

RAPPORT TIPE ENS

Sujet : Freinage par courants de Foucault

Sommaire :

- I. Introduction
- II. Freinage tubulaire
 1. Physique de l'expérience
 2. Montage expérimental
 3. Résultats et application
- III. Freinage linéaire
 1. Physique de l'expérience
 2. Montage expérimental
 3. Résultats
- IV. Freinage sur plusieurs lames
 1. Simulation informatique
 2. Montage expérimental
 3. Résultats
- V. Positionnement des lames
 1. Position du problème
 2. Simulation et résultats
- VI. Conclusion
- VII. Annexes
- VIII. Bibliographie

I. Introduction

En 2022, les parcs d'attraction et leurs montagnes russes ont totalisés plus de 3 millions d'entrées. La sécurité est alors un enjeu majeur dans la construction de ces dernières dont les vitesses peuvent atteindre plus de 140 km/h . Il faut des freins puissants et robustes pour pouvoir stopper les wagons et ainsi assurer la sécurité des passagers . De plus, pour coller aux thèmes, certains parcs sont obligés de créer des gares de départ et d'arrivée en souterrain. Le problème avec les freins à disque classique est que la friction des plaquettes sur le disque émet beaucoup de micro-particules polluantes et dangereuses pour l'homme.

Une circulation d'air pas assez efficace peut donc entraîner des concentrations importantes de microparticules et mettre en danger la santé des personnels et des visiteurs. Il semble donc cohérent de s'intéresser à des freins sans contact comme les freins à induction. L'objectif de mon TIPE est de voir si leur utilisation est réaliste et quantifier la force de freinage qu'on peut tirer de tels systèmes. J'ai dans un premier temps donc étudié l'influence de la géométrie du système en expérimentant un freinage dans un tube et un avec des lames. Ensuite, j'ai cherché à quantifier l'influence du nombre de lames et de leurs positions les unes par rapport aux autres.

II. Freinage tubulaire

1. Physique du système

Dans un premier temps nous allons nous intéresser au freinage tubulaire et nous allons chercher à mesurer la force de freinage exercée.

L'expérience est la suivante : nous allons laisser tomber un aimant dans un tube métallique conducteur. Une boucle du tube (constituée d'une section de hauteur dz du tube) va alors voir un flux magnétique variable. Un courant va apparaître dans celle-ci et ce courant va engendrer un champ magnétique qui, par la loi de Lenz, va s'opposer à sa cause. Ce champ va donc freiner l'aimant. On peut modéliser la force de la manière suivante : $\vec{F} = -\alpha\vec{v}$ avec $\alpha > 0$ (démonstration en annexe). On peut donc montrer en appliquant le principe fondamental de la dynamique que la vitesse tends vers $v_{max} = \frac{mg}{\alpha}$. On va donc chercher à mesurer $v_{max} = \frac{L}{\Delta t}$ pour remonter au coefficient de frottement.

De plus on s'attends à trouver un coefficient plus important pour le cuivre que pour l'aluminium car le cuivre étant plus conducteur, l'intensité des courants induits sera plus importante. Le champ magnétique créé sera donc plus fort.

2. Montage expérimental

Pour ce faire on va disposer une bobine au milieu et à la fin du tube (post régime transitoire). Le flux magnétique à travers la bobine va varier au passage de l'aimant et en mesurant les tensions aux bornes de la bobine à l'aide d'une interface d'acquisition, on peut remonter au temps qu'a mis l'aimant pour parcourir la distance entre les bobines.

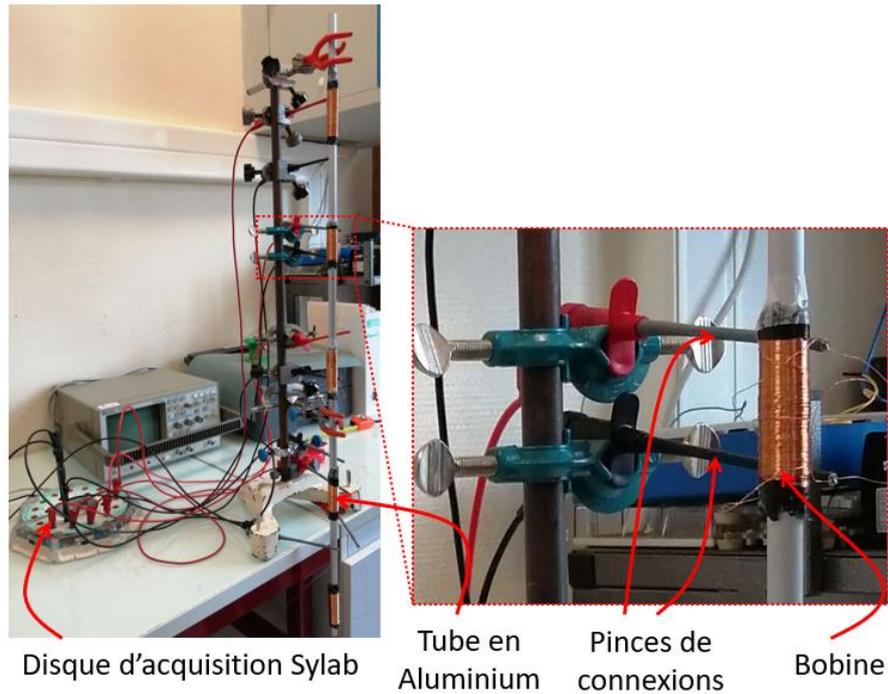


Fig. 1 : Montage expérimental



Fig. 2 : Lacher d'un aimant dans le tube

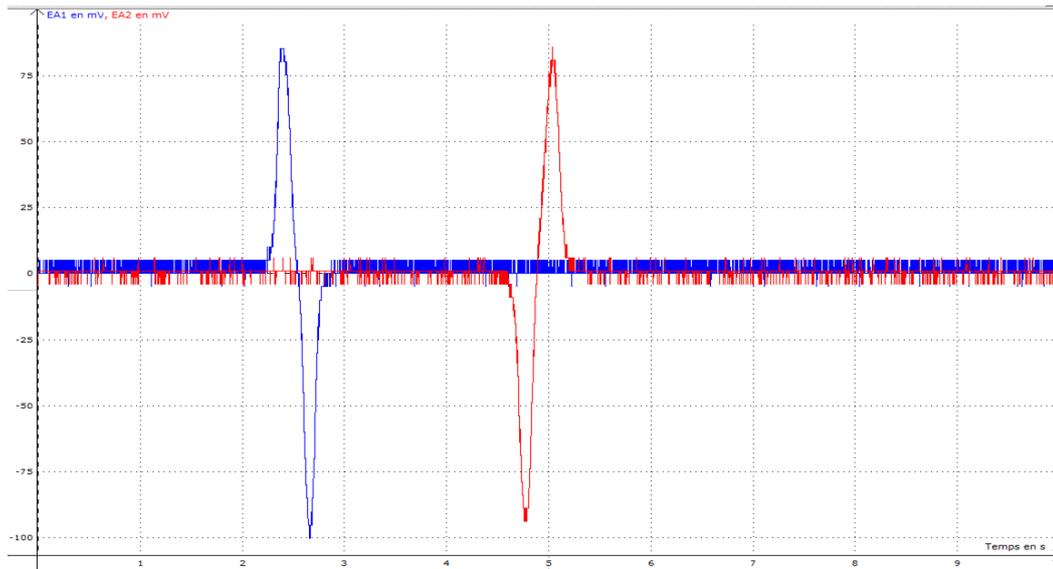


Fig. 3 : Tension aux bornes des 2 bobines au court du temps

3. Résultats

On obtient des coefficients de frottements de 470g/s et de 464g/s respectivement pour le cuivre et l'aluminium. Néanmoins l'incertitude de 5g/s ne permet pas de conclure sur une réelle influence de la conductivité dans notre expérience.

On peut comparer ces résultats avec les coefficients théoriques obtenus par calcul avec l'expression de la force : $\vec{F} = -\frac{45}{1024} \left(\frac{\mu_0 \mathcal{M}}{a^2}\right)^2 \sigma e \vec{v}$ (\mathcal{M} est le moment magnétique de l'aimant, a est le rayon du tube, σ est la conductivité linéique du métal et e son épaisseur). La démonstration de cette formule est présentée en annexe 1. On obtient alors les résultats suivants :

| Donnée | Valeur moyenne | | Incertitude | Type d'incertitude |
|---|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------------|
| | Cuivre | Aluminium | | |
| Coefficient de frottement expérimental (α_{exp}) | $0,47\text{ kg s}^{-1}$ | $0,46\text{ kg s}^{-1}$ | $0,05\text{ kg s}^{-1}$ | Type A et Simulation Python |
| Coefficient de frottement théorique (α_{th}) | $0,3\text{ kg s}^{-1}$ | $0,3\text{ kg s}^{-1}$ | $0,1\text{ kg s}^{-1}$ | Type A et Simulation Python |
| Z - score | 1,4 | 1,3 | | Simulation python |

Fig. 4 : Résultats de la première expérience et comparaison avec les coefficients attendus

Les résultats théoriques confirment donc notre hypothèse que plus le métal est conducteur, plus la force de freinage sera importante. De plus, on remarque que l'incertitude sur les coefficients théoriques est plus importante que celle sur les coefficients expérimentaux. Cela est dû au fait que le temps est la distance entre les bobines pouvaient être mesurés précisément alors que les tubes possédaient quelques aspérités. Les valeurs de e et de a étaient donc plus incertaines. On obtient donc des Z-Score de 1.4 et 1.3 inférieurs à 2 ce qui permet de confirmer l'expression du coefficient et de la force de frottement. On notera que même si le cuivre est 2 à 3 fois plus conducteur que l'aluminium, les deux coefficients de frottements théoriques sont comparables. Cela est dû au fait que les coefficients dépendent de la géométrie du tube via a et e et comme le tube en aluminium était moins large que celui en cuivre, on n'observe plus de différence due à la conductivité.

On peut alors s'intéresser aux formes que pourraient prendre ce type de freinage dans les montagnes russes. On va prendre l'exemple de Space Mountain au parc Disneyland Paris avec une vitesse maximale d'environ 50km/h . On s'intéresse au système constitué des wagons pour une masse totale de 2 tonnes. On suppose que le premier wagon dispose d'un moment magnétique \mathcal{M} qu'on cherche à déterminer et passe dans un tube conducteur comme un métro dans un tunnel. On peut alors montrer (cf. annexe 2) que l'expression du moment magnétique est la suivante avec $x_\infty = 35\text{m}$ la longueur du quai.

$$\mathcal{M} = \frac{a^2}{\mu_0} \sqrt{\frac{1024}{45} * \frac{v_0 m}{x_\infty \sigma e}}$$

On trouve que le moment magnétique doit valoir 10^7Am^2 (Pour un rayon du tube en cuivre de 2,5 m et une épaisseur de 1 cm). Ceci semble impossible car, si l'on voulait avoir un tel moment magnétique il faudrait un aimant d'environ 10m^3 ou alors une bobine de 10^5 spires traversée par 100 A. Cette option n'est donc pas réalisable et on va donc s'intéresser à une autre géométrie plus efficace.

III. Freinage linéaire

1. Physique du problème

Nous allons maintenant nous intéresser à la géométrie linéaire. Cette fois-ci, l'aimant (ou du moins ce qui permet de produire un champ magnétique) est fixe et lié aux rails et c'est une plaque liée aux wagons qui va se déplacer dans le champ magnétique (on ne met pas l'aimant sur le wagon et la plaque lié au rail car il faudrait utiliser plus d'aimants coûtant cher).



Aimants permanents liés aux rails

Fig. 5 : Résultats de la première expérience

Le wagon arrive avec une certaine vitesse et la plaque liée à ce dernier va subir une force due au champ électromoteur. Cette force qui peut être modélisée par une force de frottement (cf. Annexe 3) qui va ralentir le wagon. J'ai choisi de réaliser une maquette pour mieux étudier ce phénomène.

2. Montage expérimental

La montagne russe sera représentée par une pente inclinée pour donner une vitesse initiale au wagon puis pas un plat où se trouver un champ magnétique. Le wagon est un wagonnet de train électrique sur lequel on a fixé une plaque de cuivre de largeur $4,2\text{ cm}$.

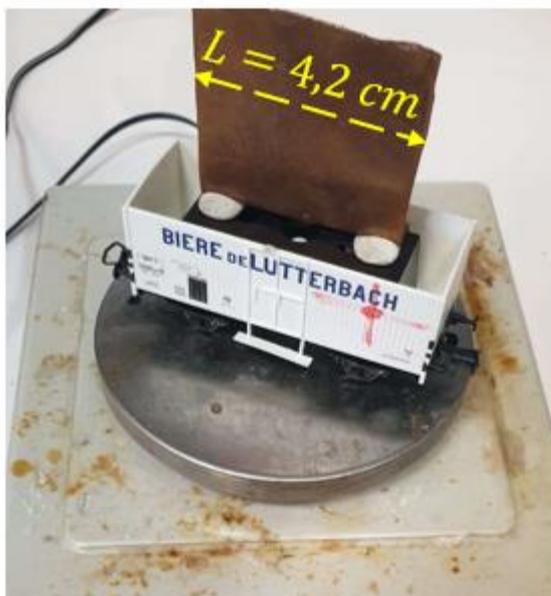


Fig. 6 (gauche) : Wagonnet utilisé

Fig. 7 (droite) : Fin de la pente d'accélération et aimants

Au début j'ai voulu utiliser un électroaimant pour contrôler précisément le champ magnétique appliqué mais il m'a été impossible de faire passer le wagon dans l'entrefer. J'ai alors essayé de mettre la plaque sur un seul côté mais elle était trop excentrée par rapport au centre de masse du wagon. La force de frottement agissait alors comme un couple qui faisait dérailler le wagon. J'ai donc choisi d'utiliser deux aimants en néodymes assez puissants pour avoir un réel freinage. Ceux-ci étaient tenus par des potences fixées les unes avec les autres pour éviter qu'ils se collent et étaient maintenus par des plaques d'aluminium.

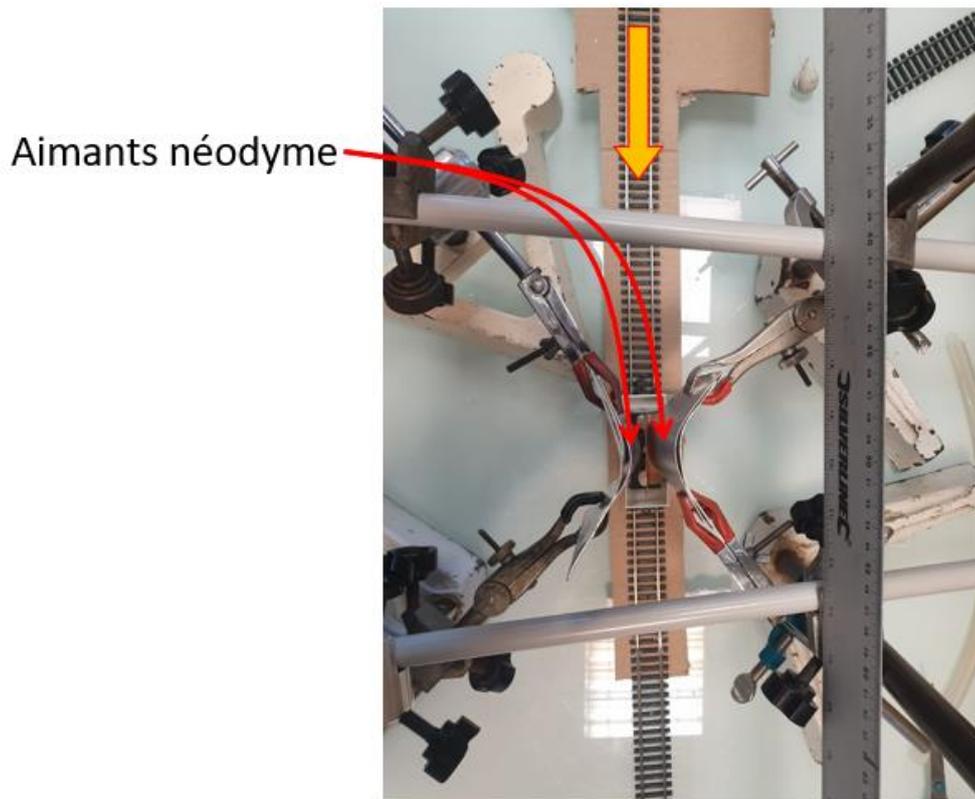


Fig. 8 : Montage final (vue du dessus)

3. Résultats

Après acquisition à un taux de 600 images par secondes et traitement par Tracker, j'ai obtenu ces deux courbes :

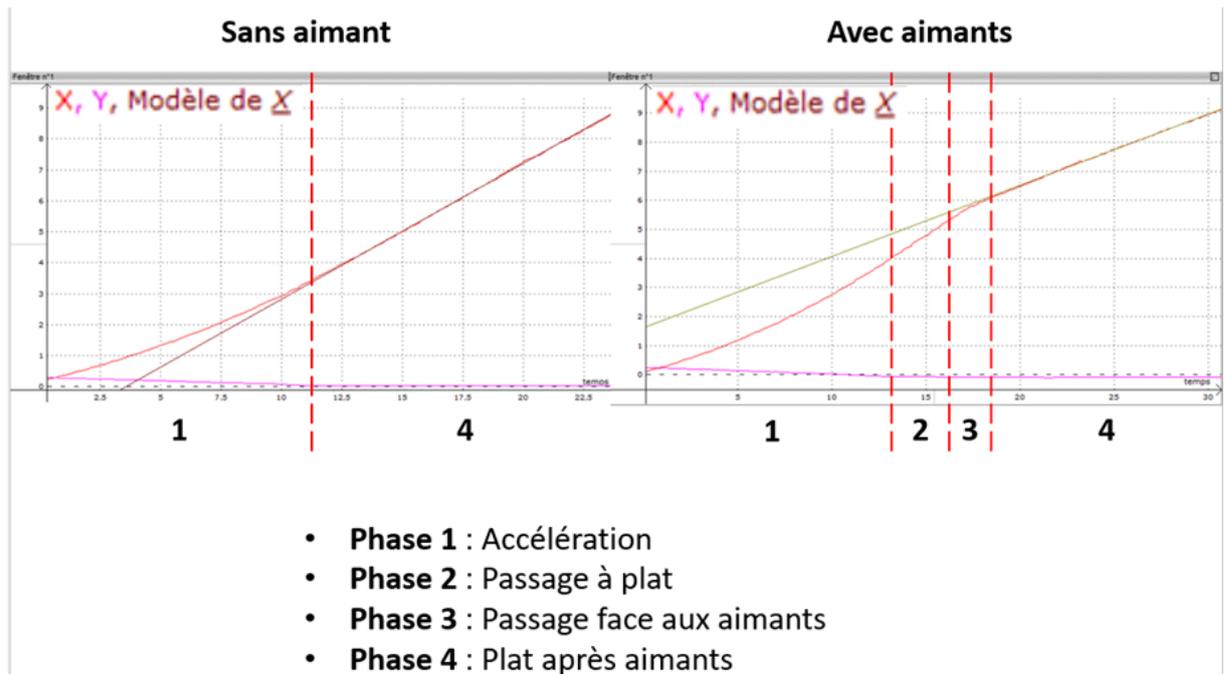


Fig. 9 : Premières courbes qualitatives

Dans le tracé de gauche on voit que le wagon va accélérer pendant la descente et comme il n'y a pas d'aimants, va continuer avec une vitesse constante sur la partie plate (montre que les frottements air/wagonnet et rail/wagonnet sont bien négligeables). En reproduisant la même expérience avec aimants (tracé de droite), on voit que le wagonnet possède une vitesse constante sur le plat puis va être freiné au passage entre les deux aimants. De plus, je suis conforté dans l'hypothèse d'une force de freinage proportionnelle à la vitesse car, sur la partie de la courbe où le wagon est freiné, la courbe semble être une exponentielle décroissante caractéristique de ce type de force de freinage.

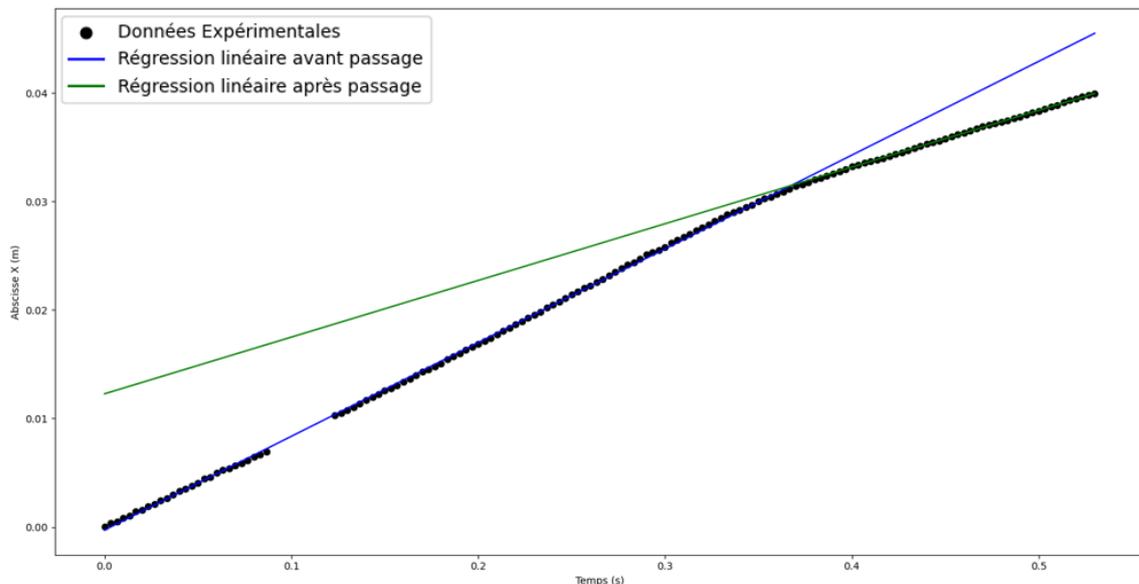


Fig. 10 : Courbes finales précises

Je réalise ensuite une acquisition plus précise qui me permet de tracer les droites asymptotiques avant et après passage par régression linéaire. Celles-ci vont me permettre de déterminer la variation de vitesse puis la variation d'énergie cinétique.

| Donnée | Valeur moyenne | Incertitude | Type d'incertitude |
|----------------|-------------------------|------------------------|---|
| $v_{initiale}$ | 87 mm/s | ± 3 mm/s | Via la régression |
| v_{finale} | 52 mm/s | ± 3 mm/s | Via la régression |
| Masse du wagon | 65,6 g | $\pm 0,1$ g | Simulation Python, Uniforme, 10 000 valeurs |
| $ \Delta v $ | 34 mm/s | 3 mm s ⁻¹ | Simulation Python |
| α | 0,13 kg s ⁻¹ | 0,1 kg s ⁻¹ | Simulation Python |
| α_{th} | 0,3 kg s ⁻¹ | 0,2 kg s ⁻¹ | Simulation Python |
| Z-Score | 1,7 | | Simulation Python |

Fig. 11 :Résultats

On peut montrer (cf. Annexe 3) que le coefficient de frottement vaut $\alpha_{th} = \gamma B^2 \tau$ où γ est la conductivité linéique du métal, τ est le volume de la lame et B l'intensité du champ magnétique. On remarquera que l'incertitude est plus élevée pour le coefficient théorique calculé par rapport au coefficient mesuré. Cela est dû au fait que la mesure de l'intensité du champ B à l'aide d'un teslamètre est plutôt compliquée car le champ varie rapidement dès qu'on s'éloigne un peu. On obtient finalement un Z-Score de 1.7 ce qui est satisfaisant car inférieur à 2. On prendra donc par la suite la valeur du coefficient théorique pour les prochaines simulations.

A l'instar de la fin de la partie II, on peut chercher à appliquer ce que l'on a trouvé à un système réel. En supposant un champ magnétique de $B = 0.1$ T et une lame de $\tau = 1m * 20cm * 1cm$ de volume, on obtient un freinage total du wagon en 25 m ce qui est encourageant pour une utilisation dans les parcs. De plus, la force en arrivée du wagon s'élève environ à $F_{max} \approx 3kN$ ce qui est cohérent avec la notice du constructeur Intrasys fournie par le parc Saint Paul qui prévoit 8kN.

IV. Freinage sur plusieurs lames

1. Simulation informatique

Nous allons maintenant chercher à savoir quel est le comportement des wagonnets avec plusieurs lames en séries. Pour simuler cette configuration j'ai choisi d'utiliser python de manière à tracer la position, la vitesse et l'accélération du wagonnet au cours du temps.

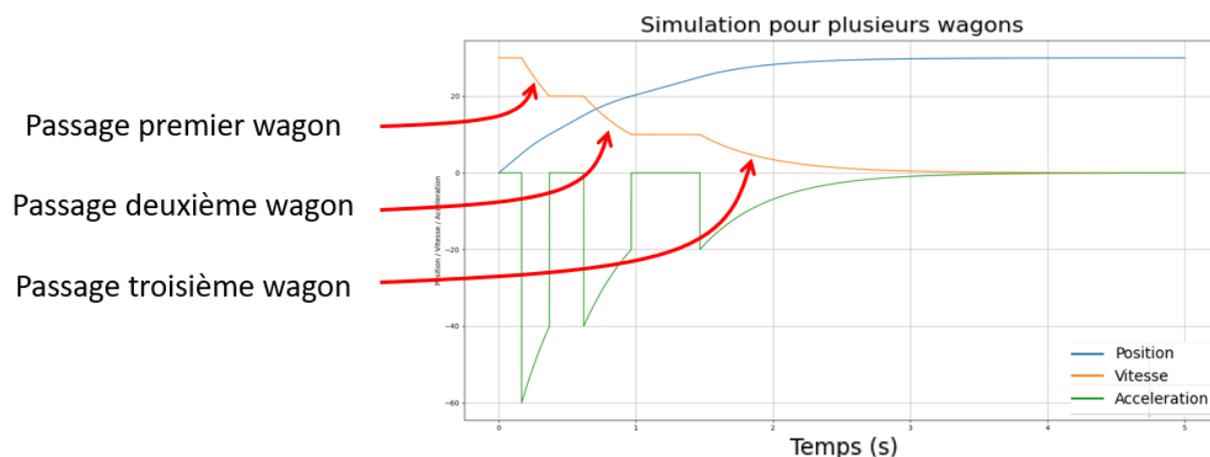


Fig. 12 : Courbes obtenues par simulation python

Nous observons alors que le train va se comporter comme si plusieurs wagonnets (ayant la masse totale de tout le train) passaient avec une seule lame devant plusieurs aimants identiques. On remarque aussi que cela revient à n'avoir qu'une seule lame (longue comme la somme des lames). On va donc chercher à vérifier cette loi expérimentalement.

2. Montage expérimental

J'ai donc reproduit le dispositif expérimental de la partie III mais en ajoutant deux autres wagons pour confronter les résultats de mon programme python au pointage du mouvement de mon train.



Fig. 13 : Montage final (ensemble des wagonnets)

3. Résultats

Nous obtenons par pointage les points bleus ($x_{\text{wagonnet } 1} = f(t)$). L'ajustement de la courbe bleu en trait plein provenant de la simulation s'est faite en deux temps : tout d'abord il a fallu mesurer les distances entre les plaques ainsi que les longueurs des plaques pour avoir les bons intervalles dans le programme. J'ai ensuite utilisé une méthode des moindres carrés pour ajuster le coefficient de frottement avec les données mesurées.

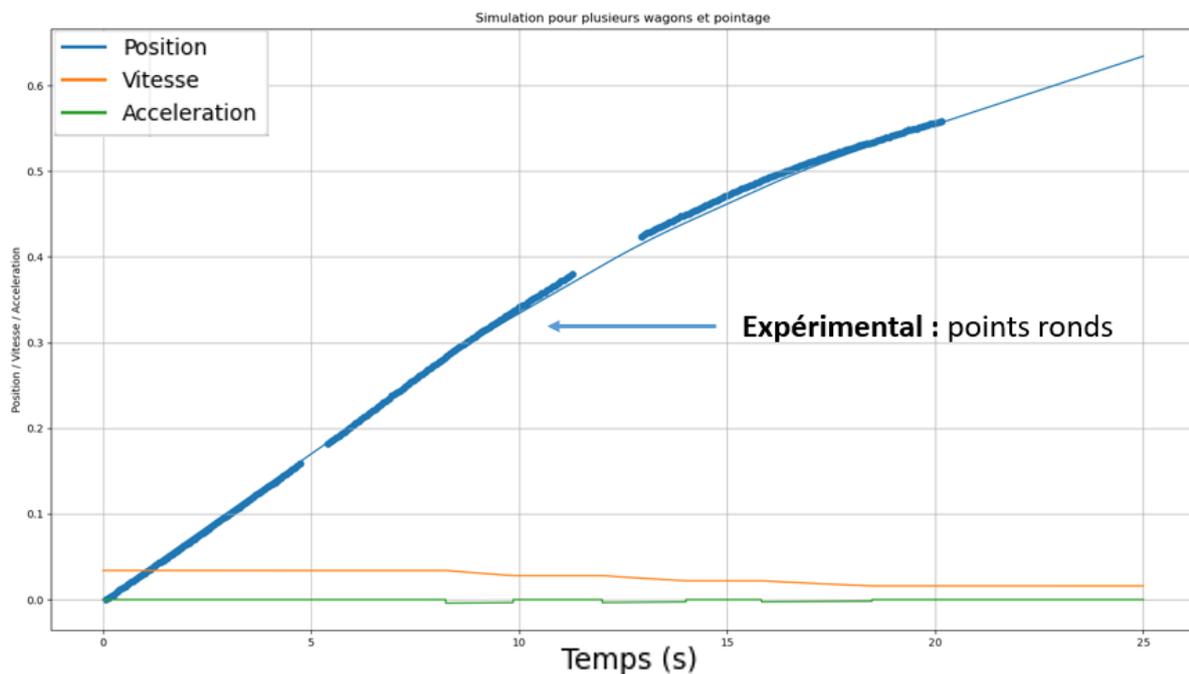


Fig. 14 : Courbe expérimentale superposée aux courbes théoriques

Nous obtenons alors le résultat ci-dessus. Notre hypothèse du comportement des différentes lames en séries est donc vérifiée. Les constructeurs ont donc grand intérêt à utiliser plusieurs lames : en faisant ainsi, on peut avoir le même freinage qu'avec une seule lame mais plus doux car plus étalé dans le temps et les aimants (pièce les plus onéreuses du dispositif) peuvent être moins puissants. De plus, cela permet une meilleure dissipation thermique sur une surface plus grande permettant de limiter l'augmentation de température des lames (important car le manuel du constructeur préconise une température de fonctionnement inférieure à 50°C). Il est alors légitime de se poser la question de l'installation des lames : en série ou en parallèle ?

V. Positionnement des lames

1. Position du problème

Il y a deux façons d'arranger les lames : En série (à gauche) ou en parallèle (à droite).

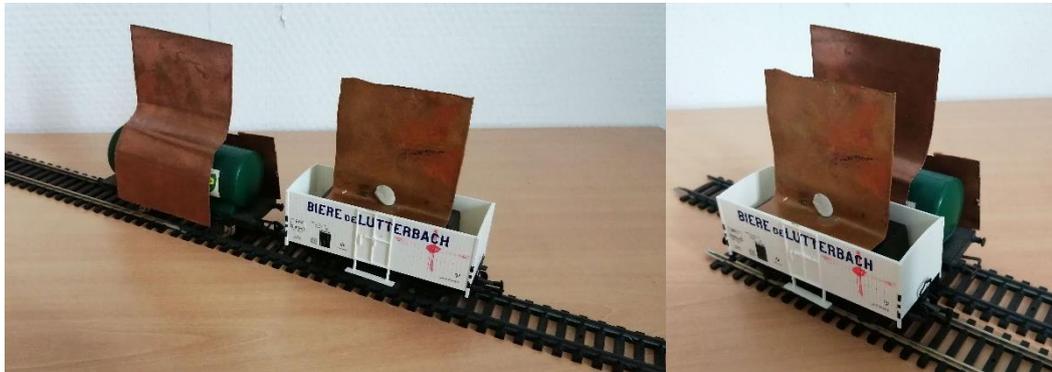


Fig. 15 : Les deux types de positionnement des lames

Chaque disposition semble à priori avoir ses avantages et ses inconvénients : Si les plaques sont positionnées en parallèles, la force exercée sur le wagon sera plus importante (les deux lames arriveront à v_0 et la force sera en norme αv_0 alors que si les lames sont en séries, la première subira une force de αv_0 mais la deuxième seulement $\alpha(v_0 - \Delta v) < \alpha v_0$. Néanmoins, il est difficile de mettre plus de deux ou trois lames sous un wagon. L'avantage de mettre des lames en séries est que le freinage sera plus progressif et le système sera moins coûteux car il faut moins d'aimants (toutes les lames passent par le même). Malheureusement il n'était pas possible de faire des relevés pour les lames parallèles car les fixations des aimants ne le permettaient pas. J'ai donc réalisé des simulations informatique pour pouvoir conclure sur leurs performances.

2. Simulation et résultats

Le modèle est le suivant : un ensemble de wagons de 300 kg chacun auxquels on ajoute 150 kg par lame ajoutée. On trace la vitesse à l'infini (après passage face aux aimants) dans les deux configurations en fonction du nombre de lames.

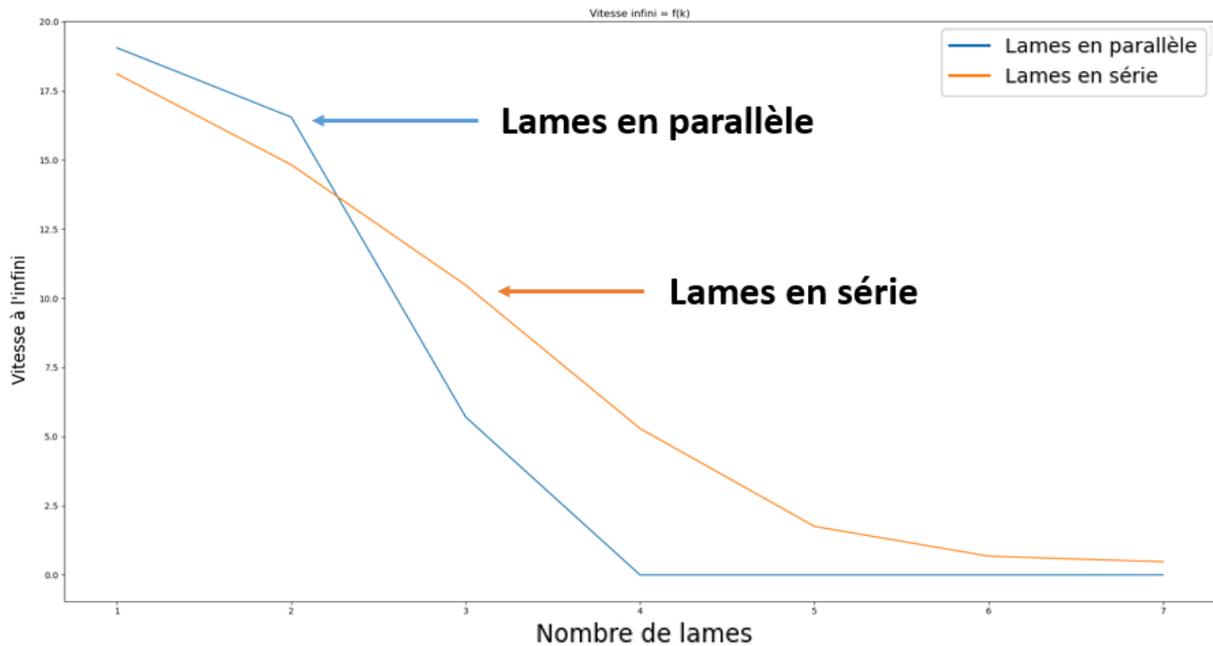


Fig. 16 : Courbes théoriques de la vitesse à l'infini en fonction du nombre de lames

On obtient les courbes suivantes (paramètres de freinage de la partie III). On remarque que la courbe pour les lames en parallèle est au-dessus de la courbe pour les lames en série pour $n_{lames} < 3$ et passe sous cette dernière pour $n \geq 3$ (même en modifiant les valeurs des coefficients de frottement et des masses on voit toujours ce phénomène se produire). On peut donc conclure que pour des valeurs typiques de freins à grandeurs nature, il est plus efficace de garder seulement des lames en série étant donné que celle-ci sont plus efficace pour $n_{lames} < 3$ ce qui est généralement le cas à cause de l'encombrement du aux aimants.

VI. Conclusion

| Type de freinage | Force de freinage | Sécurité | Pollution | Autres | Conclusion |
|-----------------------|-------------------|----------|-----------|---------------------------------|------------|
| Par friction | ++ | -- | -- | Besoin de maintenance régulière | |
| Magnétique linéaire | + | ++ | ++ | Idéal sauf prix aimants | |
| Magnétique circulaire | - | - | + | Difficile à mettre en place | |

Fig. 17 : Tableau de conclusion

On peut donc affirmer que l'utilisation de freinage magnétique linéaire est intéressante par rapport au freinage magnétique circulaire vu les avantages qu'il possède (facilité de mise en place, efficacité) et que ceux-ci peuvent même être utilisés à la place de freins par friction classiques. Plus généralement, les phénomènes d'induction sont utilisés sur de nombreux autres véhicules tels que les métros car ils sont un des rares freinage n'émettant pas de microparticules ce qui est idéal en milieu confiné.

VII. Annexes

1. Annexe 1

La démonstration de cette formule passe par l'utilisation du champ de potentiel \vec{A} hors programme. Elle repose sur l'idée suivante : on considère une couronne d'épaisseur e et de hauteur dz pour laquelle on calcule le flux de \vec{B} . Par la suite on applique la loi de Faraday pour déterminer le courant i induit. Enfin, par la troisième loi de Newton, la force exercée sur l'aimant est l'opposée de la force de Laplace que l'aimant exerce sur le tube calculable car on connaît i . On conclut en intégrant sur toute la hauteur du tube.

2. Annexe 2

On a: $\vec{F} = -\alpha_{th} \vec{v}$.

FFD: $m \frac{d\vec{v}}{dt} = -\alpha_{th} \vec{v} \Rightarrow \frac{d\vec{v}}{dt} + \frac{\alpha_{th}}{m} \vec{v} = 0$. \rightarrow projection sur \vec{u}_z

$\Rightarrow \underline{\vec{v}(t) = v_0 e^{-\frac{\alpha_{th} t}{m}}}$

Par intégration:

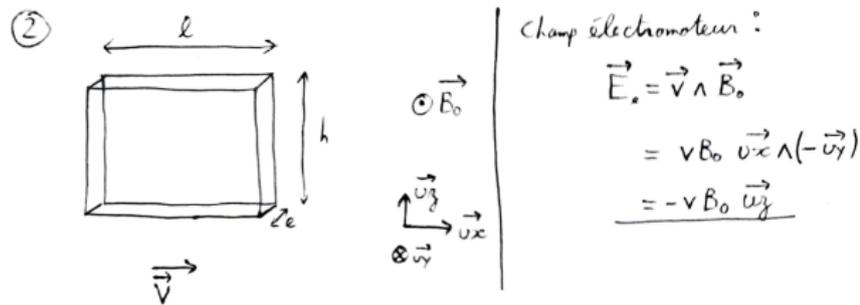
$x(t) = -\frac{m v_0}{\alpha_{th}} e^{-\frac{\alpha_{th} t}{m}} + cte$. Or, $x(0) = 0 \Rightarrow cte = \frac{m v_0}{\alpha_{th}}$.

$\Rightarrow x(t) = \frac{m v_0}{\alpha_{th}} \left(1 - e^{-\frac{\alpha_{th} t}{m}} \right) \Rightarrow x_{\infty} = \frac{m v_0}{\alpha_{th}} \Rightarrow \alpha_{th} = \frac{m v_0}{x_{\infty}}$.

$\Rightarrow \frac{45}{1024} \frac{\mu_0^2 \sigma e}{a^4} \times \mathcal{M}^2 = \frac{m v_0}{x_{\infty}}$

$\Rightarrow \mathcal{M} = \frac{a^2}{\mu_0} \sqrt{\frac{1024 \cdot m v_0}{45 \sigma e x_{\infty}}}$

3. Annexe 3



On a donc $\vec{j} = \gamma \vec{E}_s$ car la plaque est un conducteur ohmique.

$$\text{D'où, } \vec{F}_{Lap} = \iiint_V \vec{j} \wedge \vec{B}_0 d\tau = \iiint_V \gamma \vec{E}_s \wedge \vec{B}_0 d\tau = -\gamma v B_0^2 (\vec{u}_z \wedge (-\vec{u}_y)) \underbrace{l \times e \times h}_{=\tau}$$

$$\vec{F}_{Lap} = -\gamma B_0^2 \tau \vec{v}$$

Au vu bien $\alpha_{th} = \gamma B_0^2 \tau$.

Il est important de remarquer que :

- On a supposé \vec{B}_0 uniforme. Pour être plus précis il faudrait prendre en compte que B_0 ne s'applique que face aux aimants $\Rightarrow \tau_{réel} < \tau$
où $\tau_{réel} = e \times S_{aimant}$.
- On a négligé les effets de bords (plaque qui entre mais n'est pas entièrement dans \vec{B}_0).

VIII. Bibliographie

[1] JALAL CHEAYTANI : Calcul par éléments finis des pertes supplémentaires dans les motorisations performantes, Lille 1, soutenu en 2016 : <https://www.theses.fr/2016LIL10007>

[2] ABRAM P. STECKEL : Electrical clutch and brake mechanism : <https://patentimages.storage.googleapis.com/4f/c8/6a/1fa8819a2370b8/US744423.pdf> consulté en Juin 2023

[3] W. R. SMYTHE : On Eddy Currents in a Rotating Disk : Electrical Engineering (1903) : Volume: 61, Issue: 9, Sept. 1942

[4] D. WIEDERICK, N. GAUTHIER, D A. CAMPBELL, P. ROCHON : Magnetic braking: Simple theory and experiment Am. J. Phys. 1 June 1987; 55 (6): 500–503. : <https://doi.org/10.1119/1.15103>

- [5] JOHN DAVID JACKSON : Classical Electrodynamics : (chapitre 6) 0-471-30932-X, Wiley, 3rd, 1998 : <https://doi.org/10.1109/EE.1942.6436528>
- [6] RICHARD L. STOLL : The Analysis of eddy currents : 0-19-859311-2 (rel.), Oxford, Clarendon Press, 1974, Chapitres 1 et 2
- [7] MANUEL I GONZALEZ : Experiments with eddy currents: the eddy current brake : Eur. J. Phys. 25 (2004) 463–468
- [8] C S. MACLATCHY, P BACKMAN, L BOGAN : A quantitative magnetic braking experiment : American Journal of Physics (61, 1096 (1993)) DOI: 10.1119/1.17356
- [9] A DEIBER, L MARKIEWICZ, O KEMPF, F PAVIET, GRESEP : Phénomène d'induction associé au mouvement d'un aimant dans un tube de cuivre : Bull. Un. Phys., mars 2000, vol. 94, n° 822 (1), p. 487-509
- [10] COASTER-WORLD : Coaster-World : <https://coastersworld.fr/freins-magnetiquesmontagnes-russes/> consulté en Octobre 2023