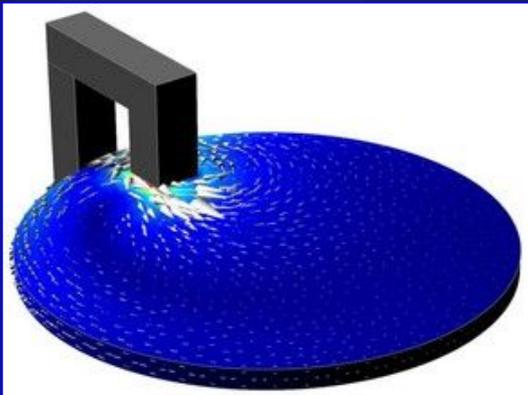
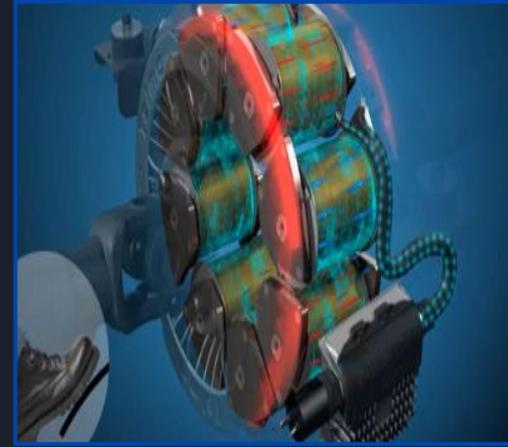


Freinage magnétique

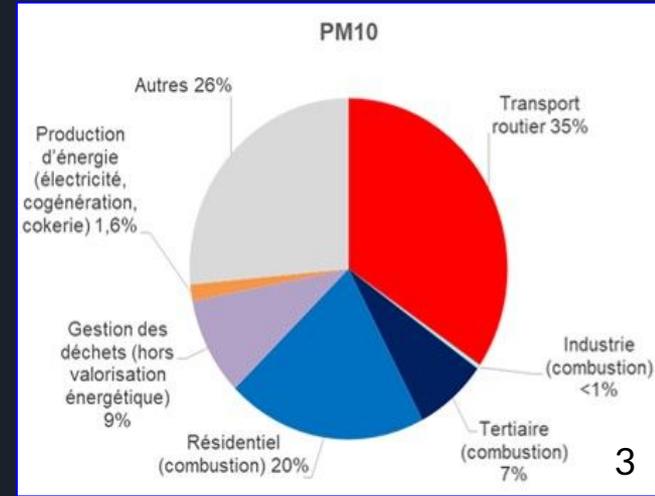
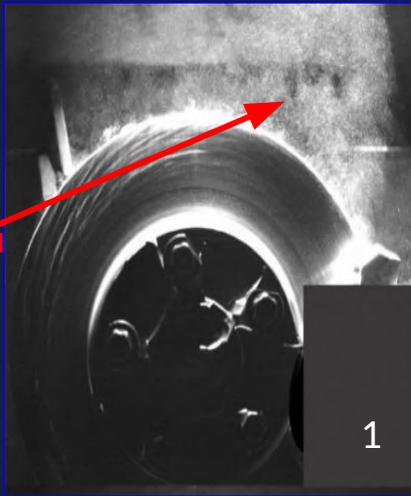


REVOIS Roderick
SCEI : 2079

Introduction

Source : Bruxelles Environnement,
Département Planification air, énergie et
climat (2020)

Particules
fines dues au
frottement



Conséquences sanitaires:
Maladies respiratoires
7 M de morts par an (OMS)

Coût économique et
environnemental



Freinage magnétique :

-sans contact

-durable





Quels sont les phénomènes responsables du freinage magnétique et dans quelle mesure sont-ils adaptables aux voitures ?

Objectifs :

Comprendre le fonctionnement du freinage magnétique, trouver un modèle pratique à mettre en place et le vérifier théoriquement

Vérifier la pertinence du freinage d'un disque et trouver des paramètres d'optimisation



Plan :

I) Appropriation du phénomène sur le modèle simple de freinage d'un aimant dans une tige

- 1) Mise en oeuvre expérience**
- 2) Analyse résultats et confrontation au modèle**

II) Application au freinage d'un disque en rotation

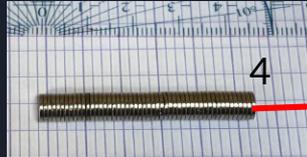
- 1) Influence de la vitesse initiale**
- 2) Influence de l'intensité à fournir**

Conclusion

Annexes

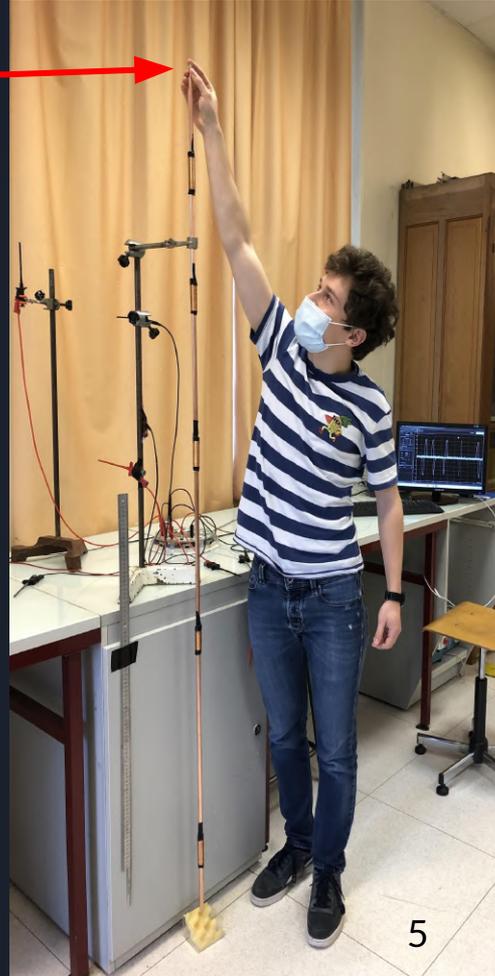
1)

Chute d'un aimant dans une tige



Aimant en néodyme 15,9 g lâché sans vitesse initiale

Tiges en PVC (témoin non métallique), cuivre (10mm de diamètre pour 2m et 14 mm pour 1m et aluminium 10 mm pour un 1m)



Aimant qui émet un champ magnétique en chutant

Le flux dans la tige varie

Force électromotrice

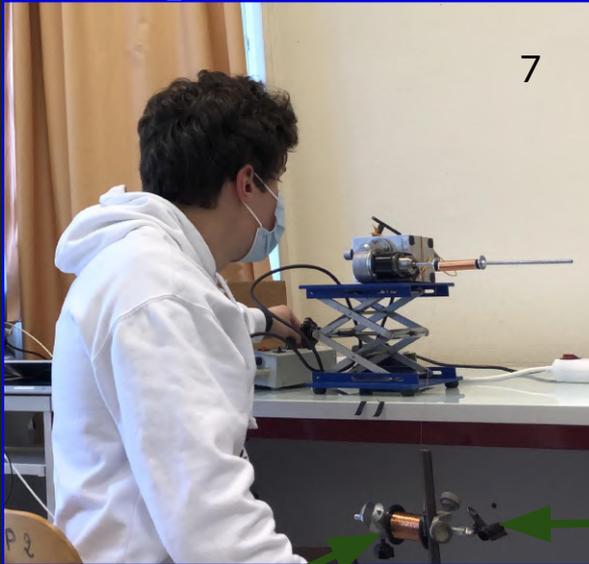
Courants de Foucault induits

Champ magnétique induit

I)1)

Mise en oeuvre

Mesure de la vitesse par bobines de détection



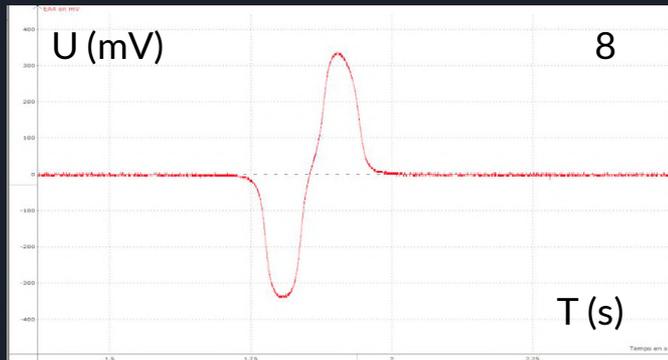
7

2 bobines larges et
5 bobines avec 3
couches de cuivre

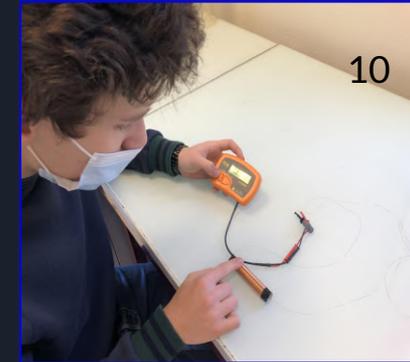
Acquisition
par boîtier
sysam
Logiciel: Latis
Pro

Fil de cuivre
émaillé 35mm

Moteur synchrone



9



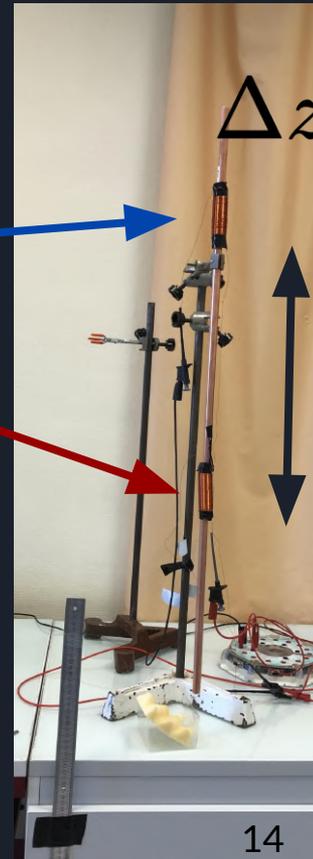
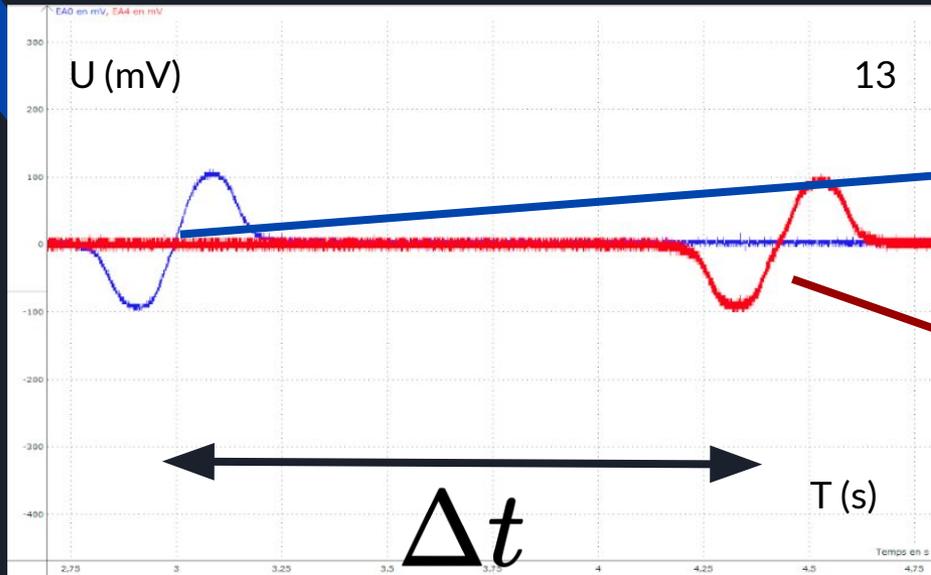
10



11

Profil de la tension aux bornes d'une bobine en fonction du temps

1)2) Mesures et premiers résultats



Accès à la vitesse :

$$v = \frac{\Delta z}{\Delta t}$$

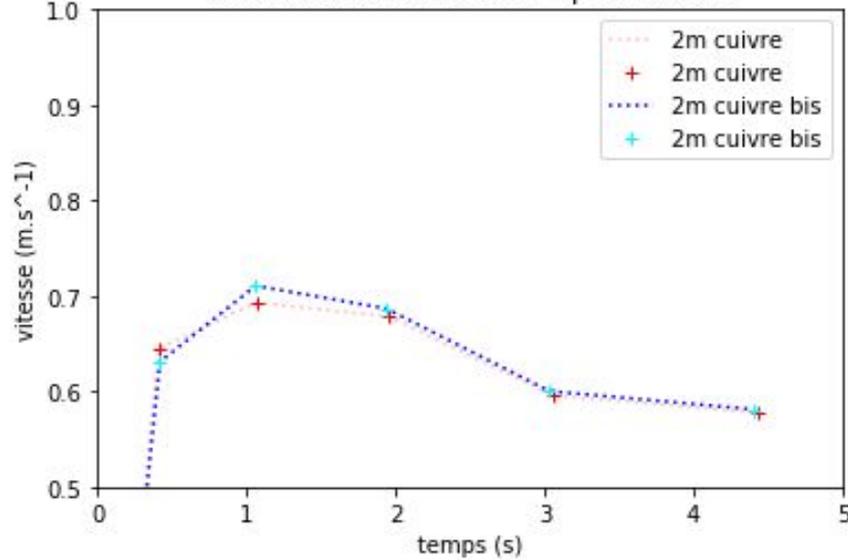
Observations :
Freinage existant et conséquent
Meilleur freinage avec cuivre
Tubes emboîtés permettent meilleur freinage



Analyse résultats

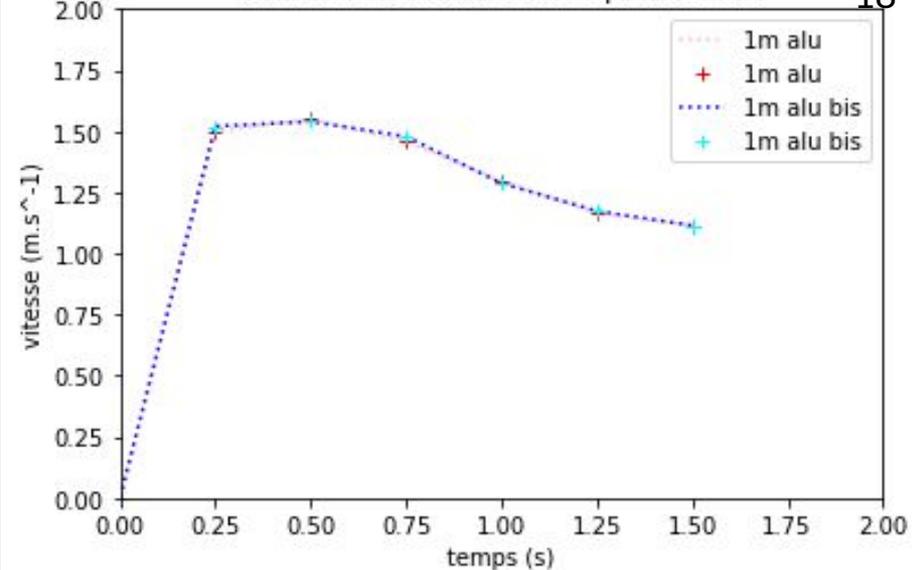
vitesse en fonction du temps de chute

17



vitesse en fonction du temps de chute

18



Reproductible

Mise en évidence vitesse limite

Meilleur freinage avec cuivre

Modèle : aimant = dipôle

Force de frottement fluide :

$$\vec{F} = -\frac{45}{1024} \left(\frac{\mu_0 M}{R^2} \right)^2 \gamma e \vec{V}$$

$$\vec{F} = -\alpha \vec{V}$$

$$\alpha = \frac{45}{1024} \left(\frac{\mu_0 M}{R^2} \right)^2 \gamma e$$

1)2)

Confrontation modèle

$$m\vec{a} = -\alpha\vec{v} + m\vec{g}$$

$$\vec{v} = \vec{v}_\infty + A \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$$

$$\|\vec{v}_\infty\| = \frac{mg}{\alpha}$$

$$\tau = \frac{m}{\alpha}$$

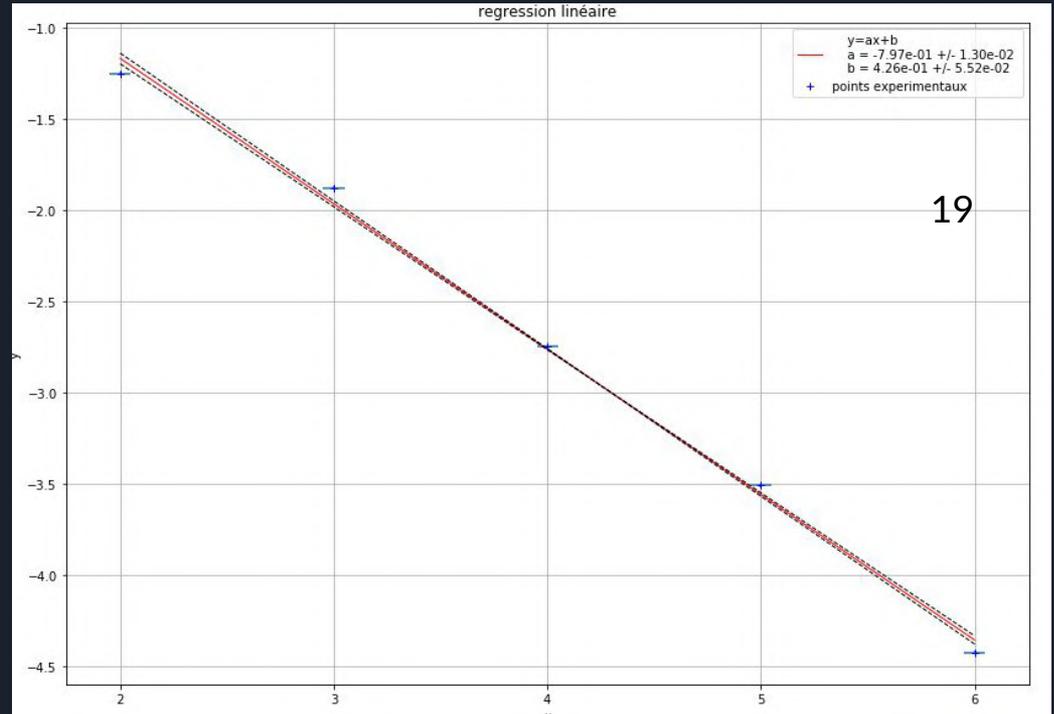
$$\alpha = \frac{45}{1024} \left(\frac{\mu_0 M}{R^2} \right)^2 \gamma e$$

$$\ln(v - v_\infty) = -\frac{t}{\tau} + \ln A$$

$$y = -\frac{1}{\tau}x + b$$

$$M_{exp} = 0.24 \pm 0.02 \text{ A} \cdot \text{m}^2$$

$$M_{théo} = 0.45 \pm 0.05 \text{ A} \cdot \text{m}^2$$



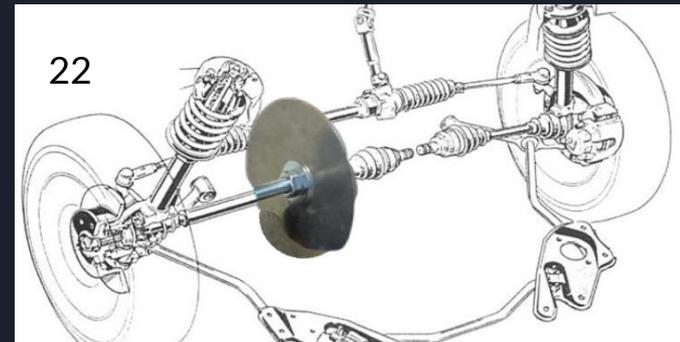
Limites du modèle :
 Approximation dipolaire
 Tube fini
 Contact tige aimant

II)

Application au freinage d'un disque en rotation dans l'entrefer d'un électroaimant



Disque en aluminium de diamètre 10 cm et épaisseur 8mm



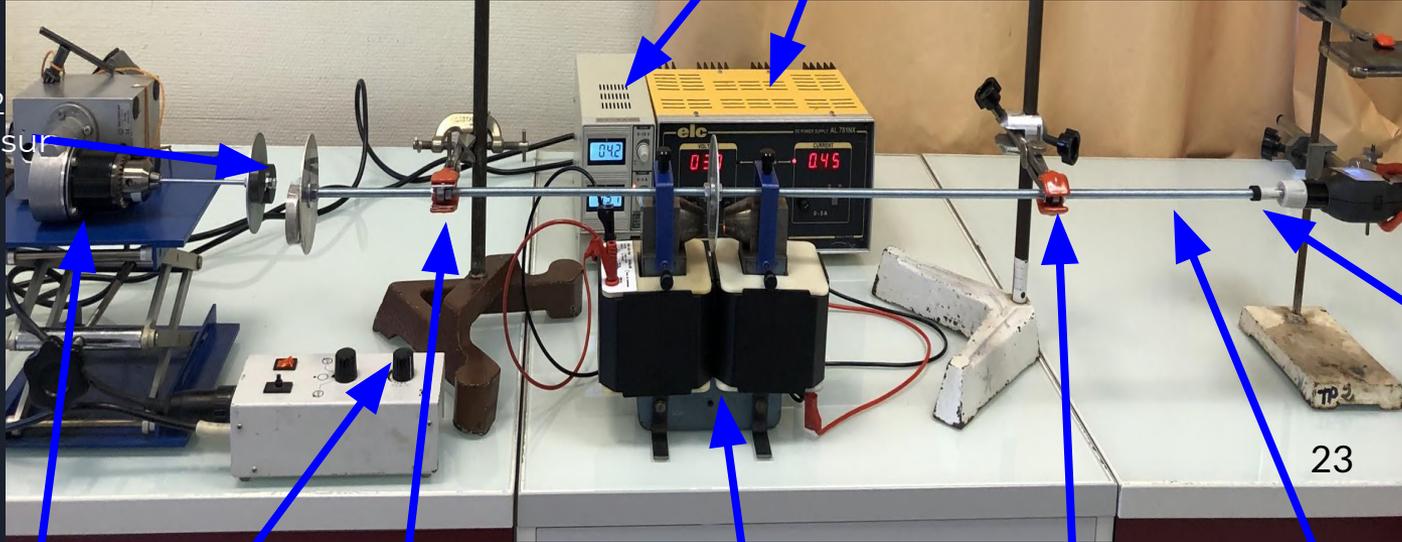
II)

Mise en oeuvre

Chaque générateur de courant est relié à une bobine orienté

Portable avec vision sur tachymètre (horloge)

Transmission magnétique: 2 aimants collés sur chaque disque



Tachymètre mesurant vitesse de rotation

23

Moteur à vitesse de rotation variable

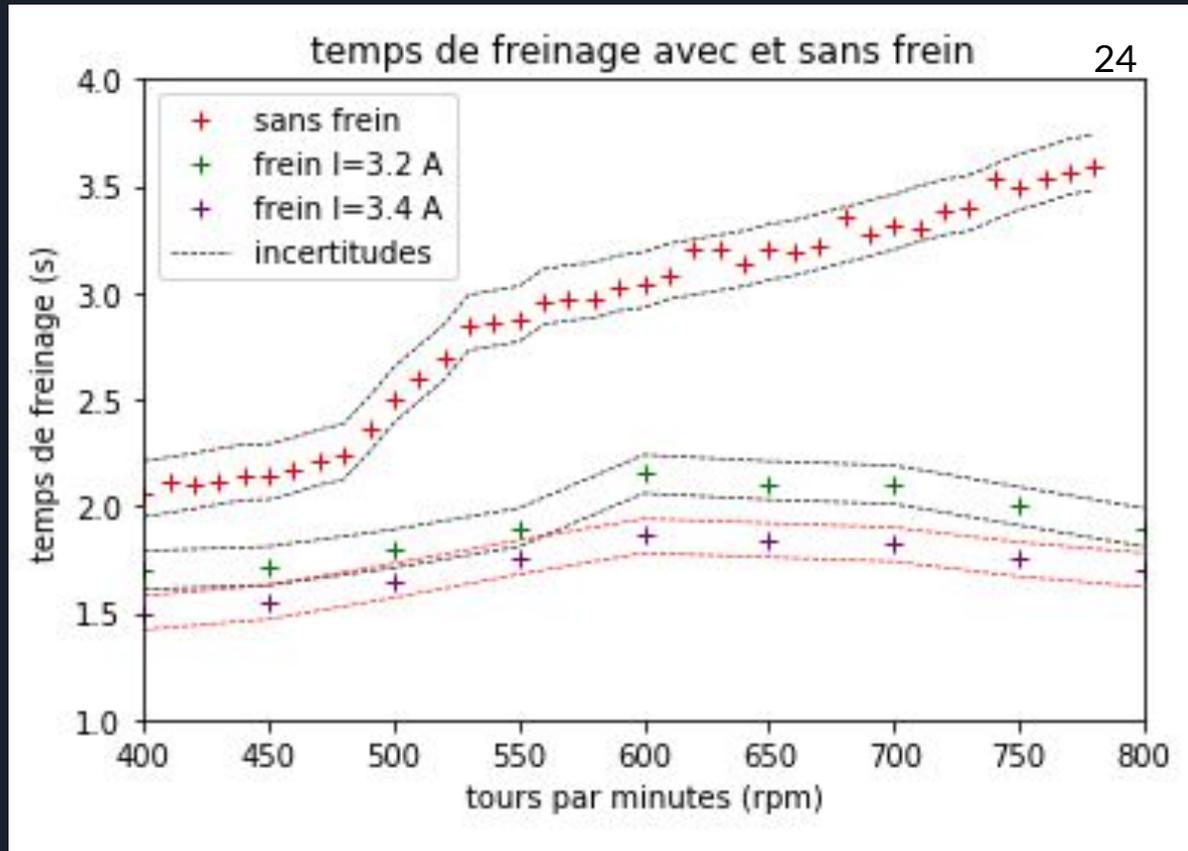
Fixation par roulements à billes maintenues

Electroaimant : le courant envoyé par les générateur permet l'apparition d'un champ magnétique dans l'entrefer

Axe de rotation solidaire avec disque, roulements à billes

Influence de la vitesse initiale :

24

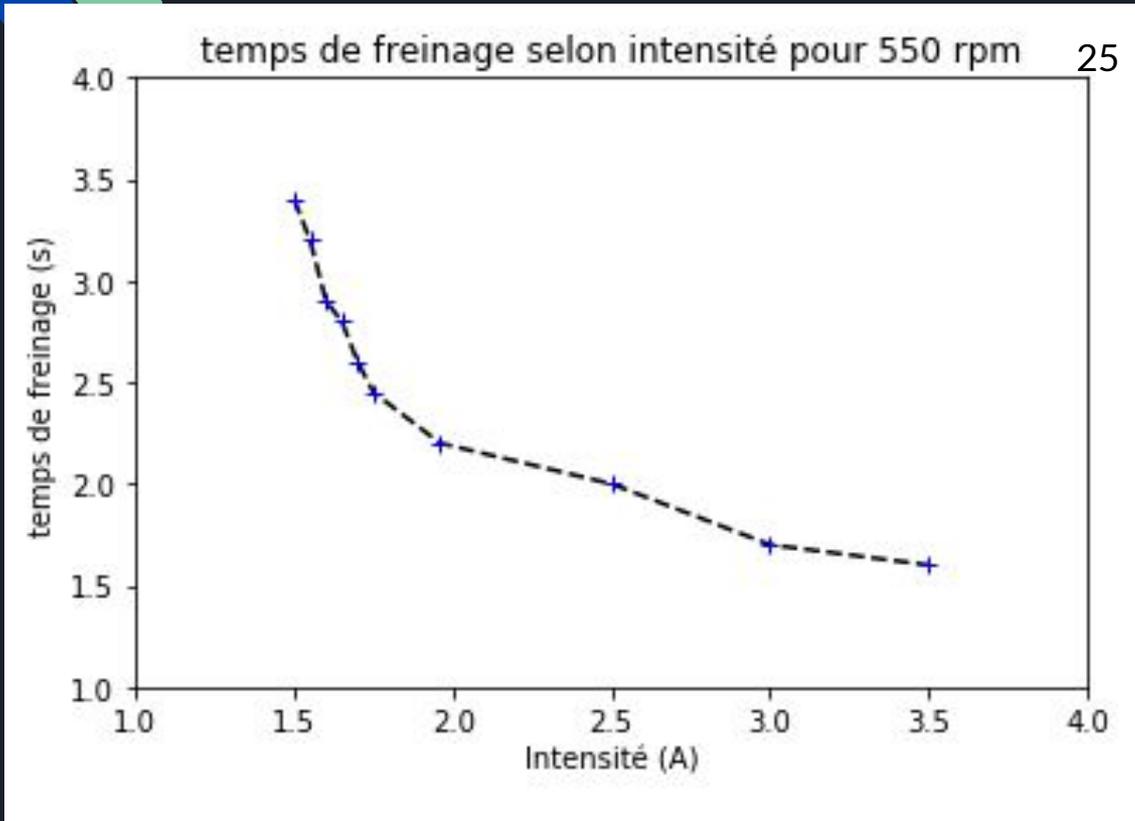


Mise en évidence de freinage

Faible à petites vitesses

Important à grandes vitesses

Influence de la tension

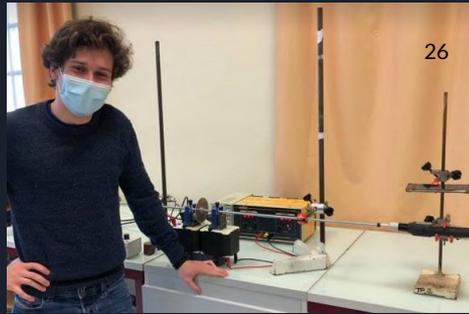


Pas de freinage à faible intensité

Le freinage est d'autant plus efficace que l'intensité est grande

$$F = \frac{\mu^2 N^2 I^2 A}{2\mu_0 L^2}$$

Conclusion



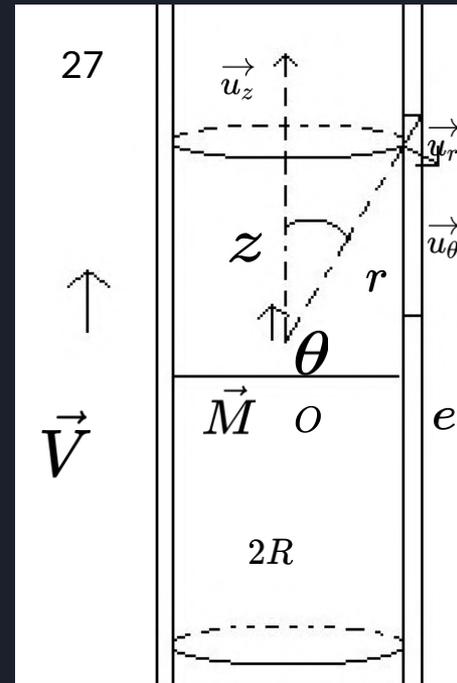
Type de freinage	Propriétés	Avantages	Inconvénients
Aimant dans tige	Courants de Foucault, plus efficace avec grande épaisseur et conductivité	Pas de frottements Repose sur loi de modération	Pas d'arrêt total Pas efficace à petites vitesses
Disque freiné par électroaimant	Fonctionne à grande intensité	Durable	Dispositif encombrant
Frein à plaquettes	Freinage par frottement	Technologie fiable, arrêt total	Coût économique Pollution Cas de surchauffe

Combiné à un frein normal, un frein à courants de Foucault dont le poids et l'efficacité sont optimisés offre une alternative sûre, écologique et viable aux simples freins à plaquettes traditionnels



Merci de votre attention

Annexe calcul champ



$$(\vec{u}_r, \vec{u}_\theta, \vec{u}_z)$$

$$r = \sqrt{R^2 + z^2}$$

$$\sin \theta = \frac{r}{z}$$

$$\cos \theta = \frac{z}{r}$$

$$\tan \theta = \frac{R}{z}$$

$$\vec{M} = M\vec{u}_z$$

$$\vec{B} = B_r\vec{u}_r + B_\theta\vec{u}_\theta$$

$$B_r = \frac{\mu_0 M 2 \cos \theta}{4\pi r^3}$$

$$B_\theta = \frac{\mu_0 M \sin \theta}{4\pi r^3}$$

$$\text{div} \vec{B} = 0$$

$$d^2 S = r^2 d\theta \sin \theta d\phi$$

$$\begin{aligned} \Phi &= \iint_S B_r(r) r^2 \sin \theta d\theta d\phi \\ &= 2\pi \int B_r(r) r^2 \sin \theta d\theta \\ &= \frac{\mu_0 M}{r} \int \cos \theta \sin \theta d\theta \\ &= \frac{\mu_0 M}{2r} \sin^2 \theta \\ &= \frac{\mu_0 M}{2R} \sin^3 \theta \end{aligned}$$

$$dG = \frac{\gamma e dz}{2\pi R}$$

$$dI = -dG \dot{\Phi}$$

$$\dot{\Phi} = \frac{3\mu_0 M}{2R} \sin^2 \theta \cos \theta \dot{\theta}$$

$$\tan \theta = \frac{R}{z}$$

$$\frac{d\theta}{dz} = -\frac{\sin^2 \theta}{R}$$

$$\dot{\theta} = -\frac{\sin^2 \theta}{R} V$$

$$\dot{\Phi} = -V \frac{3\mu_0 M}{2R^2} \sin^4 \theta \cos \theta$$

$$dI = \frac{1}{2\pi R} \gamma e \frac{3\mu_0 M}{2R} \sin^2 \theta \cos \theta V d\theta$$

$$d^2 F_z = (dI \vec{dl} \wedge \vec{B}) \cdot \vec{u}_z$$

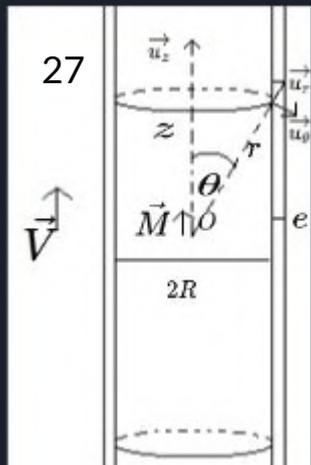
$$dF_z = 2\pi R dI (B_r \sin \theta + B_\theta \cos \theta)$$

$$F_z = \int_0^\pi -\frac{9}{8\pi} \left(\frac{\mu_0 M}{R^2} \right)^2 \gamma e V \cos^2 \theta \sin^6 \theta d\theta$$

$$= -\frac{45}{1024} \left(\frac{\mu_0 M}{R^2} \right)^2 \gamma e V$$

$$= -\alpha V$$

$$\alpha = \frac{45}{1024} \left(\frac{\mu_0 M}{R^2} \right)^2 \gamma e$$



27

Annexe calcul incertitude

Exp 1:

Résultats captés entièrement numériquement

Pas d'aléas liés à l'opérateur

$$u_t = 2 \frac{0.001}{2\sqrt{3}} \approx 0.01s$$

-Précision réticule latiss pro

-Précision bobine

-Distance entre bobines

$$u_{vmax} = 0.60 \times \sqrt{2 \left(\frac{0.001}{2\sqrt{3}} \right)^2 + 2 \left(\frac{0.02}{0.30} \right)^2} \approx 0.05 m. s^{-1}$$

```
def RegLin(X,u_X,Y,u_Y):
    dist_X=np.random.normal(X,u_X,size=(N,len(X)))
    dist_Y=np.random.normal(Y,u_Y,size=(N,len(Y)))

    droite = np.array( [np.polyfit(dist_X[i],dist_Y[i],1) for i in range (N)] )

    pente=np.mean(droite[:,0])
    ord_ori=np.mean(droite[:,1])
    u_pente=np.std(droite[:,0])
    u_ord_ori=np.std(droite[:,1])

    return (pente,ord_ori,u_pente,u_ord_ori,dist_X,dist_Y)

def Trace1(X,u_X,Y,u_Y,pente,u_pente,ord_ori,u_ord_ori,nuage_X,nuage_Y):
    """ cette fonction trace la droite de régression, les droites extrêmes, les barres d'erreur associées à chaque point expérimental"""
    # X,uX : abscisses initiales, et incertitudes-type
    # Y,uY : ordonnées initiales, et incertitudes-type
    # pente, u_pente : pente moyenne et écart-type de la distribution des pentes
    # ord_ori, u_ord_ori : Ordonnée à l'origine moyenne et écart-type de la distribution des ordonnées à l'origine

    x=np.linspace(np.min(X),np.max(X),2)
    y=pente*x+ord_ori # Droite moyenne de régression

    p_min=pente-u_pente;p_max=pente+u_pente; # pente max et min
    ord_ori_min=ord_ori-u_ord_ori;ord_ori_max=ord_ori+u_ord_ori; # ordonnée origine max et min
    droite_maxi=p_max*x+ord_ori_min # Droite extrême maxi
    droite_mini=p_min*x+ord_ori_max # Droite extrême mini

    fig, ax = plt.subplots(figsize=(14,10)) #sous figure de 1400 pixels sur 1000 pixels
    # plt.figure(1)
    plt.plot(x,y,label=" y=ax+b \n\
a = {0:.2e} +/- {1:.2e} \n\
b = {2:.2e} +/- {3:.2e}").format(a,u_a,b,u_b),linewidth=1,color="r")
    plt.plot(x,droite_maxi,"-",linewidth=1,color="k")
    plt.plot(x,droite_mini,"-",linewidth=1,color="k")
    plt.errorbar(X,Y,xerr=u_X,yerr=u_Y,linestyle="")
    plt.plot(X,Y,"+",markersize=6,label="points expérimentaux",color="b")

    plt.grid(True)
    plt.xlabel("x")
    plt.ylabel("y")
    plt.title("regression linéaire")
    plt.legend()
    plt.show()
```

28

Annexe calcul incertitude

Exp 2

Deux appareils de mesures : tachymètre et chronomètre (précisions et résolutions connues)

Opérateur : erreur appréciation temps estimée à 0,05 secondes (ralenti)

$$\Delta u = \sqrt{\left(\frac{1}{100 \times 2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{0.0006 \times 2.03}{2\sqrt{3}}\right)^2 + (0.05)^2} \approx 0.09 \text{ s}$$



Sources photos :

Première page

Simulation : <https://www.comsol.com/blogs/simulating-eddy-current-brakes/>

Frein telma : <https://fr.telma.com/produits/fonctionnement>

1:

https://www.sciencesetavenir.fr/high-tech/emissions-de-particules-par-les-freins-un-futur-scandale_127761

2: <https://www.euro-assurance.com/prevention/pic-pollution-particules-fines.html>