



# Propulsion électromagnétique: du canon au train



par les élèves de l'atelier physique du Lycée Palissy

Avec LACLAVERIE Jean-Michel  
Professeur encadrant  
Lycée Bernard Palissy- AGEN  
Académie de Bordeaux

# Table des matières

RÉSUMÉ

PROBLÉMATIQUE

INTRODUCTION YAËL

PRÉALABLE : L'HYPERLOOP, UN PROJET COLLABORATIF SANS BREVET YAËL

## Partie 1: Étude du champs magnétique sur l'axe d'un solénoïde

0 – Force de Laplace YAËL

1- Champs magnétique à l'intérieur du solénoïde YAËL

2- Carte expérimentale du champs magnétique sur l'axe Clément

3- Étude du champs B au centre de la bobine en fonction de la tension d'alimentation Clément

4- Vitesse initiale d'un aimant propulsé par la bobine Clément

## Partie 2: Charger un condensateur pour mieux propulser Paul

## Partie 3: Notre circuit en boucle fermée : Train à propulsion magnétique miniature Damien

1- Montage

2- Repérer la position de l'aimant grâce à l'induction électromagnétique

2.1 Étude préalable d'une chute libre

2.2 Notre circuit et son capteur de position et de vitesse

CONCLUSION YAËL

## RÉSUMÉ

Elon Musk porte le projet d'un train à grande vitesse, un train supersonique. Nous voulons étudier comment les forces électromagnétiques peuvent être utilisées pour propulser un véhicule et réaliser une maquette de véhicule à propulsion magnétique. L'idée d'Elon Musk est innovante, puisqu'aucun train hypersonique n'avait été construit auparavant. Nous voulons le modéliser en faisant parcourir un circuit à un modèle réduit de véhicule, constitué d'une pile et d'aimants circulant dans un enroulement de fils de cuivre. Mais auparavant nous voulons comprendre les forces électromagnétiques et la manière de les utiliser pour propulser un mobile.

## PROBLÉMATIQUE :

Est-il possible d'utiliser des forces électromagnétiques pour propulser un véhicule à grande vitesse?

## INTRODUCTION

Nous nous sommes lancés dans ce travail à la suite des TPE et après avoir rêvé de voitures volantes et de train à sustentation et à propulsion magnétique. Notre but est d'utiliser les forces électromagnétiques pour propulser un projectile (une impulsion suffit) ou un modèle de train (une impulsion ne suffit plus. Il faut une alimentation continue).

Nous voulons d'abord étudier les forces électromagnétiques, comme celles utilisées dans les canons électromagnétiques, puis les utiliser pour propulser un véhicule dans un circuit.

Nous vous présenterons d'abord la force de Laplace et l'étude du champs magnétique sur l'axe d'un solénoïde. Le solénoïde sera utilisé pour la propulsion, aussi bien pour le train magnétique que le canon. Nous dresserons la carte du champs magnétique sur l'axe et nous étudierons la vitesse initiale d'un aimant propulsé par la bobine. Notre premier objectif est de trouver comment produire le champs magnétique le plus élevé possible, en toute sécurité et avec du matériel de notre lycée. En effet, la force de propulsion est la force de Laplace, qui est proportionnelle au champs magnétique.

Notre second objectif est de propulser le système mobile le plus rapidement possible. Nous étudierons donc le lien entre tension d'alimentation de la bobine et vitesse initiale du projectile.

Au cours de notre étude, nous avons rencontré les limites des générateurs du lycée pour alimenter notre bobine. Mais pour propulser un projectile, il suffit d'une courte impulsion et une alimentation en continu est inutile. Dans la partie 2 nous avons chargé un condensateur pour mieux propulser. Le condensateur délivrera son énergie pendant un temps très court, mais pourra être chargé pendant un temps beaucoup plus long. Cela devrait permettre une impulsion de forte énergie avec une charge des condensateurs par les générateurs du lycée.

La partie 3 présente notre étonnant circuit en boucle fermée. Notre modèle de train est constitué d'une pile et de deux aimants et il se déplace dans un circuit constitué d'un fil de cuivre nu enroulé sur lui-même. Cette idée trouvée sur internet, nous a tout d'abord semblé une fausse information car nous n'avions pas d'explication au mouvement obtenu. Mais ça marche ! Et nous savons pourquoi ! Notre travail explore donc la force produite par une bobine sur un aimant pour propulser un projectile puis un modèle de train. Nous espérons qu'il va vous plaire, et que vous aurez autant de plaisir à le lire que nous à le réaliser.

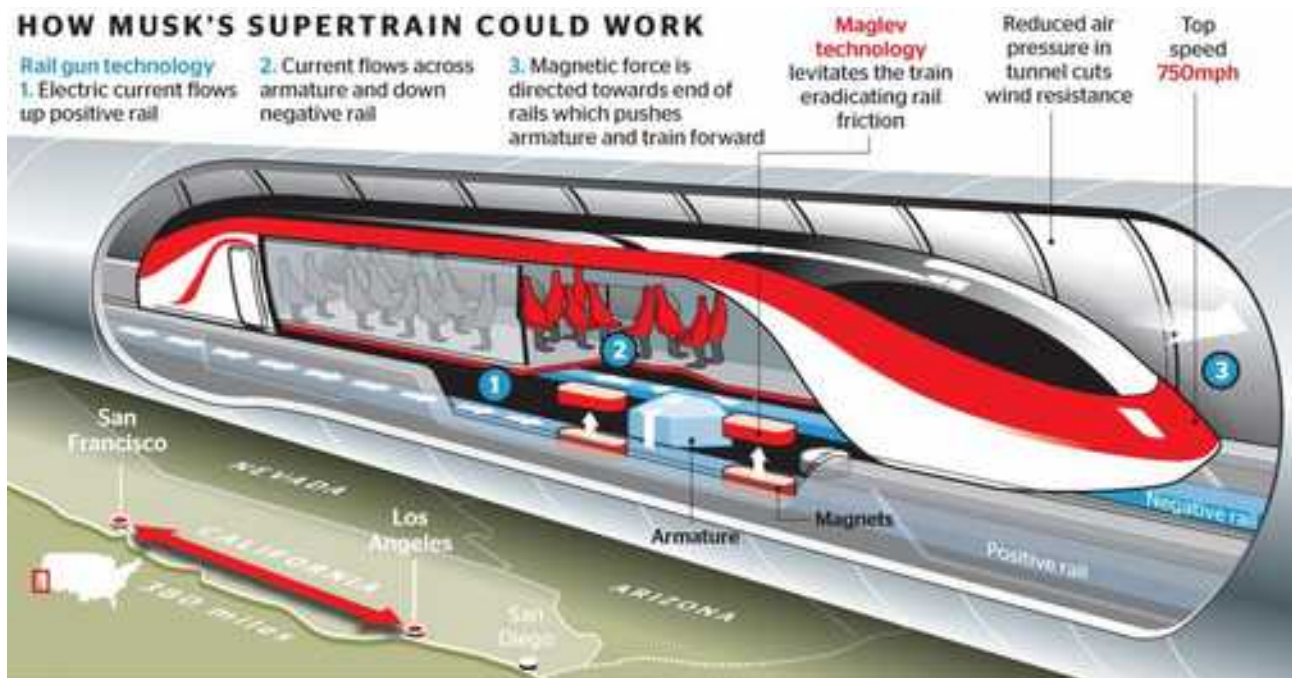
## PRÉALABLE : L'HYPERLOOP, UN PROJET COLLABORATIF SANS BREVET

L'Hyperloop est un projet de recherche proposé en 2013 par Elon Musk. Dans son concept initial, l'Hyperloop est constitué d'un double tube surélevé dans lequel se déplacent des capsules

transportant des voyageurs et/ou des marchandises. L'intérieur du tube est sous basse pression pour limiter les frictions de l'air. Les capsules devaient être surélevées grâce à des systèmes de sustentation électromagnétique. Les capsules sont propulsées par un champ magnétique créé par des moteurs à induction linéaires placés à intervalles réguliers à l'intérieur des tubes.

Selon ses promoteurs, un tel système installé entre le centre de Los Angeles et le centre de San Francisco permettrait de relier les deux villes en moins de 30 minutes, soit le parcours de 551 kilomètres à plus de 1 102 km/h, plus rapide qu'un avion qui parcourt cette même distance en 35 minutes à la vitesse de 885 km/h.

Pour le développement de l'Hyperloop, Elon Musk encourage l'aspect open source et collaboratif, et il n'a volontairement déposé aucun brevet.



## Partie 1: Étude du champs magnétique sur l'axe d'un solénoïde

### 0 – Force de Laplace

Vous avez pu constater que deux aimants peuvent s'attirer ou se repousser. Il existe donc une force magnétique. La force de Laplace est une des expressions de cette force.

La force de Laplace est la force électromagnétique qu'exerce un champs magnétique sur un conducteur parcouru par un courant.

Un conducteur de longueur  $l$ , placé dans un champ magnétique  $B$  et parcouru par un courant  $I$ , subit une force appelée force de Laplace.

$$F = I \times l \times B$$

**F en newtons (N), I en ampères (A), l en mètre (m), B en tesla (T).**

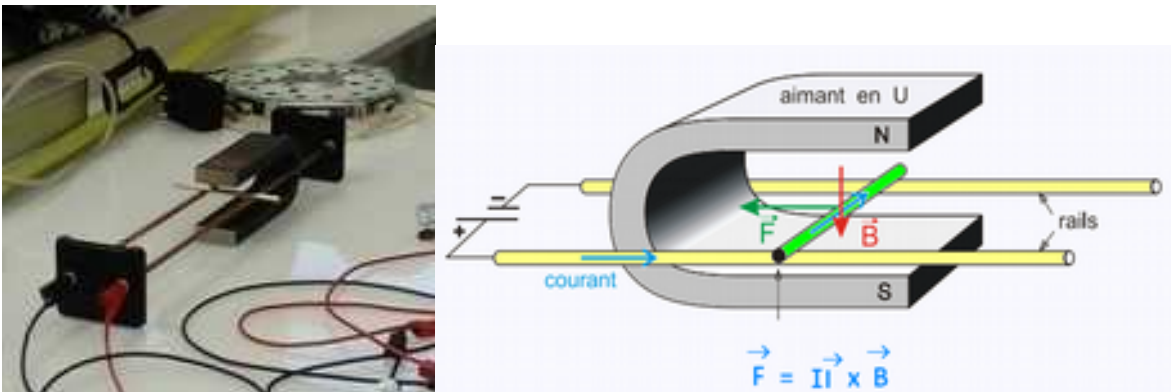
Nous avons tenté une première expérience pour essayer de la mettre en évidence

### Matériel :

- Aimant en U
- Barre de fer
- Rails conducteurs (cuivre)
- Générateur

### Protocole :

Après avoir placé l'aimant entre les rails, nous avons posé la barre de fer de sorte à ce qu'elle tienne sur les deux rails. Nous avons branché un générateur, qui peut délivrer de grandes intensités, sur les rails, qui sont d'excellents conducteurs.



[http://scientificsentence.net/Equations/Physique1S/dispositif\\_laplace.png](http://scientificsentence.net/Equations/Physique1S/dispositif_laplace.png)

### Résultat :

L'expérience n'a malheureusement pas bien fonctionné, la barre de fer n'a presque pas bougé. Le générateur, présent à ce moment, n'a pas délivré suffisamment d'intensité pour que la barre de fer puisse se déplacer facilement.

Décus par ce résultat nous avons choisi de mettre en évidence la force de Laplace par une autre expérience : La propulsion d'un aimant par un solénoïde.

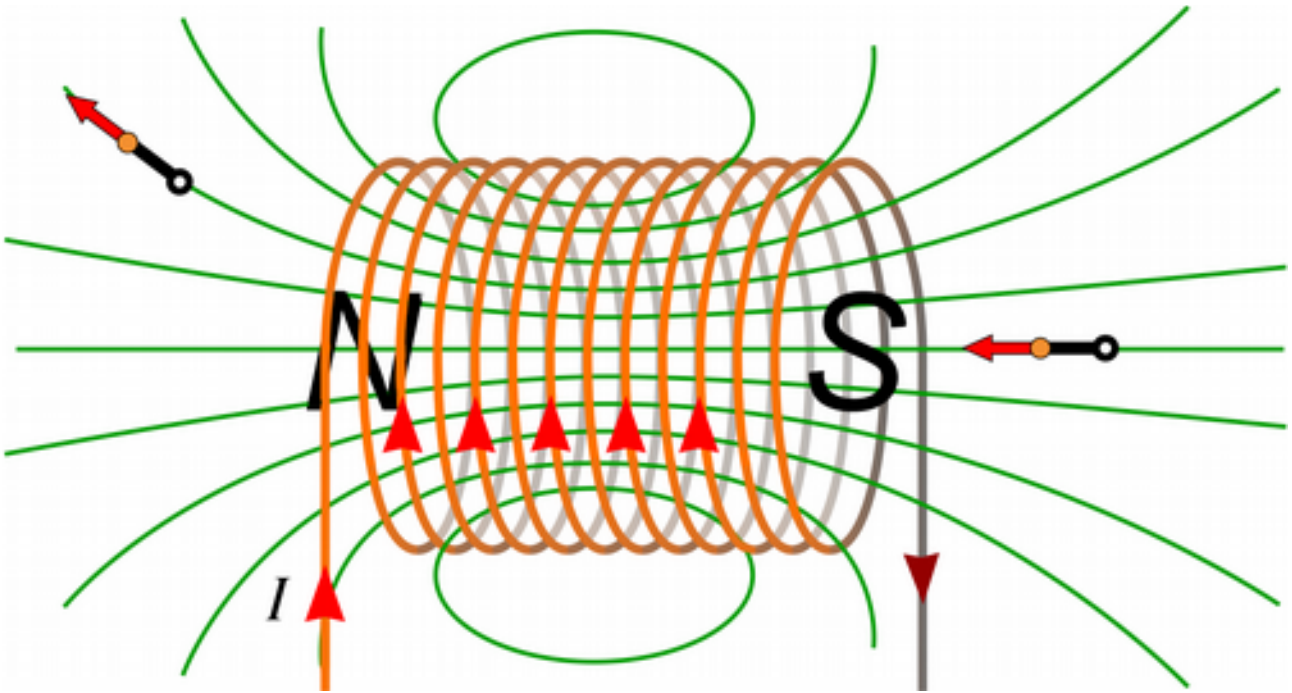
Mais auparavant, nous avons simplement fait tomber un aimant dans un tube en cuivre et nous le voyons tomber très lentement, presque en lévitation. C'est la force de Laplace qui le retient. Dans ce cas, au lieu de propulser, elle freine le système.

#### **1- Champs magnétique à l'intérieur du solénoïde**

Le champ magnétique à l'intérieur du solénoïde est proportionnel au nombre de spires  $N$  et à l'intensité du courant  $I$  traversant la bobine.

$$B = \mu_0 NI$$

avec  $\mu_0$  la perméabilité magnétique du vide ( $4 \pi 10^{-7}$  SI)

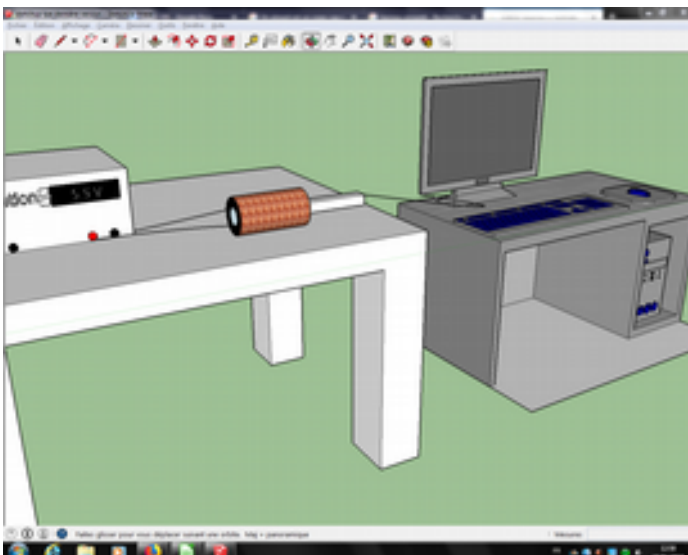


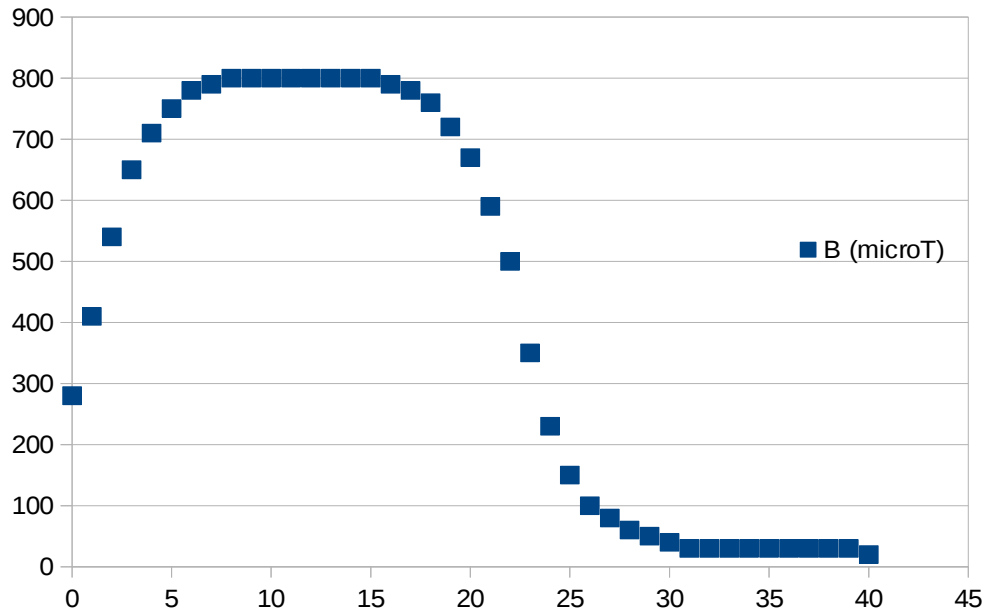
Lignes de champs d'un solénoïde

L'aimant doit être sur l'axe central de la bobine pour être propulsé dans la bonne direction selon les lignes de champs.

## 2- Carte expérimentale du champs magnétique sur l'axe

Nous utiliserons une sonde à effet hall. Cette modélisation réalisé avec le logiciel sketchup montre comment avec un teslamètre nous avons mesuré l'intensité du champ magnétique a l'intérieur de la bobine.



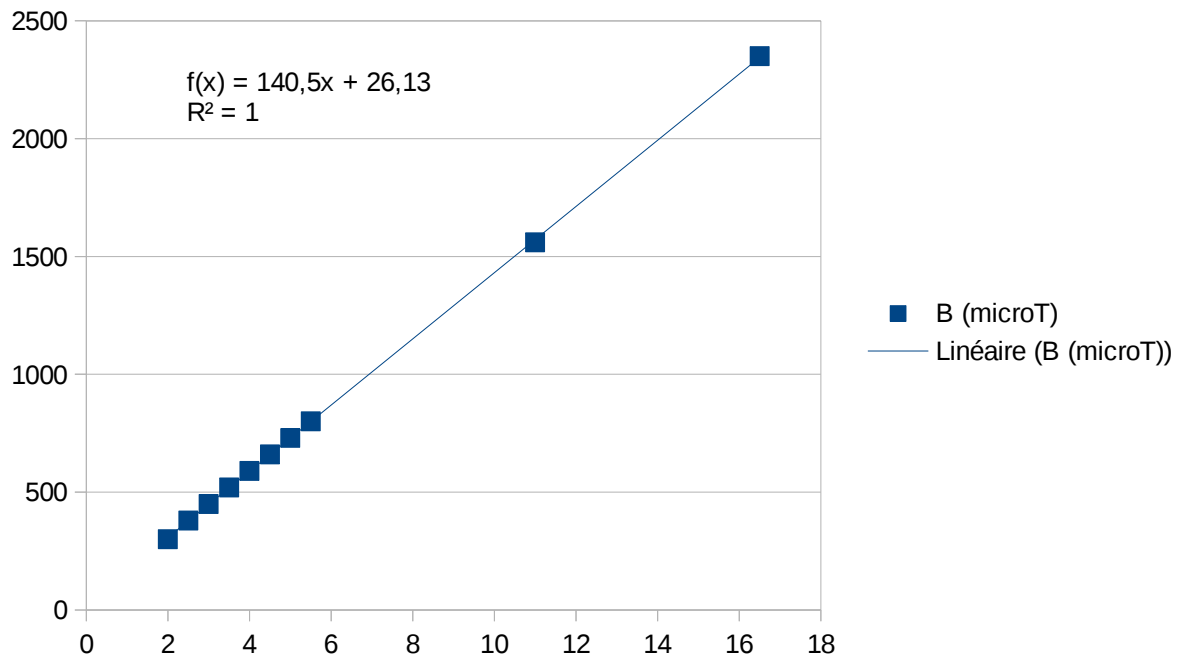


Le champs magnétique est maximum dans la partie centrale de la bobine. La valeur est constante sur 7 cm au centre de la bobine. Dès que on s'éloigne de la bobine le champs diminue très vite et devient négligeable. Au niveau des bords de la bobine, on passe en quelques centimètres de la valeur maximale à la valeur minimale.

### 3- Étude du champs B au centre de la bobine en fonction de la tension d'alimentation

Lorsque l'on augmente la tension, le champs magnétique B augmente proportionnellement.

U (V)	B (microT)	I(A)
16,5	2350	1,1148648649
11	1560	0,7432432432
5,5	800	0,3716216216
5	730	0,3378378378
4,5	660	0,3040540541
4	590	0,2702702703
3,5	520	0,2364864865
3	450	0,2027027027
2,5	380	0,1689189189
2	300	0,1351351351



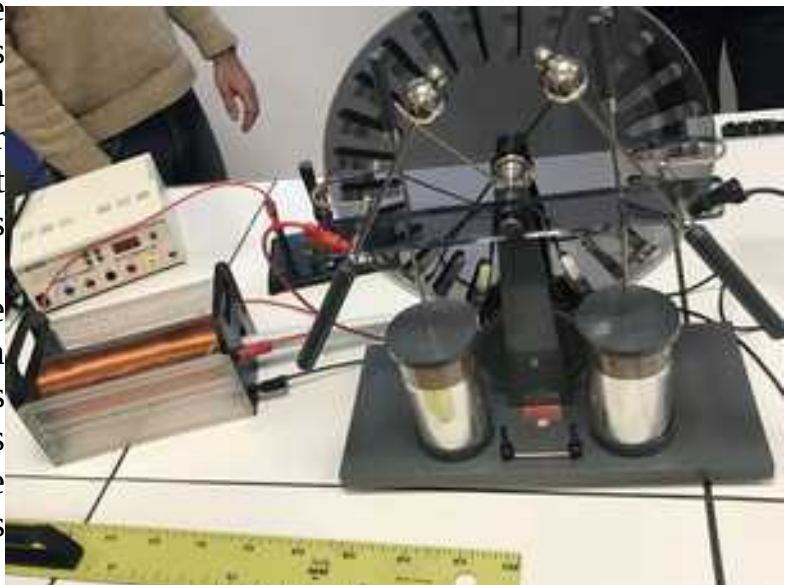
Le générateur peut fournir 3 ampères et sa tension varie uniquement entre 2 et 5,5 Volts.

La résistance de la bobine, mesurée à l'ohmmètre vaut  $14,7 \Omega$ .

Pour augmenter le champs on place deux ou trois générateurs en série avec

la bobine. On arrive à atteindre un champs de 2350 microT. Nous n'avons pas réussi à rajouter un générateur supplémentaire car l'intensité était trop forte et dépassait les possibilités de nos appareils.

Nous avons branché la machine de Wimshurst sur la bobine. On ne voit plus d'éclairs. Nous espérons que les haute tensions de la machine puissent produire des champs importants. Mais l'intensité est trop faible.

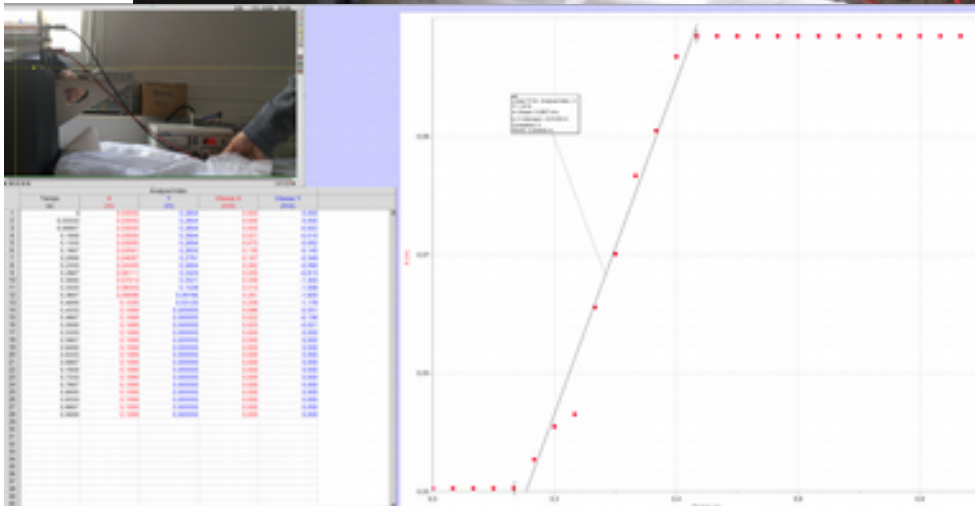
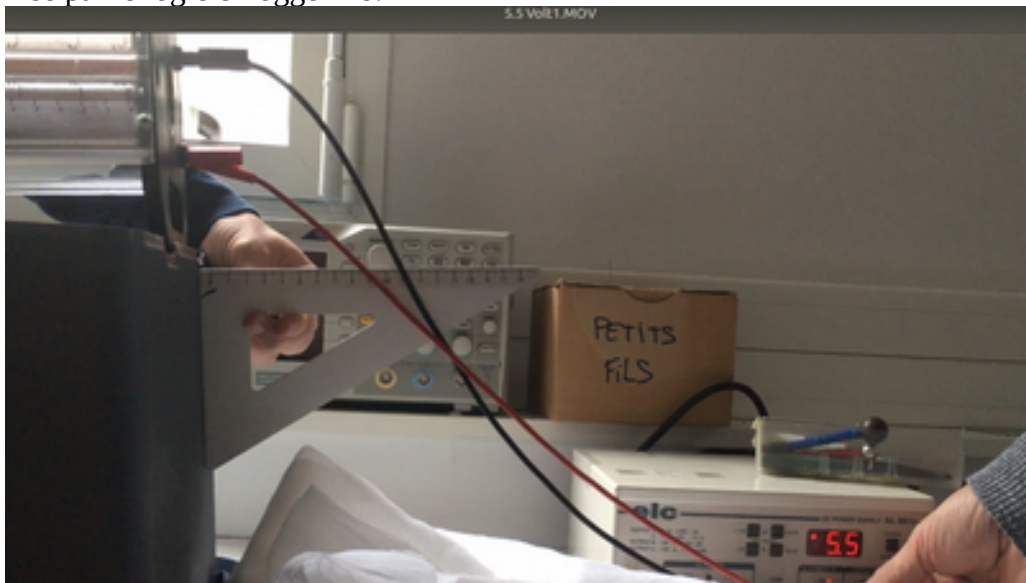


Nous pensons utiliser de gros condensateurs capables de stocker beaucoup d'énergie et la libérer d'un coup dans la bobine au moment du passage de l'aimant.

## 2- Vitesse initiale d'un aimant propulsé par la bobine



Nous propulsons 5 aimants au néodyme R40. Notre protocole expérimental est simple. Nous filmons la chute de l'aimant propulsé par la bobine et nous déterminons sa vitesse par l'analyse vidéo permise par le logiciel loggerPro.

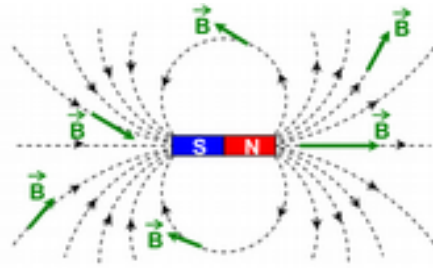


#### Matériel :

- Bobine de fil de cuivre
- cinq super aimants
- Deux fils électriques
- générateur

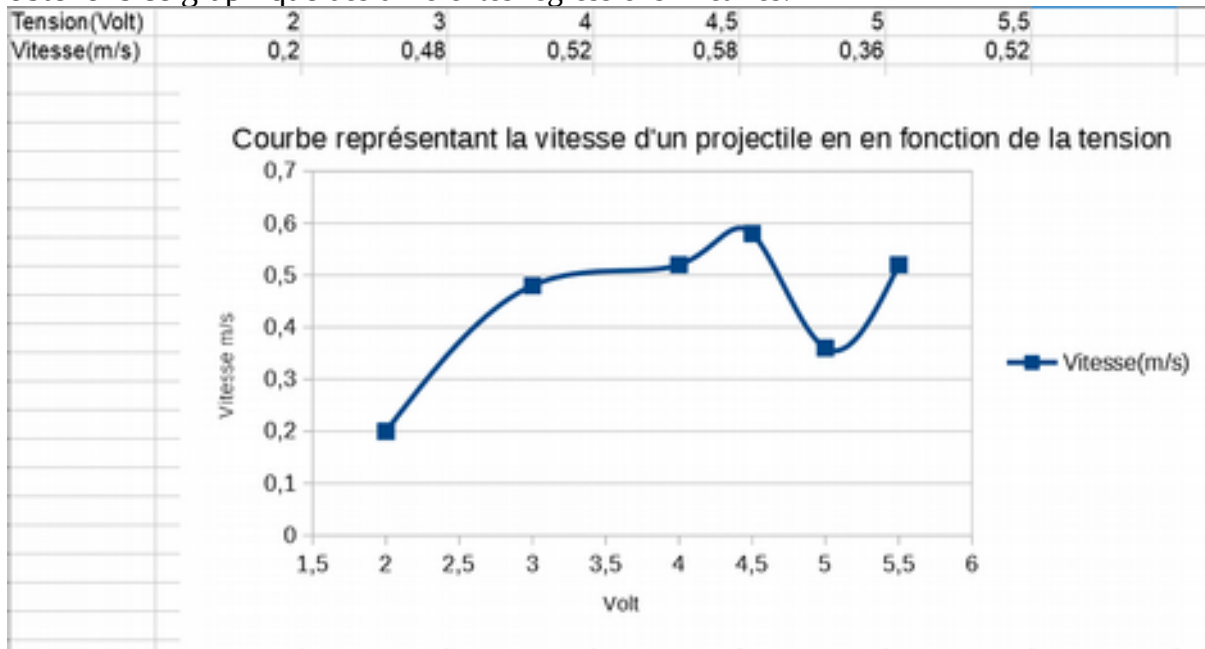
#### Protocole :

Placer les aimants sur le bord de la bobine puis brancher les deux fils électriques aux bornes positive et négative du générateur et de la bobine. L'aimant sera alors propulsé à l'extérieur ou attiré vers le milieu de la bobine en fonction du positionnement des pôles. La bobine possède une pôle nord et un pôle sud : si l'aimant est placé sur le bord du pôle nord de la bobine avec son pôle "sud" orienté vers le centre de la bobine, alors l'aimant sera propulsé à l'extérieur (pareil si l'aimant a son pôle "nord" orienté vers le centre de la bobine et situé dans sous l'influence du pôle sud de la bobine). Mais si les pôles sont mal orientés alors l'aimant sera attiré vers le centre de la bobine.



<http://www.cayrel.net/IMG/fig/II-1/fig6.png>

En utilisant le Logiciel “Logger pro” , nous avons pu analyser nos expériences. En effet ,le logiciel est un logiciel analytique mathématique utilisé en physique chimie pour par exemple trouver la vitesse d’un objet à l’aide d’une vidéo.Ce logiciel va donc utiliser la régression linéaire qui nous donnera une valeur moyenne de la vitesse horizontale de notre projectile.Après analyse nous obtenons ce graphique des différentes régressions linéaires.



Ce graphique nous montre l'évolution de la vitesse horizontale d'un projectile aimanté en fonction de la tension desservie par le générateur. Il montre une anomalie. Effectivement le projectile après une augmentation de vitesse avec la tension imposée à la bobine, va subitement perdre de la vitesse à 5.0 Volt , en passant de 0.58 mètre par seconde à 4.5 Volt à 0.36 mètre par seconde.

Cette expérience montre les différentes interactions qu'un projectile subit dans sa phase de propulsion :

- poids
- forces de frottement solide
- force de Laplace

La force de frottement avec l'air n'apparaît que lors de la chute libre, à la sortie de la bobine.

L'interaction entre notre aimant et le support en plastique du solénoïde est mal maîtrisée, malgré le soin apporté à l'expérience. En effet, les 5 aimants accolés ne sont pas parfaitement alignés, et s'abîment au fil des chutes. Cela peut provoquer une modification de la force de frottement solide lors de la propulsion.

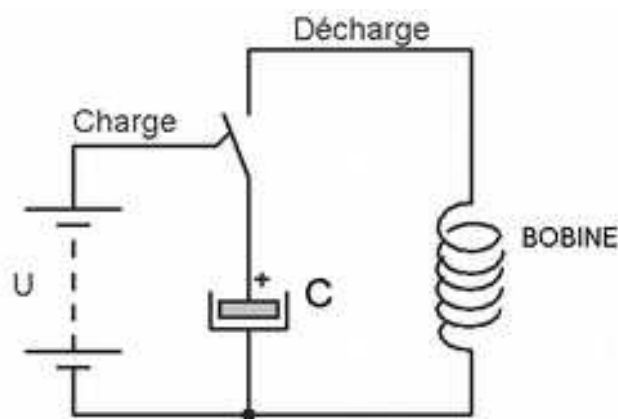
Nous pouvons conclure que la vitesse initiale du projectile augmente avec la tension imposée à la bobine pour les tensions inférieures à 4,5V. Mais il n'est pas possible d'établir une relation mathématique simple entre les deux.

## Partie 2: Charger un condensateur pour mieux propulser

Un condensateur est capable de stocker de l'énergie électrique et de la libérer rapidement dans certaines conditions. Nous avons réalisé un circuit de charge d'un condensateur sur un générateur, et un circuit de décharge dans une bobine. C'est un circuit RLC.

Pour le circuit RLC que nous n'étudions pas au lycée, nous avons utilisé la source principale suivante :

<http://public.iutenligne.net/etudes-et-realizations/nardi/Coilgun/Principe/index.html>

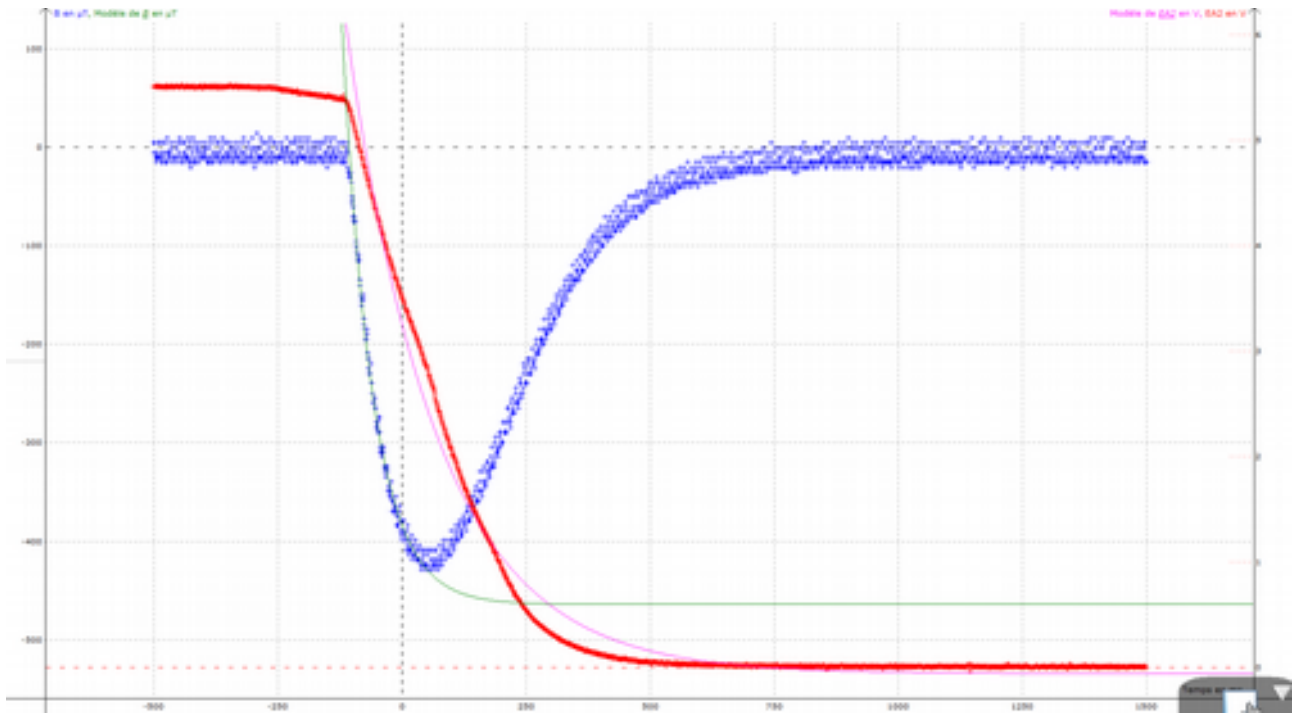


L'énergie stockée dans un condensateur est

$$W = \frac{1}{2} (C \cdot U^2)$$

Elle dépend du carré de la tension à ses bornes. Mais nous ne pouvons pas augmenter la tension d'alimentation pour des raisons de sécurité. Nous augmentons donc la valeur de  $C$ . Nous choisissons les plus gros condensateurs du lycée. Leur valeur est de  $C = 4700 \mu\text{F}$ . Avec  $4C$ , nous obtenons les courbes suivantes.

Un teslamètre est placé au centre de la bobine et un aimant est placé à son extrémité. Lors de la fermeture du circuit l'aimant (Nous propulsons encore 5 aimants au néodyme R40.) est éjecté à une vitesse de  $0,50 \text{ m/s}$  (valeur obtenue par étude de fichier vidéo comme dans la partie précédente)



Le pic du champ magnétique est obtenu 166 ms après le début de la décharge. Le champ magnétique au cœur de la bobine a varié de 433  $\mu\text{T}$ .

LatisPro permet de modéliser la décharge du condensateur :

$$A = 5,929$$

$$\Delta = -0,106$$

$$\tau = 0,183$$

$$V0 = -61,725E-3$$

//Modèle

$$EA2 = A * \text{Exp}(-(\text{Temps} - \Delta) / \tau) + V0$$

La constante  $\tau$  est de 0,163 s.

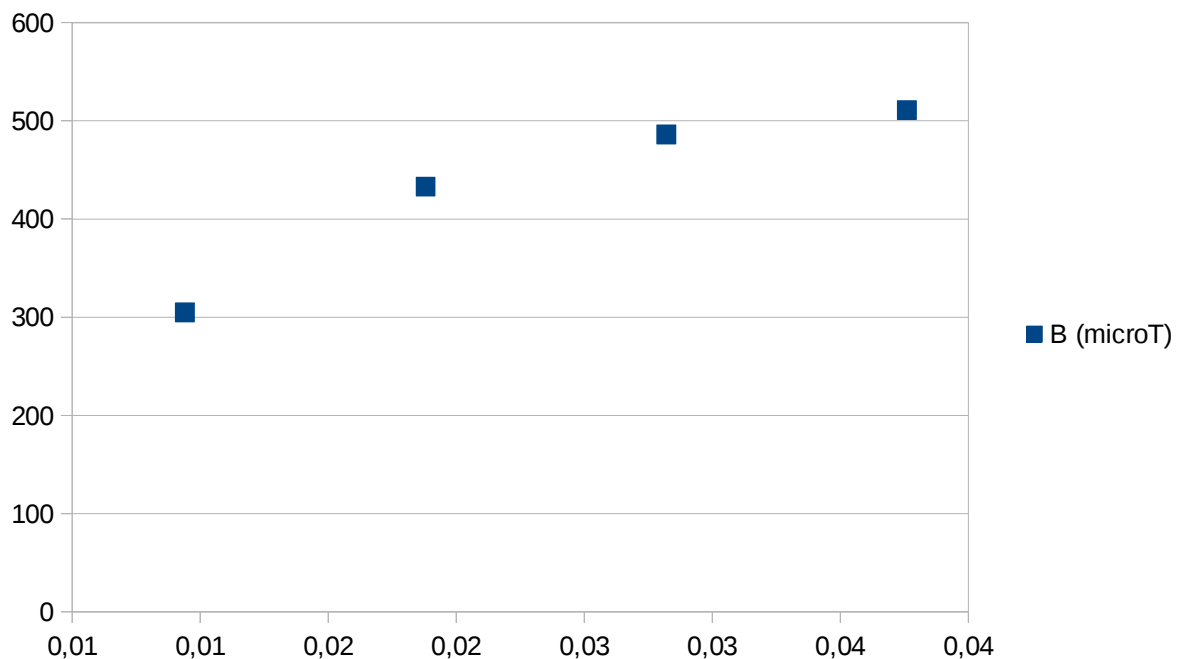
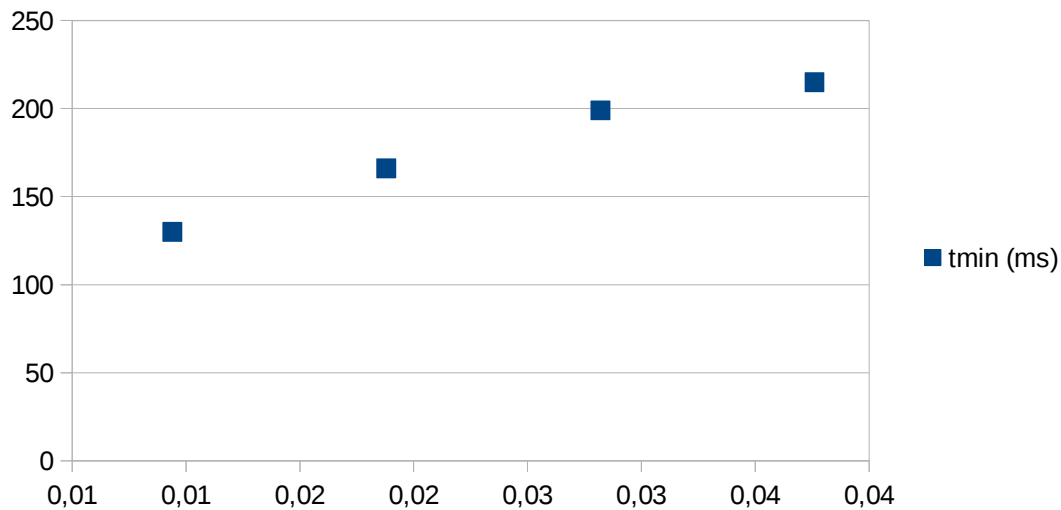
La décharge du condensateur dans la bobine suit une exponentielle décroissante.

Nous avons un circuit bobine ( $L = 0,15\text{H}$  de 1500 spires et  $12 \Omega$ ) condensateur, qui pourrait osciller, mais ce n'est pas le cas ici. La courbe de la tension ressemble à celle de la décharge d'un condensateur dans une résistance de  $8,7 \Omega$ . ( $R = \tau / C$ )

Voici les résultats obtenus avec 2, 4, 6 et 8 condensateurs de  $4700\mu\text{F}$

B (microT)	C (F)	tmin (ms)
305	0,0094	130
433	0,0188	166
486	0,0282	199
511	0,0376	215

Le temps  $t$  correspond au maximum de la valeur absolue du champ magnétique au cœur de la bobine. Traçons d'abord  $t$  en fonction de  $C$ , puis  $B$  en fonction de  $C$ .



Donc plus on augmente C, plus le maximum de B arrive tardivement et plus B est grand.

L'énergie libérée a une valeur permettant d'envoyer notre projectile de la même manière qu'avec le générateur réglé sur 3,4V avec une intensité de 0,22A.

L'IUT en ligne dont nous avons utilisé les renseignements pour faire cette expérience, charge deux condensateur de 2900 μF avec une tension de 220V qui nous est interdite. Nous ne pouvons que modifier C.

Nous avons testé de nombreux condensateur pendant les heures de l'atelier durant notre année de première S. Nous avons constaté que la plupart avait des courants de fuite et se déchargeaient alors que l'interrupteur était encore ouvert.

### Conclusion:

**Il est possible avec un circuit RLC de délivrer une énergie importante à une bobine pendant un temps court et donc de pouvoir créer une force de propulsion importante.**

Nous sommes limités au lycée dans la réalisation de cette expérience par les courants de fuite des condensateurs et par les consignes de sécurité nous interdisant les tensions élevées et les intensités dangereuses.

## Partie 3 : Notre circuit en boucle fermée : Train à propulsion magnétique miniature

### 1- Montage

#### Matériel :

- Une pile AAA ( En prévoir plusieurs car la pile se décharge vite )
- Six super aimants boutons de 10 mm de diamètre
- Du fil de cuivre 0,9 mm
- Support de type stylo, marqueur pour enrouler le fil de cuivre autour

#### Protocole :

-Premièrement, il faut fabriquer la capsule motrice.

Elle est constituée de la pile AAA et des super aimants.

Il est conseillé de mettre trois aimants de chaque côté de la pile, ainsi que le disque en laiton sur la borne positive, pour équilibrer l'assemblage et obtenir de meilleures performances.

**Attention ! : Placez les aimants sur la pile de sorte que soit les deux pôles nord soit les deux pôles sud soient connectés à la pile, autrement le train n'avancera pas.**

-Deuxièmement, il faut créer le circuit de cette capsule.

Pour cela nous aurons besoin du fil de cuivre, il suffit de l'enrouler autour d'un objet de diamètre supérieur de 4 ou 5 mm par rapport à la pile ( autour d'un marqueur ), toujours dans le même sens jusqu'à obtenir le circuit voulu.

Il faut aussi veiller à ne pas fermer complètement le circuit pour pouvoir introduire et récupérer la capsule.

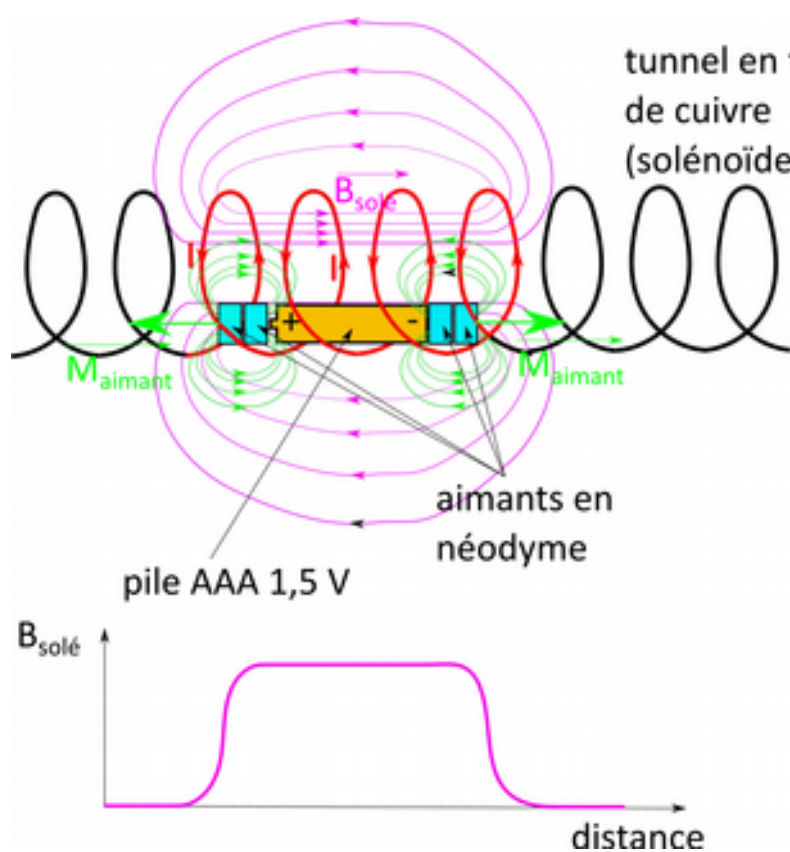




Résultat :

Nous avons donc réalisé cette expérience une première fois . Malheureusement le résultat obtenu était assez décevant. En effet, la capsule n'as pas pu se déplacer dans le circuit. Nous avons découvert que le fil de cuivre que nous avons utilisé était émaillé, ce qui, selon nous est la principale cause de l'échec de l'expérience.

ATTENTION : Le fil de cuivre ne doit pas être galvanisé ou émaillé pour le bon fonctionnement de l'expérience.



Notre professeur de physique a alors commandé du fil de cuivre nu et de nouveaux aimants et l'expérience a alors réussi!

L'aimant se déplace dans le circuit avec ses deux aimants. Il faut cependant pousser parfois l'aimant qui se bloque sur les spires. Mais la pile chauffe et se vide très vite. Elle est en effet presque en court-circuit pendant le fonctionnement du train.

Mais pourquoi ? Comment fonctionne ce circuit ?

Nous nous sommes appuyés sur l'explication de Guillaume Blanc. (<https://gblanc.fr/spip.php?article583>)

Les aimants en néodyme sont conducteurs de l'électricité, ils permettent donc de faire circuler un courant électrique  $I$  dans la portion de fil de cuivre qui se

trouve entre les deux pôles de la pile, en contacts avec les aimants. C'est la partie en rouge dans le schéma ci-dessus.

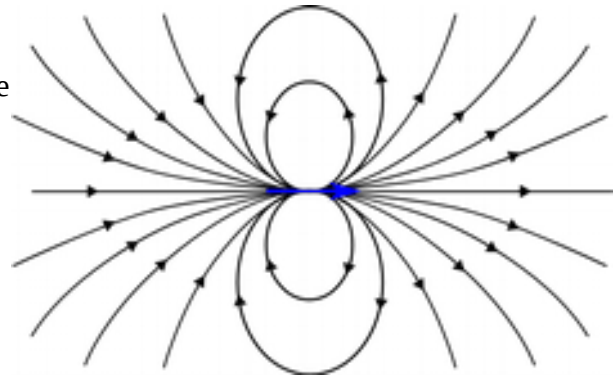
Ce courant circulant dans le tunnel en fil de cuivre , c'est à dire une bobine ou un solénoïde, crée un champ magnétique dans la partie du solénoïde parcouru par le courant. Donc uniquement la partie autour de la pile est parcourue par le courant et produit un champ. Lors du déplacement de la pile la

partie alimentée change, et le champ magnétique est toujours produit exactement autour de la pile et des aimants.

Le champ est dirigé dans le sens de circulation du courant, c'est-à-dire du pôle + vers le pôle - de la pile.

Par ailleurs, les aimants de part et d'autre de la pile, produisent aussi chacun un champ magnétique. Ce sont des dipôles magnétiques (Lignes de champ autour du dipôle magnétique :

<http://www.physagreg.fr/electromagnetisme-16-dipole-magnetique.php> )



La force qui pousse le mobile à se déplacer dans le tunnel est dû au champ magnétique de la bobine qui n'est pas homogène. C'est une force de Laplace. Chaque aimant est poussé vers l'avant comme

les projectiles dans nos bobines, mais l'un est poussé par le pôle nord de la bobine et l'autre par le pôle sud. C'est pour cela que les deux pôles nord sont placés l'un face à l'autre de part et d'autre de la pile.

## 2- Repérer la position de l'aimant grâce à l'induction électromagnétique

Nous voulions ensuite repérer la position de l'aimant dans le circuit par une acquisition sur Latispro, qui nous permettrait de calculer sa vitesse. Pour cela un enroulement secondaire de fil, situé autour du premier circuit servira de capteur. Cet enroulement est constitué d'un seul fil, avec des groupes de spires jointives séparées de 5 cm. Des impulsions devaient se produire au passage de l'aimant.

### 2.1 Étude préalable d'une chute libre

Nous avons étudié la vitesse de chute d'un aimant dans un tube en plastique grâce aux impulsions créées dans un enroulement de fil, situé autour du tube de cuivre. Cet enroulement est constitué d'un seul fil, avec des groupes de spires jointives séparées de 5 cm.

Matériel :

- Tube de plastique enroulé de fil de cuivre.
- Aimant
- Le logiciel Latis-Pro
- Deux fils électriques

Protocole :

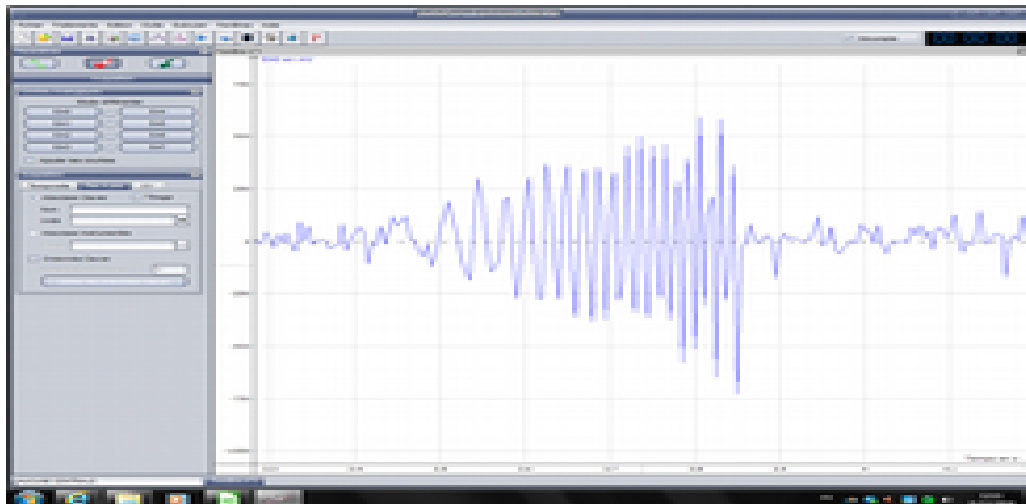
Nous avons branché les deux fils sur le tube puis lancé le logiciel Latis-Pro et appuyé sur la touche "Lancer l'acquisition". Juste après, nous avons placé l'aimant dans le tube. Avec le fil de cuivre enroulé autour, l'aimant va provoquer des impulsions électriques qui seront captées par le logiciel. On peut y voir des pics qui montreront le passage de l'aimant. Sachant la distance qui sépare deux



enroulements de fil de cuivre (ici, 5 cm), on peut étudier la vitesse de chute des aimants avec un tableur.



(L'aimant tombe dans le tube)



distance (cm)	temps (ms)	Vitesse (cm/ms)	Vitesse (m/s)	Vitesse (km/h)
5	36	0,138888888888889	1,38888888888889	5
5	33	0,151515151515152	1,51515151515152	5,45454545454546
5	27	0,185185185185185	1,85185185185185	6,66666666666667
5	23	0,217391304347826	2,17391304347826	7,82608695652174
5	22	0,227272727272727	2,27272727272727	8,18181818181818
5	21	0,238095238095238	2,38095238095238	8,57142857142857
5	17	0,294117647058823	2,94117647058824	10,5882352941177
5	17	0,294117647058823	2,94117647058824	10,5882352941177
5	17	0,294117647058823	2,94117647058824	10,5882352941177
5	16	0,3125	3,125	11,25

5	16	0,3125	3,125	11,25
5	15	0,3333333333333333	3,333333333333333	12
5	15	0,3333333333333333	3,333333333333333	12
5	11	0,4545454545454545	4,545454545454545	16,3636363636364
5	11	0,4545454545454545	4,545454545454545	16,3636363636364
5	11	0,4545454545454545	4,545454545454545	16,3636363636364
5	12	0,416666666666667	4,16666666666667	15

### Résultat :

Grâce à ce tableau, nous pouvons dire que la vitesse de chute de l'aimant ne cesse d'augmenter passant de 1,4 m/s, soit 5 km/h, à 4,5 m/s, soit 16,4 km/h.

## 2.2 Notre circuit et son capteur de position et de vitesse

Nous voulons maintenant associer ce capteur de position et de vitesse à notre circuit de fil électrique nu servant au déplacement de l'aimant.

L'expérience est en cours et devrait pouvoir être présentée au concours.

## CONCLUSION

Notre projet nous a permis d'étudier la propulsion électromagnétique pour un projectile et pour un mobile dans un circuit. Pour le projectile une impulsion suffit, mais pour le mobile il faut fournir de l'énergie pendant tout le déplacement pour vaincre les frottements.

Les deux systèmes sont différents, mais utilisent tous les deux la force de Laplace pour mettre en mouvement ou maintenir le mouvement d'un mobile.

Le projet d'Elon Musk, s'il aboutit, sera une innovation fantastique pour les déplacements humains. Notre modèle en est une modeste illustration.

Nous avons été étonné de pouvoir faire circuler une pile et des aimants dans un enroulement de fil, et notre professeur aussi ! Pourtant cela fonctionne et peut illustrer le fonctionnement du train Hyperloop.

Ce projet a rassemblé des élèves de première pendant un an et a été mené en parallèle puis à la suite des TPE.

## Sources principales:

<http://public.iutenligne.net/etudes-et-realisations/nardi/Coilgun/coilgun116J/index.html>

<https://gblanc.fr/spip.php?article583>

<https://www.supermagnete.fr/Utilisations-d-aimants/Le-train-electrique-le-plus-simple-du-monde>