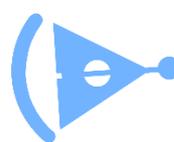




# DESCENTE MAGNÉTIQUE



**LP2I**

Lycée Pilote  
Innovant International

**Clara Carlin**

**Maxence Launay-Querré**

**William Robin**

## Présentation de l'équipe :



Je m'appelle Clara CARLIN. Je suis élève de terminale au LP2I du Futuroscope. Je suis curieuse, dynamique et avide de découvertes. J'aime me lancer de nouveaux défis. Le travail de recherche et d'échanges scientifiques me passionnent. Depuis la seconde, je participe à différents projets scientifiques avec une équipe motivée et curieuse du monde qui l'entoure. Le projet descente magnétique est un travail de groupe que nous avons commencé en fin de seconde et que nous avons poursuivi jusqu'à cette année. Nous avons adopté une véritable démarche scientifique, élaboré des protocoles expérimentaux, rédigé un mémoire et partagé le fruit de nos recherches aux autres lycéens. Cette étonnante descente de l'aimant sur du cuivre nous a intrigué, notre goût pour la science nous a alors poussé à trouver des réponses à nos questions. Ce projet a renforcé mon appétence pour les sciences et mon envie de poursuivre des études scientifiques.



Clara, William et Gabriel et moi (Maxence), on a toujours été mauvais perdants et perdre cette course de luges magnétiques ne nous a pas du tout plus. On a alors retroussé nos manches et commencé à chercher des explications. Et on l'a trouvé : la piste en cuivre. On a donc enfilé nos blouses et on s'est penché sur la question, pourquoi donc est-ce que cet aimant glisse tranquillement, en ignorant presque la gravité ? Cela nous a poussé à inventer nos propres expériences, nos systèmes de mesure, on a dû se creuser les méninges. Le projet nous a donné l'occasion de découvrir plein de facettes de la recherche en physique, expériences, réfléchir à la théorie, travailler avec d'autres chercheurs, écrire un mémoire, présenter son travail, bref, une expérience plus qu'enrichissante ! Au final, une piste en platine serait trop chère... Bon... On va continuer de perdre, mais au moins maintenant, on sait pourquoi !



Je me nomme William Robin, je suis élève de terminale au Lycée pilote innovant international et je fais partie du groupe "Descente magnétique". C'est un projet que nous avons mené en équipe de 3 avec Maxence Launay-Querré et Clara Carlin. Ce projet m'a permis d'acquérir des connaissances sur le domaine du magnétisme mais également sur les différents matériaux que nous avons utilisés au cours de nos expériences. Pour ce qui est du côté pratique, j'ai été surpris de voir qu'on pouvait inventer et mettre en place nos propres expériences à partir de rien ou presque. Et pour finir, je pense et je suis même sûr que ce projet restera gravé dans ma mémoire car à partir d'une simple question banale, nous avons fait tellement d'expériences, de mesures, de découvertes et bien plus encore.

Lien vers la vidéo du projet : <https://youtu.be/RdzfaoJbf6s>

## INTRODUCTION :

Les aimants constituent un jeu pour les petits, des souvenirs sur les réfrigérateurs.... Mais les applications des aimants et du champ magnétique plus généralement au quotidien est bien plus présent qu'on ne le pense. On peut le retrouver dans des moteurs, dans des composants électriques, on s'en sert dans la distribution du courant, pour faire des IRM... et pour freiner des véhicules... C'est sur ce dernier point que nous avons décidé de travailler : Lorsqu'un aimant se déplace sur une plaque de cuivre, l'aimant ressent une force qui le freine. Comment caractériser cette force d'origine magnétique, capable d'influencer la vitesse à laquelle se déplace un objet ? C'est la première question que nous nous sommes posés. Puis, forts de tout ce que nous apprenions sur cette force d'origine magnétique, nous avons souhaité aller plus loin dans nos investigations en travaillant avec des plaques de métaux différents, ou encore des aimants différents.

# I – Quelle relation relie la force d'origine magnétique à la vitesse ?

## 1 ) Mise en évidence expérimentale de la force d'origine magnétique :

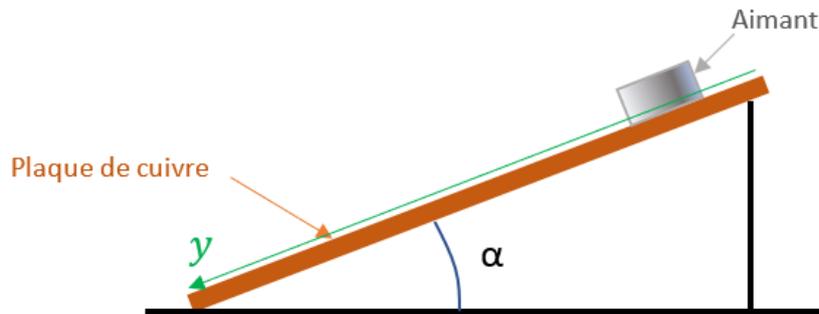


Figure 1 : Dispositif expérimental pour étudier la descente de l'aimant le long du plan incliné en cuivre

Nous nous intéressons à la force d'origine magnétique que subit un aimant qui dévale une plaque de cuivre.

Contrairement à ce que l'on peut observer en faisant glisser l'aimant sur une surface en plastique, l'aimant semble subir une force supplémentaire qui l'empêche d'accélérer au cours de sa descente. Voici ci-contre l'expérience en question : figure 1

Pour étudier le mouvement de l'aimant, nous le lâchons sans vitesse initiale, et nous filmons la scène de façon à enregistrer sa coordonnée  $y$  au cours du temps. Nous avons exploité la vidéo de l'expérience avec LATIS PRO et nous avons obtenu les résultats suivants, pour un angle de  $\alpha = 35^\circ$  : figure 2

Résultat LATIS PRO

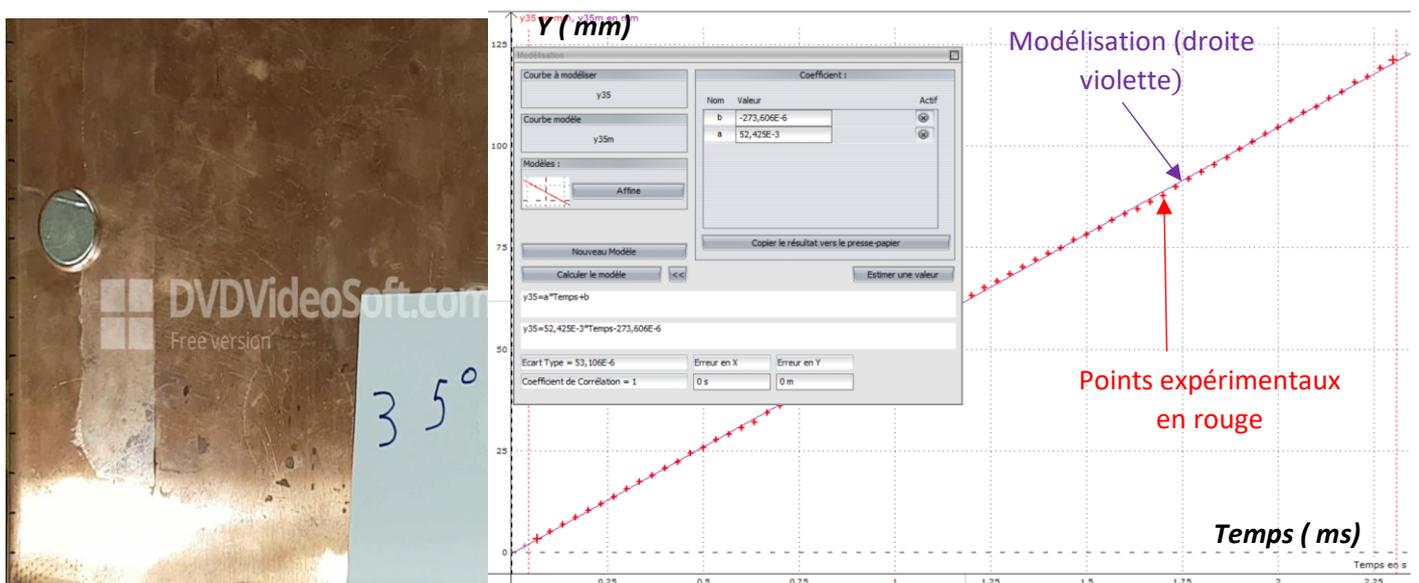


Figure 2 : évolution de la position de l'aimant au cours du temps lors de la descente.

Nous pouvons voir que, alors que l'aimant est lâché avec une vitesse initiale nulle, il acquiert très rapidement (en moins de 33 ms) une vitesse limite ici égale à 52,4 mm/s, comme l'indique le résultat de la modélisation. Comment pouvons-nous déduire qu'il existe bien une force d'origine magnétique qui s'exerce sur l'aimant ?

Faisons un bilan des forces appliquées au système :

L'aimant subit la force de frottement solide  $\vec{f}$  exercée par la plaque, la force de réaction normale exercée par la plaque  $\vec{N}$ , et la force de pesanteur  $\vec{P}$ . Si seules ces forces étaient appliquées, on pourrait prévoir alors, de par le fait que ces forces sont constantes, que l'accélération de l'aimant devrait être constante.

C'est d'ailleurs le type de mouvement que l'on observe lorsque l'aimant glisse non pas sur une plaque de cuivre, mais sur une plaque de plastique, comme on peut le voir dans le résultat ci-contre (figure 3), obtenu en réalisant l'expérience en question.

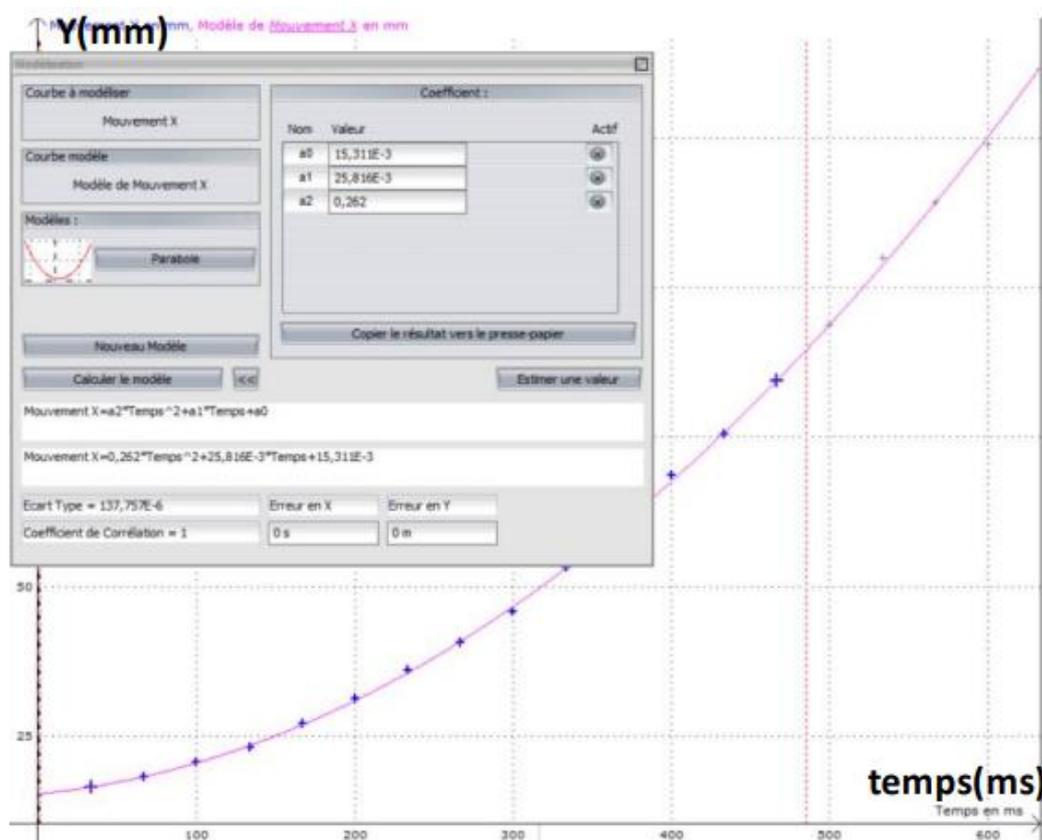


Figure 3 : Evolution de la position de l'aimant lorsque celui glisse sur une plaque de plastique : la modélisation parabolique montre une accélération constante de l'aimant.

La différence de résultats obtenus lorsque l'aimant glisse soit sur le cuivre, soit sur du plastique, ne peut s'expliquer que par la présence d'une force d'origine magnétique lorsque l'aimant glisse sur la plaque de cuivre. Appelons alors  $\vec{F}$  cette force magnétique que nous rajoutons au bilan des forces. Voyons ce que cela donne schématiquement : figure 4

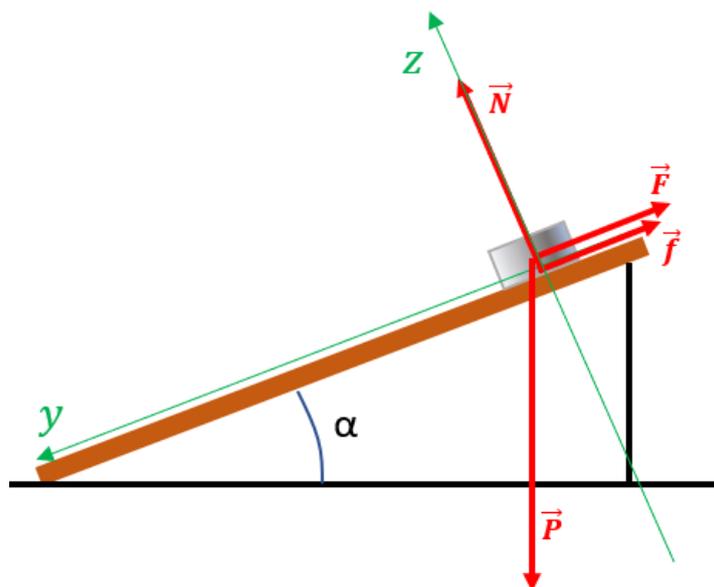


Figure 4 : Bilan des forces appliquées à l'aimant lors de sa descente le long de la plaque de cuivre inclinée.

Si nous appliquons la première loi de Newton à l'aimant, dans le référentiel du laboratoire supposé galiléen, lorsque le mouvement est rectiligne uniforme, nous pouvons dire que :

$$\vec{N} + \vec{F} + \vec{f} + \vec{P} = \vec{0}$$

Projetons sur les deux axes (Oy) et (Oz) :

$$-F - f + mgsin\alpha = 0$$

$$N - mgcos\alpha = 0$$

A l'instant initial, la force magnétique doit être plus faible que  $|-f + mgsin\alpha|$ , ce qui fait que l'aimant aura une accélération. Lorsque la vitesse devient constante, cela veut dire que la force  $F$  a augmenté de telle sorte que  $-F - f + mgsin\alpha = 0$ .

Donc non seulement l'expérience révèle la présence d'une force magnétique, mais en plus elle montre que cette force magnétique dépend de la vitesse de l'aimant : plus la vitesse de l'aimant est grande, et plus la force magnétique est grande.

Cette force ressemble donc à une force de frottement de type fluide.

Nous avons essayé de voir de façon détaillée la phase d'accélération, en filmant la scène avec une caméra à 1000 images par seconde. Nous obtenons bien une variation de vitesse, mais peu exploitable du fait d'une résolution de l'image très médiocre. Nous avons alors pris contact avec l'institut Pprime de l'Université de Poitiers pour filmer la descente de l'aimant avec une caméra performante. Nous y reviendrons à la fin de ce mémoire, ces mesures ayant été réalisées très récemment.

Mais en attendant de pouvoir faire cette mesure au laboratoire de l'Université, nous avons essayé de trouver la relation entre la force magnétique et la vitesse de l'aimant. Cela s'est avéré plus délicat que nous le pensions, et du coup, plus intéressant que ce à quoi on s'attendait :

## 2 ) Quelle relation existe-t-il entre la force d'origine magnétique et la vitesse de l'aimant ?

Quelle démarche avons-nous suivi pour trouver la dépendance de la force magnétique en fonction de la vitesse de l'aimant ?

Nous avons tout simplement réalisé dans un premier temps un bilan des forces appliquées à l'aimant lors du mouvement rectiligne uniforme.

$$-F - f + mgsina = 0$$

Mais peut-on calculer la valeur de  $\vec{F}$  ? Et bien non... en effet,

$$F = -f + mgsina$$

Mais on ne connaît pas la force de frottement solide  $f$ . Nous pouvons toujours détailler l'expression de la force de frottement solide à l'aide des lois de Coulomb pour les frottements :

$$f = \mu N$$

Où  $\mu$  est le coefficient de frottement entre le cuivre et l'aimant. Compte tenu de  $N - mgcosa = 0$ , on en déduit que  $f = \mu mgcosa$  et donc que

$$F = -\mu mgcosa + mgsina$$

Mais là encore, ne connaissant pas le coefficient  $\mu$ , nous ne pouvons pas, à ce stade du projet, en déduire  $F$ . Alors il nous est venu une idée pour déterminer  $\mu$ , en tenant compte des faits suivants :

- Nous pouvons calculer la force de frottement totale  $F_T$  subie par l'aimant :

$$F_T = F + f = mgsina$$

- La force de frottement magnétique dépend de la vitesse. Elle doit être nulle pour une vitesse nulle. Donc pour une vitesse nulle,

$$F_T = f = mgsina$$

- Si on est capable de tracer l'évolution de la valeur de  $F_T$  en fonction de la vitesse, on devrait pouvoir, en extrapolant la courbe obtenue, en déduire quelle serait la force de frottement totale subie par l'aimant pour une vitesse nulle. Et comme pour une vitesse nulle, la force de frottement totale n'est égale qu'à la force de frottement solide, on pourra en déduire le coefficient de frottement entre l'aimant et le cuivre.

⇒ Pratiquement, pour réaliser ces expériences, nous avons fait glisser l'aimant sur la plaque de cuivre, en inclinant la plaque avec différents angles de sorte que l'aimant glisse à différentes vitesses.

Pour que cette série d'expériences soit pratique à réaliser, nous avons conçu ce dispositif (figure 5), qui permet de faire varier proprement l'angle du plan incliné.



Figure 5 : dispositif expérimental

Toutes les vidéos ont été analysées avec le logiciel Latis Pro. Voici alors les résultats obtenus pour différents angles du plan incliné :

On obtient alors l'évolution de  $F_T$  en fonction de  $v$  suivante :

$v$ (mm/s)	$\alpha$ (°)	$F_T = mgsin\alpha$ (N)
8,7	16	0,054
30	25	0,083
52,4	35	0,112
79,2	45	0,139
100	55	0,161
104	60	0,170
133	70	0,184
141	80	0,193

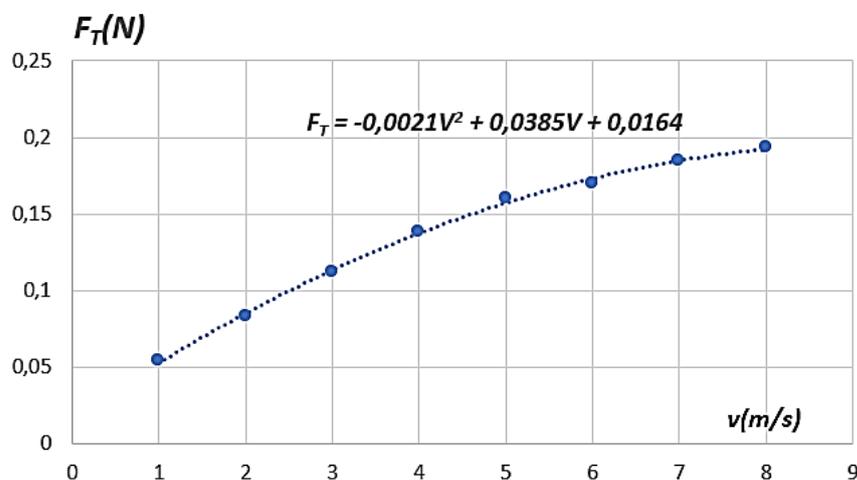


Figure 6 : Evolution de la force totale opposée au déplacement de l'aimant en fonction de la vitesse de l'aimant. Les différentes vitesses ont été obtenues en inclinant le plan avec différents angles.

Nous pouvons modéliser les résultats expérimentaux par la fonction polynôme du second degré, ce qui nous permet d'en déduire la valeur que devrait avoir la force totale de frottement pour une vitesse nulle :

$$F_T(v = 0) = 0,016N$$

On en déduit que lorsque la vitesse est nulle

$$f = 0,016 = \mu mg \cos(\alpha)$$

On peut en déduire le coefficient de frottement  $\mu$ , sachant que comme la valeur 0,04 correspond à une vitesse nulle, l'angle  $\alpha$  correspond à l'angle limite pour lequel l'aimant se met en mouvement. Nous avons recherché cet angle limite : il vaut  $16^\circ$ .

Donc

$$\mu = \frac{0,016}{mg \cos(\alpha)} = 0,1$$

Maintenant que nous connaissons ce coefficient, et sachant que ce coefficient est constant puisqu'il ne dépend que de la nature des surfaces en contact, nous pouvons calculer et tracer l'évolution de la force de frottement magnétique en fonction de la vitesse :

Durant le mouvement rectiligne uniforme, on rappelle que l'on avait établi que :

$$F_T = F + f = mgsin\alpha$$

Donc

$$F = mgsin\alpha - f = mgsin\alpha - \mu mg \cos\alpha$$

On obtient alors l'évolution suivante en fonction de la vitesse : Figure 7

$v$ (m/s)	$F_T$	$F$	$F$ (N)
0,0087	0,054	0,040	0,014
0,03	0,083	0,037	0,046
0,0524	0,112	0,034	0,079
0,0792	0,139	0,029	0,110
0,1	0,160	0,024	0,137
0,104	0,170	0,021	0,149
0,133	0,184	0,014	0,170
0,141	0,193	0,007	0,186

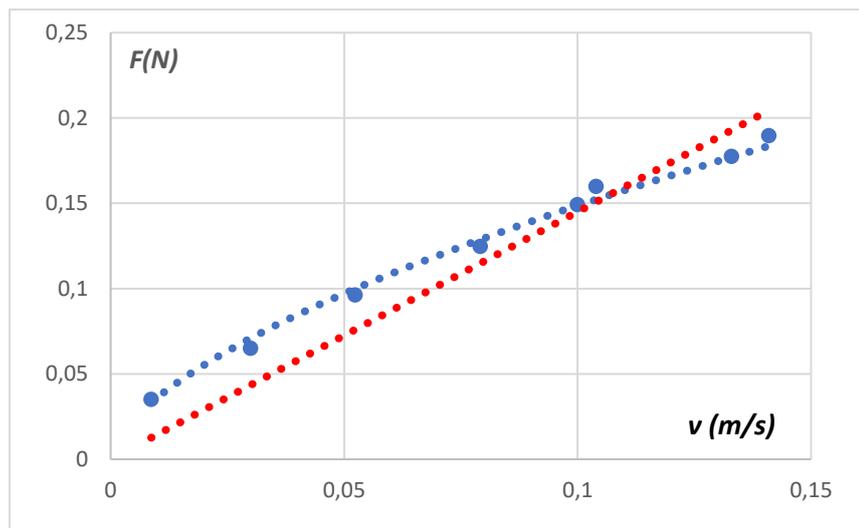


Figure 7 : Points bleus : Evolution de la force d'origine magnétique exercée sur l'aimant en fonction de la vitesse de l'aimant. Les différentes vitesses ont été obtenues en inclinant le plan avec différents

Nous avons tenté de modéliser les résultats expérimentaux (points bleus) par diverses fonctions particulières, mais sans résultat. A ce stade du projet, nous avons donc obtenu une fonction graphique montrant l'évolution de la force d'origine magnétique en fonction de la vitesse.

Nous avons ainsi atteint l'objectif que nous nous étions fixés dans un premier temps, à savoir être capable de quantifier cette force d'origine magnétique en fonction de la vitesse.

Nous avons cela dit voulu vérifier la cohérence de nos résultats en réalisant une autre série de mesures, avec une démarche expérimentale légèrement différente, mais qui permet de s'affranchir de l'angle du plan incliné.

### 3 ) Vérification de la relation entre la force d'origine magnétique et la vitesse.

L'idée est cette fois-ci de faire glisser l'aimant sur la plaque de cuivre, positionnée horizontalement, en le tirant avec une force constante au moyen d'un fil relié à une masse, comme le montre le schéma du dispositif ci-contre : figure 8.

L'expérience montre à nouveau que la vitesse à laquelle se déplace l'aimant est constante.

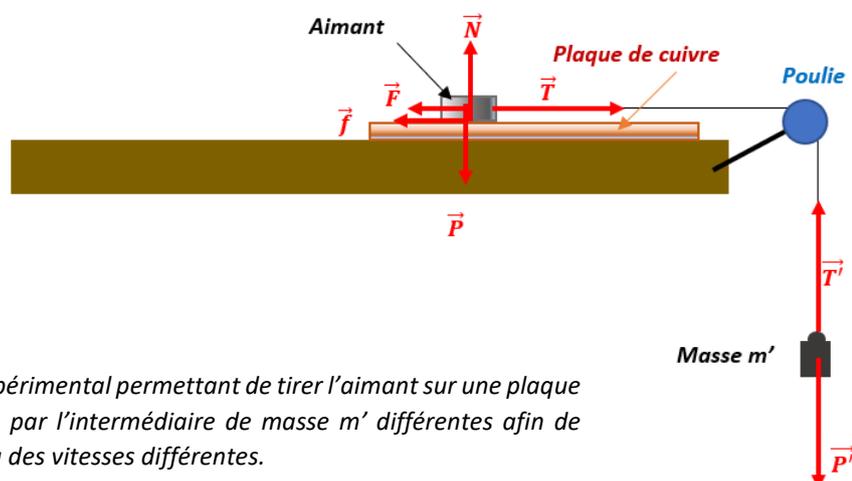


Figure 8 : dispositif expérimental permettant de tirer l'aimant sur une plaque de cuivre horizontale, par l'intermédiaire de masse  $m'$  différentes afin de faire défilier l'aimant à des vitesses différentes.

Donc, durant le mouvement rectiligne uniforme, la somme des vecteurs force exercés sur l'aimant est nulle.

$$\vec{F} + \vec{f} + \vec{P} + \vec{N} + \vec{T} = \vec{0}$$

Projetée sur l'axe (Ox) horizontal, cela donne :

$$-F - f + T = 0$$

Par ailleurs, la somme des vecteurs force exercés sur la masse  $m'$  est nulle. Autrement dit la force de tension  $\vec{T}'$  est égale à  $-\vec{P}'$ , et en valeur,  $T' = P' = m'g$ .

La poulie ne changeant pas la valeur de la force, la force  $\vec{T}$  avec laquelle l'aimant est tiré vers la droite est égale à la force de pesanteur  $P$

Donc

$$-F - f + m'g = 0 \quad \rightarrow \quad F_T = F + f = m'g$$

En accrochant différentes masses  $m'$ , on obtient des mouvements rectilignes uniformes à des vitesses différentes, ce qui nous permet à nouveau de tracer l'évolution de la somme  $F_T$  de la force magnétique et de la force de frottement solide en fonction de la vitesse de l'aimant (figure 9).

$m$ (g)	$F_T$ (N)	$v$ (m/s)
7	0,069	0,013
10	0,098	0,032
20	0,196	0,083
30	0,294	0,139
40	0,392	0,193
50	0,491	0,254
60	0,589	0,308
70	0,687	0,364

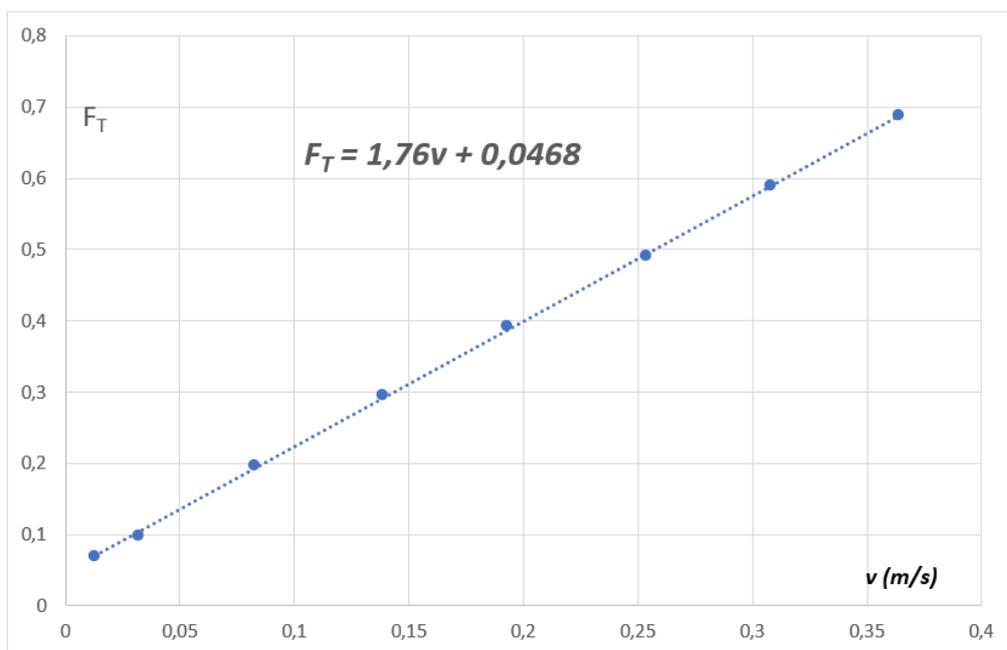


Figure 9 : Evolution de la force totale opposée au déplacement de l'aimant en fonction de la vitesse de l'aimant. Les différentes vitesses ont été obtenues en accrochant différentes masse  $m'$  dans le dispositif présenté figure 8

On en déduit la valeur de la force de frottement pour une vitesse nulle, par extrapolation. La force de frottement solide  $f$  est donc égale à 0,0468 N

Or  $f = \mu N = \mu mg$ . On en déduit ensuite la valeur du coefficient de frottement solide

$$\mu = \frac{f}{mg} = \frac{0,0468}{0,02 \times 9,81} = 0,24$$

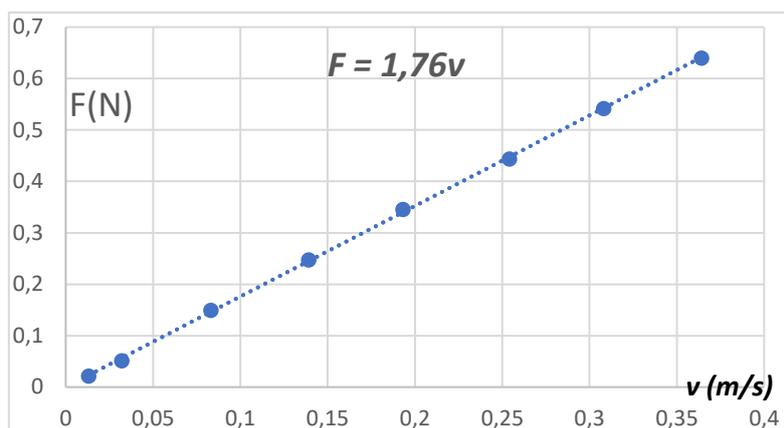


Figure 10 : Evolution de la force d'origine magnétique exercée sur l'aimant en fonction de la vitesse de l'aimant. Les différentes vitesses ont été obtenues en accrochant différentes masse  $m'$  dans le dispositif présenté figure 8.

On peut alors à nouveau tracer la force magnétique  $F = m'g - f$  en fonction de la vitesse : Ces résultats, comparés aux précédents, sont suffisamment différents pour supposer que quelque chose nous a échappé.

Comment est-il possible que le coefficient de frottement n'ait pas la même valeur, et que le coefficient de proportionnalité entre la force d'origine magnétique et la vitesse ne soit pas sensiblement le même ?

#### 4 ) Mise en évidence d'une autre conséquence de la force d'origine magnétique

Comme l'annonce le titre de ce paragraphe, il semblerait que le fait que l'aimant ait une grande surface (2 cm de diamètre), engendre un couple de force sur l'aimant lui-même, à cause de la force magnétique dont il est à l'origine. Essayons de voir cela de plus près :

Nous avons cherché à observer le spectre du champ magnétique de l'aimant utilisé, de façon qualitative et quantitative.

Qualitativement à l'aide de limaille de fer soupoudrée au voisinage de l'aimant, voici ce que l'on observe, figure 11 ;



Figure 11 : Spectre magnétique de l'aimant utilisé dans toutes nos expériences

Quantitativement, nous avons mesuré la valeur du champ magnétique dans l'espace autour de l'aimant, dans le plan de l'aimant.

Nous avons ainsi mesuré les composantes  $B_z$  et  $B_r$  du champ magnétique  $\vec{B}$  en des points situés dans le plan horizontal sur lequel serait posé l'aimant (figure 12 et 13)

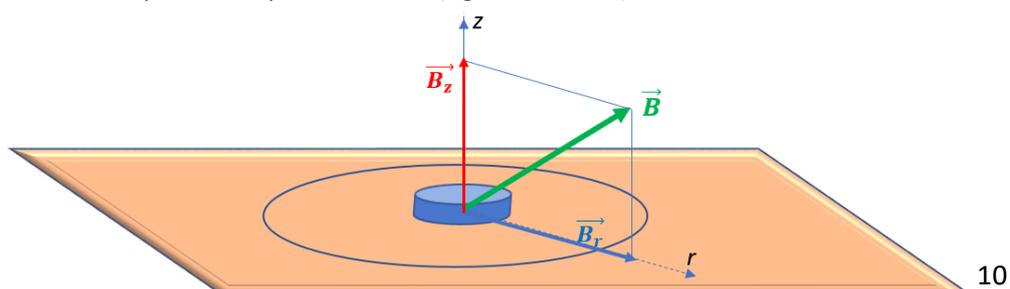


Figure 12 : Représentation des composantes radiale  $B_r$  et verticale  $B_z$  du champ magnétique créé par l'aimant

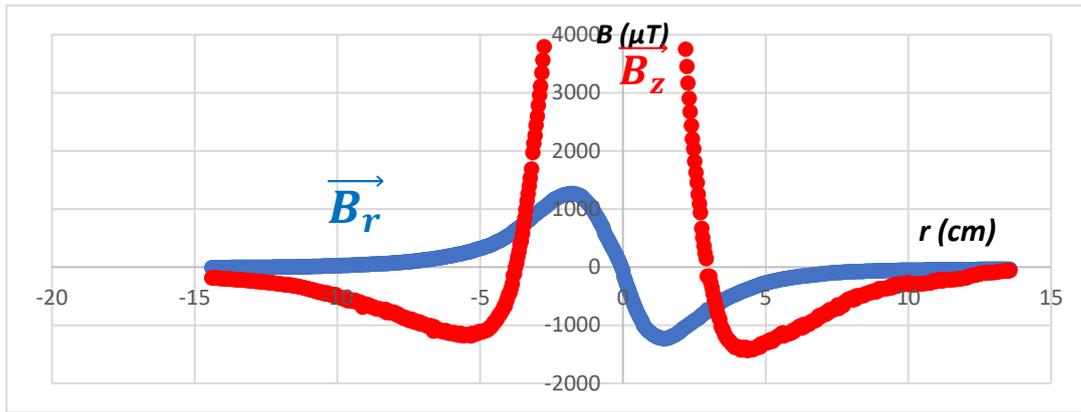


Figure 13 : Evolutions des composantes radiales  $B_r$  et verticale  $B_z$  du champ magnétique créé par l'aimant, au niveau du plan horizontal sur lequel repose l'aimant.

Nous n'avons pas retranché le champ magnétique local, car nous souhaitions avoir une image globale du champ magnétique autour de l'aimant. Le champ magnétique selon  $z$  au-dessus de l'aimant n'a pas pu être mesuré car les valeurs étaient trop grandes. Nous pouvons ainsi voir la portée de l'aimant ainsi que l'orientation du champ magnétique en fonction du point de l'espace.

Compte tenu de ces informations que nous avons pu avoir, essayons de comprendre ce qui se passe dans la plaque de cuivre, et l'interaction qui en découle entre le cuivre et l'aimant : figure 14.

$\vec{B}_a$  : Champ magnétique de l'aimant

$\vec{B}_i$  : Champ magnétique induit

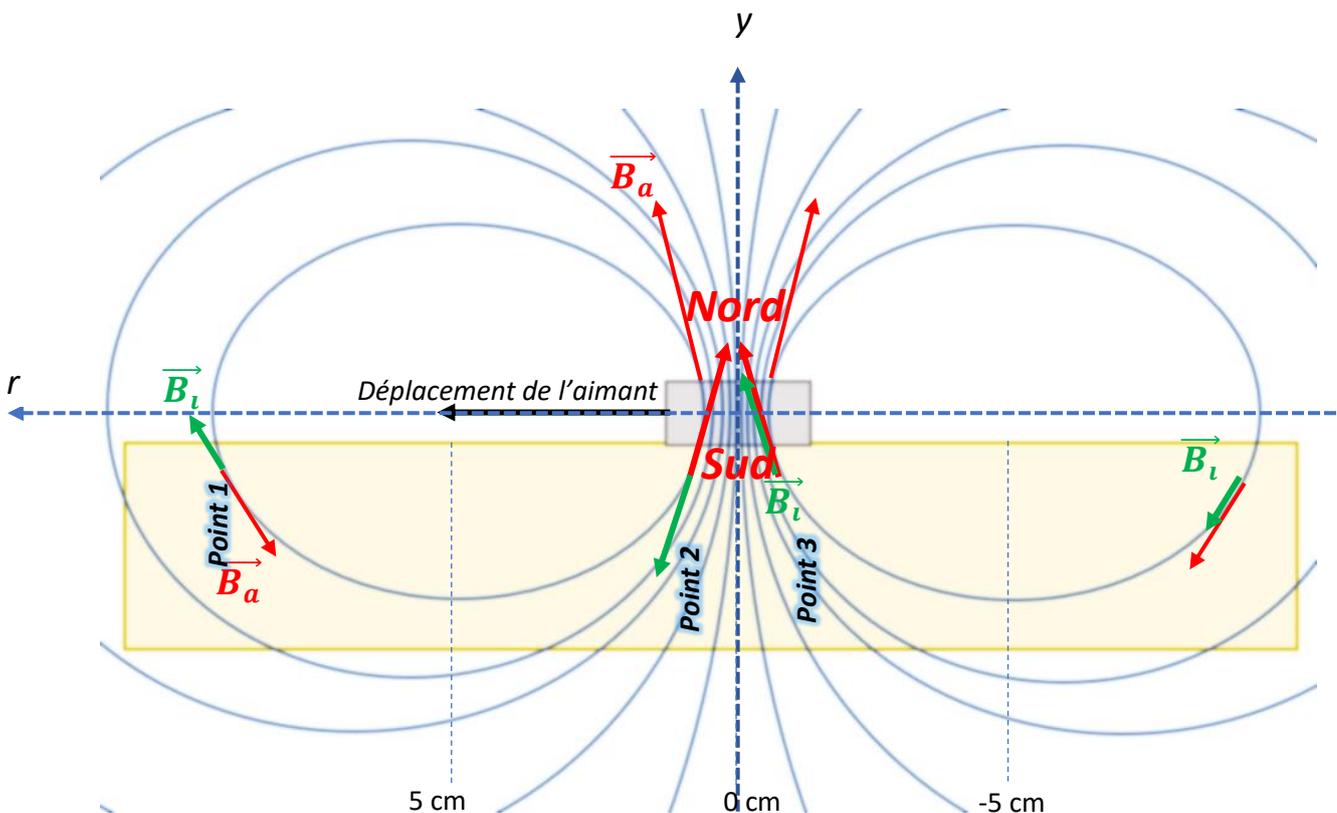


Figure 14 : Représentation du champ magnétique induit  $\vec{B}_i$  dans la plaque de cuivre lors du passage de l'aimant

Supposons que, sur la figure 14, l'aimant se déplace sur la plaque de cuivre de la droite vers la gauche. Le champ magnétique permanent de l'aimant est représenté en rouge sur la figure ci-dessus. Le fait que le champ magnétique varie dans l'espace lorsque l'aimant se déplace, va engendrer un champ magnétique induit dans la plaque de cuivre, de telle sorte que ce champ magnétique induit va s'opposer à la variation du flux du champ magnétique dans le cuivre. Autrement dit, si on regarde ce qui se passe en différents points de la plaque de cuivre, on pourrait dire que lorsque l'aimant circule de la droite vers la gauche :

**Au point 1 :** le champ magnétique créé par l'aimant augmente au niveau du point 1. Pour s'opposer à cela, le champ magnétique induit sera opposé au champ magnétique de l'aimant. Comme on est loin de l'aimant, le champ magnétique induit doit être faible.

**Au point 2 :** le champ magnétique induit sera également opposé au champ magnétique de l'aimant puisqu'en avançant vers la gauche, le champ magnétique de l'aimant augmente au niveau du point 2 de la plaque de cuivre.

**Au point 3 :** contrairement à ce que l'on avait aux points 1 et 2, ici, le flux du champ magnétique créé par l'aimant diminue lorsque l'aimant avance vers la gauche. Il y a donc un champ magnétique induit créé de tel sorte de compenser cette diminution du champ magnétique de l'aimant. Le champ magnétique induit aura alors le même sens que le champ magnétique de l'aimant.

Par conséquent, on peut prévoir que des forces attractives et répulsives auront lieu entre les différentes parties de la plaque, et les différentes parties de l'aimant. On peut imaginer alors que l'aimant ne repose pas de façon équitable toute sa surface sur la plaque de cuivre lorsqu'il glisse. D'après le schéma de la figure 14, étant donné les orientations des champs magnétiques permanents et induits aux différents endroits, on peut même prévoir que l'avant de l'aimant subisse une force répulsive de la part de la plaque, alors que l'arrière de l'aimant subisse une force attractive. Nous avons alors cherché à le prouver expérimentalement. Et effectivement, comme le montre la figure 15, lorsque nous faisons glisser l'aimant sur le plan incliné, au-delà d'un angle d'environ  $80^\circ$ , l'aimant se soulève.... Mais il se soulève à l'arrière et bascule vers l'avant. Nous l'avons fait glisser par ailleurs sur une surface non métallique avec la même inclinaison, et l'aimant glisse sans basculer vers l'avant. Lien vidéo : <https://youtu.be/gcO5CKAzyW8>

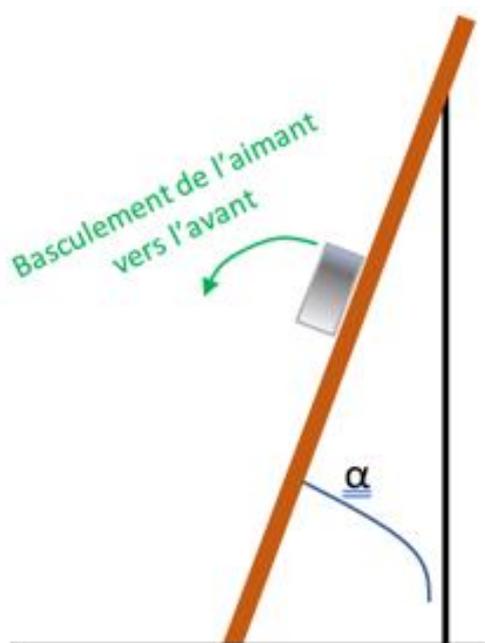


Figure 15 : A gauche : bascule de l'aimant sur du cuivre - A droite : descente rapide sans bascule sur du plastique

Alors arrêtons nous un instant sur cette expérience. Tout d'abord, l'expérience montre bien que la force de frottement solide entre la plaque et l'aimant dépend de l'inclinaison car la surface de contact entre l'aimant et la plaque dépend justement de l'inclinaison de la plaque.

On peut alors comprendre que l'étude menée dans le 1 ) paragraphe 2 ) (page 6 et 7) soit perturbée par cet effet de soulèvement de l'aimant, puisque justement, ce soulèvement ne se fait pas de la même intensité selon l'inclinaison de la plaque.

Par contre, dans le paragraphe 1 – 3 ) page 9, étant donné que l'on travaille avec une plaque toujours horizontale, cet effet de soulèvement de l'aimant est sûrement beaucoup moins présent, et la force de frottement solide n'est alors visiblement pas perturbée par cet effet.

Ceci nous amène à penser que pour nos futures expériences, il sera préférable de travailler avec une plaque horizontale au lieu d'une plaque inclinée pour éviter cet effet de soulèvement de l'aimant.

Maintenant, revenons sur le fait que contrairement à ce à quoi nous nous attendions, l'aimant se soulève à l'arrière et non à l'avant.

Nous avons cherché à comprendre cela et faisant varier les situations : utilisation d'aimants de caractéristiques géométriques différentes, épaisseurs de plaques différentes, ou encore inclinaison différente.

Les résultats montrent que l'inclinaison ne change rien à cette observation. L'effet de soulèvement est par contre bien plus important pour une plaque épaisse que pour une plaque fine. Mais beaucoup plus surprenant : nous avons refait l'expérience avec un aimant de diamètre 2 cm, et épaisseur 3 mm. Nous avons observé que l'aimant se soulève à l'avant lorsqu'on positionne une face sur la plaque de cuivre, et il se soulève à l'arrière lorsqu'on met sa face opposée sur la plaque de cuivre. Nous avons refait des expériences avec d'autres aimants, de mêmes dimensions ou de dimensions différentes, et finalement, nous avons pu observer que l'aimant se soulève toujours à l'avant lorsque la face nord de l'aimant est contre la plaque de cuivre, et à l'arrière lorsque c'est la face sud de l'aimant qui est contre la plaque de cuivre. Nous ne comprenons pas ce comportement dissymétrique, qui n'est pas dû à une dissymétrie du champ magnétique de l'aimant puisqu'on observe cela avec tous les aimants.

Nous continuons de réfléchir pour expliquer cette observation.

Une dernière remarque. Si nos mesures sont cohérentes, le coefficient de frottement solide que nous avons mesuré doit être légèrement inférieur au coefficient de frottement statique  $\mu_S$ , qui lui, s'obtient en recherchant la masse minimale que l'on doit accrocher au fil pour que l'aimant se mette en mouvement dans les expériences réalisées avec la plaque de cuivre horizontale.

$$\mu_S = \frac{m}{M} = \frac{6}{20} = 0,3 \quad \text{On a bien } \mu_S > \mu$$

Cette dernière étude, menée dans le paragraphe 4), nous a donc poussé à nous intéresser de plus près au champ magnétique induit, de façon qualitative, pour comprendre le mouvement de bascule de l'aimant. Nous nous sommes dit qu'il serait également intéressant de pouvoir avoir une estimation quantitative de ce champ magnétique induit, pour comprendre à quel point il peut s'opposer à la cause qui lui en a donné naissance.

## 5 ) Evaluation quantitative du champ magnétique induit :

Pour compléter l'étude du champ magnétique induit, nous avons tenté de le mesurer. Pour cela, nous avons comparé la valeur du champ magnétique obtenu en faisant glisser l'aimant sur une plaque de cuivre, à celui que nous obtenons lorsqu'on fait glisser l'aimant sur une plaque de plexiglas d'épaisseur identique.

Pour que les expériences soient comparables, nous devons tirer l'aimant à la même vitesse dans les deux cas. Or, n'ayant pas de champ magnétique induit dans le plexiglas, nous ne pouvions pas obtenir de mouvement rectiligne uniforme en accrochant une masse à l'extrémité d'un fil comme nous l'avons fait dans l'expérience précédente. Du coup, nous avons utilisé un moteur pour tracter l'aimant dans les deux cas. Le moteur a permis d'avoir ainsi le même mouvement rectiligne uniforme dans les deux cas.

Comme nous voulions mesurer le champ magnétique induit, nous avons préféré mettre le capteur magnétique sous la plaque sur laquelle glissait l'aimant, comme le montre le schéma suivant : figure 16.

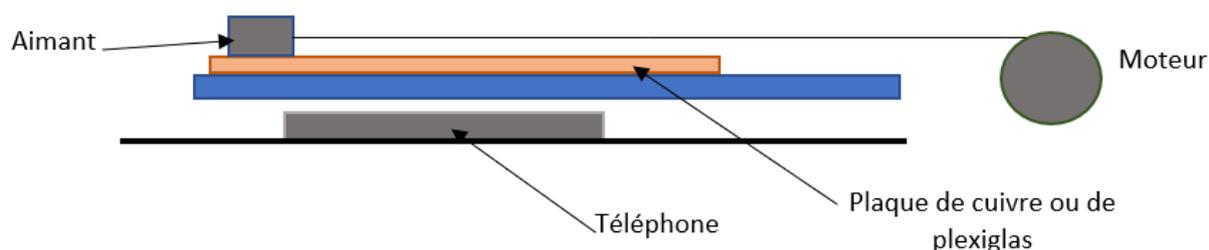


Figure 16 : Mesure du champ magnétique induit, en tirant l'aimant à vitesse constante et identique dans un premier temps sur une plaque de cuivre, et dans un deuxième temps sur une plaque de plexiglas.

Voici alors le résultat obtenu : (principe de la mesure : <https://youtu.be/bY2tYWObroI> )

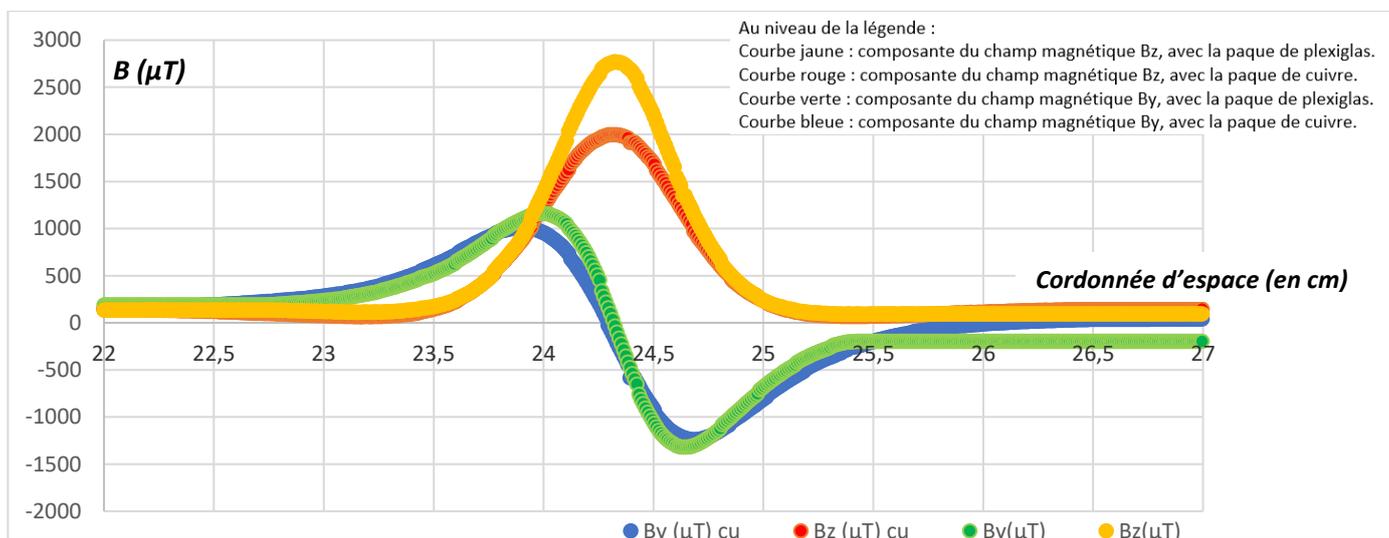


Figure 18 : Evolution des composantes radiale et verticale du champ magnétique total mesuré lorsque l'aimant glisse à vitesse constante et identique sur une plaque de cuivre et sur une plaque de plexiglas.

Pour cette expérience, nous avons travaillé avec un aimant de plus faible intensité magnétique, afin que la composante  $B_z$  du champ magnétique reste mesurable par le capteur.

Nous pouvons alors dire que le champ magnétique sous l'aimant, lorsque l'aimant passe sur la plaque de cuivre, diminue de presque 30%. Cela paraît considérable, car cela voudrait dire que le cuivre est capable de produire un champ magnétique relativement important par rapport à celui qui en est à l'origine. Du coup, on peut mieux comprendre pourquoi le champ magnétique induit dans le cuivre est capable d'interagir de façon importante avec le champ magnétique de l'aimant, au point de contrôler sa vitesse. Nous avons refait l'expérience en faisant varier la vitesse de l'aimant tiré par le moteur. Les vitesses ont été mesurées en filmant le déplacement de l'aimant. Les mesures sont représentées ci-dessous (figure 19)

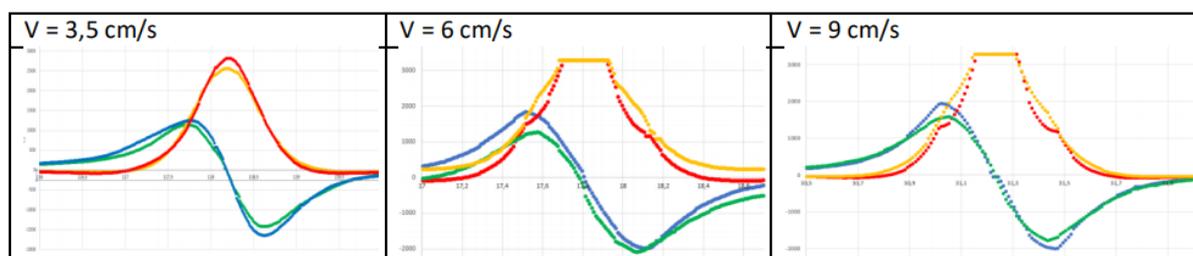


Figure 19 : Evolution des composantes radiale et verticale du champ magnétique total mesuré lorsque l'aimant glisse à vitesse constante et identique sur une plaque de cuivre et sur une plaque de plexiglas.

Mais nous voyons, après exploitations des enregistrements par les capteurs, que pour des grandes vitesses, le champ magnétique sature le capteur. Nous avons alors refait une série de mesure, que vous pouvez voir dans l'annexe 1. Nous les avons réalisées avec un aimant produisant un champ magnétique plus faible pour éviter la saturation du capteur. Malheureusement, les résultats semblent indiquer que notre protocole expérimental n'est pas suffisamment précis pour avoir une chance d'accéder à la mesure du champ magnétique induit, car les évolutions de  $B_y$  et  $B_z$  ne semblent pas suivre de règle logique. Nous pensons que la trajectoire de l'aimant ne suit pas une direction suffisamment précise pour pouvoir faire des mesures comparatives. Nous referons ces mesures en plaçant alors des guides qui contraindront l'aimant à suivre une trajectoire identique d'une expérience à l'autre.

Nous n'avons pas abordé l'origine du champ induit. Les recherches dans la littérature nous ont appris qu'il est généré par des courants induits dans la plaque de cuivre. Dès lors, nous avons voulu approfondir le sujet en répondant aux questions suivantes :

- Comment se répartissent les courants dans la plaque de cuivre, que ce soit en profondeur ou en largeur ?
- Est-ce que ces courants dépendent de la taille de l'aimant ? De son pouvoir magnétique ?
- Peut-on estimer la valeur du champ magnétique induit par les courants de Foucault ?
- Est-ce que le phénomène étudié se produit dans les autres métaux ?

Pour répondre à ces questions, nous avons décidé d'acheter un ensemble de morceaux de cuivre d'épaisseurs différentes, un ensemble de morceaux d'aluminium et nous disposons également de plaques de zinc et d'une plaque de titane. Par ailleurs, nous avons acheté un grand nombre d'aimants de géométries différentes, et de pouvoirs d'aimantation différents.

## II – Comment varie la force magnétique en fonction des dimensions de la plaque de cuivre ?

### 1 ) Etude qualitative :

Nous avons pu nous rendre compte très rapidement que la durée avec laquelle un aimant identique dévale la pente de la plaque de cuivre est d'autant plus grande que la plaque de cuivre est épaisse. Nous devons donc étudier à quelle profondeur le champ magnétique induit peut être créé. Par ailleurs, nous avons aussi fait glisser l'aimant en le rapprochant de plus en plus du bord de la plaque de cuivre, et nous avons alors constaté que sa vitesse est d'autant plus grande. Voyons cela d'un point de vue quantitatif :

### 2 ) Influence de la largeur de la plaque :

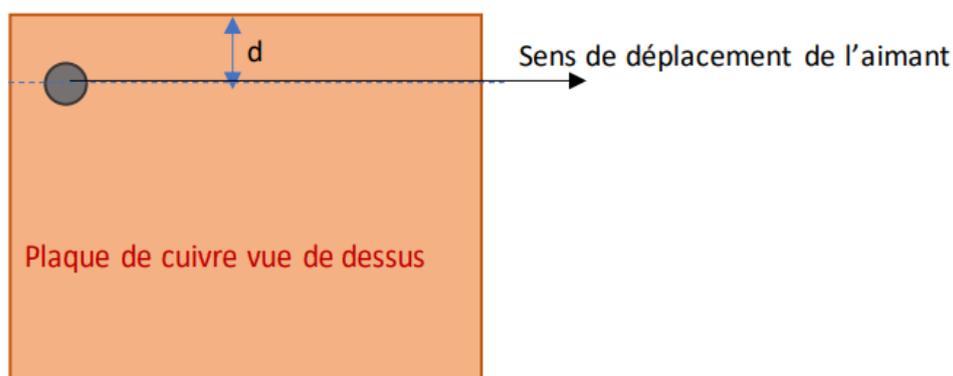


Figure 20 : trajectoire de l'aimant à une distance  $d$  du bord de la plaque.

Nous avons fait glisser l'aimant, sur la plaque de cuivre horizontale, à vitesse constante, en écartant l'aimant d'une distance  $d$  du bord de la plaque entre chaque glissade (figure 20). Voici les résultats obtenus : figure 21.

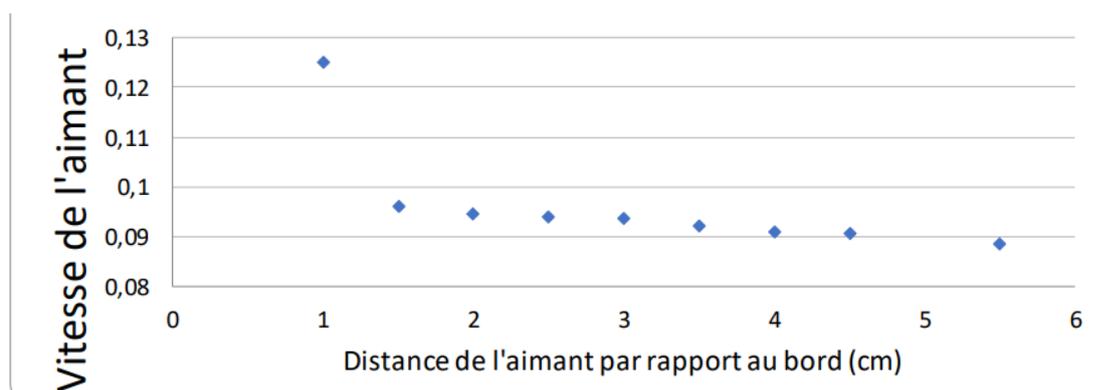


Figure 21 : Vitesse limite de l'aimant lorsque celui-ci se déplace à une distance  $d$  du bord de la plaque horizontale. L'aimant est alors tiré par la même masse  $m'$ , avec le dispositif présenté en I-3)

Nous avons représenté la vitesse en ordonnée et non la force d'origine magnétique. En effet, lorsque nous avons établi que la force était proportionnelle à la vitesse, on faisait glisser l'aimant au milieu de la plaque, et on modifiait la vitesse à laquelle on tirait l'aimant. On peut facilement imaginer que si on avait fait ces expériences en modifiant la distance «  $d$  » de la trajectoire de l'aimant par rapport au bord de la lame, la

constante de proportionnalité peut être différente en fonction de « d ». C'est pour cette raison que dans l'expérience présentée ici, nous ne pouvons pas mettre en ordonnée la force d'origine magnétique, mais uniquement la vitesse. Pour évaluer alors la surface de la plaque qui exerce une force d'origine magnétique sur l'aimant, nous devons connaître K pour chacune des distances « d » entre le bord de l'aimant et le bord de la plaque.

Nous avons alors refait une série de 30 mesures pour déterminer les coefficients de proportionnalité entre la force magnétique et la vitesse, pour différentes valeurs de « d » comprises entre 0 et 2,5 cm. Nous avons pour cela procédé de la même manière que dans le paragraphe I – 3 ), en faisant varier la masse m' qui tire l'aimant, pour chacune des valeurs de « d ».

Voici alors les résultats obtenus, dans lesquels nous avons choisi de tracer la constante de proportionnalité k ( $F=Kv$ ) en fonction de « d » : figure 22.

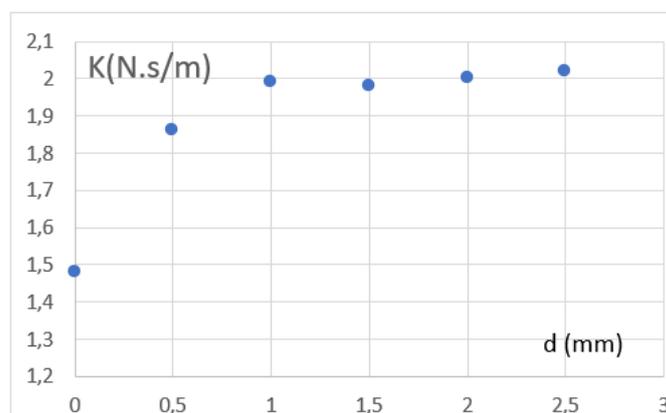


Figure 22 : Evolution de la constante de proportionnalité k entre la force d'origine magnétique et la vitesse de l'aimant en fonction de la distance du bord de l'aimant par rapport au bord le plus proche de la plaque de cuivre.

Ces résultats montrent clairement que la force magnétique qui s'oppose au déplacement de l'aimant est principalement créée par une zone de la plaque de cuivre, située au maximum à 1 cm autour de l'aimant (c'est-à-dire à 2 cm maximum par rapport au centre de l'aimant qui a un rayon de 1 cm). Ces résultats ont cela dit été obtenus avec un aimant donné, et il faudrait voir si cela reste identique ou pas avec un autre aimant.

Nous avons étudié l'influence de l'épaisseur des lames de cuivre, en tirant l'aimant au moyen d'une masse reliée à l'aimant, comme nous l'avions précédemment fait : figure 23

Mais cette fois-ci, la masse m' qui tire l'aimant est maintenue constante lorsque nous modifions les épaisseurs des lames de cuivre. La masse m' était égale à 10g.

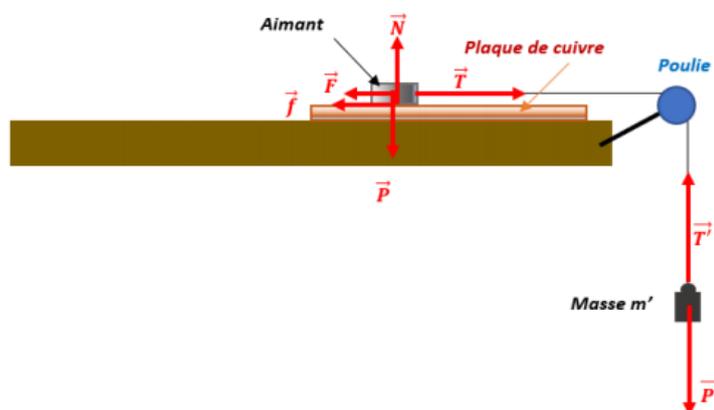


Figure 23 : Dispositif utilisé pour étudier l'influence de l'épaisseur de la plaque sur la force d'origine magnétique. La masse m' est maintenue constante lorsqu'on change l'épaisseur de la plaque

Voici les résultats obtenus :

e (mm)	v(mm/s)
1	85,6
2	58,55
3	54,67
5	51,12
6	48,04
10	46,63

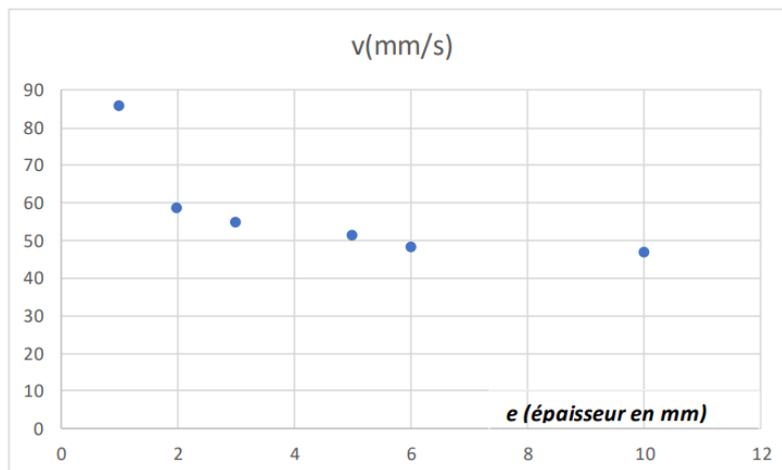


Figure 24 : Evolution de la vitesse de l'aimant en fonction de l'épaisseur de la plaque de cuivre, la masse  $m'$  qui tire l'aimant étant constante

De la même manière que précédemment, nous avons représenté dans un premier temps la vitesse en ordonnée et non la force d'origine magnétique. Car là encore, lorsque nous avons établi que la force était proportionnelle à la vitesse, on travaillait avec une lame d'épaisseur identique, et on modifiait la vitesse à laquelle on tirait l'aimant. On peut facilement imaginer que si on avait fait ces expériences avec une lame d'épaisseur différente lors des expériences réalisées dans les parties I – 2) et I – 3) on aurait également trouvé une relation de proportionnalité entre la force d'origine magnétique et la vitesse.

Nous avons alors refait une série de 30 mesures pour déterminer les coefficients de proportionnalité entre la force magnétique et la vitesse, pour 6 épaisseurs de lame de cuivre, comprises entre 1mm et 10 mm. Nous avons pour cela procédé de la même manière que dans le paragraphe I – 3), en faisant varier la masse  $m'$  qui tire l'aimant, pour chacune des plaques.

Voici alors les résultats obtenus (figure 25), dans lesquels nous avons choisi de tracer la constante de proportionnalité  $k$  ( $F=Kv$ ) en fonction de l'épaisseur de la lame.

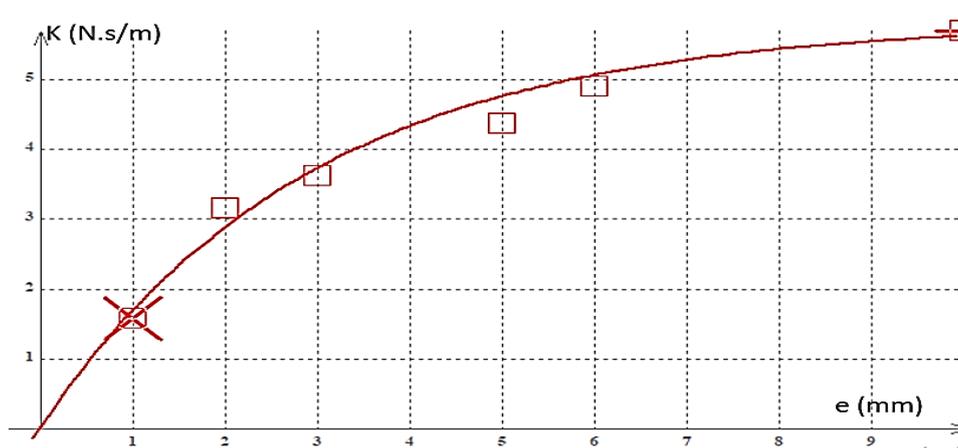


Figure 25 : Evolution de la constante de proportionnalité  $k$  entre la force d'origine magnétique et la vitesse de l'aimant en fonction de l'épaisseur de la plaque de cuivre.

Une modélisation des points expérimentaux par une fonction du type

$$K = K_{max} \left( 1 - e^{-\frac{e}{L}} \right)$$

où  $L$  serait alors une grandeur caractéristique semble appropriée. La modélisation donne alors :

$$K_{max} = 5,8 \text{ kg/s} \text{ et } L = 2,9 \text{ mm}$$

Avec cette étude, nous pouvons donc penser que la valeur de  $K$  aura atteint 99% de sa valeur maximale pour une épaisseur de lame égale à  $4,6 \times L = 1,3 \text{ cm}$

Nous pouvons noter toutefois qu'au bout de 2 mm d'épaisseur,  $K$  aura déjà atteint 50% de sa valeur maximale.

Ces résultats quantitatifs ont été obtenus avec un aimant produisant un champ magnétique de valeur donnée. La question est alors de savoir ce qui se passerait si on utilisait un aimant produisant un champ magnétique plus faible. Est-ce que là encore,  $K$  atteindrait 99% de sa valeur maximale au bout de 1,3 cm, avec une valeur de  $K_{max}$  différente de celle obtenue avec l'aimant fort ? Nous devons refaire une série de mesures pour répondre à cette question.

Enfin, nous avons jusque-là travaillé avec des plaques de cuivre, mais qu'en est-il si on fait glisser un aimant sur d'autres métaux ?

### III – Influence de la nature du métal

Comme nous possédons au lycée quelques lames de zinc, et d'aluminium, nous avons pu nous rendre compte que finalement, la force d'origine magnétique est aussi créée lorsque l'aimant glisse sur ces métaux. Alors nous avons acheté des lames d'aluminium d'épaisseurs différentes pour refaire des séries de mesures et mener des comparaisons. Nous avons ainsi pu refaire les expériences sur une lame d'aluminium d'épaisseur 1 mm, et voici les résultats que nous avons obtenus :

Pour réaliser ces mesures, nous avons procédé autrement qu'en réalisant et analysant des vidéos (figure 26). En effet, puisque le mouvement de l'aimant est rapidement rectiligne uniforme, nous pouvons simplement mesurer le temps que met l'aimant pour parcourir une certaine distance. Nous avons alors, à l'aide de deux lasers et deux photorésistances, mesurer la distance parcourue par l'aimant tracté par une masse sur un plaque horizontale d'aluminium. Voir la vidéo : <https://youtu.be/WwmGTn-Lz7o> .

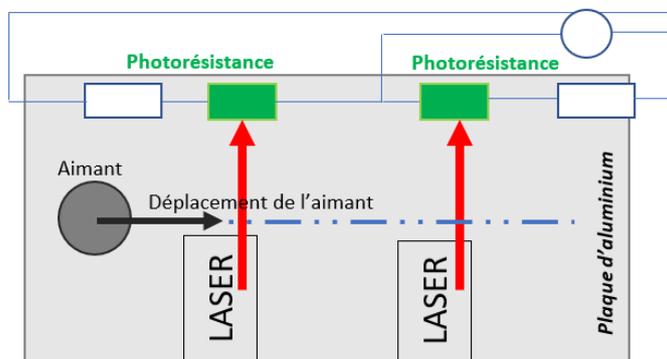


Figure 26 : Dispositif utilisé pour mesurer la vitesse de l'aimant dans son régime permanent : l'aimant obture deux faisceaux laser lors de son trajet.

On relève les tensions aux bornes des résistances. Lorsque l'aimant obture un rayon laser, ces tensions décroissent rapidement. Il suffit alors de calculer la vitesse de l'aimant en faisant  $v = d/t$ .

Nous faisons alors des mesures pour différentes vitesses de l'aimant en faisant varier la masse qui tire l'aimant, et voici les résultats obtenus :

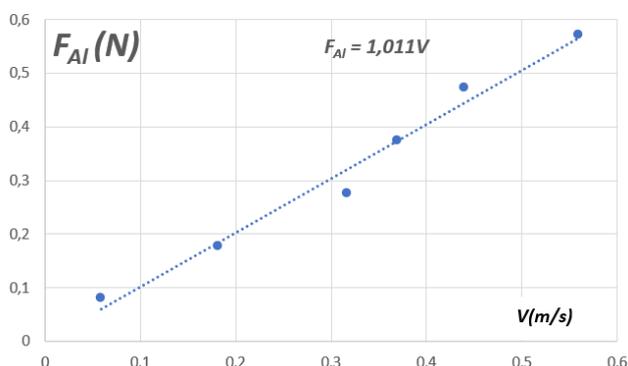


Figure 27 : Evolution de la force d'origine magnétique exercée par une plaque d'aluminium de 1 mm d'épaisseur en fonction de la vitesse.

Les résultats expérimentaux (figure 27) sont moins précis que ceux obtenus avec une analyse vidéo, mais cela semble suffisant pour faire une comparaison avec les résultats obtenus lorsque l'aimant glisse sur la plaque de cuivre de même épaisseur.

La force d'origine magnétique est proportionnelle à la vitesse, ce qui est un résultat identique à celui que l'on avait obtenu pour le cuivre.

Les résultats montrent clairement que la force d'origine magnétique est plus faible sur l'aluminium que sur le cuivre, car le rapport de la constante de proportionnalité entre la force et la vitesse, entre l'aluminium et le cuivre, est :

$$\frac{1,74}{1,01} = 1,74$$

C'est un résultat intéressant, que nous avons cherché à comprendre en cherchant les valeurs des conductivité électriques de l'aluminium et du cuivre.

Conductivité électrique du cuivre : 59,6 MS/m

Conductivité électrique de l'aluminium : 35,3 MS/m

Le rapport de ces conductivité électrique est égal à **1,69**

Ces rapports sont quasiment égaux ! Il est donc fort probable que cette différence soit liée aux différences de conductivité, mais cela reste à confirmer en menant des mesures sur d'autres métaux de même épaisseur sur lesquels on observe la présence de la force d'origine magnétique. C'est alors ce que nous avons fait.

Nous nous sommes procurés des plaques de zinc de 1 mm d'épaisseur, et nous avons tiré toujours le même aimant avec différentes masses en utilisant le dispositif décrit au début de ce paragraphe. Voici les résultats obtenus : Figure 28.

La constante de proportionnalité entre la force d'origine magnétique et la vitesse est donc égale à  $K_{\text{zinc}} = 0,56 \text{ N.s/m}$

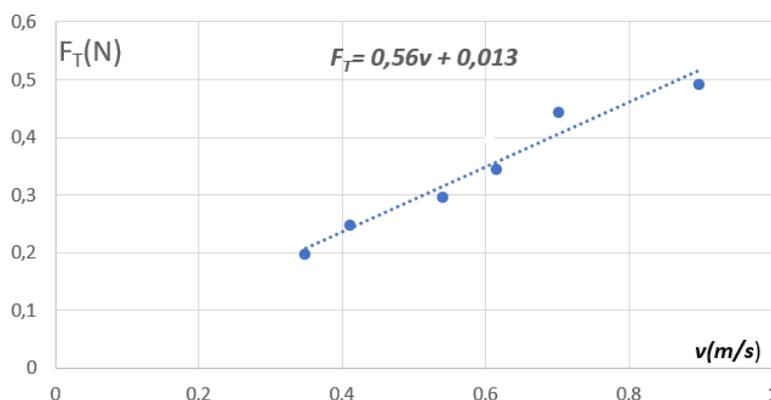


Figure 28 : Evolution de la force d'origine magnétique exercée par une plaque de zinc de 1 mm d'épaisseur en fonction de la vitesse.

Or la conductivité électrique du zinc vaut 16,6 MS/m. Le rapport de la conductivité électrique du cuivre sur celle du zinc vaut donc :

$$\frac{\lambda_{Cu}}{\lambda_{Zn}} = \frac{59,6}{16,6} = 3,6$$

Or le rapport des constantes de proportionnalité est :

$$\frac{K_{Cu}}{K_{Zn}} = \frac{1,74}{0,56} = 3,1$$

Ces deux rapports ne sont pas égaux, mais ne sont pas non plus très éloignés l'un de l'autre. Comme nous le soulignons, la précision des mesures réalisées avec la méthode des lasers a une précision moins grande que celles issues de l'analyse des vidéos. Il est possible que le faible écart observé soit donc le fait d'une précision trop faible de nos mesures. Nous avons également réalisé des mesures sur une plaque de platine de 1 mm d'épaisseur. Nous avons constaté que l'aimant n'est alors pratiquement pas freiné par une force d'origine magnétique. Or la conductivité électrique du platine est environ 6,5 fois moins grande que celle du cuivre. Là encore, ce résultat expérimental nous conforte dans l'idée que la conductivité électrique est un facteur déterminant dans le phénomène observé.

Suite à plusieurs échanges avec le laboratoire LNCMI de Grenoble, nous avons voulu aller plus loin pour montrer l'influence de la conductivité électrique. En effet, le LNCMI nous a suggéré d'étudier l'influence de la température de la plaque de cuivre sur la vitesse de l'aimant. Nous avons alors effectué quelques recherches, et nous avons vu que la conductivité électrique du cuivre dépend de sa température, comme le dépend de sa température, comme le montre le graphique suivant : figure 29.

Nous avons décidé de modifier la température de la plaque de cuivre. Nous possédons 2 plaques de cuivre de 1mm d'épaisseur. Nous avons laissé 1 plaque à température ambiante, et nous avons mis l'autre dans un four, avec une température qui peut aller jusqu'à 200 °C. L'expérience est visible en suivant le lien : <https://youtu.be/qTcHWQzhvLE>

Pour que la seule différence entre les deux plaques soit la température de la plaque, nous avons recouvert les deux plaques de papier cuisson. L'expérience montre alors très nettement que plus la plaque de cuivre est chaude, plus l'aimant descend rapidement, montrant alors que les courants de Foucault à l'origine du champ magnétique induits dans la plaque, et donc à l'origine de la force magnétique qui ralentit l'aimant, sont plus faibles.

Cette expérience est alors parfaitement conforme à une expérience que le LNCMI a réalisé devant nous lors d'une visioconférence, au cours de laquelle ils ont fait glisser deux aimants sur deux plaques de cuivre dont l'une était à température ambiante et l'autre refroidie dans de l'azote liquide. Voici le lien de l'expérience en question : <https://youtu.be/4EvYQvb6g5o>

Nous nous sommes même amusés à modifier l'ordre des choses : à température ambiante, la conductivité électrique de l'aluminium est 35,3 MS/m et celle du cuivre 59,6 MS/m. Nous avons mis la plaque d'aluminium au congélateur, à -18°C, et la plaque de cuivre dans le four à 200°C, et l'aimant glisse alors plus vite sur la plaque de cuivre que sur la plaque d'aluminium de même épaisseur. L'expérience est visible en suivant le lien : <https://youtu.be/S1qBdQ99I2Y>

L'ensemble de ces expériences confirme donc que la conductivité électrique du matériau est un facteur extrêmement important pour quantifier le phénomène étudié.

Nous venons de voir, en comparant le phénomène induit par des métaux différents, l'importance de la conductivité électrique.

Comme nous possédons des lames d'aluminium de différentes épaisseurs, nous avons voulu aussi comparer l'influence de l'épaisseur du matériau (cuivre et aluminium) sur l'intensité de la force d'origine magnétique. Comme nous l'avons alors fait pour le cuivre, nous avons tiré l'aimant sur la

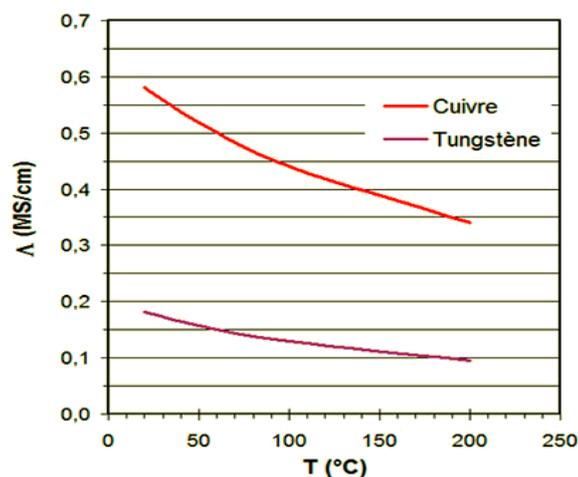


Figure 29 : Evolution de la conductivité électrique du cuivre en fonction de la température

plaque d'aluminium avec différentes masses, et ce, pour 6 plaques d'aluminium d'épaisseurs différentes. Nous avons là encore utilisé le dispositif décrit au début du III. Grâce aux mesures obtenues, nous avons pu tracer l'évolution de la constante de proportionnalité  $k$  entre la force d'origine magnétique et la vitesse de l'aimant en fonction de l'épaisseur (figure 30).

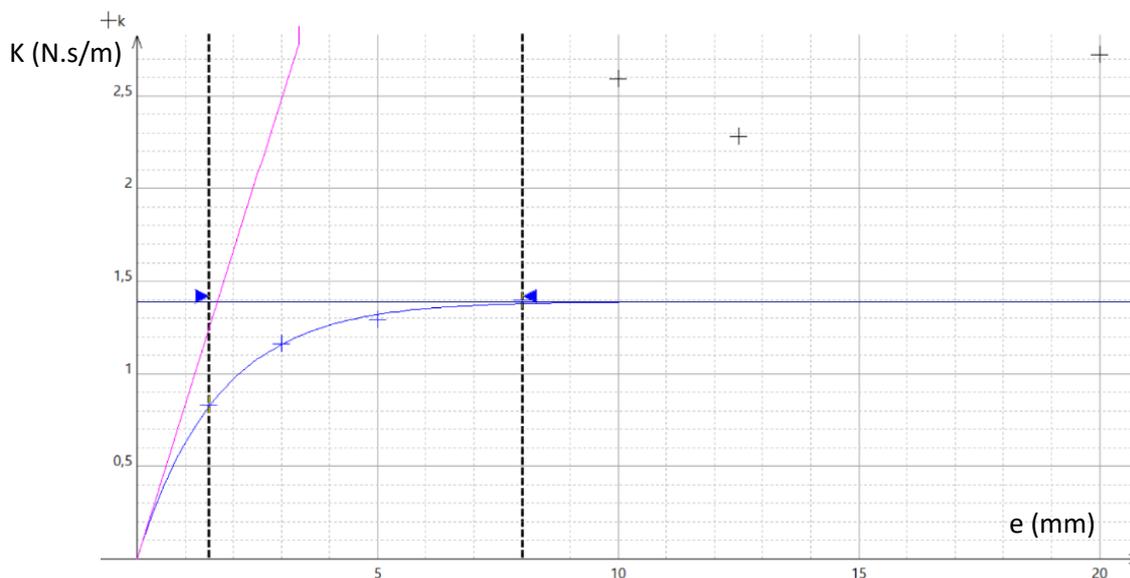


Figure 30 : l'évolution de la constante de proportionnalité  $k$  entre la force d'origine magnétique et la vitesse de l'aimant en fonction de l'épaisseur de la plaque de cuivre

Nous constatons que pour des épaisseurs d'aluminium allant de 0 à 8 mm, l'évolution de  $k$  est assez similaire dans la forme à ce qu'on avait pour le cuivre. Mais par contre, pour des épaisseurs supérieures à 8 mm, l'évolution de  $k$  est complètement différente :  $k$  semble anormalement élevé. Nous avons refait 3 fois les mesures, et nous trouvons des valeurs toujours semblables.

Nous avons cherché les différences autres que conductivité électrique qui existe entre le cuivre et l'aluminium pour tenter de comprendre cette différence de comportement. Nous avons alors pu voir qu'il existe une perméabilité magnétique qui a pour conséquence le fait que le champ magnétique dans le matériau sera plus ou moins intense. Nous chercherons à savoir dans la suite de notre projet si ce paramètre intervient alors de façon significative dans le phénomène étudié.

## IV – La modélisation de la force d'origine magnétique $kV$ a-t-elle des limites ?

Nous nous sommes posés cette question, car dans l'expérience au cours de laquelle l'aimant glisse sur le plan incliné, si on suppose que la force d'origine magnétique est de forme  $kV$  quel que soit l'instant, l'équation qui régit l'évolution de la vitesse de l'aimant est alors :

$$-kV - f + mgsin\alpha = m \frac{dv}{dt}$$

La solution de cette équation est telle que la vitesse de l'aimant doit être égale à 99% de sa valeur maximale au bout d'un temps égal à 4,6 fois  $k/m$ .

Le régime transitoire devrait donc durer environ 50 ms. Or, avec nos caméras filmant à 240 images par seconde, donc 1 image toute les 4 ms, nous ne voyons pas de phase d'accélération, mais directement le régime permanent.

Que se passe-t-il dans les premiers instants de la glissade ?

Comme il nous fallait filmer avec un plus grand nombre d'image pas seconde, nous sommes alors entrés en contact avec Romain Bellanger et Patrick Braud, ingénieurs au laboratoire Pprime de L'Université de Poitiers, afin de réaliser des vidéos de l'expériences avec une meilleure définition, et une fréquence d'image plus grande (figure 31).

Après plusieurs essais, nous avons vu qu'un nombre de 1000 images par seconde, permettait de voir la phase d'accélération de l'aimant. Un exemple de vidéo que nous avons prise se trouve en suivant le lien : <https://youtu.be/z-9rjelQL0c> . Nous avons alors exploité la vidéo à l'aide de Latis pro, et voici ci-dessous (figure 32) les résultats obtenus sur une plaque de cuivre de 1mm d'épaisseur inclinée de 42°.

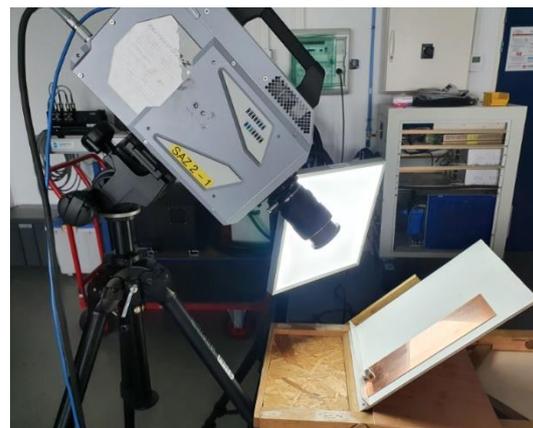


Figure 31 : Caméra de compétition de l'institut Pprime de l'Université de Poitiers pour filmer les premiers instants du déplacement de l'aimant.

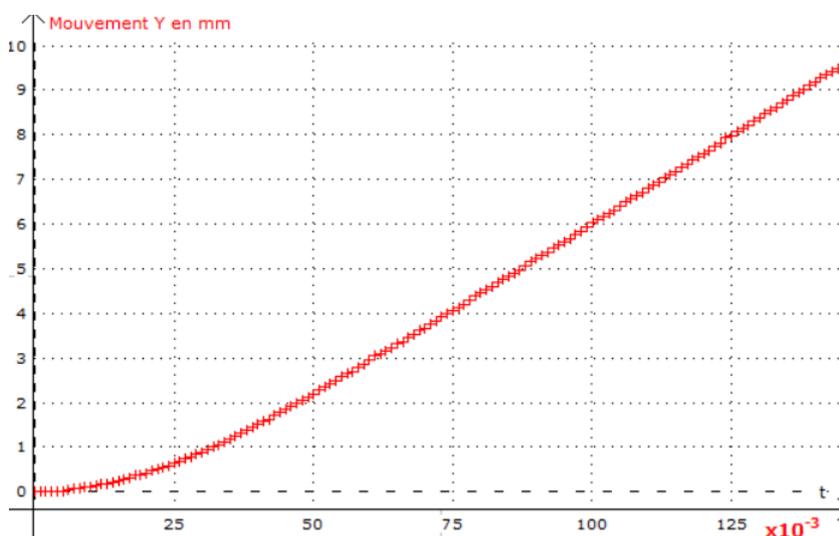


Figure 32 : Evolution de la position de l'aimant descendant une plaque de cuivre de 1 mm inclinée à 42°

Un premier commentaire : finalement, on s'aperçoit que la phase d'accélération dure entre 20 et 30 ms. Nous aurions donc pu l'observer avec notre caméra. Mais le problème était alors la résolution de l'image qui n'était pas assez précise pour décrire cette phase d'accélération. En effet, le déplacement de l'aimant durant cette phase n'est que de 2 à 3 mm.

Nous avons essayé de modéliser ces points expérimentaux par une fonction du type :

$$x(t) = v_{lim}t + \frac{m}{k}e^{-\frac{k}{m}t} - \frac{m}{k}$$

Ce serait en effet la solution de l'équation différentielle si la force d'origine magnétique était de forme kv. Nous avons essayé de faire cette modélisation sur une multitude d'expériences : nous avons filmé et analysé 3 descentes d'aimant sur une plaque de cuivre de 1 mm d'épaisseur, 3 autres sur une plaque de cuivre de 3 mm d'épaisseur, 3 autres sur une plaque d'aluminium de 1 mm d'épaisseur, et 3 dernières sur une plaque d'aluminium de 3 mm d'épaisseur. Pour que les frottements solides soient identiques entre chacune de ces expériences, nous avons à chaque fois recouvert la plaque par du papier cuisson.

Nous n'avons jamais pu modéliser la courbe dans son intégralité avec la fonction donnée. Quelques exemples sont donnés en annexe. Cela signifie clairement que dans les premiers instants, on ne peut pas dire que la force d'origine magnétique est de forme kv. Voici ce que donne la modélisation avec les résultats issus de la plaque de cuivre de 1 mm d'épaisseur inclinée à 42° : figure 33 ci-contre.

On voit en particulier qu'alors que dès 25 ms, la modélisation est bonne, ce n'est pas du tout le cas pour les 15 premières millisecondes.

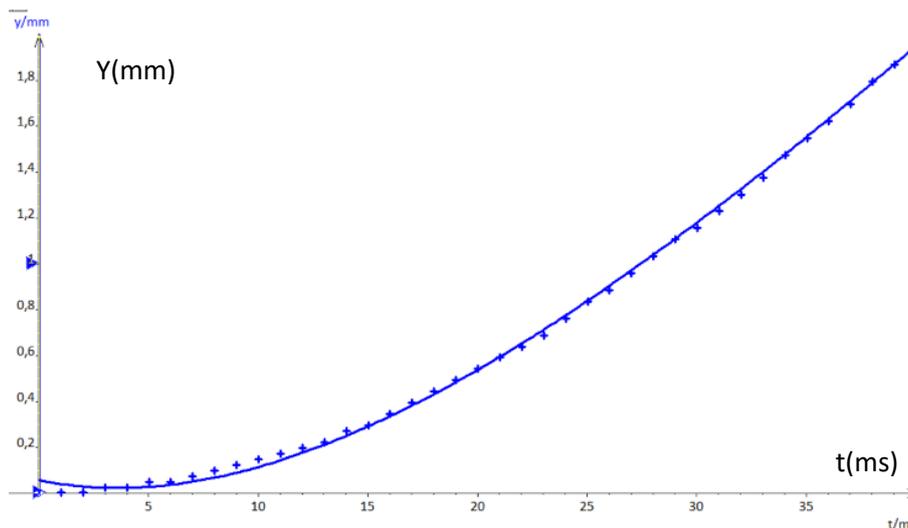


Figure 33 : Impossible de modéliser la force d'origine magnétique par la fonction  $kv$  tout au long du mouvement de l'aimant.

Nous avons alors tenté de modéliser la courbe en 2 temps :

Le début de la courbe par une parabole, et la fin de la courbe par une fonction affine. Voici ce que cela donne :

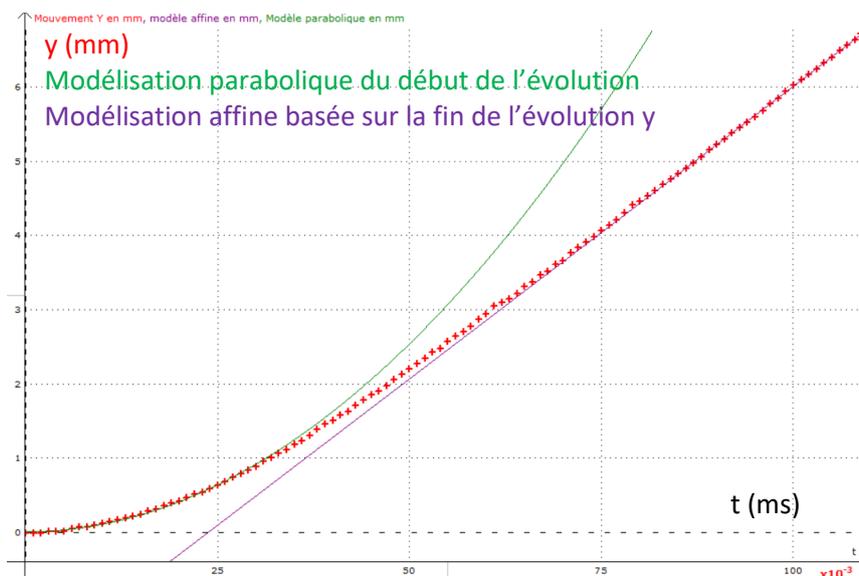


Figure 34 : modélisation de l'évolution de la position  $y(t)$  de l'aimant glissant sur la plaque de cuivre de 1 mm inclinée de  $42^\circ$ .

Figure 34 - Cette étude montre que durant les 25 premières millisecondes, on peut considérer que les forces qui agissent sur l'aimant sont constantes car la modélisation parabolique implique que l'accélération est constante durant cette phase-là. On remarque aussi que la modélisation par une fonction affine est bonne qu'à partir de 75 ms.

Est-ce que ces observations permettent de conclure que la force d'origine magnétique ne s'exerce pas sur l'aimant durant les premiers instants ? Et bien non. En effet, nous avons comparé les résultats obtenus avec la plaque de cuivre de 1 mm d'épaisseur, avec les autres plaques. Nous avons en particulier relevé la valeur de l'accélération issue de la modélisation parabolique, pour les plaques de cuivre et d'aluminium de 1 mm et de 3 mm d'épaisseur. Rappelons que pour chaque plaque, 3 vidéos ont été réalisées pour s'assurer que les résultats étaient reproductibles. Voici alors dans le tableau suivant les résultats obtenus. Nous y avons aussi noté la date à laquelle la modélisation parabolique n'est plus bonne, et la date à partir de laquelle la modélisation par une fonction affine est bonne.

Vidéo	Accélération	Fin modélisation parabolique (ms)	Début modélisation affine (ms)
Cu 1 mm – Vidéo1	2,0	25	75
Cu 1 mm – Vidéo2	2,8	25	50
Cu 1 mm – Vidéo3	3,0	27	42
Cu 3 mm – Vidéo1	1,2	30	
Cu 3 mm – Vidéo2	1,8	21	52
Cu 3 mm – Vidéo3	1,0	30	50
Al 1 mm – Vidéo1	4,0	25	57
Al 1 mm – Vidéo2	4,0	25	
Al 1 mm – Vidéo3	4,2	28	
Al 3 mm – Vidéo1	2,4	37	60
Al 3 mm – Vidéo2	3,4	22	55
Al 3 mm – Vidéo3	2,0	40	60
PVC	4,56	Toujours valable	

Normalement, si la force d'origine magnétique n'intervenait pas dès les premiers instants, on aurait :

$$-f + mgs\sin\alpha = ma$$

Et comme chaque plaque a été recouverte de papier sulfurisé, la force de frottement solide  $f$  étant alors identique, l'accélération devrait être constante. On s'aperçoit bien que ce n'est pas le cas. Même si pour chaque plaque, les trois essais ne donnent pas exactement les mêmes accélérations, on peut tout de même voir que d'une plaque à l'autre, les valeurs sont en moyenne différentes.

Nous avons mis dans l'annexe 2 plusieurs fichiers latispro montrant les évolutions de l'aimant sur les différentes plaques, ainsi que leurs modélisations

L'accélération est plus faible sur la plaque de cuivre de 3 mm, puis viennent à peu près à égalité, la plaque de cuivre de 1 mm et la plaque d'aluminium de 3 mm, et enfin la plaque d'aluminium de 1 mm. A titre d'indication, nous avons fait glisser l'aimant sur une plaque de PVC recouverte également de papier sulfurisé. Comme le montre la courbe en annexe, on constate que la modélisation parabolique est parfaitement appropriée tout au long du mouvement de l'aimant. L'accélération est alors égale à  $4,56 \text{ m/s}^2$ .

## CONCLUSION :

Grace à une démarche expérimentale, nous avons pu établir la relation qu'il y a entre la force d'origine magnétique et la vitesse de l'aimant. Cela n'a pourtant pas été facile, puisque nous avons vu que selon l'expérience envisagée, l'aimant pouvait davantage être sensible à des contraintes qui perturbaient alors nos études. Mais au fur et à mesure que nous menions ce projet, ce que nous apprenions nous permettait de comprendre l'origine de ces nouvelles contraintes, ce qui nous permettait alors de faire des choix expérimentaux plus appropriés. C'est cela qui nous a par exemple encouragé à poursuivre nos mesures non pas en faisant glisser les aimants sur une pente, mais en les tirant plutôt sur un plan horizontal.

Comme nous avons étudié l'influence des dimensions géométriques du matériau sur lequel glissait l'aimant, et comme nous voulions tout savoir de cette force, nous avons commencé à faire varier des paramètres, comme par exemple la nature du métal sur lequel glisse l'aimant.

Au cours de nos différentes expériences, nous avons en outre pu faire des observations très étonnantes que vous devez absolument voir : [https://youtu.be/Pz\\_HoRQYLGy](https://youtu.be/Pz_HoRQYLGy) et que nous sommes en mesure d'expliquer !

Nos mesures ne sont pas terminées, mais nous comptons bien les poursuivre et vous les présenter de vive voix. Nous remercions très chaleureusement le LNCMI, en particulier Albin De Muer, François Debray, Olivier Jay, Benjamin Vincent, et Romain Raison pour leur soutien, pour les échanges que nous avons eu avec eux en visioconférence, et pour nous avoir fait découvrir le très beau monde du magnétisme. Nous remercions également Romain Bellanger, ingénieur d'études CNRS, ainsi que Patrick Braud, ingénieur de recherche, tous deux à l'institut Pprime de l'Université de Poitiers, qui nous ont accordé du temps et de l'intérêt, nous permettant de mener à bien nos expériences. Nous remercions enfin les Olympiades de physique qui nous ont permis de valoriser notre travail et qui nous ont stimulés.