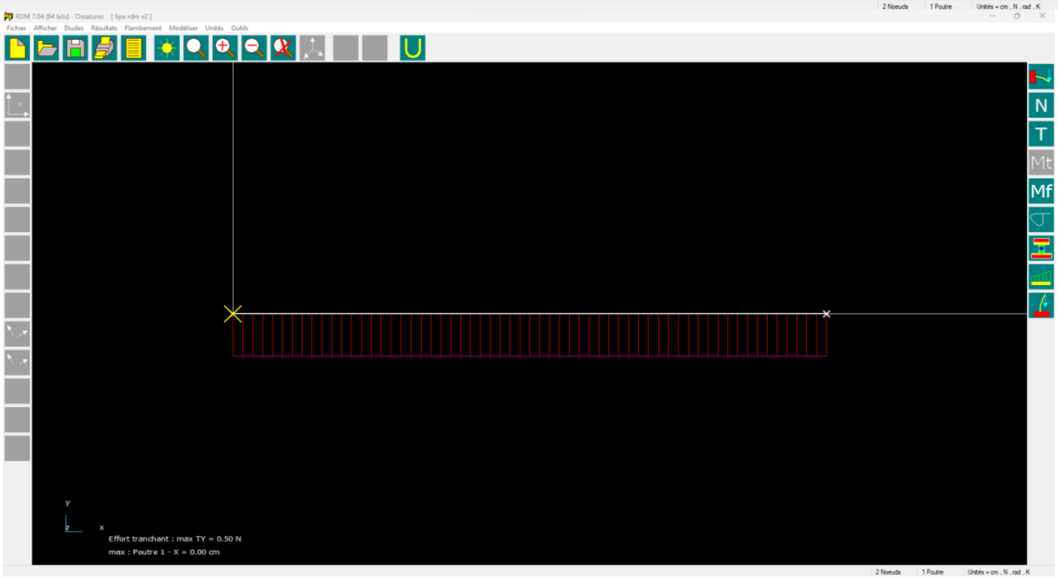
<u>Interprétation :</u>

- Bras de levier > à l'encastrement ⇔ le plus loin du bout libre

Source : RDM 7.04 Ossatures

Annexe 8 – Modélisation poutre flexion

Module de la contrainte normale (MF + N) : max = 0.20 MPa
max : Poutre 1 - X = 0.00 cm



Effort tranchant : max TY = 0.50 N
max : Poutre 1 - X = 0.00 cm

Source : RDM 7.04 Ossatures