

*Étude et modélisation du principe de sustentation
électromagnétique : application aux trains*

Nom : Brisard Paul

Numéro candidat : 34390

Sommaire

- Contexte
- Hypothèses
- Construction d'un système de lévitation magnétique
- Théorie sur le point d'équilibre
- Recherche du domaine de stabilité
- Conclusion

Sommaire

- **Contexte**
- Hypothèses
- Construction d'un système de lévitation magnétique
- Théorie sur le point d'équilibre
- Recherche du domaine de stabilité
- Conclusion

Contexte

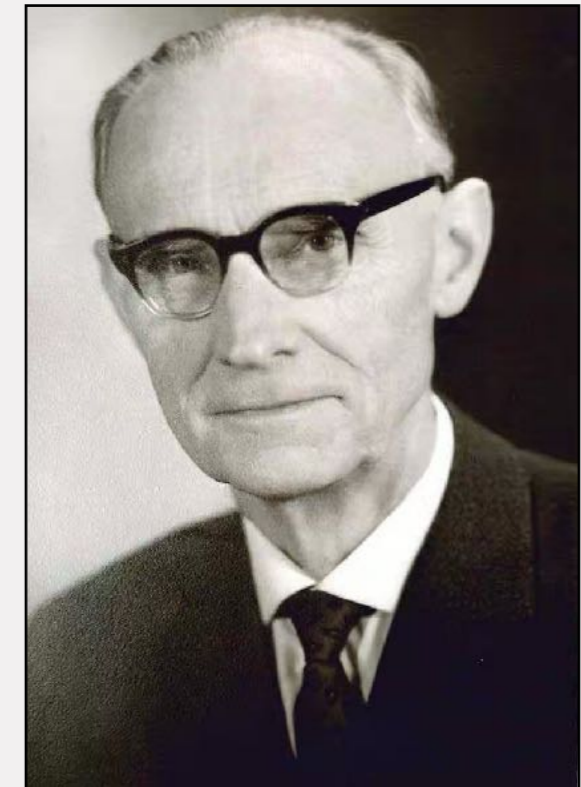
Inventé en 1922

Projet réalisé :

- Transrapid Allemagne (1987) : **430 km/h**
- Transrapid de Shanghai (2004) : **430 km/h**
- Maglev Japon (2015) : **603 km/h**

Projet futur :

- Hyperloop Canada : **≥ 1000 km/h**



Source: Kemper-Nortrup

Herman Kemper (1892 - 1927)

Contexte

Inventé en 1922

Projet réalisé :

- Transrapid Allemagne (1987) : **430 km/h**
- Transrapid de Shanghai (2004) : **430 km/h**
- Maglev Japon (2015) : **603 km/h**

Projet futur :

- Hyperloop Canada : **≥ 1000 km/h**

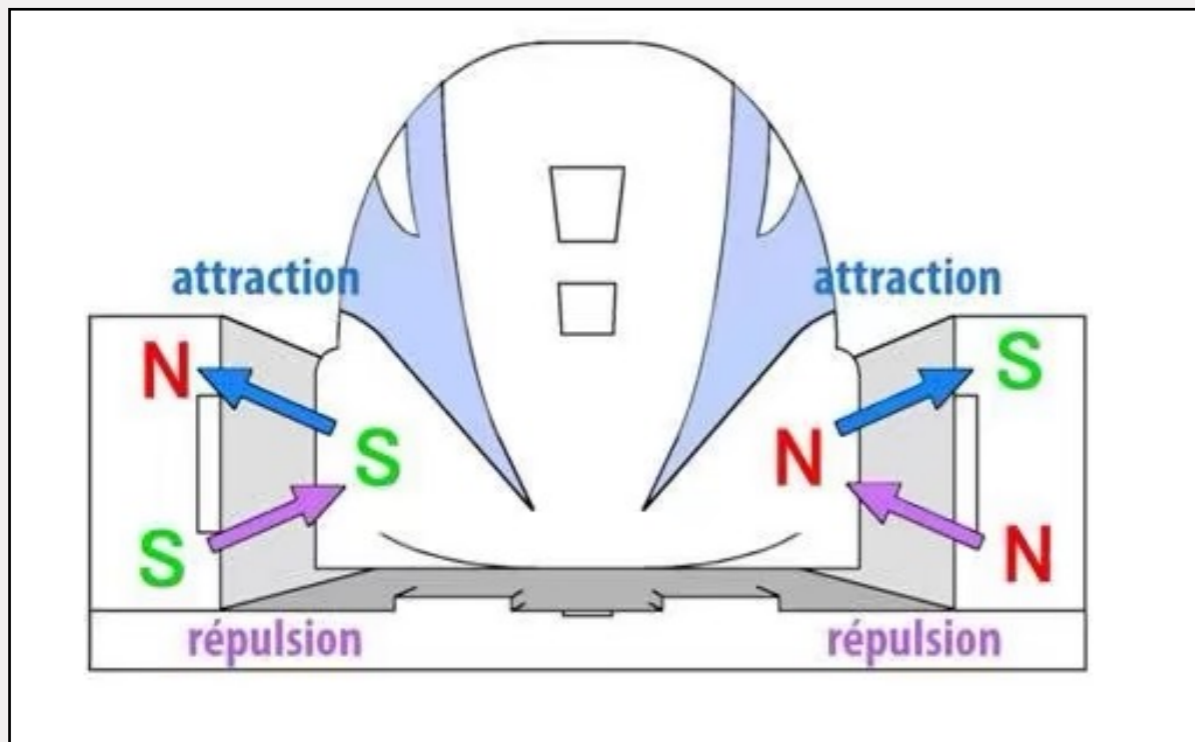


Source : transpode.com

Projet Hyperloop transpod

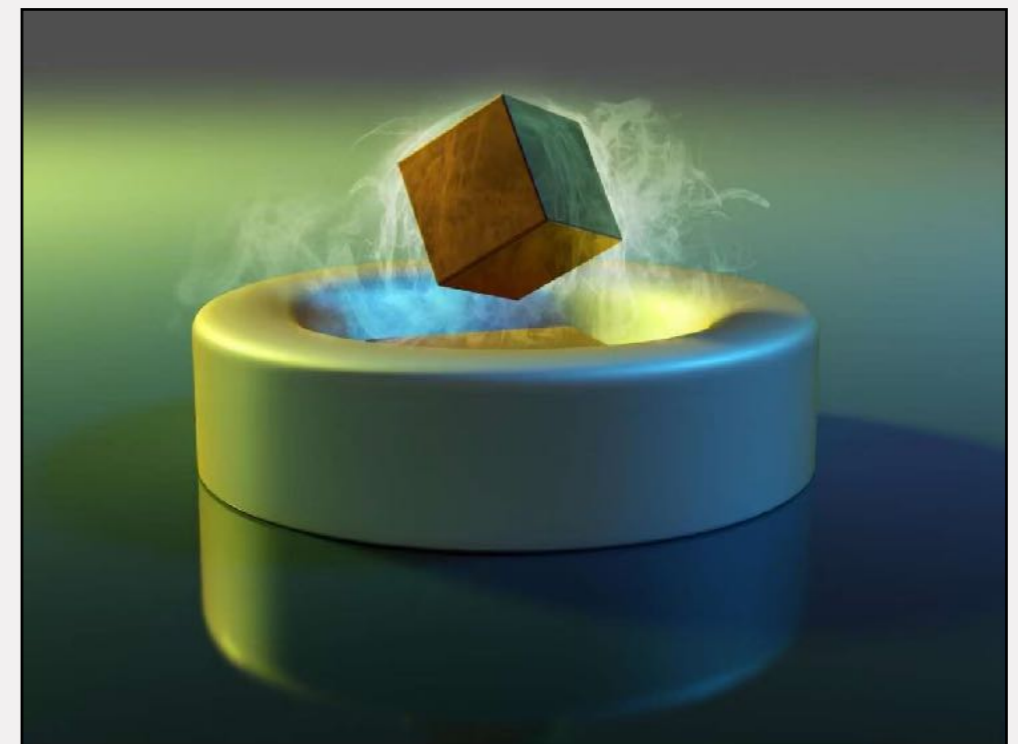
Contexte

Système EDS



Source: Hyperloop, Document Alpha

Sustentation Électrodynamique
EDS



Source: Mark Garlick

Supraconducteurs
- 200 °C

L'effet Meissner assure une stabilité du train

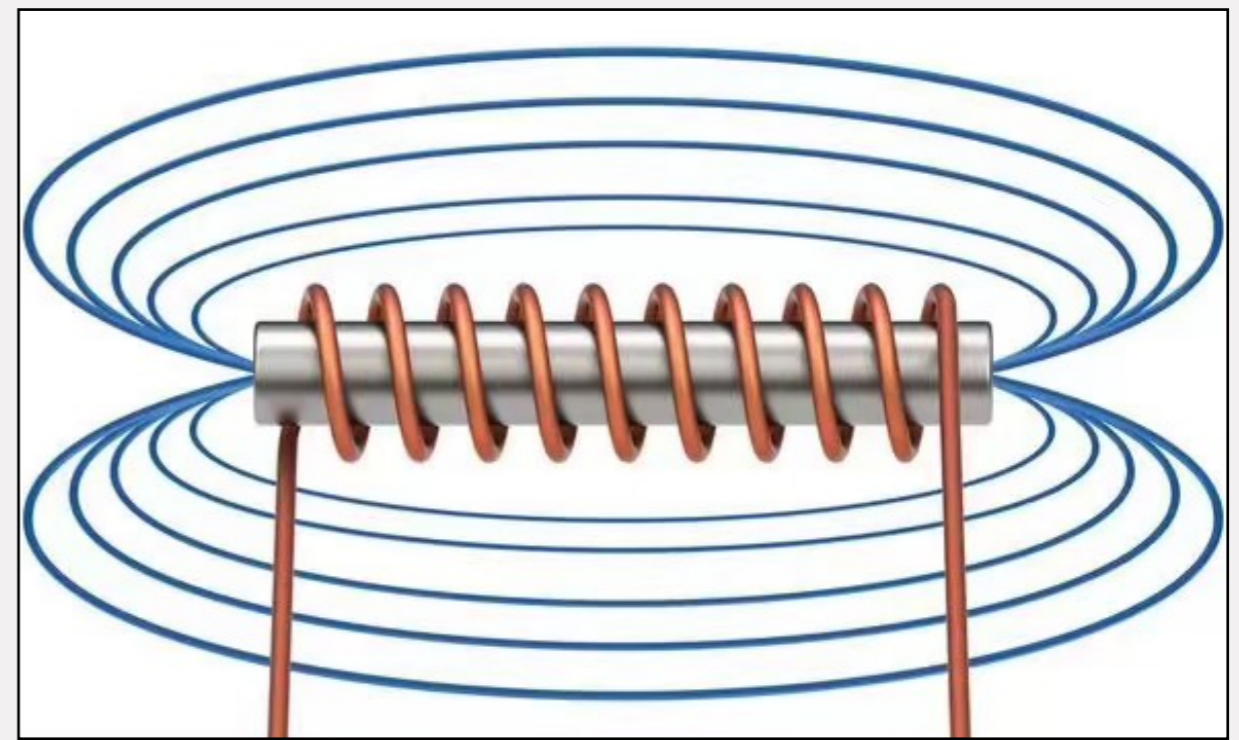


Système EMS



Source: Andreas krebs

Sustentation Électromagnétique
EMS



Source: depositphotos.com

Remplacement des supraconducteurs
par des électroaimants



Contexte

Sustentation Électrodynamique **EDS**

- ⊖ Utilisation de supraconducteurs
- ⊕ Grande stabilité
- ⊕ Vitesse supérieure

Sustentation Électromagnétique **EMS**

- ⊕ Utilisation d'électroaimants
- ⊖ Peu stable
- ⊖ Vitesse inférieure



Contexte

Sustentation Électrodynamique **EDS**

- ⊖ Utilisation de supraconducteurs
- ⊕ Grande stabilité
- ⊕ Vitesse supérieure

Sustentation Électromagnétique **EMS**

- ⊕ Utilisation d'électro aimants
- ⊖ Peu stable
- ⊖ Vitesse inférieure



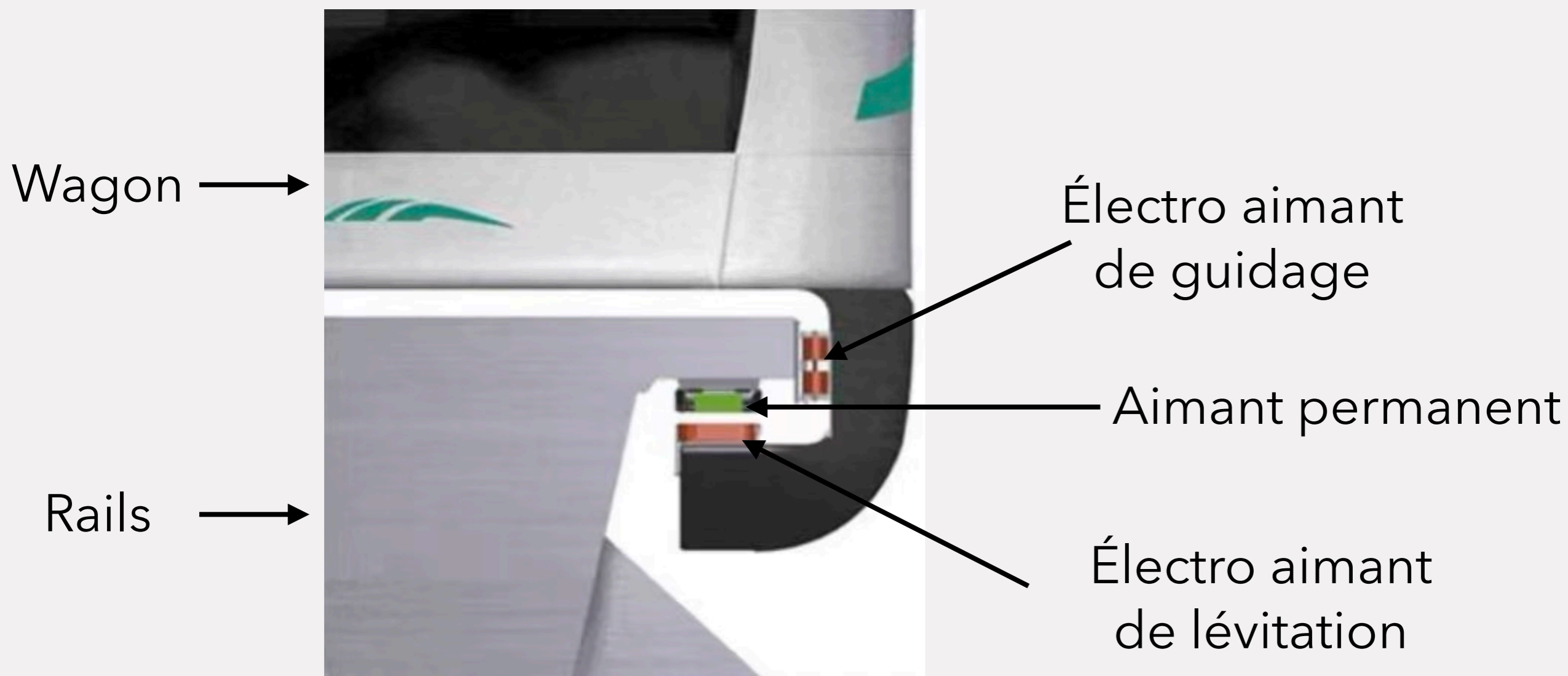
Contexte



Sustentation Électromagnétique
EMS



Contexte

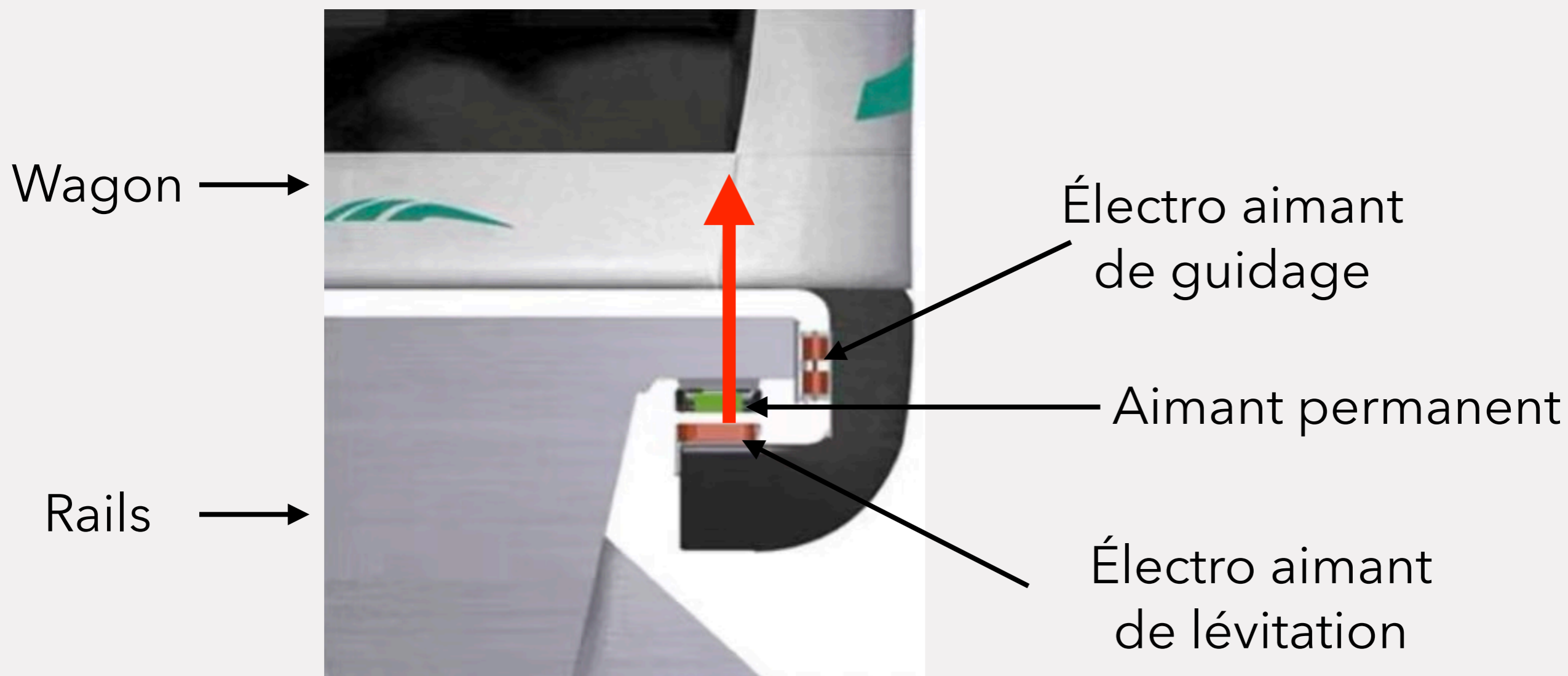


Source: transrapid.de

Vue de face du train



Contexte

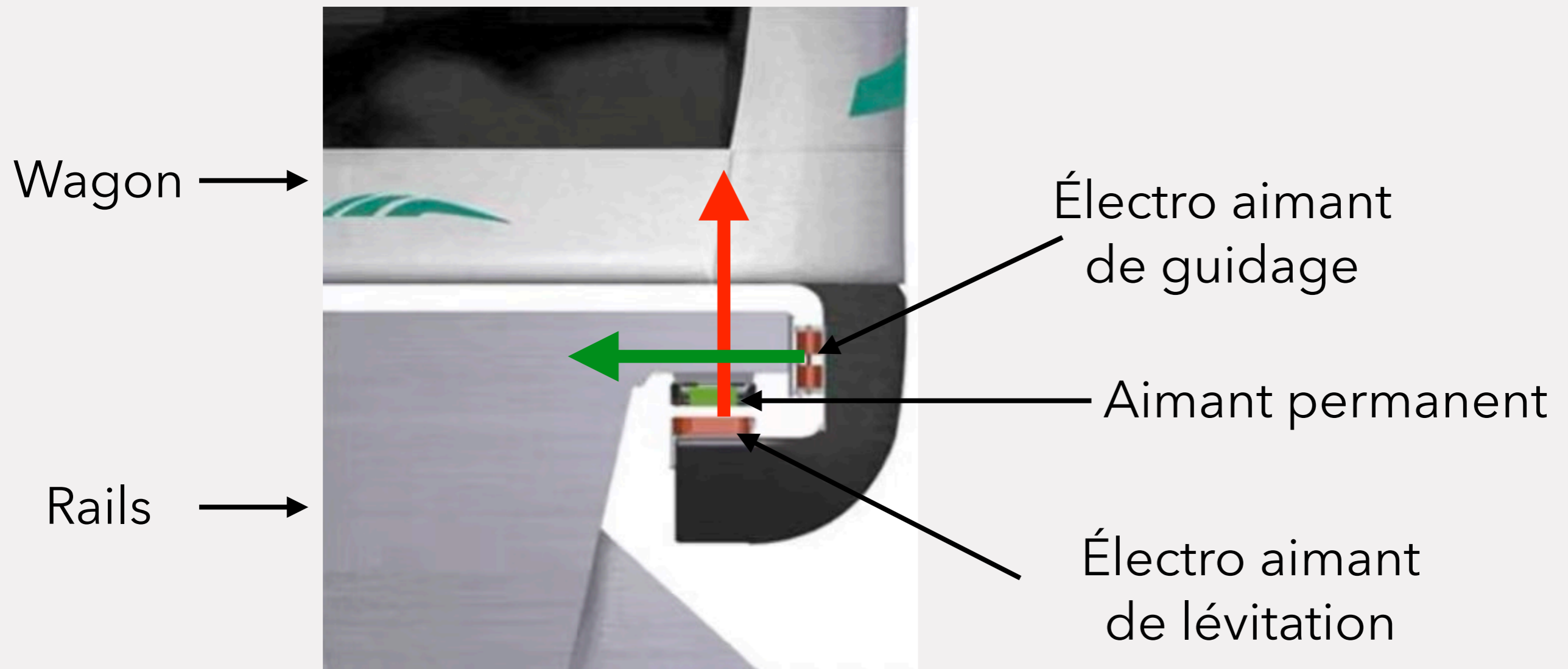


Source: transrapid.de

Vue de face du train



Contexte



Source: transrapid.de

Vue de face du train



Contexte

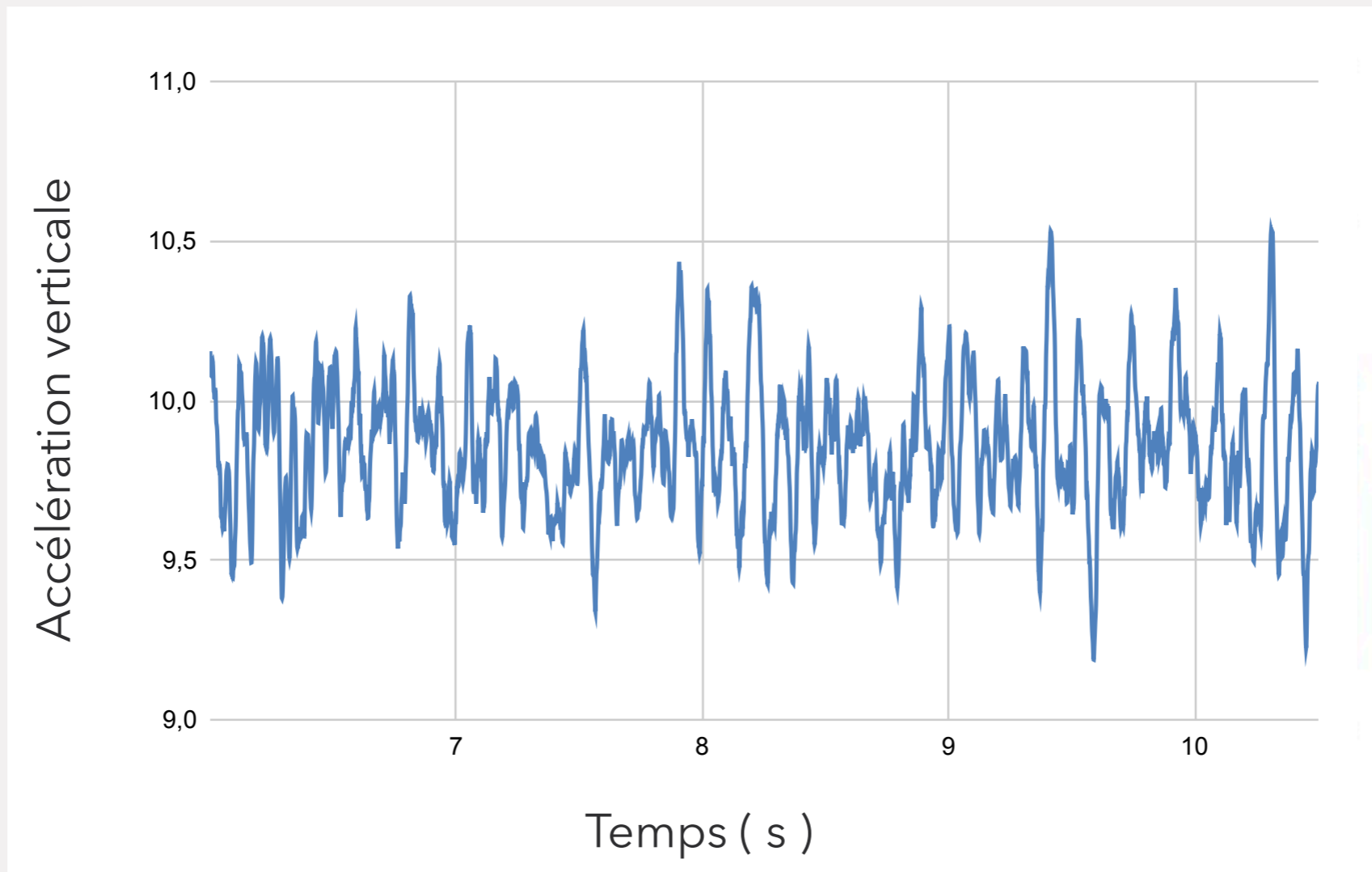
Théorème d'Earnshaw : un ensemble de charges ponctuelles ne peut pas être maintenu dans un équilibre stable uniquement par des interactions d'ordre électrostatique entre les charges.

Problème de stabilité ?



Contexte

- Mesure de l'accélération verticale du TGV avec l'application Phyphox

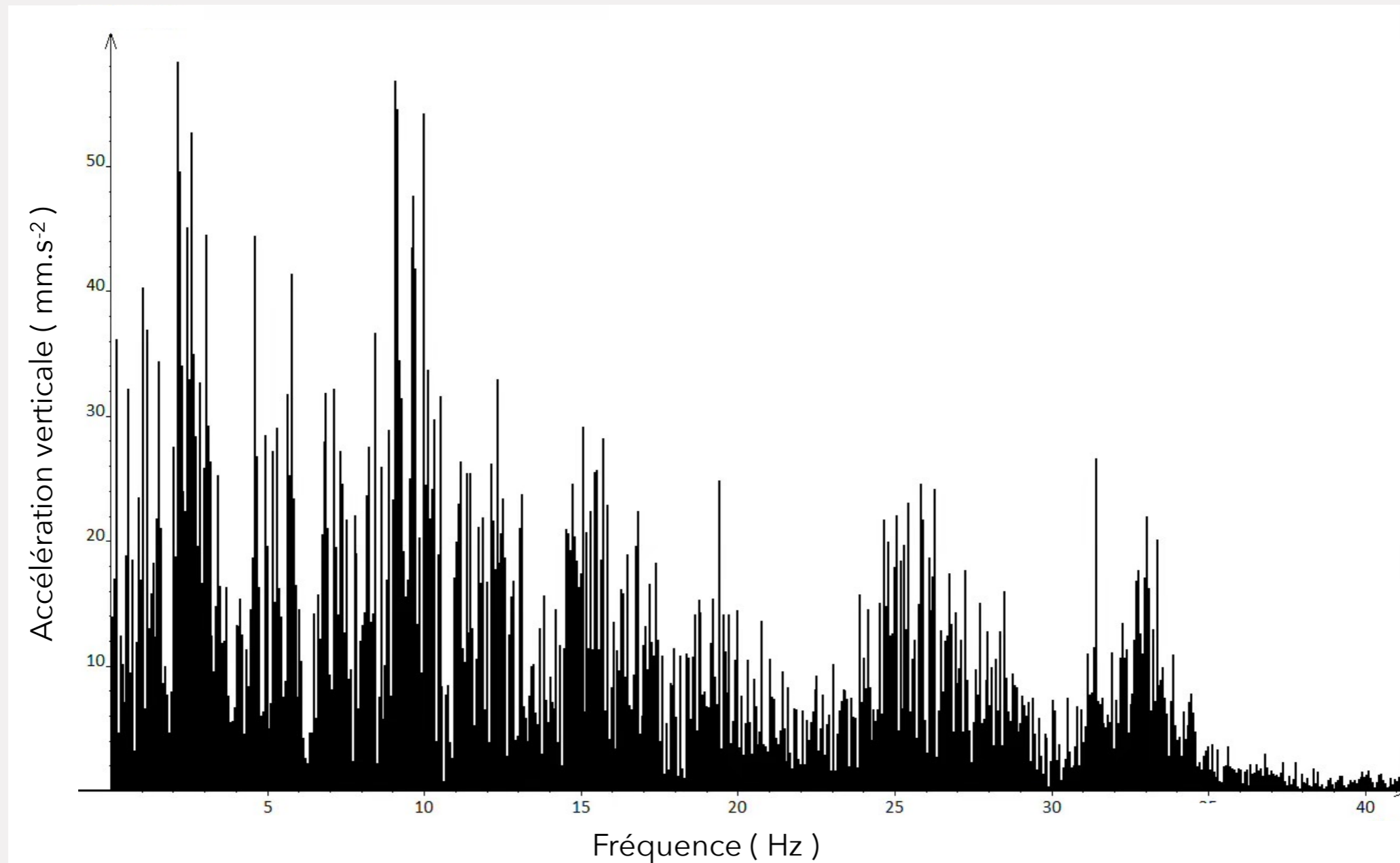


- Transformée de Fourier sur Regressi



Contexte

Transformée de Fourier du signal



➤ Fréquence d'oscillations verticales: **0 - 35 Hz**



Contexte

Problématique

Quel est le domaine de stabilité d'un train à sustentation magnétique en terme d'amplitude et de fréquence d'évolution du profil des rails ?



Sommaire

- Contexte
- **Hypothèses**
- Construction d'un système de lévitation magnétique
- Théorie sur le point d'équilibre
- Recherche du domaine de stabilité
- Conclusion



Hypothèses

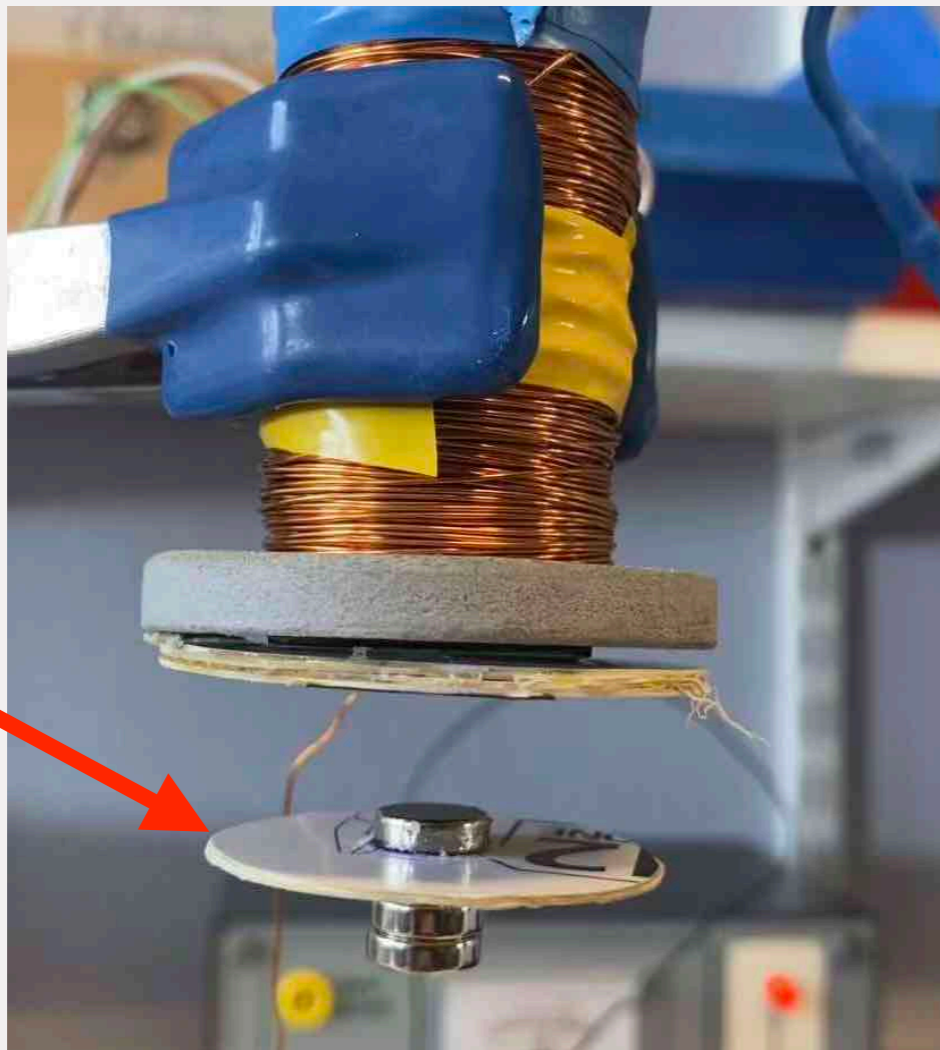
Cadre d'étude

1. Lévitiation sans propulsion
2. Lévitiation verticale sans la stabilisation horizontale

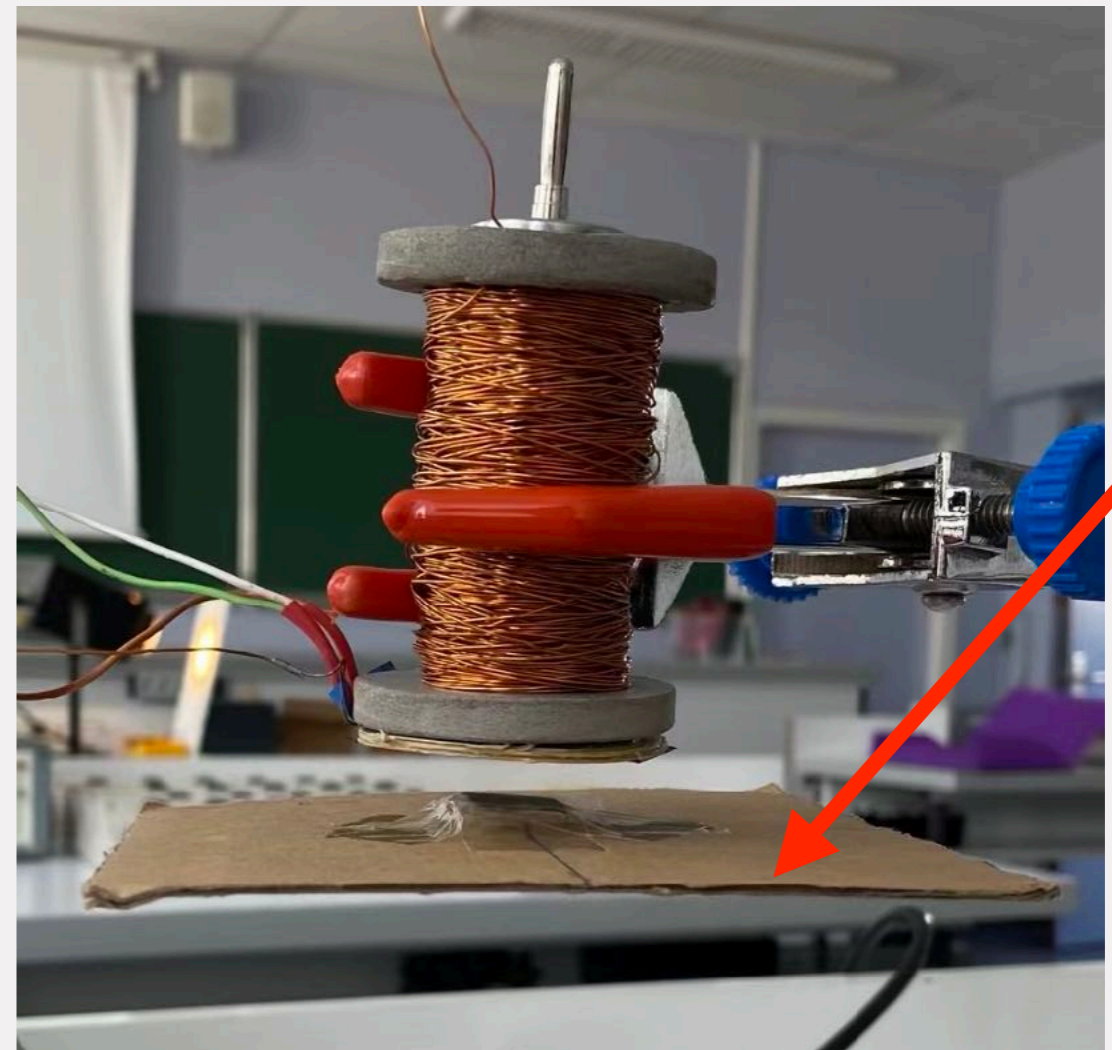
Hypothèses

Cadre d'étude

Aimant permanent
(Modélise le train)



Disque d'inertie



Sommaire

- Contexte
- Hypothèses
- **Construction d'un système de lévitation magnétique**
- Théorie sur le point d'équilibre
- Recherche du domaine de stabilité
- Conclusion



Lévitacion magnétique



Construction de la bobine



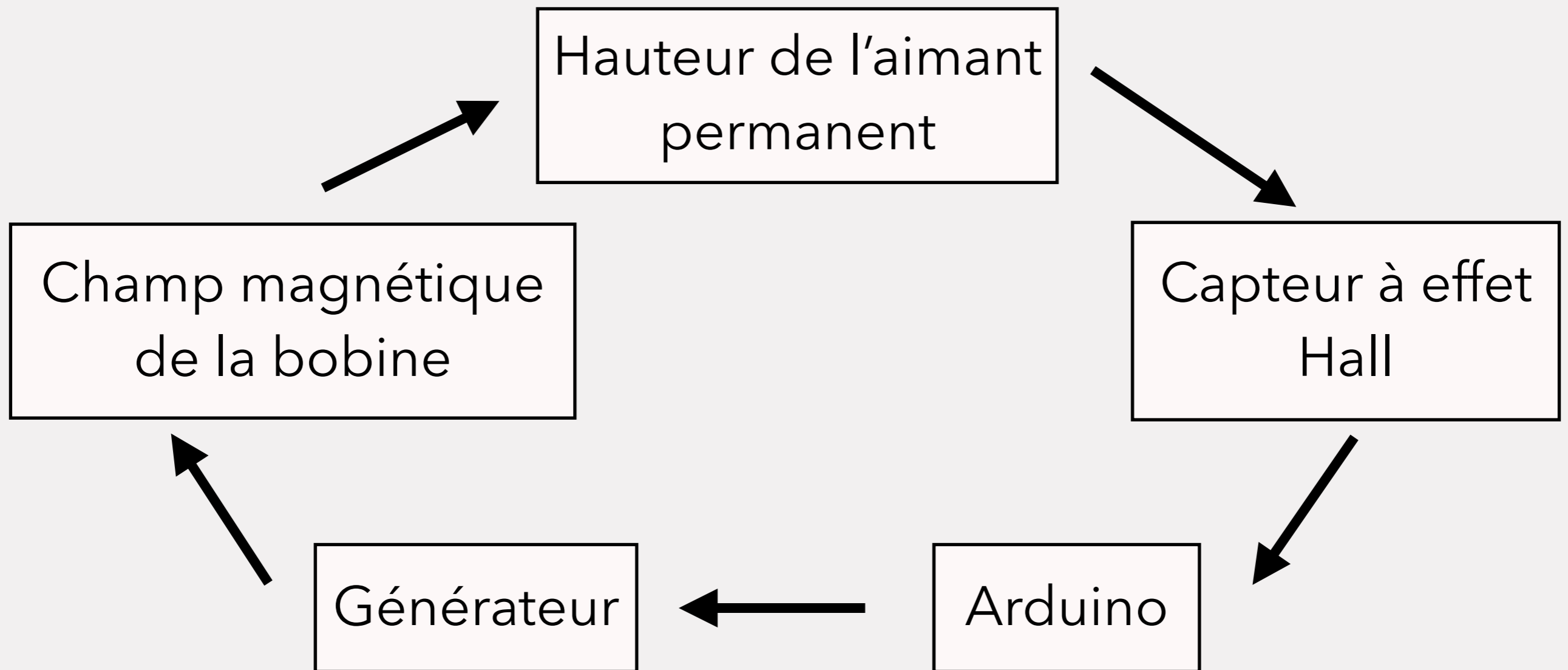
Bobine

Bobine supposée homogène



Lévitation magnétique

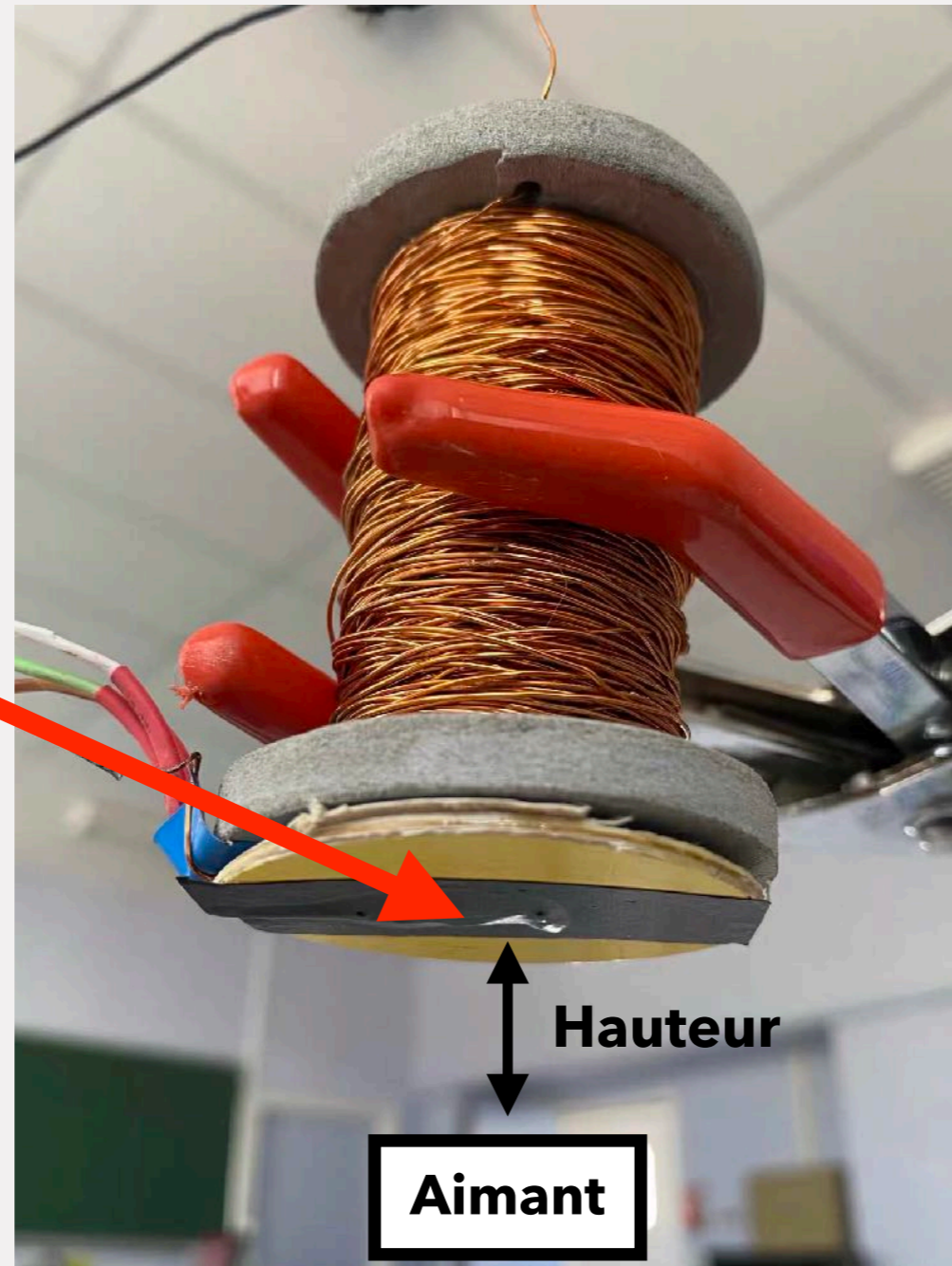
Principe du système



Lévitation magnétique

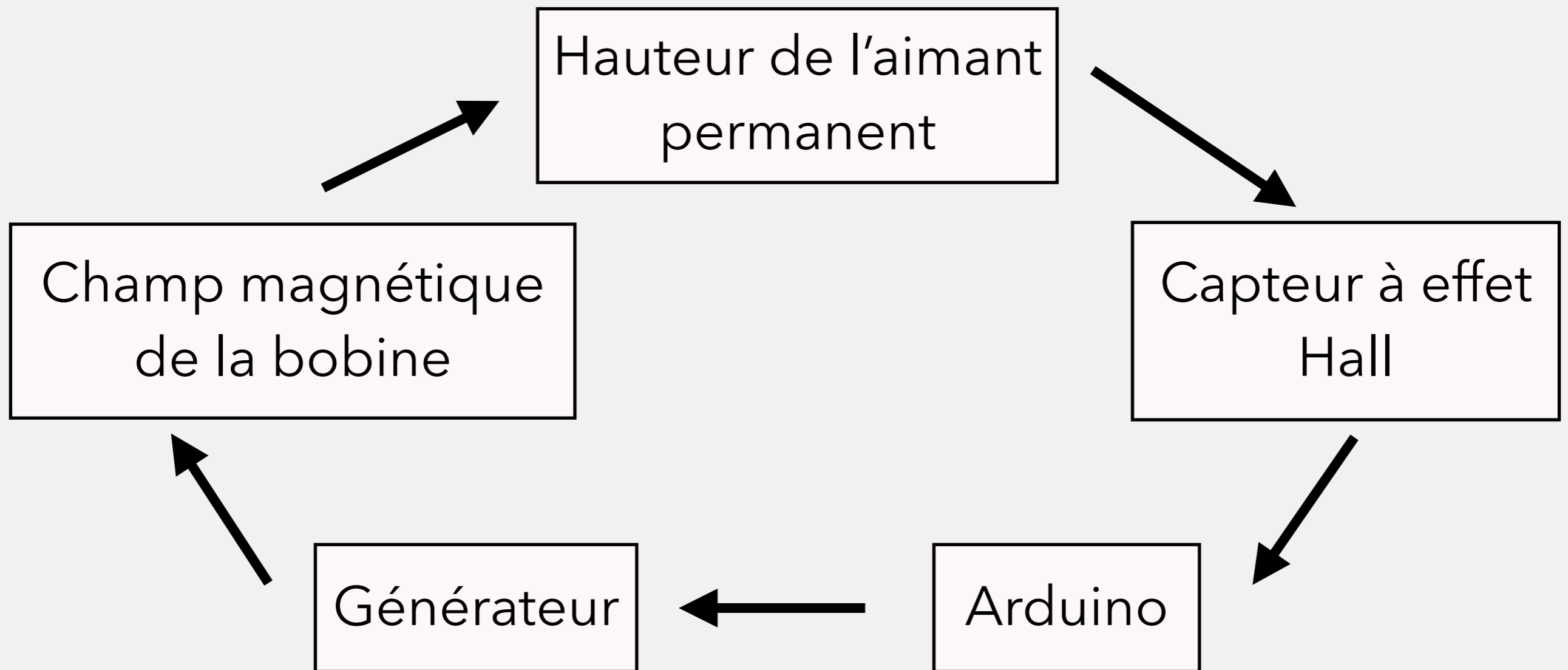
Capteur à effet Hall

Capteur à effet Hall

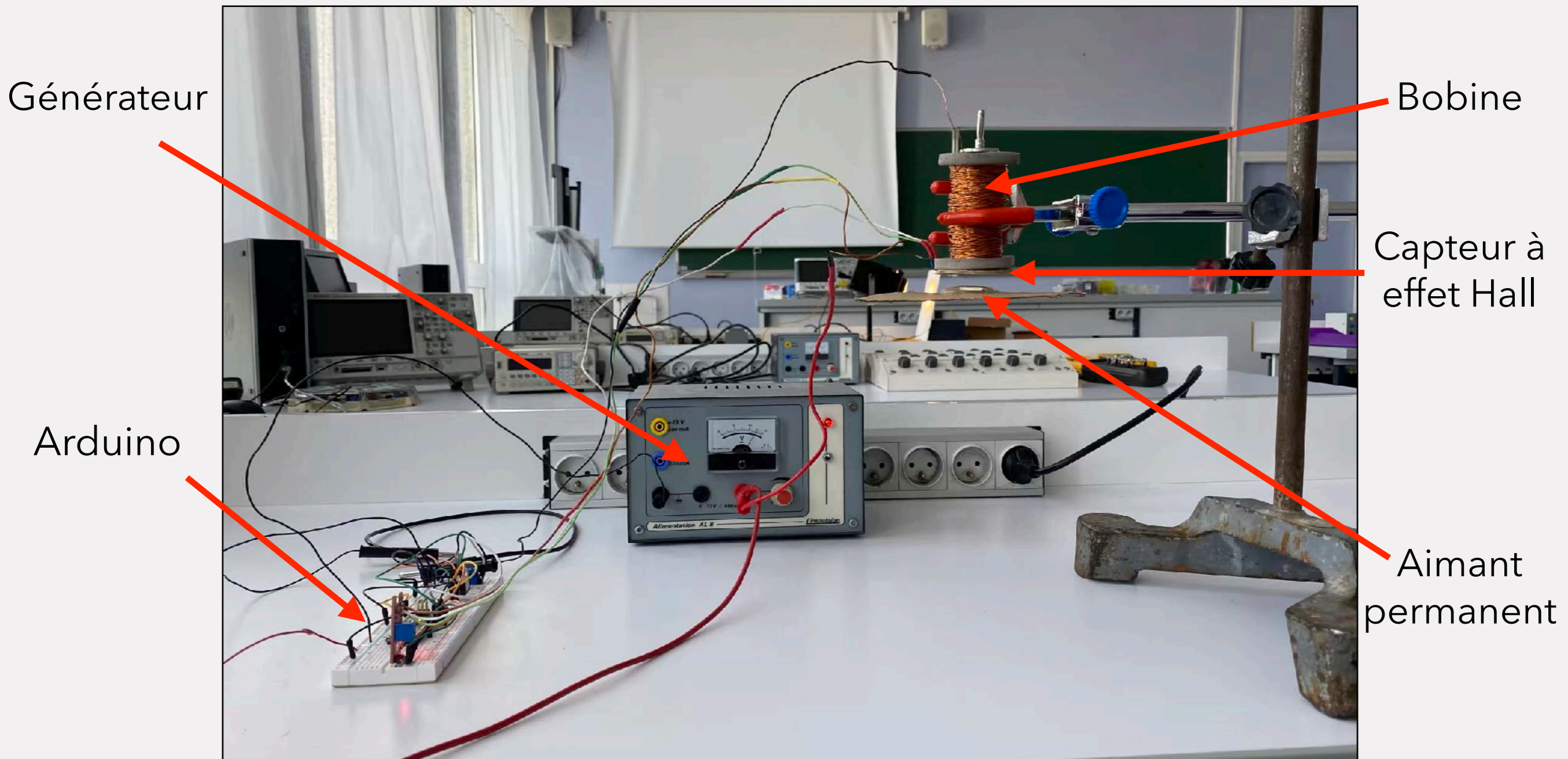


Lévitation magnétique

Principe du système



Lévitation magnétique



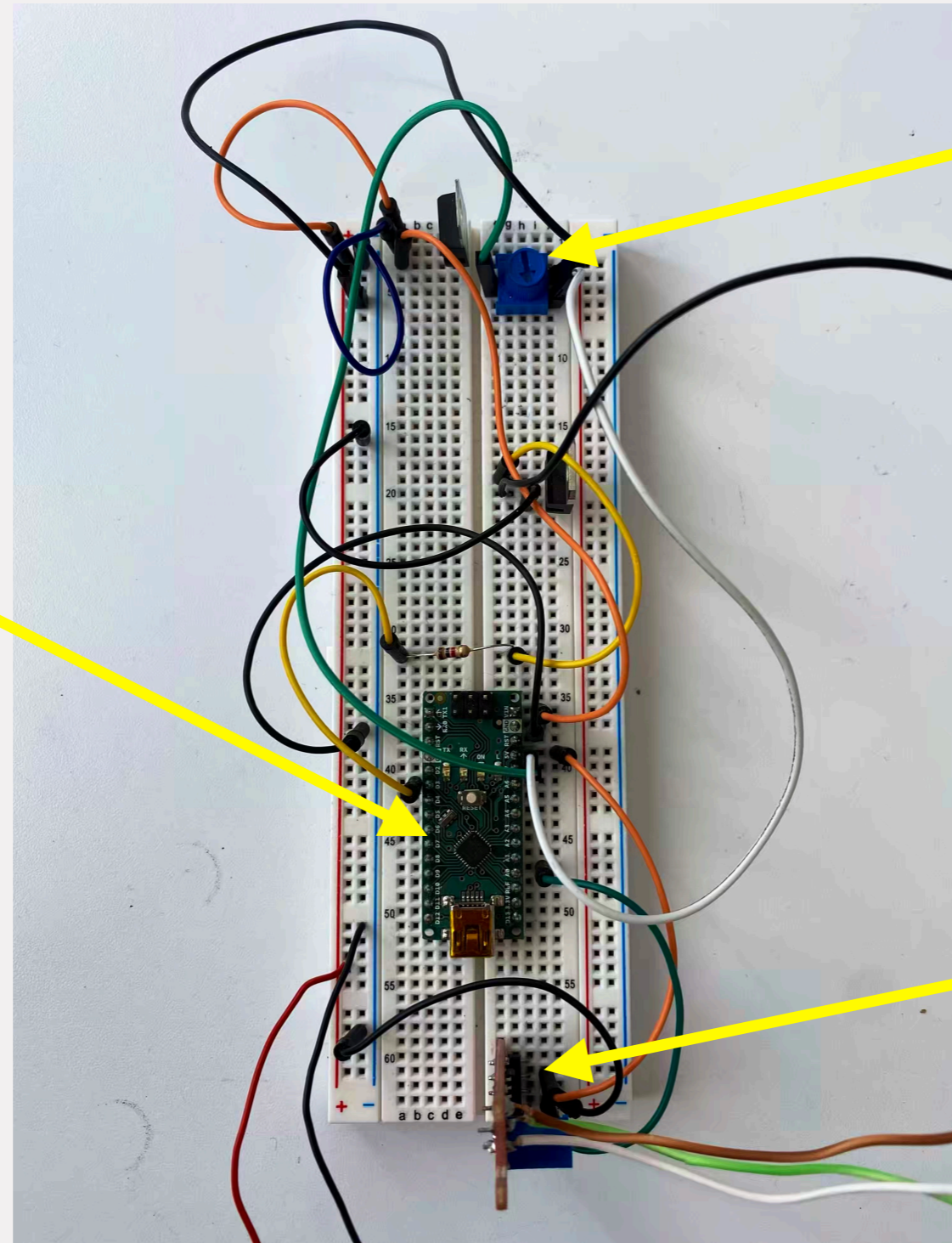
L'aimant permanent modélise le train



Lévitation magnétique

Potentiomètre pour régler la commande

Carte Arduino



Capteur à effet hall

Systeme électrique



Lévitation magnétique

```
#include <PID_v1.h>

int Magnet = 3;
double Setpoint, Input, Output;
double Kp=5000, Ki=0, Kd=5;

PID myPID(&Input, &Output, &Setpoint, Kp, Ki, Kd, DIRECT);

void setup() {
  pinMode(Magnet, OUTPUT);
  Input = analogRead(A0);
  myPID.SetMode(AUTOMATIC);
  myPID.SetSampleTime(1);
}

void loop() {
  Setpoint = analogRead(A7);
  Input = analogRead(A0);

  myPID.Compute();
  analogWrite(Magnet, Output);
}
```

Réglage de la
commande



Correcteur :

Proportionnel
Intégrale
Dérivé

Code Arduino

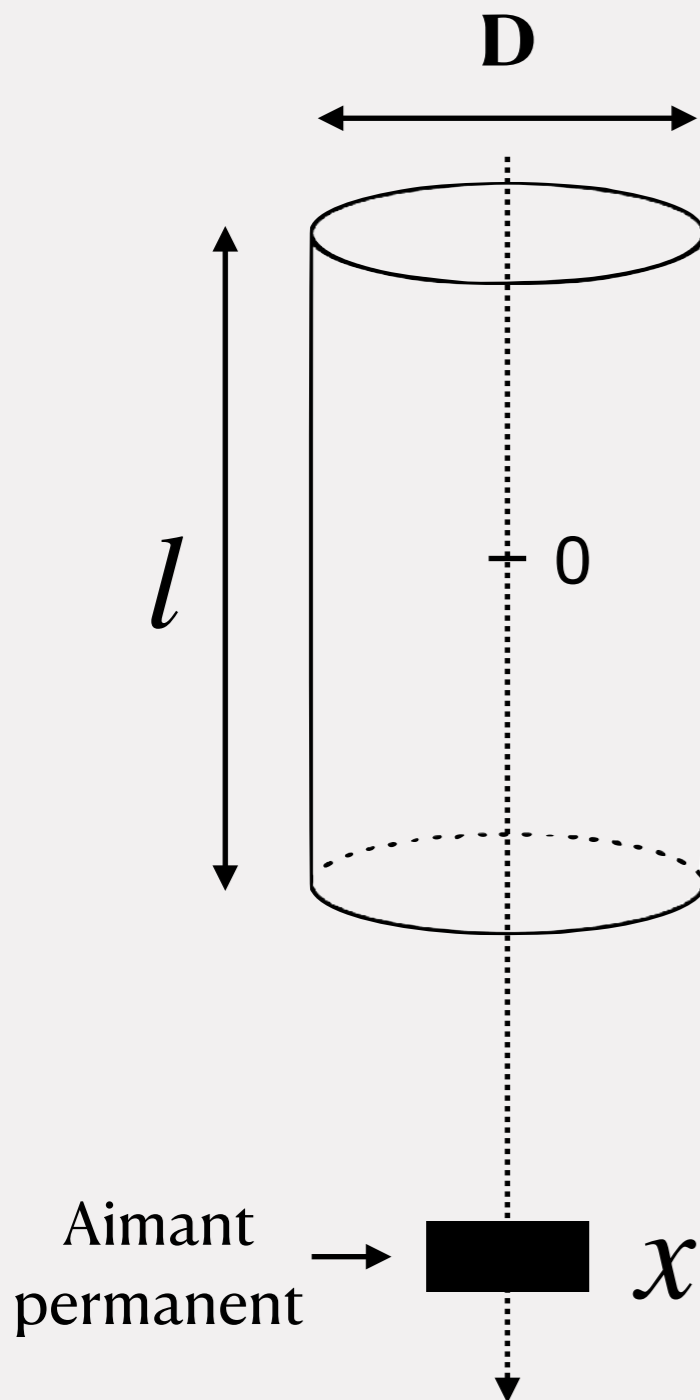


Sommaire

- Contexte
- Hypothèses
- Construction d'un système de lévitation magnétique
- **Théorie sur le point d'équilibre**
- Recherche du domaine de stabilité
- Conclusion

Théorie sur le point d'équilibre

Formules



$$\bullet B(x) = \frac{\mu Ni}{l} \left(\frac{l + 2x}{2\sqrt{(l + 2x)^2 + D^2}} + \frac{l - 2x}{2\sqrt{(l - 2x)^2 + D^2}} \right)$$

$$\bullet \vec{F}(x) = \overrightarrow{\text{grad}} (\vec{M} \cdot \vec{B}(x))$$

$$\bullet \vec{P} = m \vec{g}$$

} Sur l'aimant permanent

Théorie sur le point d'équilibre

Données

N = Nombre de spires

μ = Perméabilité magnétique de la vis dans la bobine

l = Longueur de la bobine

M = Moment magnétique de l'aimant permanent

i = Intensité parcourant la bobine

D = Diamètre de la bobine

Formules

$$\bullet B(x) = \frac{\mu Ni}{l} \left(\frac{l + 2x}{2\sqrt{(l + 2x)^2 + D^2}} + \frac{l - 2x}{2\sqrt{(l - 2x)^2 + D^2}} \right)$$

$$\bullet \vec{F}(x) = \vec{\text{grad}} (\vec{M} \cdot \vec{B}(x))$$

$$\bullet \vec{P} = m \vec{g}$$

} Sur l'aimant permanent

Théorie sur le point d'équilibre

Quelle est la valeur de N ?

$$\blacktriangleright \phi = L \times i \quad ET \quad \phi = N \times \vec{B} \cdot \vec{S}$$

Or, à l'intérieur de la bobine :

$$B = \frac{\mu \times N \times i}{l}$$

$$\Rightarrow N = \sqrt{\frac{l \times L}{\mu \times S}} = \mathbf{837 \text{ spires}}$$

Principe fondamental de la dynamique à l'équilibre



Théorie sur le point d'équilibre

Équation à résoudre

$$mg + M\mu NiD^2 \left(\frac{1}{((l + 2x)^2 + D^2)^{\frac{3}{2}}} - \frac{1}{((l - 2x)^2 + D^2)^{\frac{3}{2}}} \right) = 0$$

⇒ Impossible à résoudre à la main



Théorie sur le point d'équilibre

Recherche dichotomique

```
def dichotomie_v3(f, a, b, epsilon):  
    if f(a) * f(b) >= 0:  
        raise ValueError("erreur de signe")  
    while (b - a) > epsilon:  
        c = (a + b) / 2  
  
        if f(c) == 0:  
            return c  
        elif f(c) * f(a) < 0:  
            b = c  
        else:  
            a = c  
  
    return (a + b) / 2
```

Dichotomie

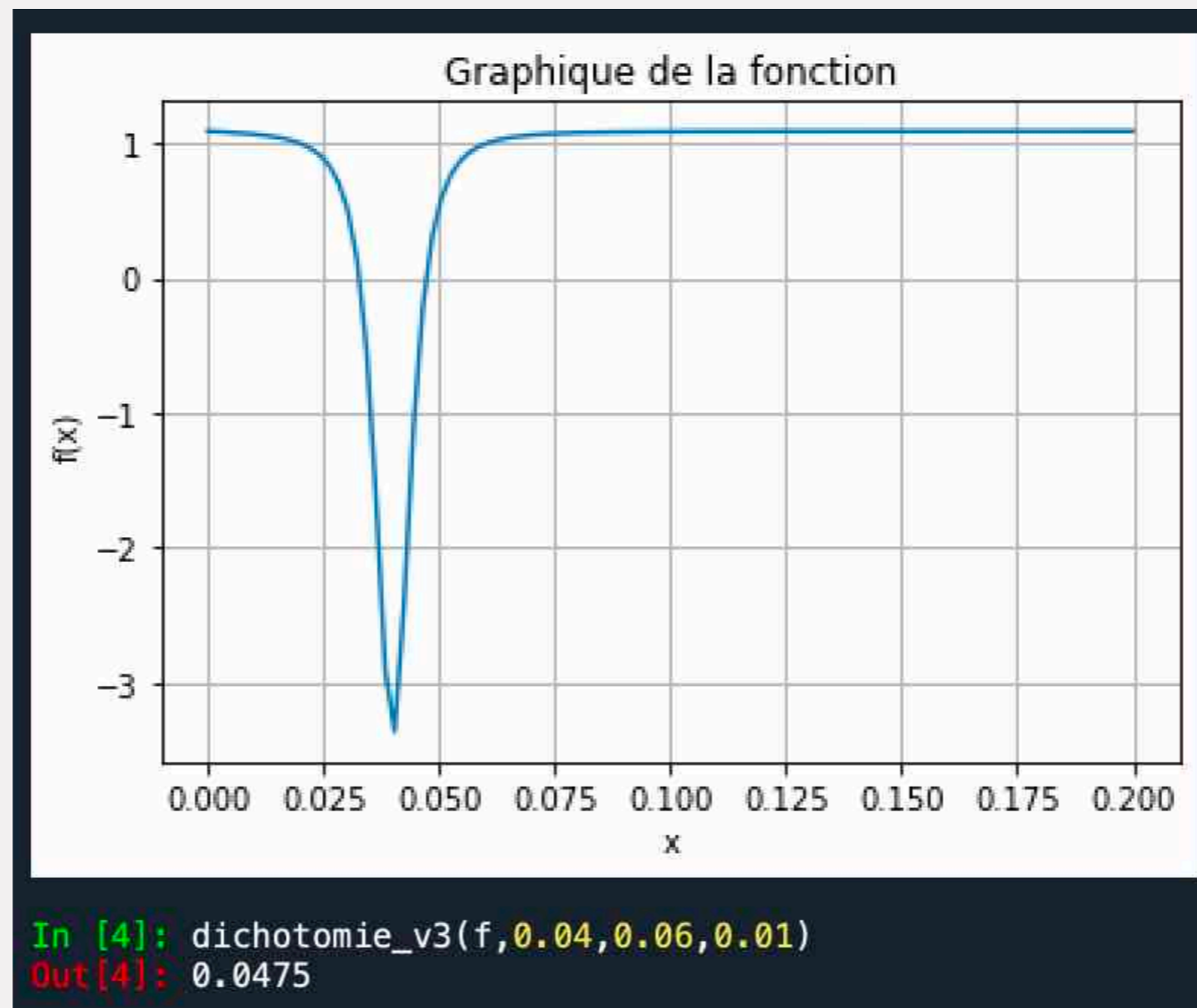
```
def plot_function(f, a, b):  
  
    x = np.linspace(a, b, 100)  
    f_vectorized = np.vectorize(f)  
    y = f_vectorized(x)  
  
    plt.plot(x, y)  
    plt.xlabel('x')  
    plt.ylabel('f(x)')  
    plt.title('Graphique de la fonction')  
    plt.grid(True)  
    plt.show()
```

Affichage de la courbe



Théorie sur le point d'équilibre

Solution



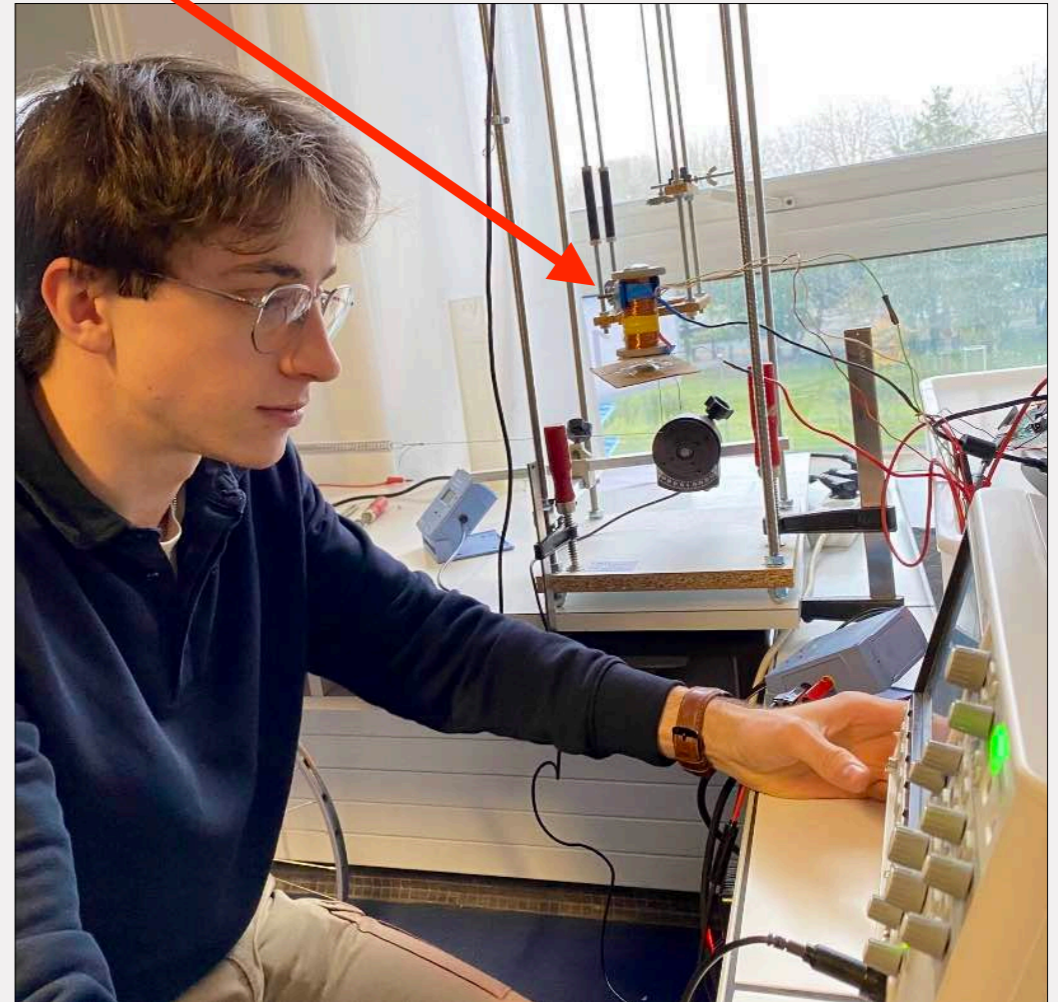
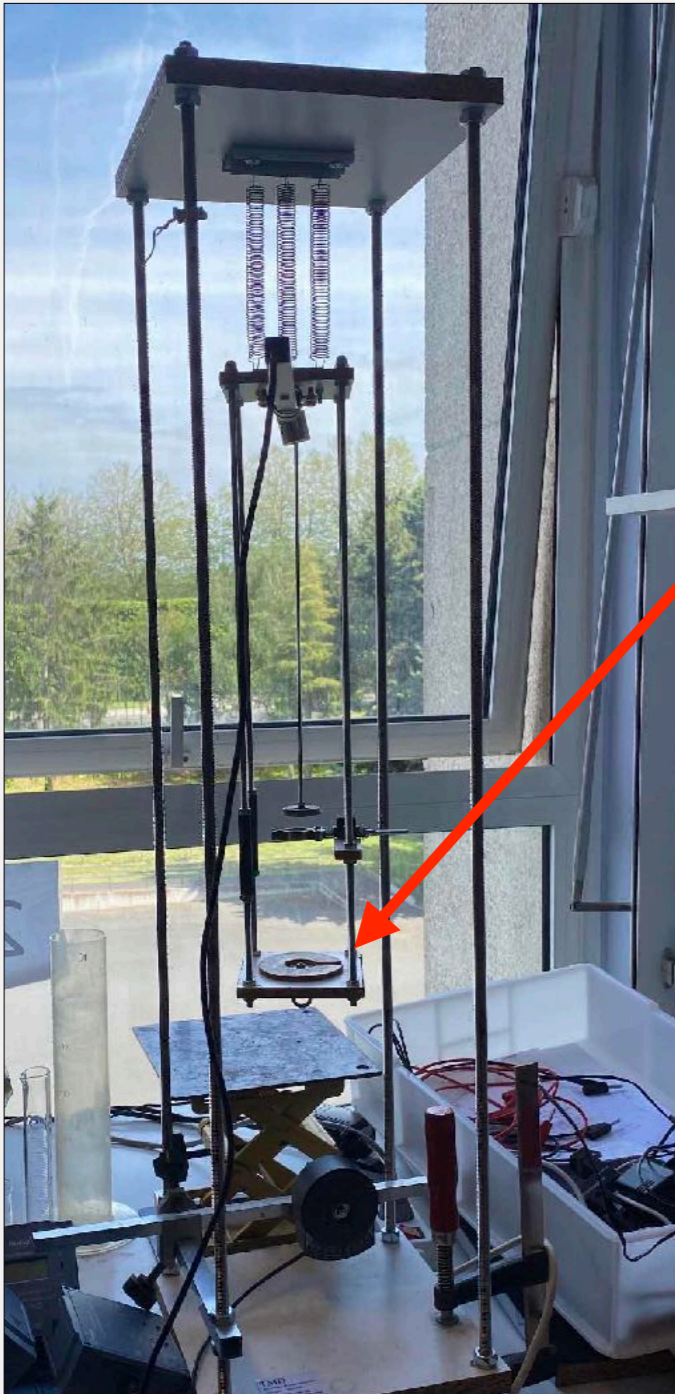
Réglage de la commande à **4,75 cm**

Sommaire

- Contexte
- Hypothèses
- Construction d'un système de lévitation magnétique
- Théorie sur le point d'équilibre
- **Recherche du domaine de stabilité**
- Conclusion

Domaine de stabilité

Système TMD



Domaine de stabilité



Limites du système

- Translation Horizontale
- Phénomène de résonance
- Grandes amplitudes



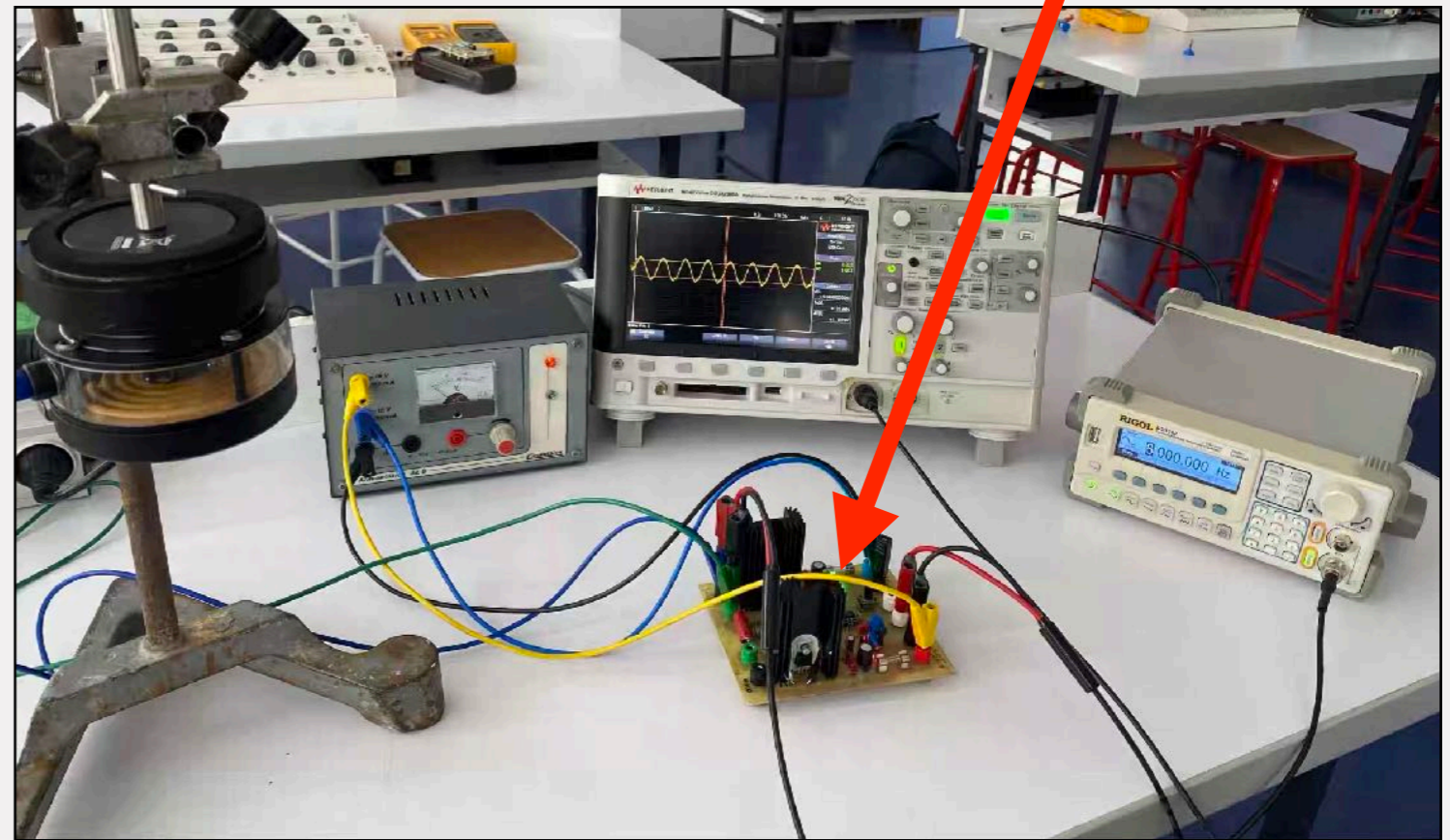
Domaine de stabilité

Vibreux de Melde

Amplificateur



Vibreux de Melde



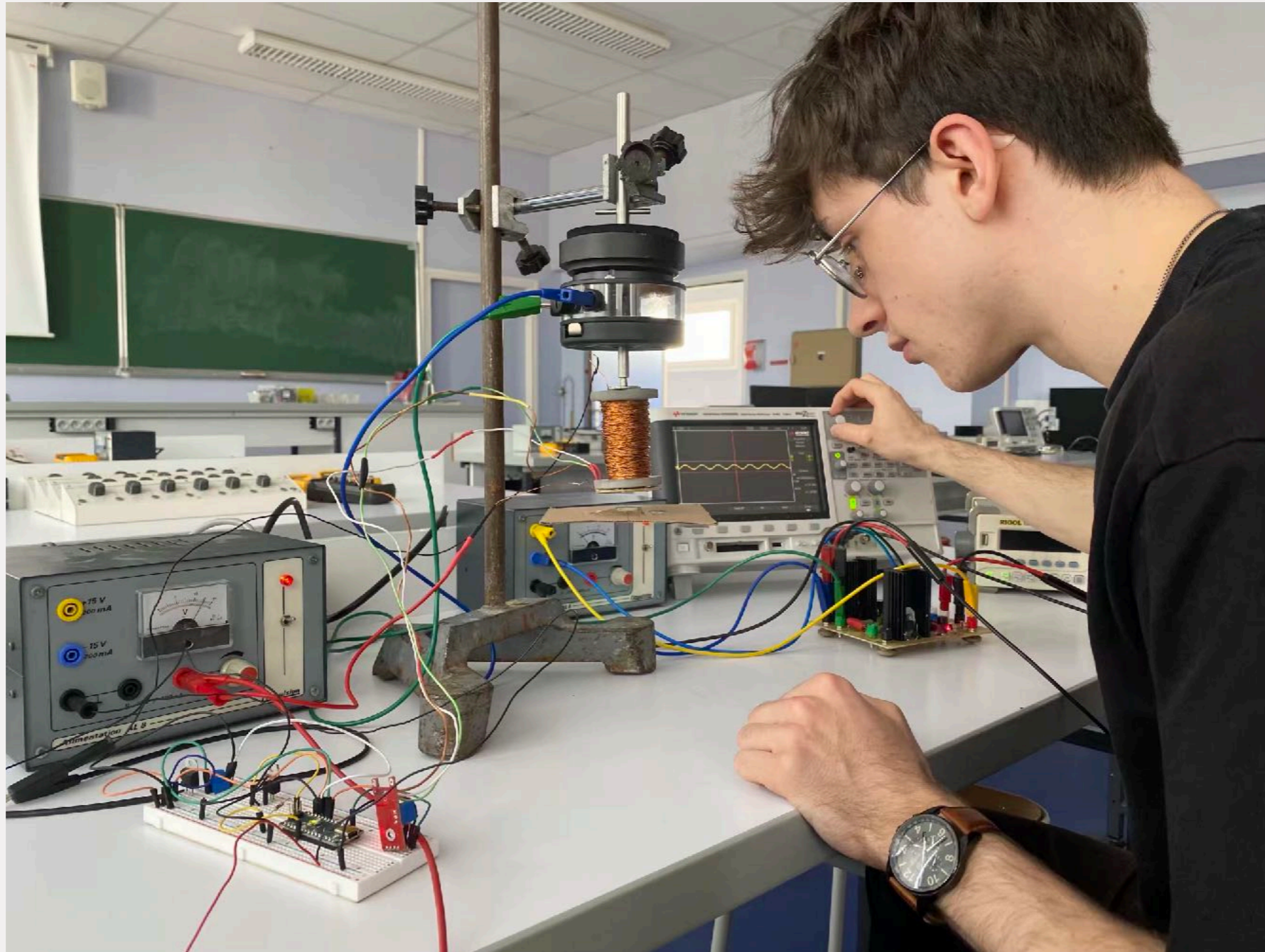
Systeme complet du vibreur de Melde

➤ Enceinte vibrant verticalement



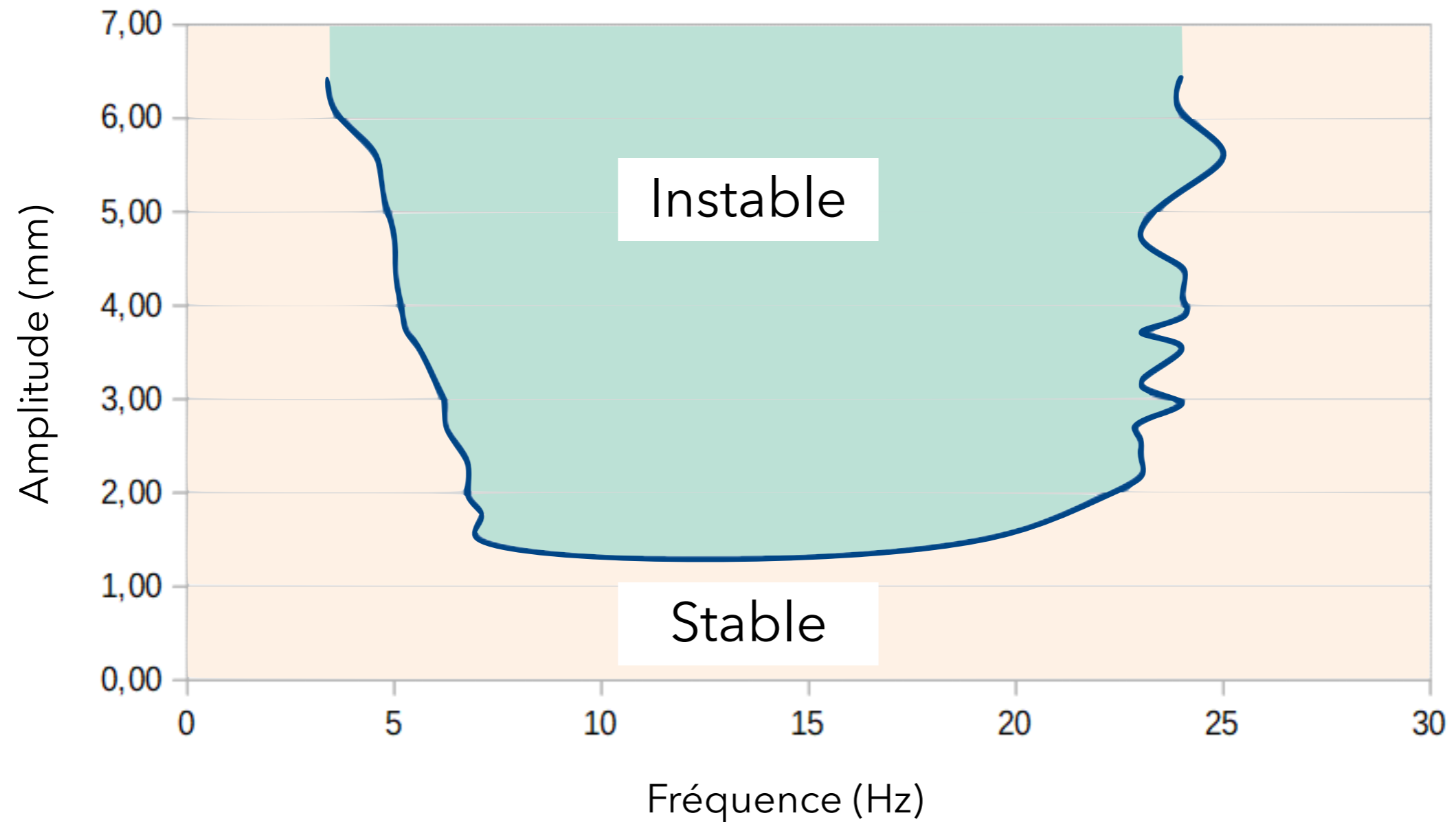
Domaine de stabilité

Expérience



Domaine de stabilité

Domaine de stabilité du train

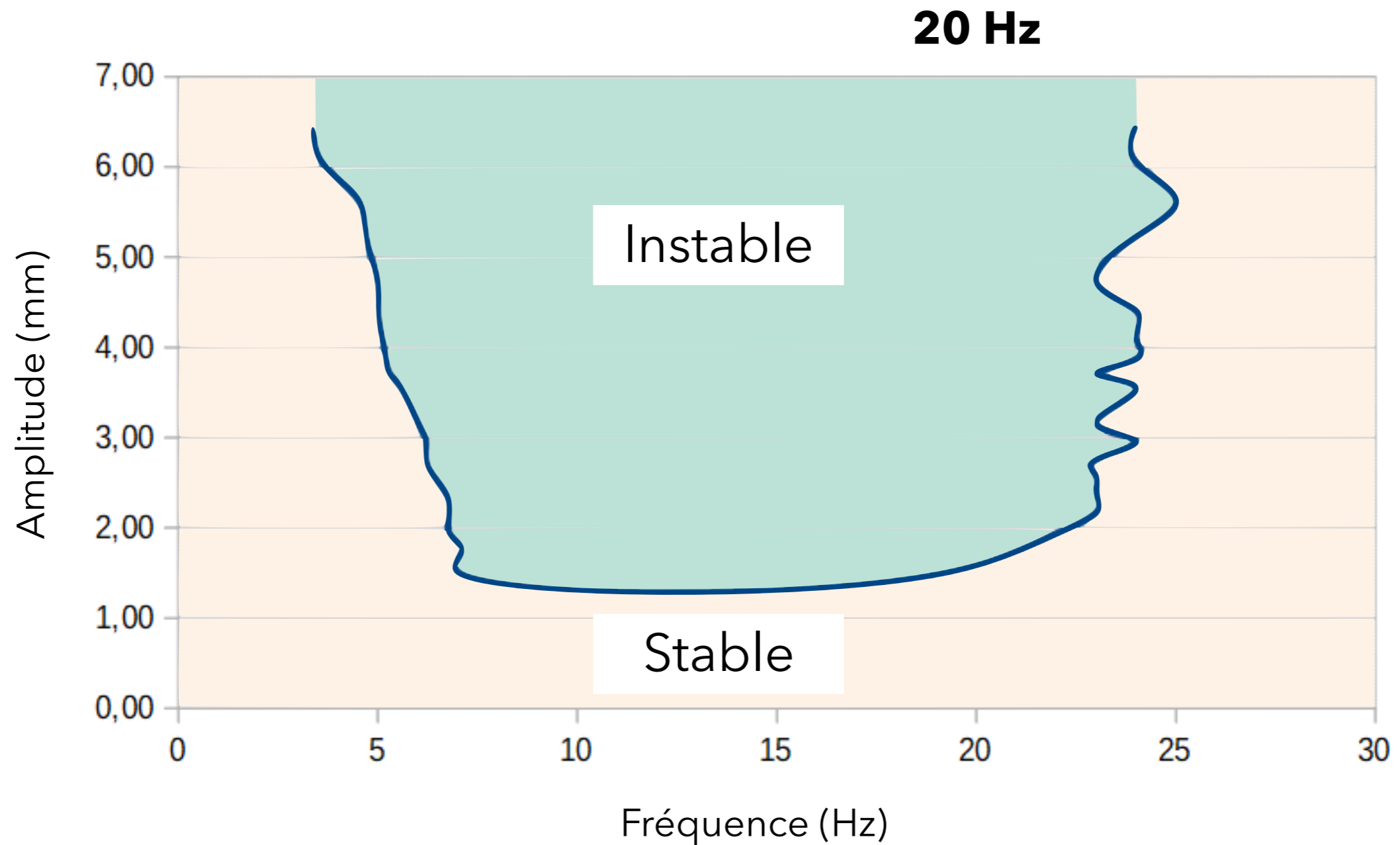


Sommaire

- Contexte
- Hypothèses
- Construction d'un système de lévitation magnétique
- Théorie sur le point d'équilibre
- Recherche du domaine de stabilité
- **Conclusion**

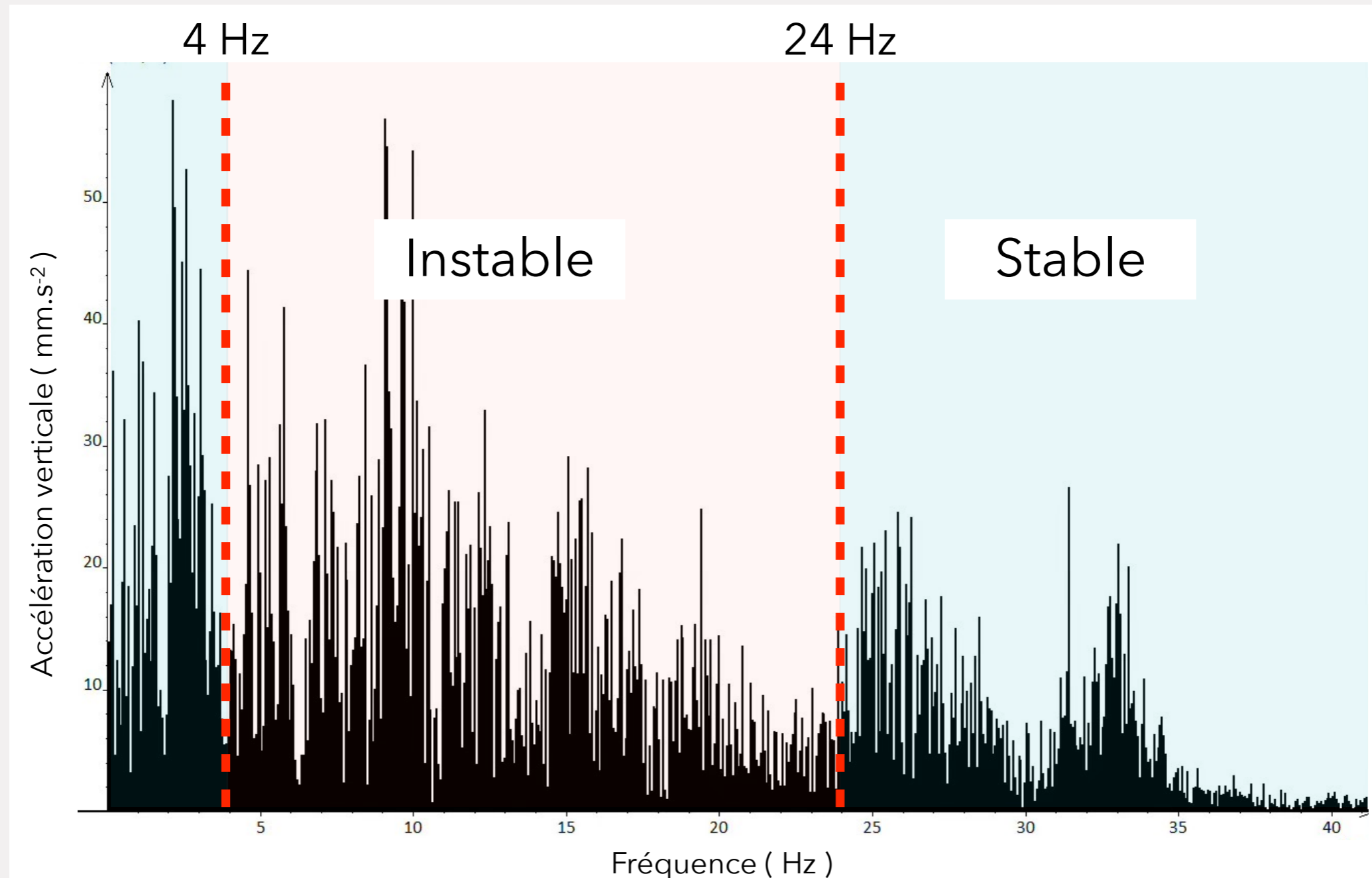
Conclusion

Le modèle est-il stable ?



Conclusion

Le modèle est-il stable ?



Conclusion

Le modèle est-il stable ?



- Stable dans les basses fréquences.
- Possible instabilité dans les fréquences comprises entre 4 et 24 Hz.
- Nécessite d'être plus vigilant dans la construction des rails pour éviter les oscillations.

Conclusion

Pour aller plus loin ...

- Améliorer la stabilité en testant d'autres correcteurs
- Étude de la propulsion
- Étude de la lévitation avec des supraconducteurs