



# Récupération d'énergie mécanique sur un vélo



THOMAZEAU Grégoire  
10638

# Introduction

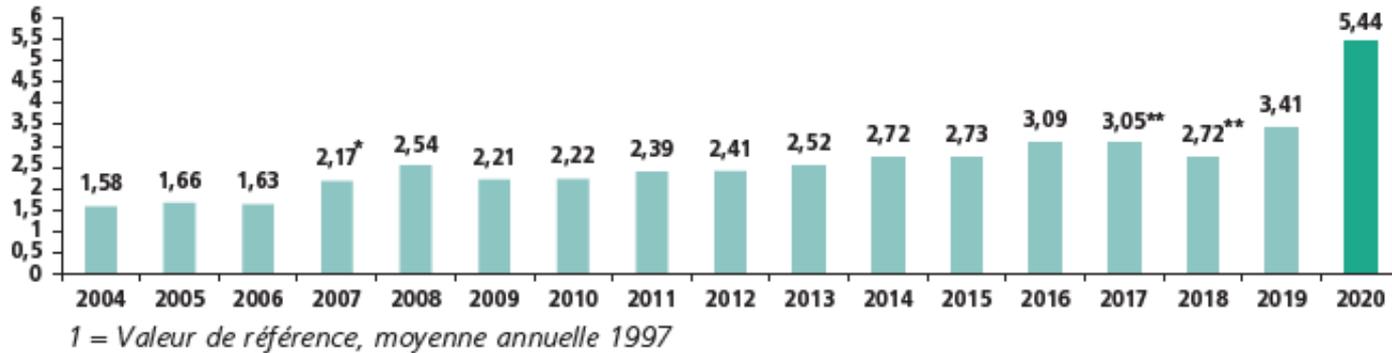


Figure 1: Indice d'évolution du nombre de vélo à Paris<sup>1</sup>



Figure 2: Usager du vélo



Figure 3: Feu rouge



Figure 4: Prototype de vélo récupérateur d'énergie<sup>2</sup>

1. VILLE DE PARIS, Le bilan des déplacements à Paris en 2020, « Indice d'évolution annuel du nombre de vélos entre 2003 et 2020 »
2. TOM STANTON, Flywheel Bike KERS, <https://www.youtube.com/watch?v=gahKxbwUcYw> (2021)

## Comment récupérer l'énergie cinétique perdue lors du freinage d'un cycliste afin de la lui restituer ultérieurement ?

### OBJECTIFS

Grégoire THOMAZEAU

Réaliser un volant d'inertie permettant de stocker de l'énergie sous forme mécanique

Déterminer la quantité maximale d'énergie restituée

Thomas ALBERT

Réaliser un dispositif permettant de stocker de l'énergie sous forme électrique

Déterminer la quantité maximale d'énergie électrique stockable

01

## PRÉSENTATION DU SYSTÈME

Présentation générale

Présentation des différents composants

02

## ÉTUDE DE LA ROUE LIBRE

Détermination de son moment d'inertie

Comparaison avec la théorie

03

## ÉTUDE DU SYSTÈME

Énergie maximale emmagasinée

Récupération d'énergie

Rendement



Figure 5: Vélo modifié avec le système de récupération d'énergie

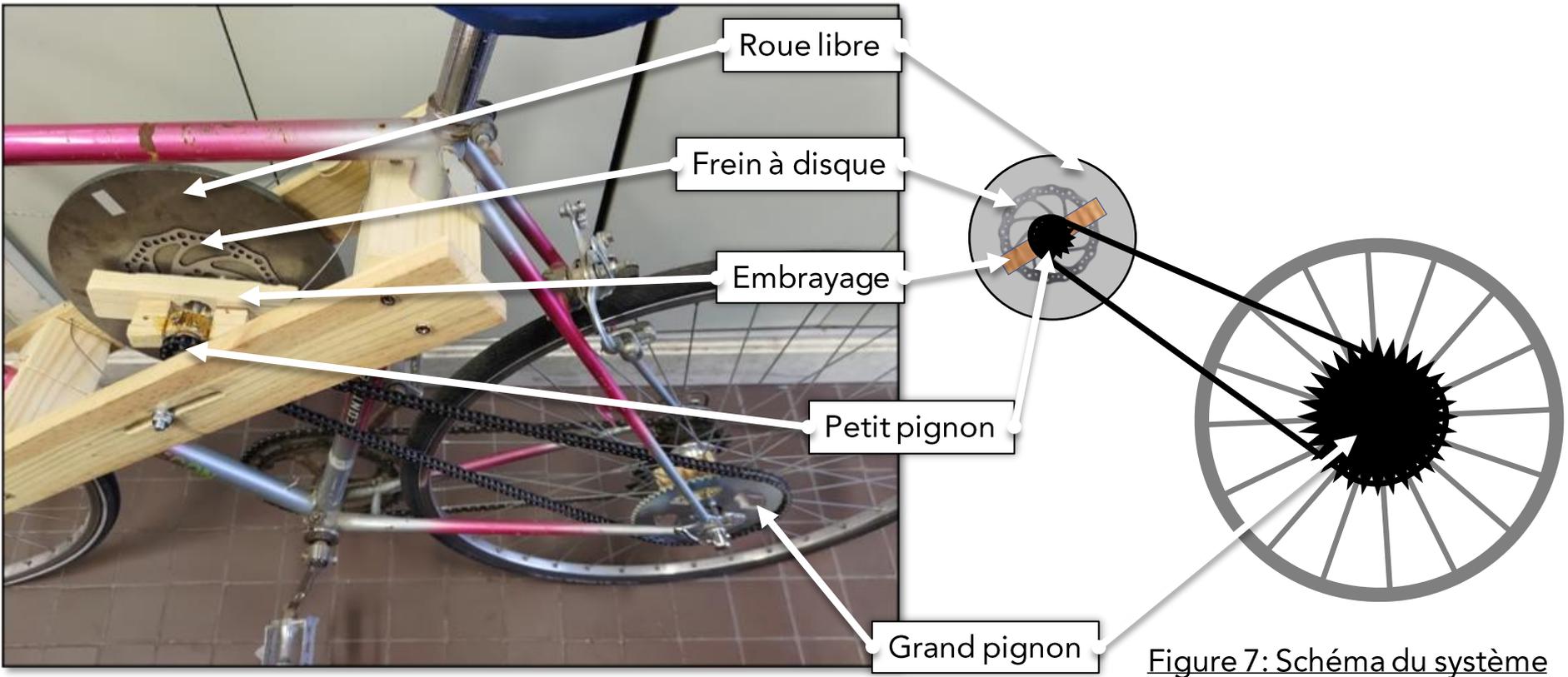


Figure 6: Système de récupération d'énergie

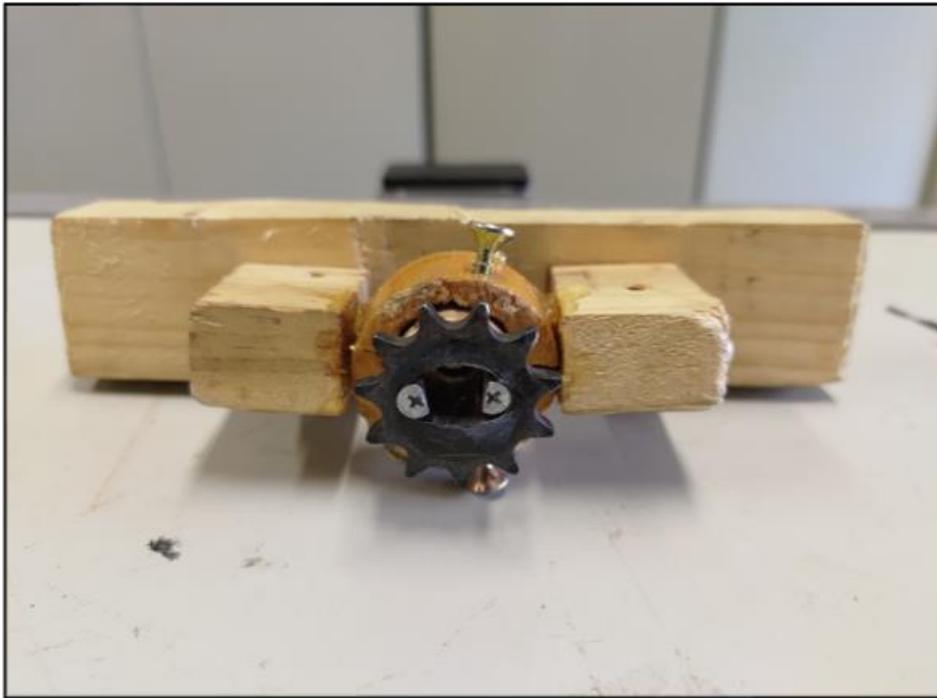


Figure 8: Embrayage vu de devant

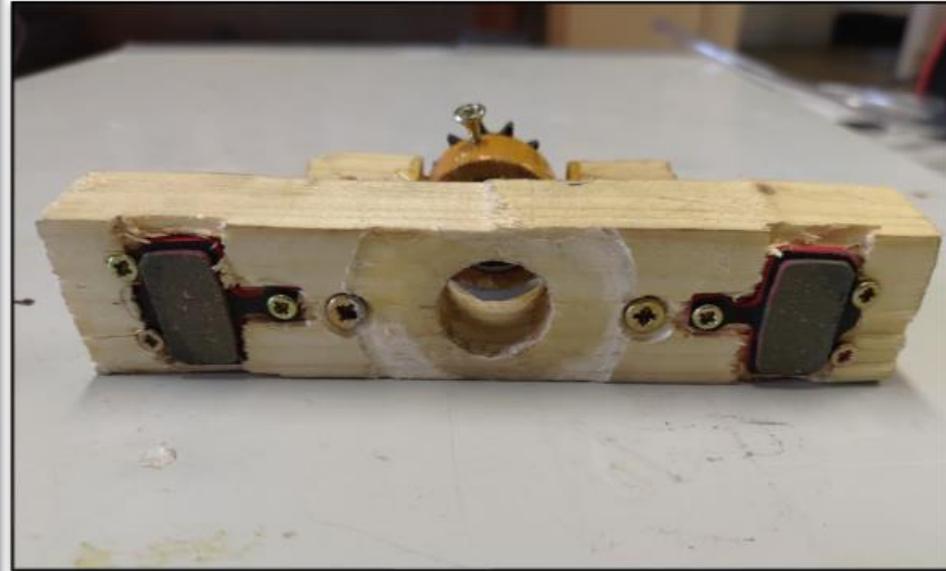


Figure 9: Embrayage vu de derrière

$$a = \frac{mR^2 g}{mR^2 + I_{\Delta}} \sin(\theta)$$

$$\theta \in \{6^{\circ}, 10^{\circ}, 15^{\circ}, 20^{\circ}, 25^{\circ}, 30^{\circ}\}$$



Figure 10: Roue libre

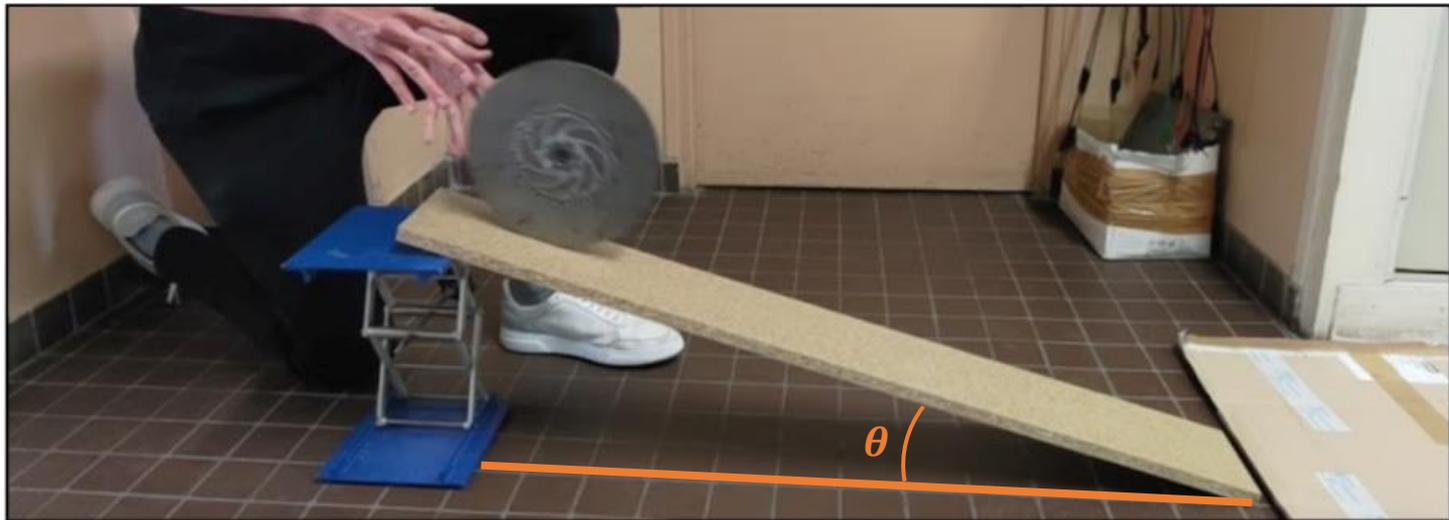


Figure 11: Expérience: Détermination du moment d'inertie de la roue libre

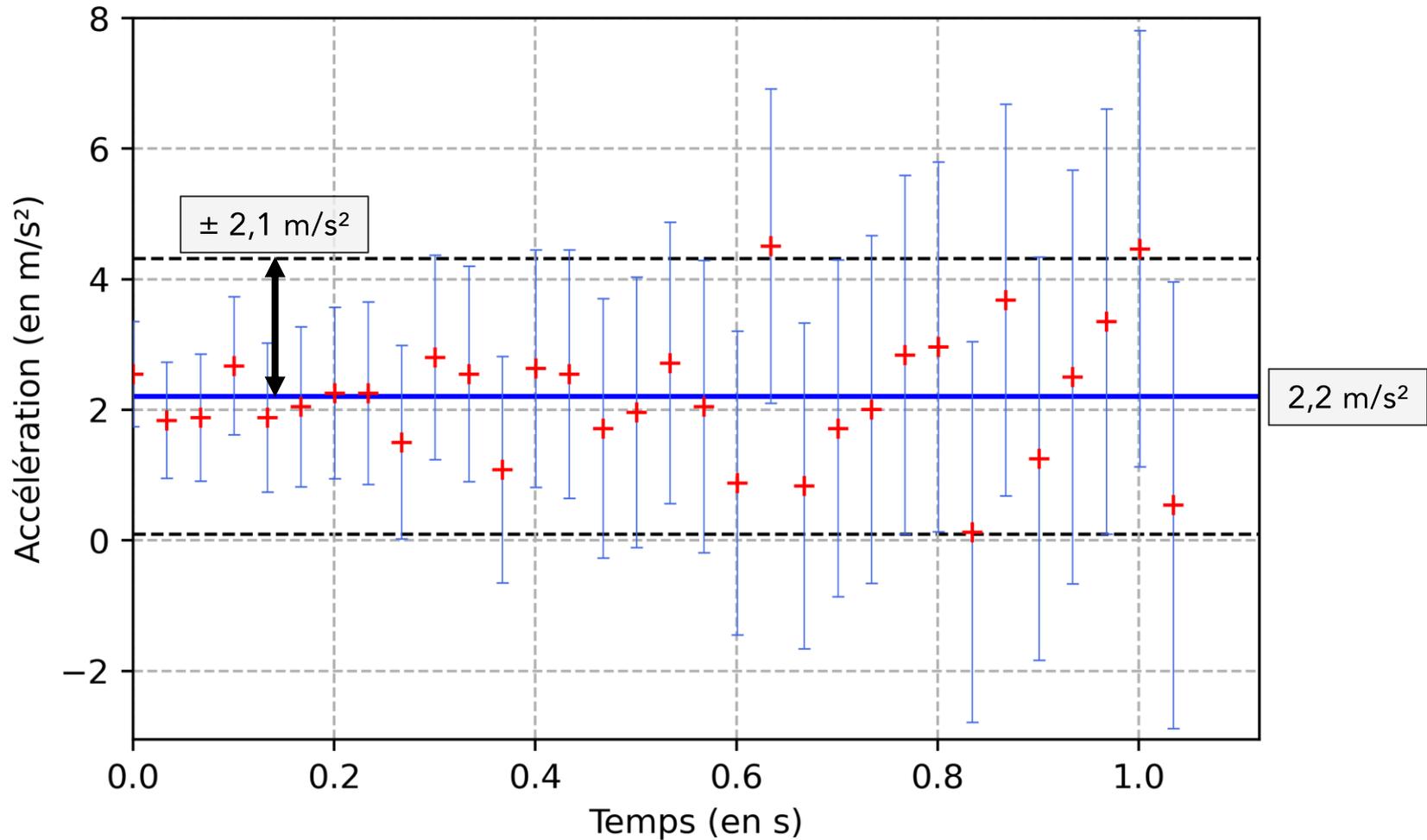
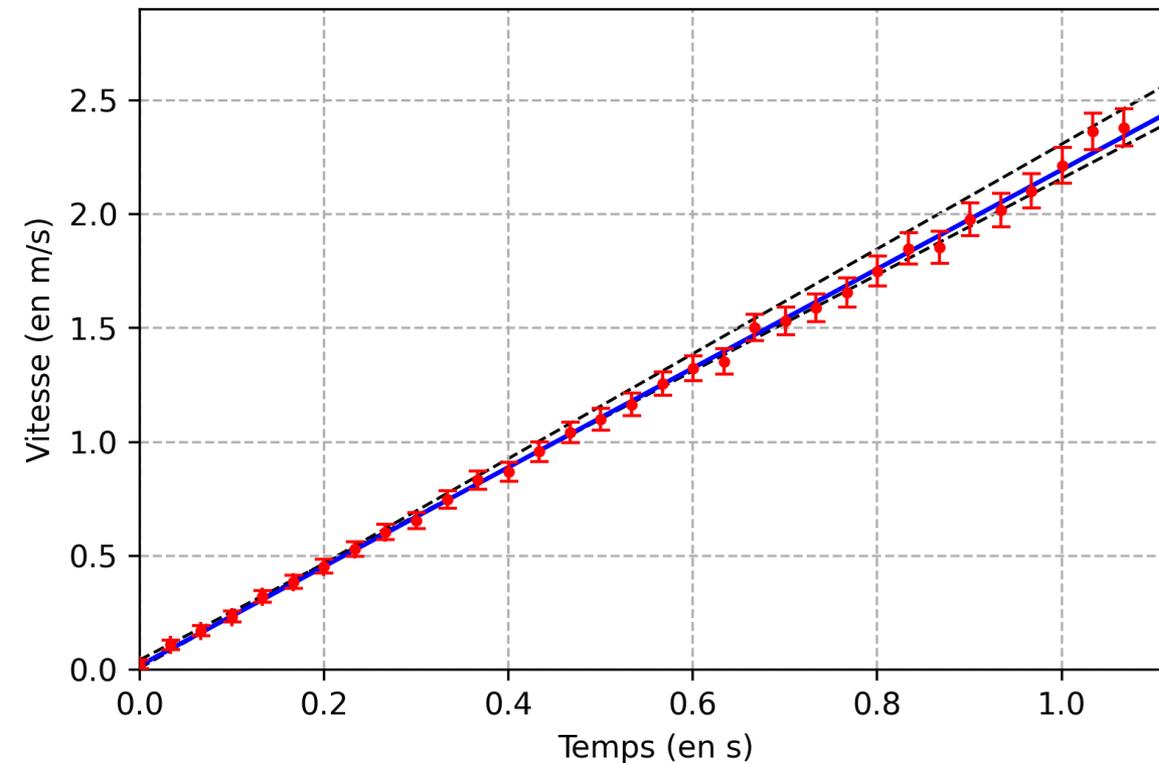
Pour  $\theta = 15^\circ$ 

Figure 12: Tracé de l'accélération de la roue libre en fonction du temps

Pour  $\theta = 15^\circ$



Régression linéaire:

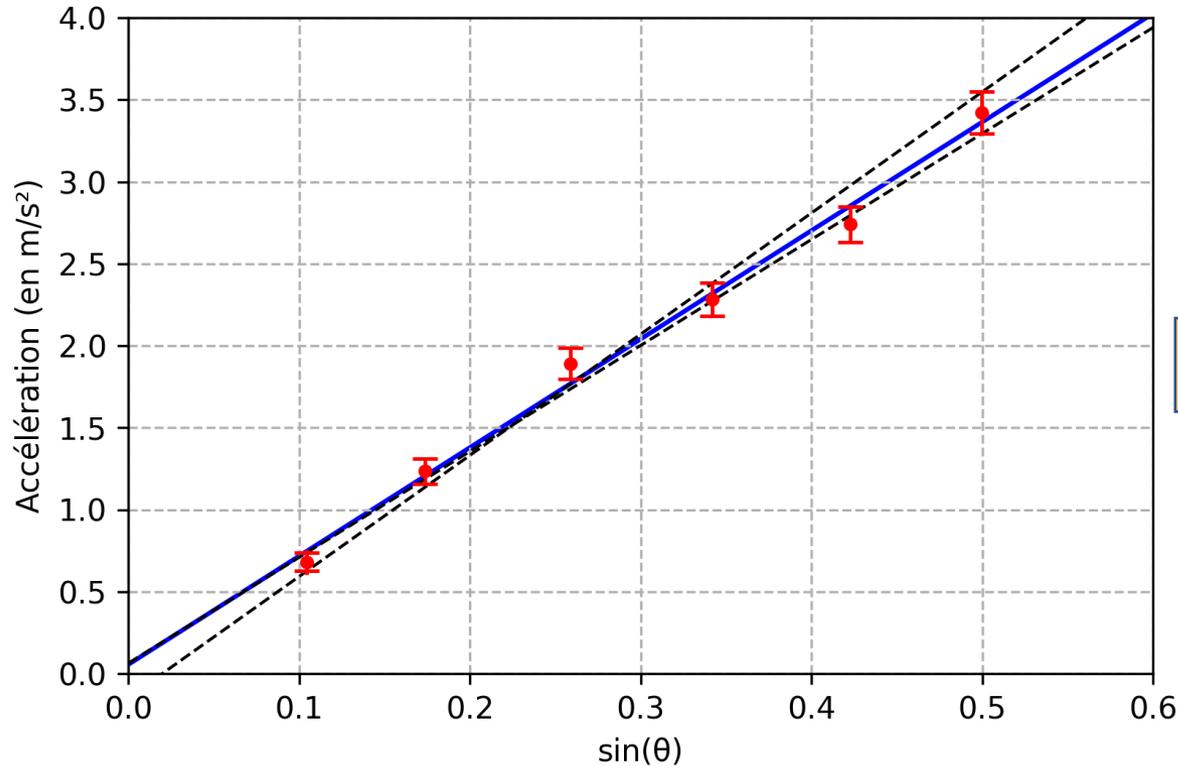
$$v = a * t + b$$

$$a = 2.2 \pm 0.1 \text{ m/s}^2$$

$$b = 0.02 \pm 0.02 \text{ m/s}$$

$$r^2 = 0.998$$

Figure 13: Tracé de la vitesse de la roue libre en fonction du temps



Régression linéaire:

$$a = A1 * \sin(\theta) + B1$$

$$A1 = 6.6 \pm 0.5 \text{ m/s}^2$$

$$B1 = 0.1 \pm 0.1 \text{ m/s}^2$$

$$r^2 = 0.992$$

Figure 14: Tracé de l'accélération de la roue libre en fonction de l'angle d'inclinaison du support

$$I_{\Delta,exp} = \frac{mR^2(g - A1)}{A1}$$

AN:  $I_{\Delta,exp} = 0.024 \pm 0.005 \text{ kg.m}^2$  à 95%

$$I_{\Delta,th} = \frac{mR^2}{2}$$

AN:  $I_{\Delta,th} = 0.025 \text{ kg.m}^2$

## MESURE DE L'ÉNERGIE STOCKÉE

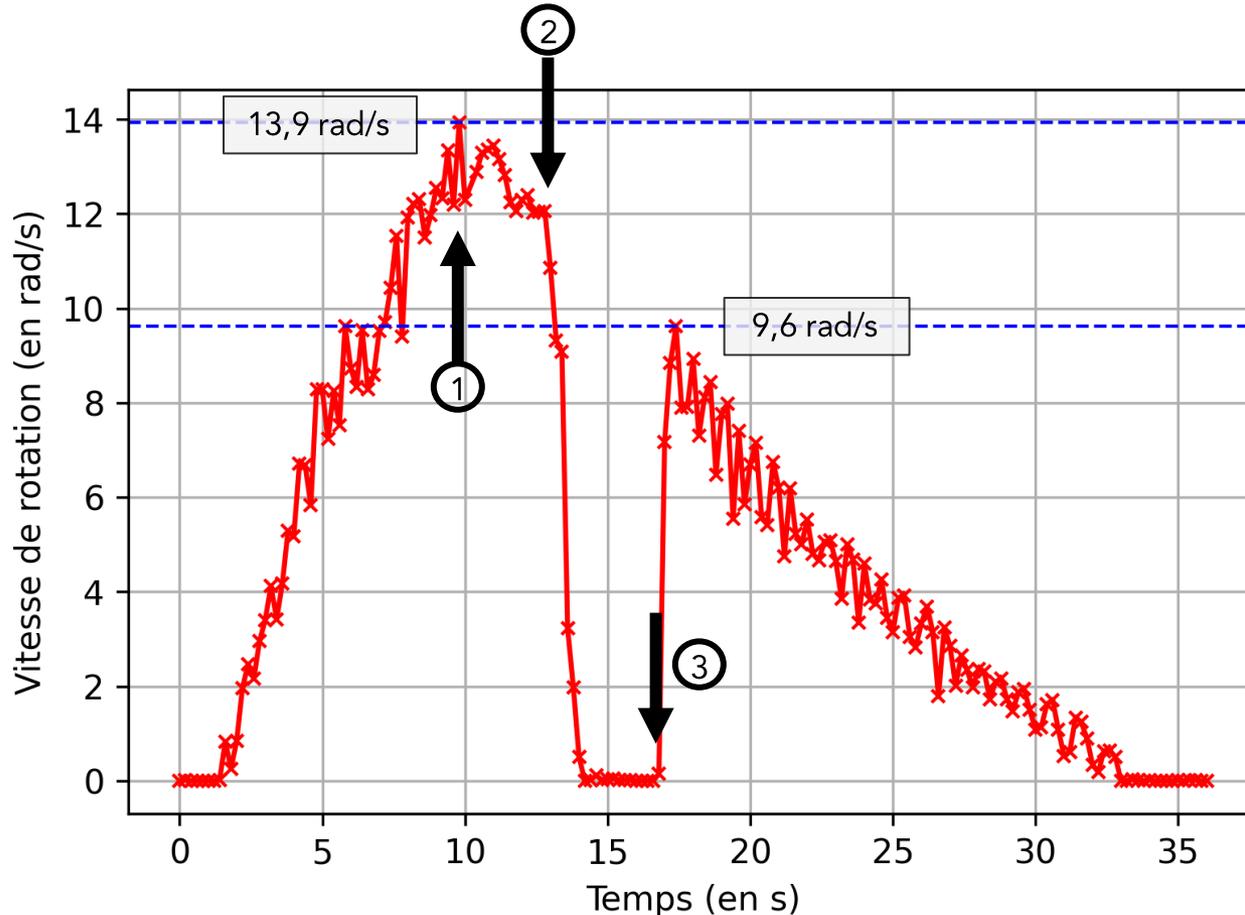


Figure 15: Prise de mesure de la vitesse de rotation de la roue arrière de vélo



Figure 16: Accéléromètre PocketLab Voyager

## Vélo à l'envers:



Vitesse angulaire recouvrée

69% de  $\omega_{\max}$

Énergie recouvrée

48% de  $E_{\max}$

Figure 17: Tracé de la vitesse de rotation de la roue arrière de vélo en fonction du temps (Expérience 1)

## Vélo à l'endroit:

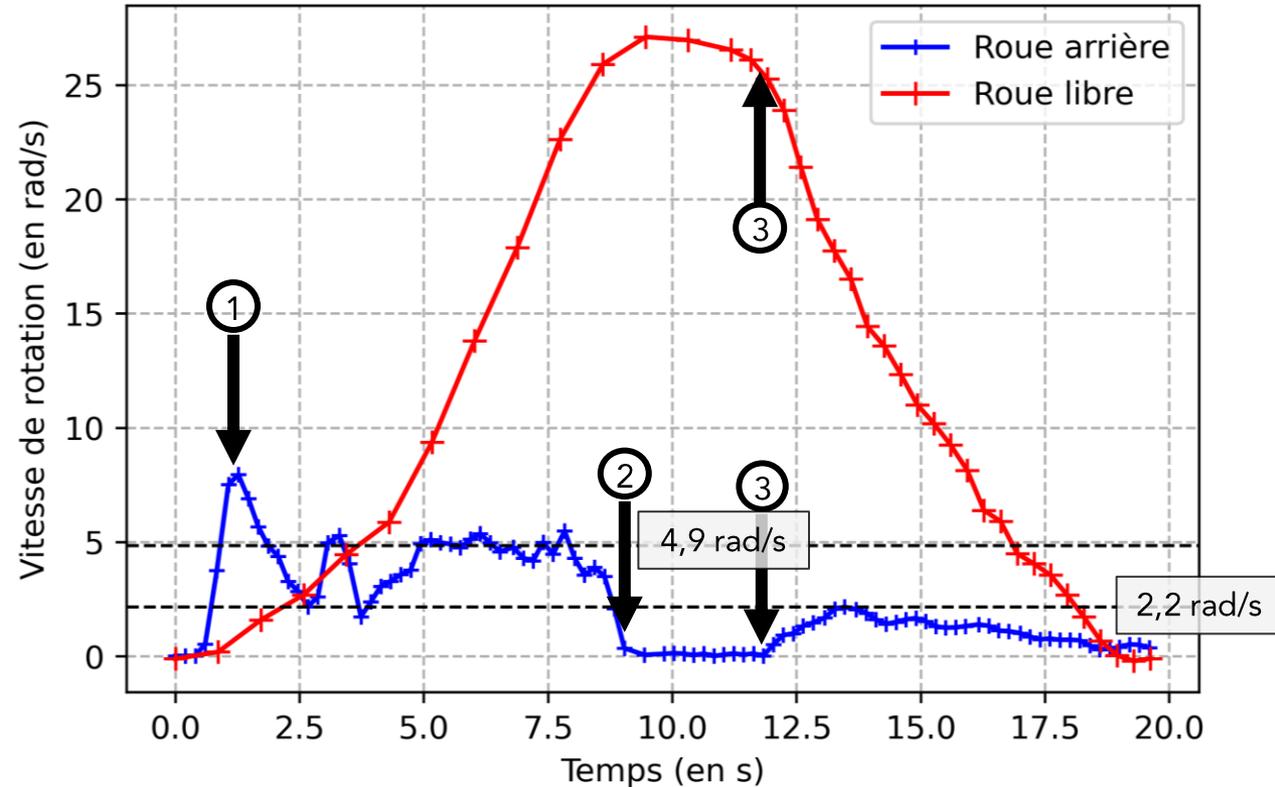


Figure 18: Tracé de la vitesse de rotation de la roue arrière de vélo en fonction du temps (Expérience 2)



Figure 19: Expérience de restitution d'énergie

**Vitesse angulaire recouvrée**

45% de  $\omega_{\max}$

**Énergie recouvrée**

20% de  $E_{\max}$

	Roue arrière	Roue libre
$W_{max}$ (en rad/s)	32,2	187

$$E = \frac{1}{2} I_{\Delta} W^2$$



$$E_{max} = 0,44 \text{ kJ}$$



≈ 10 kJ



$$v_{vélo, i} = 15 \text{ km/h}$$

$$\text{Roue libre} \rightarrow 71 \text{ rad/s}$$

$$E_{roue libre, i} = 63 \text{ J}$$

Vitesse angulaire recouvrée: (45%)

$$\text{Roue libre} \rightarrow 32 \text{ rad/s}$$

$$v_{vélo, f} = 6,8 \text{ km/h}$$

$$E_{roue libre, f} = 13 \text{ J}$$

# Conclusion

	Roue libre	Alternateur
<b>Avantages</b>	Énergie verte Rapidité stockage/restitution Faible coût Longue durée de vie	Rendement élevé Système léger
<b>Inconvénients</b>	Poids élevé Encombrement Effet gyroscopique	Coût élevé Détérioration dans le temps Terres rares
<b>Énergie max stockable</b>	0,44 kJ	1,8 kJ <i>(supercondensateur)</i>
<b>Vitesse recouvrée</b>	45%	<b><u>Rendement:</u></b>  75%
<b>Énergie recouvrée</b>	20%	
<b>Temps de rechargement</b>	10-15 s	30 s

A red road bicycle is shown from a side profile, parked on a light-colored tiled floor. A wooden repair stand is attached to the frame, supporting the bike. The bicycle has a blue saddle with the brand name 'Cobra' visible. The handlebars are wrapped in white tape. The background is a plain wall with a vertical pipe. The text 'Merci de votre attention' is overlaid in white on the center of the image.

Merci de votre attention

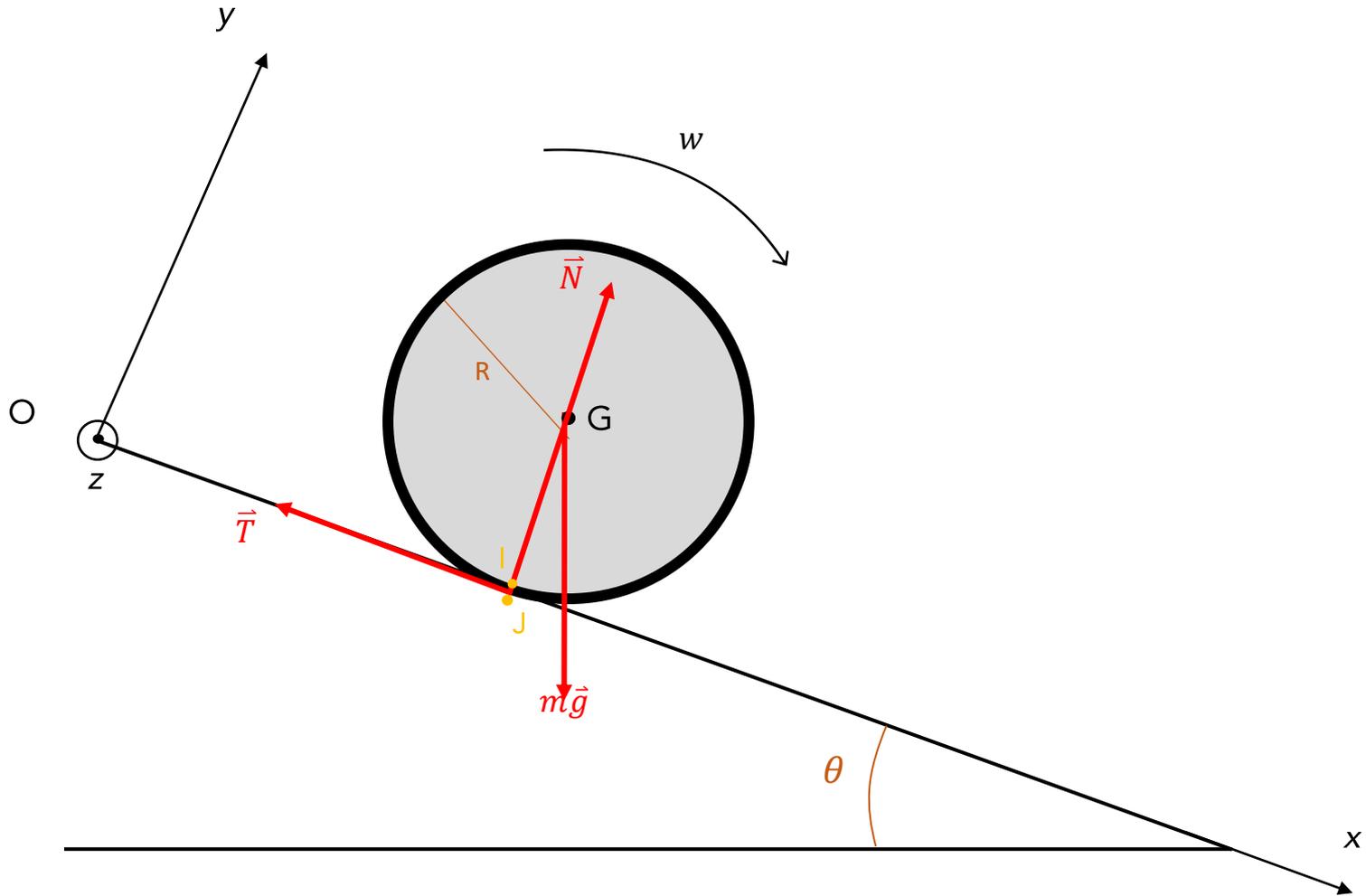


Figure 20: Schéma de l'expérience de la détermination du moment d'inertie du cylindre

Dans  $\mathcal{R}(0, \vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z)$  terrestre galiléen:

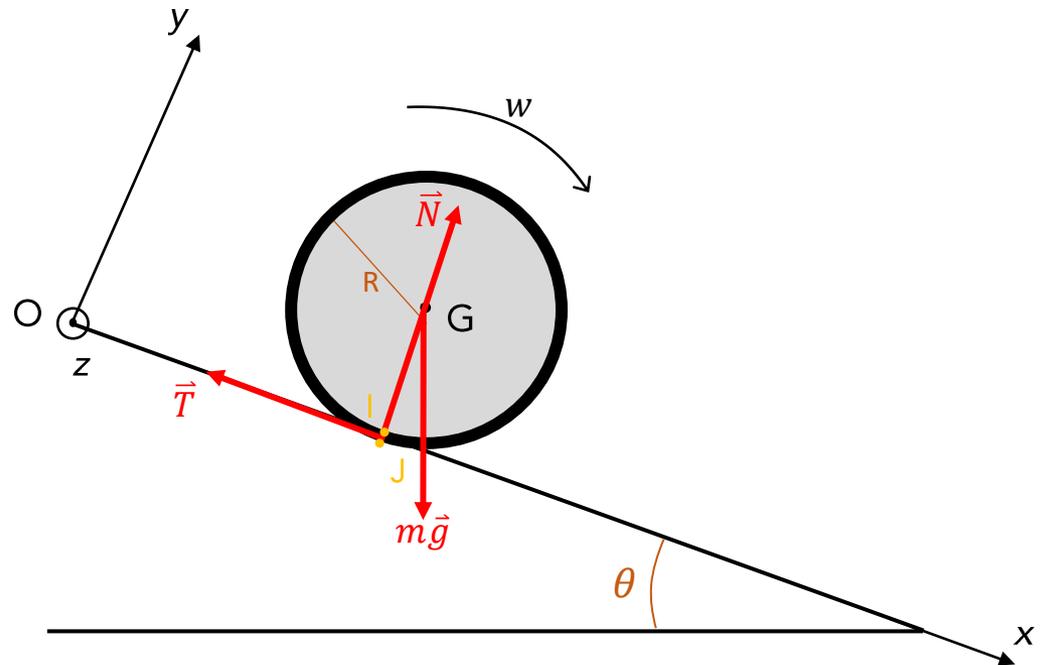
- Hypothèse: Non glissement

$$\vec{v}(J) = \vec{v}(G) = \vec{v}(I) = R\dot{\theta}\vec{e}_x$$

$$\longrightarrow \vec{a}(G) = R\ddot{\theta}\vec{e}_x$$

- TRC:  $m\vec{a}(G) = m\vec{g} + \vec{N} + \vec{T}$

Selon  $\vec{e}_x$ :  $ma = mgsin(\theta) - T$



Dans  $\mathcal{P}^*(G, \vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z)$  non galiléen:

- $$\overline{M}_G(m\vec{g}) = \vec{0} \quad \overline{M}_G(\vec{F}_{ie}) = \vec{0}$$

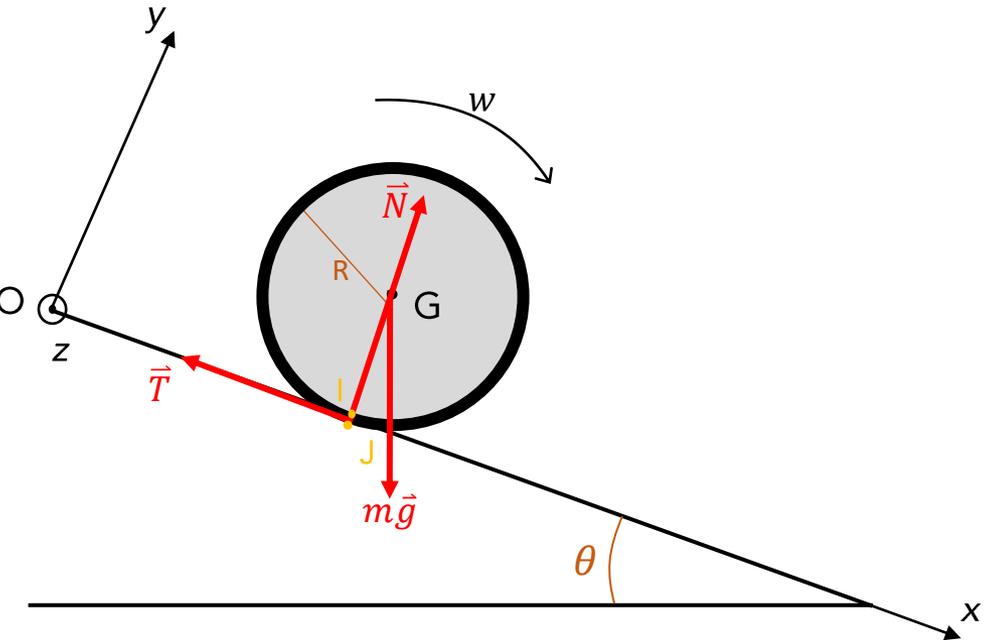
$$\overline{M}_G(\vec{N}) = \vec{0} \quad \overline{M}_G(\vec{F}_{ic}) = \vec{0}$$

$$\overline{M}_G(\vec{T}) = \vec{GI} \wedge \vec{T} = -RT\vec{e}_z$$

• TMC  $I(Gz)$  fixe dans  $\mathcal{P}^*$ :

$$-I_{\Delta}\ddot{\theta} = -RT \quad \longrightarrow \quad T = \frac{I_{\Delta}\ddot{\theta}}{R} = \frac{I_{\Delta}a}{R^2}$$

$$\longrightarrow \quad ma + \frac{I_{\Delta}a}{R^2} = mg\sin(\theta)$$



$$a = \frac{mR^2g}{mR^2 + I_{\Delta}} \sin(\theta)$$

```
1 import csv
2 from math import *
3 import matplotlib.pyplot as plt
4 from scipy.stats import linregress
5 import matplotlib.pyplot as plt
6
7
8 m=3.214
9 em=1e-3 #incertitudes sur m
10 R=0.125
11 eR=1e-3/sqrt(12) #incertitudes sur R
12 g=9.80665
13 angle=[6,10,15,20,25,30]
14 eXi=5e-4 #incertitudes sur le relevé de X initial (Tracker)
15 eXf=3e-3 #incertitudes sur le relevé de X final (Tracker)
16 A=[]
17 incertitude_A=[] #incertitudes moy sur les valeurs d'accélération
18
19
20 for theta in angle:
21     d1 = open(str(theta)+'°.csv','r')
22     D1 = csv.reader(d1, delimiter = ';')
23
24     A1=[]
25     B1=[]
26     for ligne in D1:
27         a=ligne[0].replace(',','.')
28         A1.append(a)
29         b=ligne[1].replace(',','.')
30         B1.append(b)
31
32
33     T1 = [float(x) for x in A1] #transforme str en float
34     X1 = [float(x) for x in B1]
35     d1.close()
36
37
38     T=[] #tableau des temps
39     for k in range(len(T1)-1):
40         T.append(T1[k])
41
42     incertitude_V=[]
43     h=(eXf-eXi)/(len(X1)-1)
44     incertitude_X=[eXi + k*h for k in range(len(X1))]
45
```

```
46
47     V=[] #tableau des vitesses instantannées
48     for k in range(len(X1)-1):
49         delta_x=X1[k+1]-X1[k]
50         v=delta_x/(T1[k+1]-T1[k]) #vitesse instantannée
51         V.append(v) #vitesse instantannée
52         u_x=sqrt((incertitude_X[k+1])**2 + (incertitude_X[k])**2)
53         u_v=v*u_x/delta_x #incertitude sur cette vitesse
54         incertitude_V.append(u_v)
55
56
57     amin=((V[-1]-incertitude_V[-1])-(V[0]+incertitude_V[0]))/(T[-1]-T[0])
58     amax=((V[-1]+incertitude_V[-1])-(V[0]-incertitude_V[0]))/(T[-1]-T[0])
59
60     bmin=(V[-1]-incertitude_V[-1]) - amin*(T[-1])
61     bmax=(V[-1]+incertitude_V[-1]) - amax*(T[-1])
62
63
64     a, b, r, p_value, std_err = linregress(T, V)
65     A.append(a)
66     incertitude_A.append((amax-amin)/2)
67
68
69
70     sin_angle=[sin(theta*pi/180) for theta in angle] #conversion angle en rad et passe au sin
71
72     amax=((A[-1]+incertitude_A[-1])-(A[0]-incertitude_A[0]))/(sin_angle[-1]-sin_angle[0])
73     amin=((A[-1]-incertitude_A[-1])-(A[0]+incertitude_A[0]))/(sin_angle[-1]-sin_angle[0])
74
75     bmin=(A[-1]-incertitude_A[-1]) - amin*(sin_angle[-1])
76     bmax=(A[-1]+incertitude_A[-1]) - amax*(sin_angle[-1])
77
78     delta_a=(amax-amin)/2 #incertitudes sur a
79
80     print((amax-amin)/2)
81     print((bmin-bmax)/2)
82
83     a,b,r,p_value,std_err = linregress(sin_angle,A)
84
85
86     I_reel=m*R**2*(g-a)/a #moment d'inertie réel
87
88     delta_I=I_reel*sqrt((em/m)**2 + 2*(eR/R)**2 + 2*(delta_a/a)**2)
89
90     print("Le moment d'inertie I réel est I_reel = ", round(I_reel,3), "+/-", round(delta_I*2,3), "kg.m² à 95% de confiance.")
```