

Freinage électromagnétique dans le cadre ferroviaire

Principe de fonctionnement



Commande de
freinage d'urgence



- 2 cas :
- distant du rail (freinage à courants de Foucaults)
 - contact avec le rail (freinage magnétique)

Plan

I. Champ magnétique généré

1. Champ créé par un électroaimant
2. Géométrie des patins
3. Estimation du champ magnétique

II. Freinage par courants de Foucaults

1. Principe de fonctionnement
2. Modèle de la force
3. Vérification expérimentale

III. Freinage magnétique

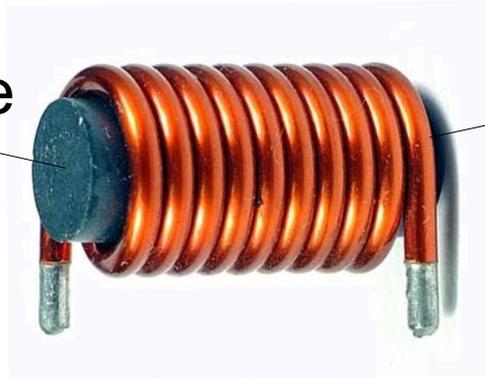
1. Principe de fonctionnement
2. Détermination expérimentale du coefficient de frottement
3. Détermination théorique de la force

IV. Conclusion

I. Champ magnétique généré

1. Champ créé par un électroaimant :

Matériau ferromagnétique
(fer doux)



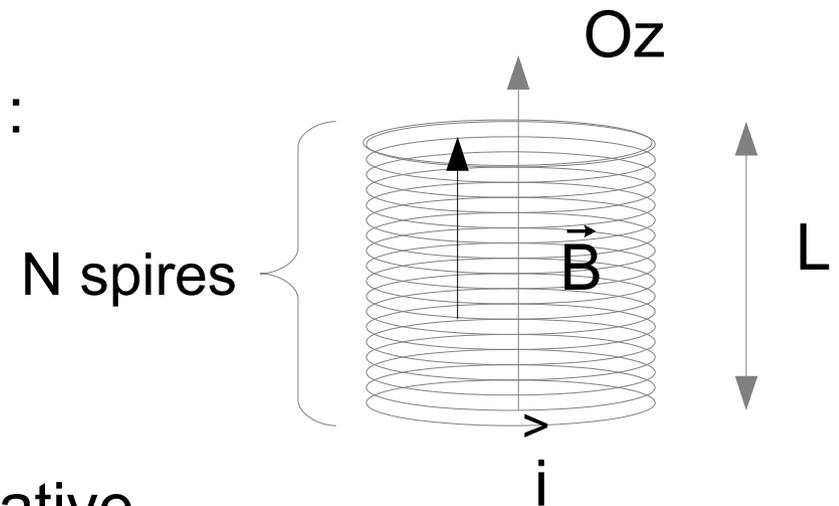
Bobinage alimenté par
un courant électrique

Champ magnétique généré (th d'Ampère) :

$$\vec{B} = \frac{\mu N}{L} i \vec{e}_z$$

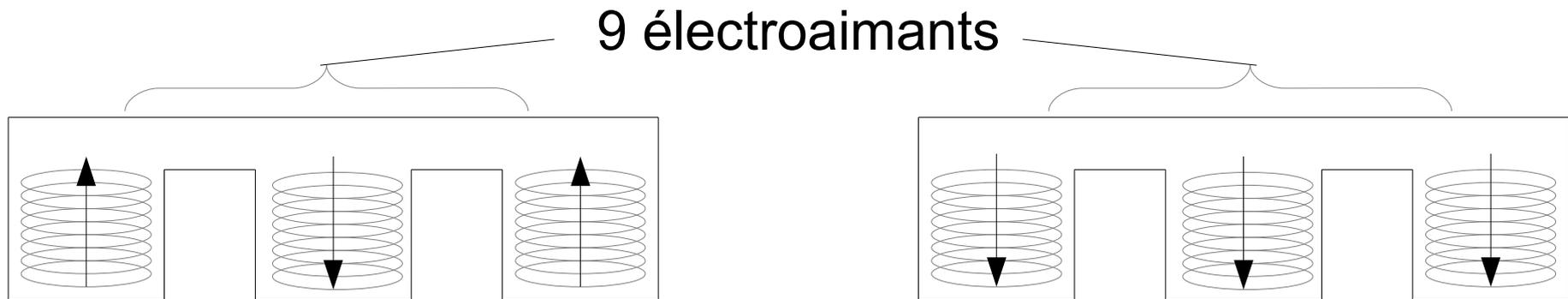
$$\mu = \mu_r \mu_0$$

μ_r → Perméabilité relative



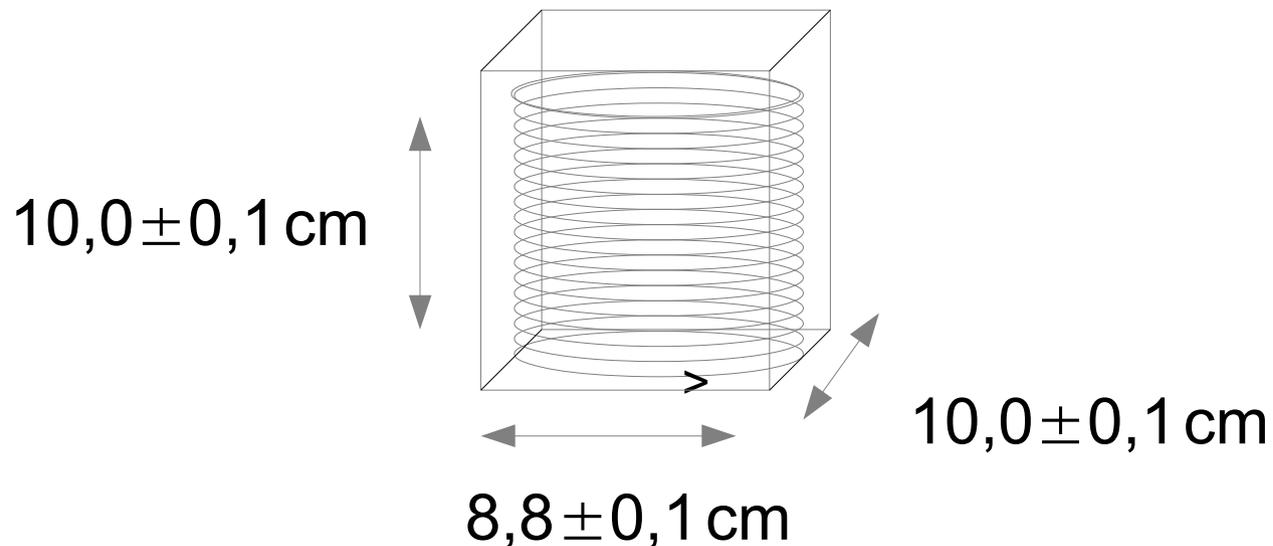
I. Champ magnétique généré

2. Géométrie des patins :



Freins à courants de Foucaults :
alternation de pôle nord et sud

Freins magnétique : champ
magnétique constant (aimantation)



I. Champ magnétique généré

3. Estimation de la norme du champ magnétique :

Données fournis par l'entreprise de fabrication pour un patin (Tramways) :



- Alimentation : 24V
- Consommation : 40A

KNORR-BREMSE

Consommation pour un électroaimant : $I=4,4A$

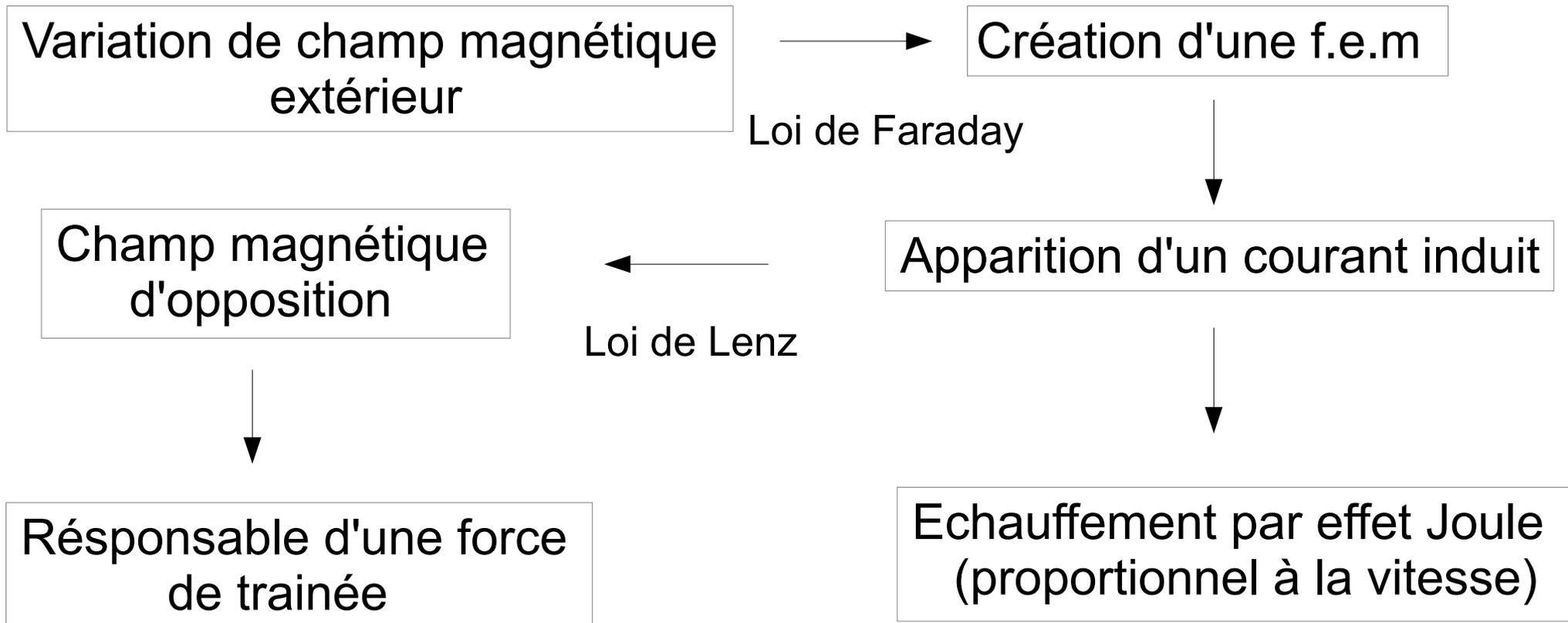
Hypothèse : -Nombre de spires $N=20$

- $\mu_r = 1000$

$$B = 1,10 \pm 0,02 \text{ T}$$

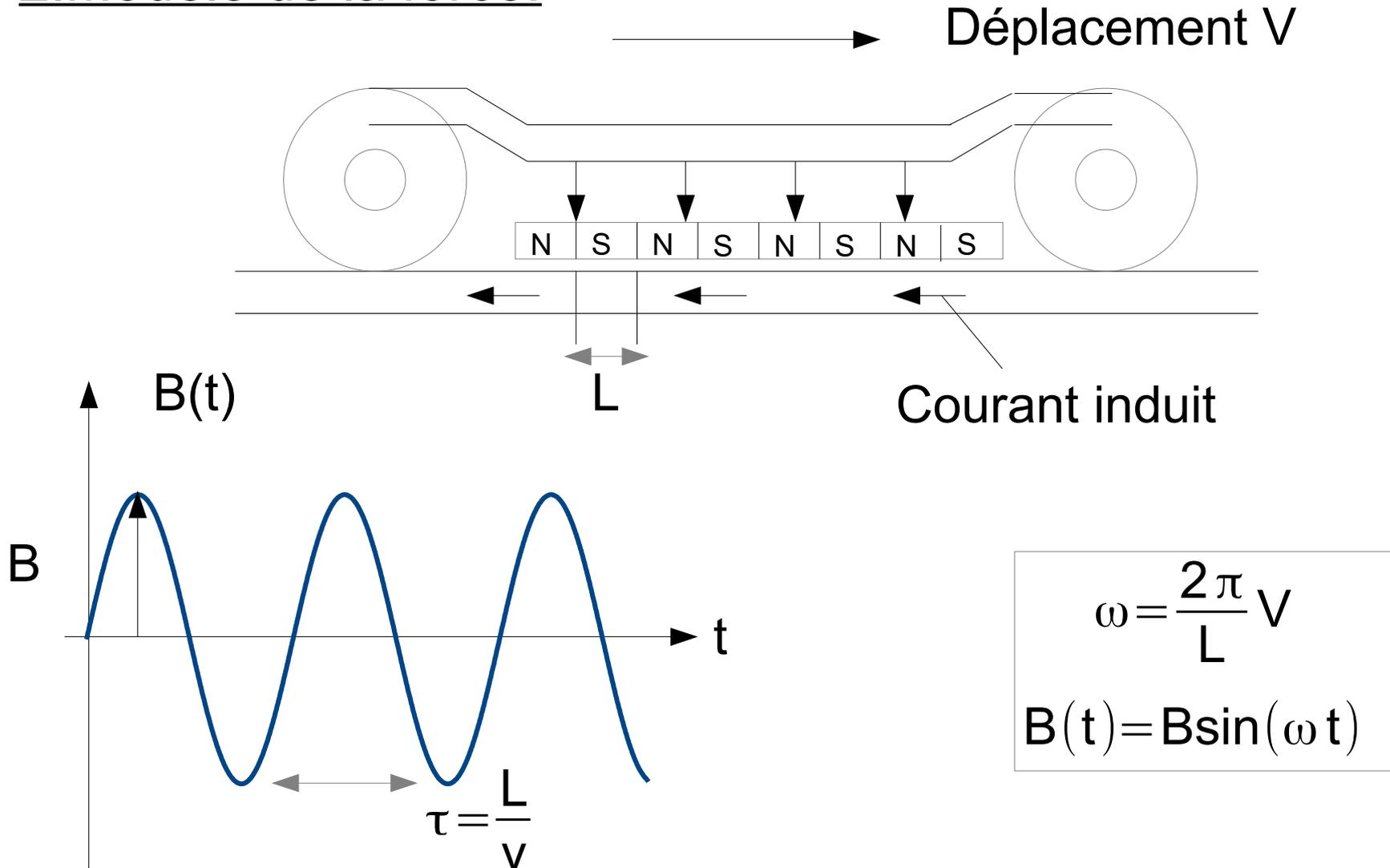
II. Freinage par courants de Foucault

1. Principe de fonctionnement :



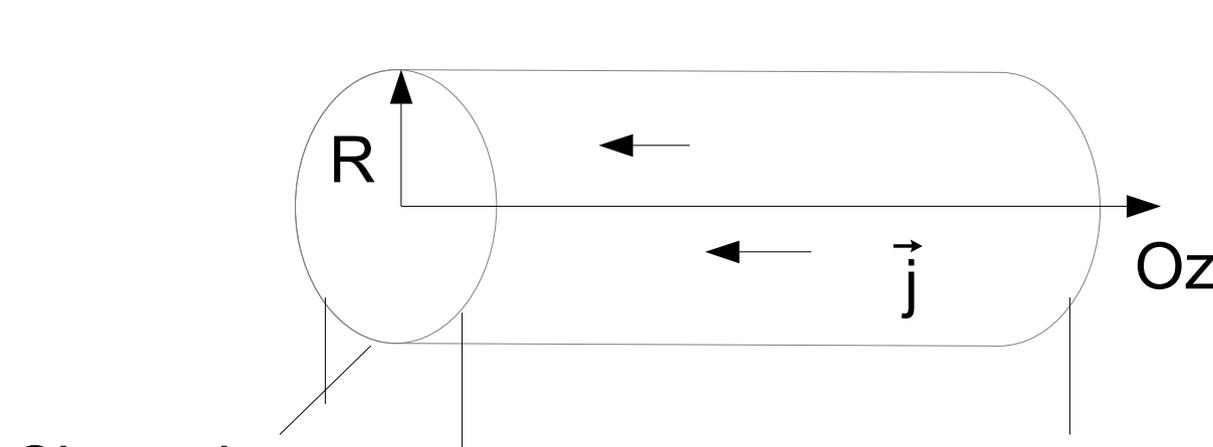
II. Freinage par courants de Foucault

2. Modèle de la force:



II. Freinage par courants de Foucault

2. Modèle de la force:

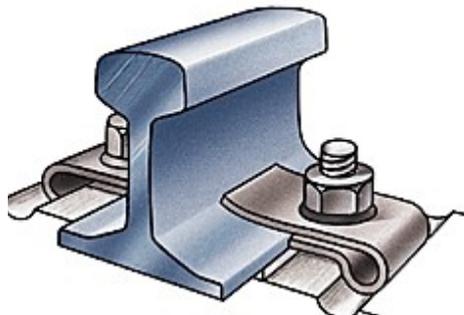


\vec{j} : densité de courant

$$\vec{j} = \frac{-I_{\text{ind}}}{\pi R^2} \vec{e}_z$$

σ : conductivité du rail

Champignon



Equation de Maxwell-Faraday + loi d'ohm :

$$P_j = \frac{\pi}{8} \sigma B^2 \omega^2 L R^4 \cos(\omega t)^2$$

Valeur moyenne instantanée :

$$\langle P_j \rangle = \frac{\pi}{16} \sigma B^2 \omega^2 L R^4$$

II. Freinage par courants de Foucault

2. Modèle de la force:

$$\langle P_j \rangle = \frac{\pi^3 R^4 \sigma B^2}{4L} V^2 = \vec{F} \cdot \vec{V}$$

Par identification :

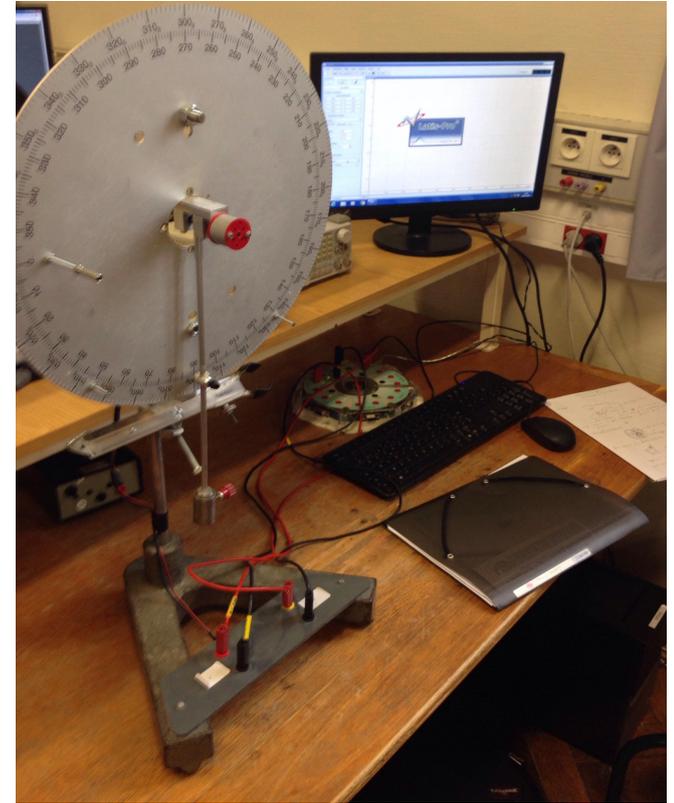
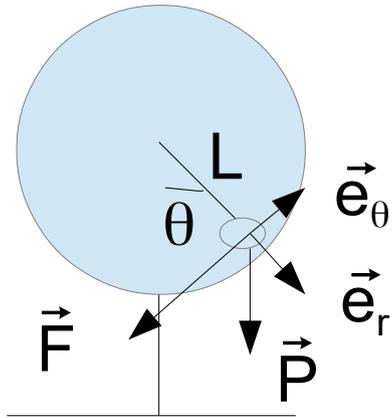
$$\|\vec{F}\| = \underbrace{\frac{\pi^3 R^4 \sigma B^2}{4L}}_{\text{constante}} V$$

Conclusion : -Présence d'une force de frottement fluide

- $F \propto V \longrightarrow$ TGV
- $\langle P_j \rangle \propto V^2 \longrightarrow$ Echauffement du rail
- Incapacité de freiné totalement

II. Freinage par courants de Foucault

3. Validation expérimentale :



Systeme : { tige + aimant (J) }

BDF : -Poids $\vec{P} = -mg(\cos(\theta)\vec{e}_r - \sin(\theta)\vec{e}_\theta)$
 -Frottement fluide $\vec{F} = -\alpha L \dot{\theta} \vec{e}_\theta$

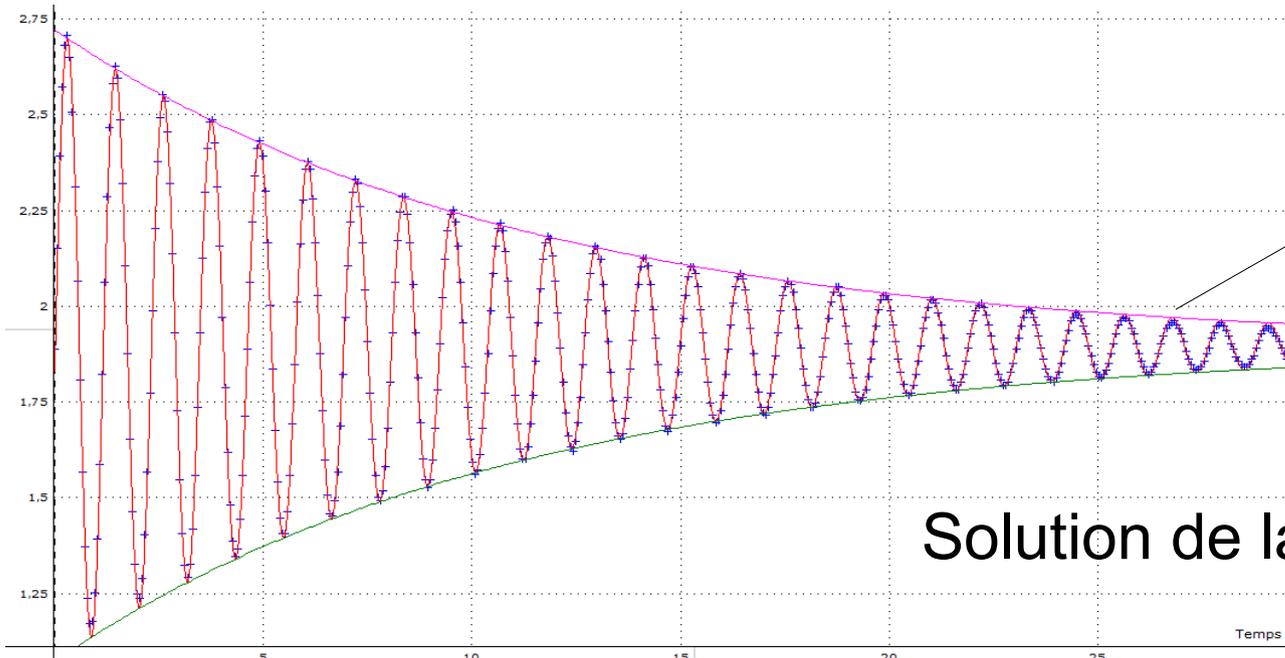
TMC+petit angle :

$$\ddot{\theta} + \frac{\alpha L^2}{J} \dot{\theta} + \frac{Lmg}{J} \theta = 0$$

$\frac{\omega_0}{Q}$ ← → ω_0^2

II. Freinage par courants de Foucault

3. Validation expérimentale :



Décroissance exponentielle des oscillations

Solution de la forme :

$$EA0=1,897+0,824*\exp(-16,536E-3*2*pi*0,868*Temps)*\cos(2*pi*0,868*Temps-1,65)$$

$$\theta(t) = A e^{-\frac{\omega_0}{Q}t} \cos\left(\omega_0 \sqrt{1 - \frac{1}{4Q^2}}t + \varphi\right)$$

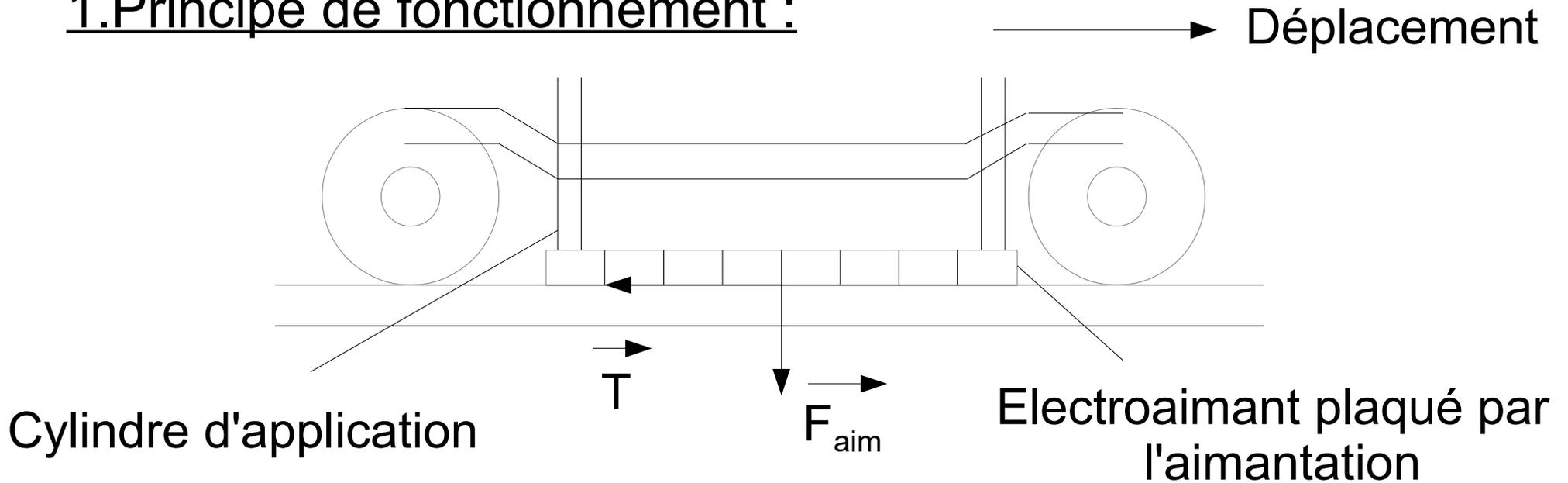
Ecart Type = 525,023E-6	Erreur en X	Erreur en Y
Coefficient de Corrélation = 0,999	0 s	0 V

$R^2 = 0,999$

Modèle pertinent

III. Freinage électromagnétique

1. Principe de fonctionnement :



Loi de Coulomb :

$$\left\{ \begin{array}{l} \|\vec{T}\| = \mu_d \|\vec{F}_{aim}\| \\ \|\vec{T}\| \leq \mu_s \|\vec{F}_{aim}\| \end{array} \right.$$

Limite du glissement :

Hypothèse : $\mu = \mu_s = \mu_d$

$$\|\vec{T}\| = \mu_d \|\vec{F}_{aim}\|$$

III. Freinage électromagnétique

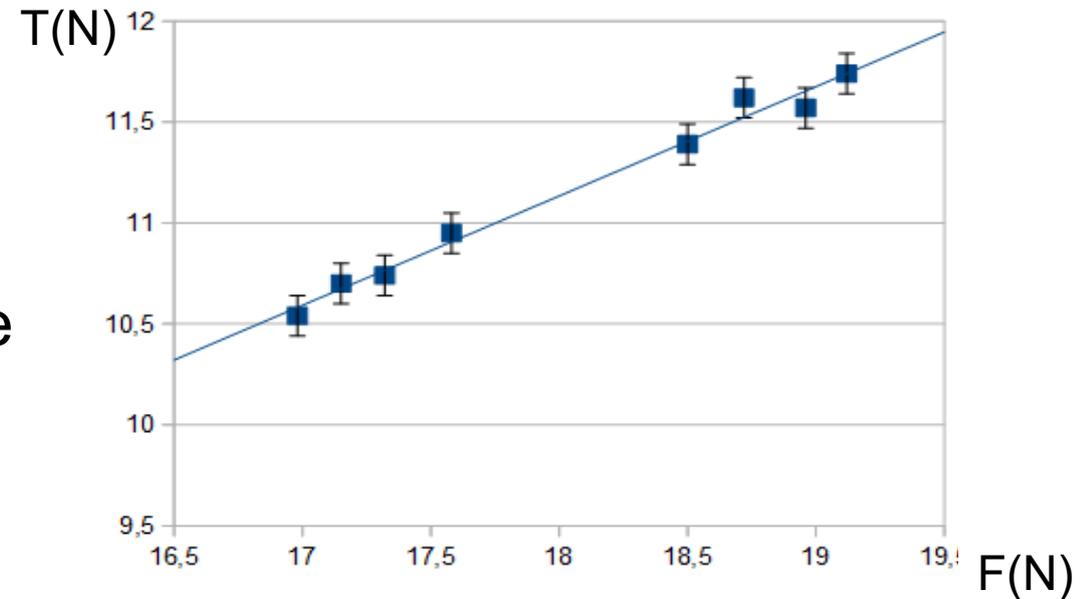
2. Détermination expérimentale du coefficient de frottement :



Alimentation

Dynamomètre

Rail



Barre d'erreur → modèle probable

$$R^2 = 0,98 \quad f(x) = 0,67x + 0,04$$

→ Modèle pertinent

Conclusion :

$$\mu = 0,67 \pm 0,01$$

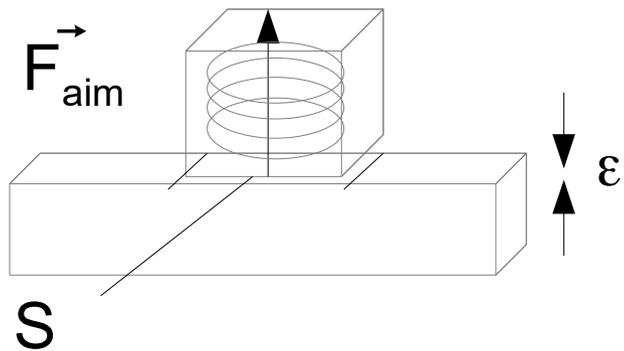
Acier-Acier :

$$\mu_s = 0,74$$

$$\mu_d = 0,57$$

III. Freinage électromagnétique

3. Détermination théorique de la force et comparaison :



\vec{F}_{aim} : force pour déplacer l'électroaimant de ϵ

Travail généré : $W = F_{\text{aim}} \epsilon$

Densité énergétique créé : $e = \frac{B^2}{2\mu_0}$

Travail transformé en énergie : $F_{\text{aim}} \epsilon = \frac{B^2}{2\mu_0} S \epsilon$

Force d'arrachage

$$F_{\text{aim}} = \frac{B^2}{2\mu_0} S$$

III. Freinage électromagnétique

3. Détermination théorique de la force et comparaison :

Force d'arrachage pour un électroaimant : $F_{aim} = 4,24 \pm 0,15 \text{ KN}$

Force d'arrachage pour un patin : $F_{aim} = 38,16 \pm 0,15 \text{ KN}$

Donnée fournis par Knorr Bremse (Tramways)

└─▶ Force d'attraction : 64KN

Conclusion :

$$T = 102,27 \pm 0,21 \text{ KN}$$

Knorr Bremse ─▶ T ~ 171KN

IV. Conclusion

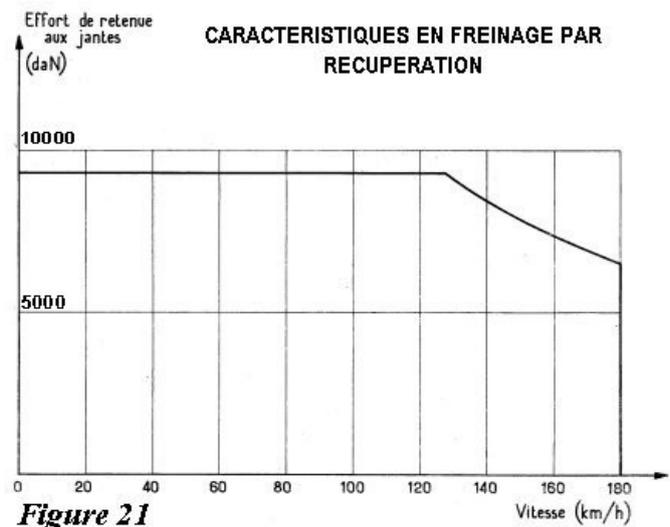
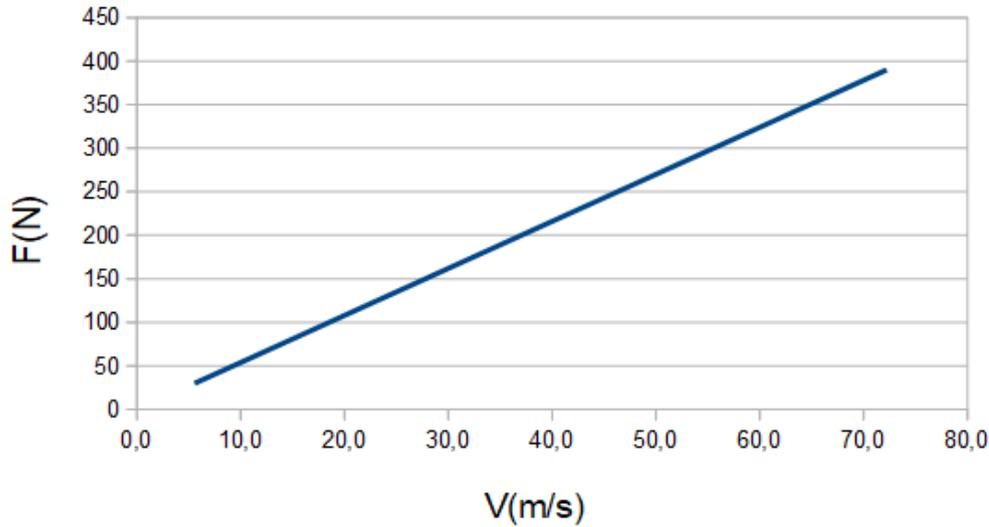


Figure 21

Freinage CF < freinage rhéostatique < freinage magnétique



Complément



Standard



Urgence

Annexe

 TIBTECH	Conductivité Electrique (10.E6 Siemens/m)	R E C
Argent	62,1	
cuivre	58,5	
Or	44,2	
Aluminium	36,9	
Molybdène	18,7	

$$R = 7,1 \pm 0,1 \text{ cm}$$
$$cste = 5,4 \pm 0,2 \text{ kg/s}$$

18,72	11,62
17,15	10,7
18,5	11,39
17,32	10,74
19,12	11,74
16,98	10,54
17,58	10,95
18,96	11,57
N	T

Contact : Mr Perrin Samuel