Comme sur un aimant !

ÉLABORATION D'UN SYSTÈME DE SUSPENSION À L'AIDE DE LA RÉPULSION MAGNÉTIQUE ENTRE DES AIMANTS NÉODYME.

METZ Thibaut, SCHRECKENBERG Hugo, VARESCON Killian

Professeur encadrant : M. Lohner

LYCÉE LE GYMNASE JEAN-STURM
À STRASBOURG

Résumé

Bien souvent, les routes de campagne sillonnant les plantations viticoles sont cahoteuses, et nombre de fois a-t-on eu la joie (ou l'horreur) durant un trajet en voiture de se retrouver secoué dans tout les sens. C'est ainsi que nous est venu à l'esprit la question des suspensions. Les suspensions hydrauliques habituelles n'étant pas suffisantes, nous nous sommes posés la question suivante : un système utilisant les propriétés répulsives des aimants pourrait-il amortir les chocs plus efficacement ? Nous avons donc étudié les oscillations d'un module, en rajoutant du poids ou non, en faisant varier l'intensité du champ magnétique ainsi que d'autres paramètres. Ainsi, dans ce projet vous découvrirez donc comment grâce à la force répulsive magnétique vous ne renverserez plus votre café en voiture !

Table des matières

Introduction

I. Etude des aimants
- A. Les aimants et le champ magnétique
- B. Détermination de la cartographie des aimants

II. Etude de la répulsion magnétique à l'équilibre
- A. Hauteur d'équilibre sans ajout de masse
- B. Hauteur d'équilibre avec ajout de masse
- C. Le champ magnétique dans notre système
- D. Hauteur d'équilibre avec ajout de masse correspondant à la masse d'aimants

III. Etude de la dynamique des oscillations libres
- A. Expérimentation
- B. Visite du laboratoire ICUBE : utilisation d'une caméra a haute vitesse
- C. Conclusion

IV. Etude des oscillations a régime forcé
- A. Expérimentation
- B. Interprétation
- C. Conclusion

V. Prospectives
- A. Automatisation des mesures
- B. Prototype

Conclusion
Remerciement
Références
Annexes

LISTE DES NOTATIONS, ABRÉVIATIONS ET SYMBOLES EMPLOYÉS

n	le nombre d'aimants du module	a	aire de la plaque conductrice de la sonde a effet Hall
m_n	somme de la masse des aimants du module	I	courant circulant dans la sonde de Hall
m_a	masse additionnelle attachée aux aimants	U_h	tension de Hall
h_0	hauteur initiale à laquelle est lâché le module	g	champ de pesanteur terrestre
m_{TOT}	$m_{TOT} = m_a + m_n$	f_a	fréquence d'oscillation des aimants
$\vec{B}$	champ magnétique	f_s	fréquence d'oscillation de la structure
R_h	constante de Hall	A_a	amplitude des oscillations des aimants
		A_s	amplitude des oscillations de la structure

Introduction :

Les aimants sont présents dans notre quotidien, ils sont par exemple exploités dans différents jeux pour enfant, dans certains systèmes de fermeture, sur nos frigidaires, etc. On peut également les trouver dans le monde du travail. En effet, les aimants sont exploités dans différentes usines, par exemple dans celles où l'on extrait le fer. Les aimants ont la capacité, que l'on pourrait presque qualifier de magique, à attirer les métaux. Mais développons nous tout le potentiel que possèdent les aimants ? Ne pourrait-on pas plus exploiter la capacité des aimants ? Lorsqu'on pense aux aimants, leur propriété d'attraction, celle qu'on a le plus l'habitude d'expérimenter est souvent abordée. Cependant, n'avez vous jamais essayé de joindre deux aimants qui se repoussent sans qu'aucun d'eux ne se retourne ? Assez difficile n'est-ce pas ?

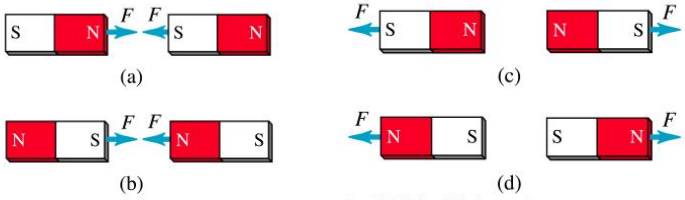
La force de répulsion des aimants est si intense qu'il est presque impossible de mettre deux faces similaires en contact. Ce phénomène de répulsion magnétique n'est aujourd'hui pas très exploité car il est très difficilement exploitable. Elon Musk est l'un des seul qui a su contrôler la répulsion magnétique avec son train supersonique connu sous le nom d'Hyperloop. Mais ne pourrait-on exploiter la répulsion magnétique d'une autre manière ? Comment fonctionne la répulsion magnétique ? Est-il possible de la mesurer ?

I. Étude des aimants

A. Les aimants et le champ magnétique

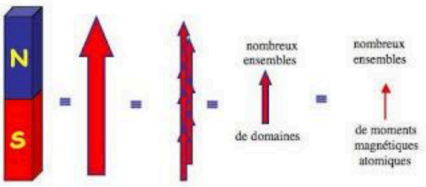
1. Le magnétisme

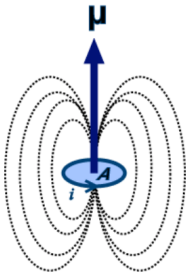
En étudiant les propriétés des aimants et des phénomènes qui s'y rattachent, on peut souligner que les aimants sont caractérisés par leurs pôles. En effet, comme le montre le schéma ci-dessous, chaque aimant possède un pôle magnétique nord noté N et un pôle magnétique sud noté S. Selon la disposition de ces pôles, les aimants peuvent s'attirer ou se repousser.



Les pôles de polarité opposés s'attirent (figure a et b) alors que deux pôles de même polarité se repoussent (figure c et d). Le magnétisme n'admet que des dipôles. En effet, un aimant ne possédant qu'un pôle nord ou sud n'a jamais été observé. Lorsqu'un aimant est divisé en deux parties distinctes, chacune de ces parties possède un nouveau pôle nord et un nouveau pôle sud.

Le champ magnétique provient du mouvement des électrons. La « boucle de courant » créée par les électrons génère un moment magnétique. La somme statistique de tous les moments magnétiques atomiques forme un moment magnétique macroscopique.





2. Le champ magnétique

Le champ magnétique est un champ vectoriel résultant du déplacement de charges. Ainsi les aimants ne sont pas les seules sources de champ magnétique : la Terre possède également un champ magnétique par exemple. En outre, un conducteur parcouru par un courant génère également un champ magnétique. Le champ magnétique peut être représenté comme un ensemble de lignes reliant un pôle nord à un pôle sud. Ces lignes sont appelées lignes de champ. Il est également important de souligner qu'un aimant ne peut être mis en lévitation sans que des forces externes au système soient présentes. En effet d'après le théorème d'Earnshaw, des charges ponctuelles ne peuvent pas être en équilibre si des interactions autres que les interactions électrostatiques comme l'interaction gravitationnelle sont présentes.

3. Force de Lorentz

La force de Lorentz est l'action d'un champ magnétique sur une charge électrique. En effet, la force magnétique $\vec{f}$ appelée force de Lorentz, agit sur les électrons en mouvement. La force de Lorentz possède trois grandes propriétés : elle est perpendiculaire aux vecteurs champ et vitesse, son intensité dépend des valeurs de la vitesse et du champ et celle-ci est nulle si les vecteurs vitesse et champ sont parallèles ou si au moins un des deux vecteurs est nul.
Loi de Lorentz : La force magnétique $\vec{f}$ subie par une particule de charge q se déplaçant avec la vitesse $\vec{v}$ dans un champ magnétique $\vec{B}$ s'écrit : $\vec{f} = q\vec{v} \times \vec{B}$
$\vec{f}$ est perpendiculaire à $\vec{v}$ et à $\vec{B}$;
$f = |q \times sin(\alpha)|vB$, où α est l'angle formé par $\vec{v}$ et $\vec{B}$.

D'après le théorème de l'énergie cinétique, la force de Lorentz ne contribue pas à la variation de l'énergie cinétique de la particule chargée. Il n'y a pas d'énergie potentielle associée à cette force.

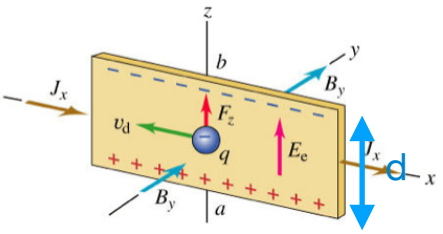
B. Détermination de la cartographie des aimants

1. Les aimants utilisés

Les aimants utilisés lors de nos expériences sont des aimants permanents en néodyme. Un aimant permanent est un aimant dont les pôles ne changent jamais. Ces aimants sont des alliages de néodyme, de fer et de bore. Les aimants en néodyme sont les aimants permanents les plus puissants sur le marché. Ceux que nous avons utilisés sont cylindriques de hauteur 5mm et de diamètre 25mm (+/- 1mm). Un aimant pèse environ 18,4 grammes. Ces aimants ont une rémanence entre 1,29 et 1,32 T.

2. Les sondes à effet Hall

La cartographique du champ magnétique de nos aimants a été réalisée avec des capteurs à effet Hall qui mesurent l'intensité du champ magnétique. Les capteurs utilisés sont constitués d'une fine plaque rectangulaire sur laquelle on trouve un conducteur ou un semi conducteur. Le courant va circuler entre deux électrodes situées parallèlement l'une de l'autre. Les électrons vont se déplacer le long de l'axe des abscisses et lorsqu'ils seront soumis à un champ magnétique ils vont se déplacer sur l'axe des ordonnées comme on peut le voir sur le schéma ci-dessous. En effet, comme énoncé précédemment, lorsqu'un courant est soumis à un champ magnétique, les forces magnétiques de Lorentz agissent perpendiculairement au champ. Au cours de la mesure, les électrons vont se diriger d'un côté de la plaque conductrice. Ce déplacement de charges va créer un amas de charges négatives et un amas de charges positives qui va entrainer une force électrique d'opposition et une tension appelée la tension de Hall.



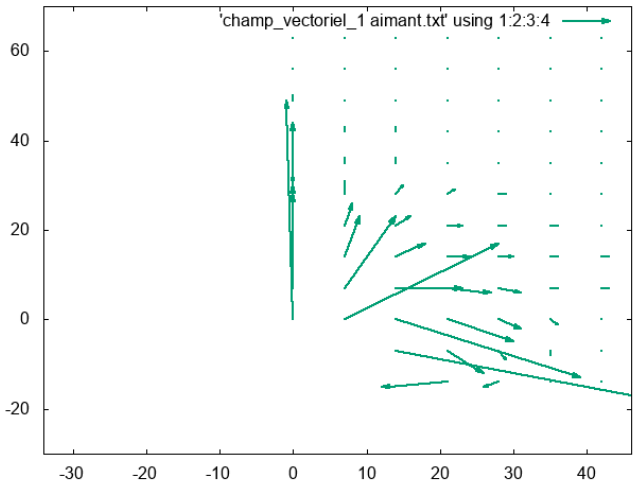
$$F_z = q \times \frac{j}{nq} \times B \text{ et } F_{elec} = qE = q\frac{U}{dx} \quad \text{équilibre : } q\frac{U}{d} = \frac{j}{n}B$$

Grâce à cette tension et à la formule ci-dessous, l'intensité du champ magnétique va pouvoir être calculée par le système Arduino auquel on a branché le capteur.

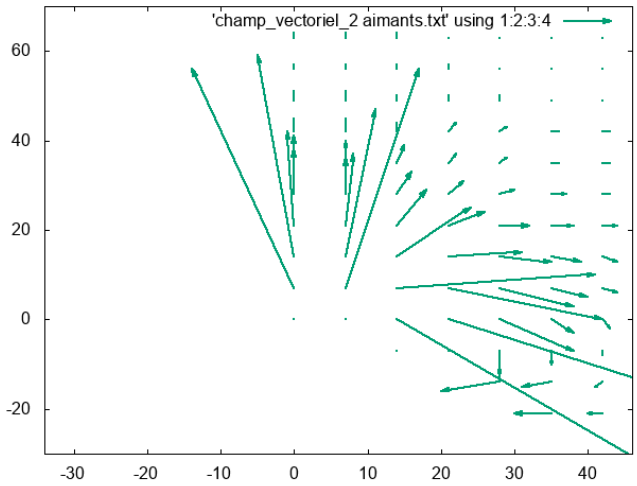
$$U_h = R_h \frac{IB}{a}$$

3. La cartographie du champ magnétique

Afin de cartographier la champ magnétique de nos aimants nous avons utilisé une plaque Arduino et réalisé une structure en lego™. Les deux capteurs à effet Hall ont été collés de part et d'autre d'un lego™ qui a été déplacé sur l'ensemble de la surface de la structure pour obtenir les coordonnées x et y d'un vecteur.



Champ vectoriel d'un aimant



Champ vectoriel de deux aimants

On remarque que le champ magnétique croît en fonction du nombre d'aimant. Le champ magnétique de deux aimants est plus fort que le champ magnétique d'un aimant. Cependant bien que le nombre d'aimants soit doublé, le champ magnétique ne double pas.

Grace à une plaque Arduino et le programme récupérant les données des capteurs nous avons également pu déterminer le champ magnétique total de deux aimants en opposition, cf annexe partie A.

En rapprochant deux aimants, lorsque deux pôles similaires (deux pôles nord ou deux pôles sud) sont à proximité, le champ magnétique s'oppose et par conséquent les aimants vont soit se repousser, soit l'un d'entre eux va se retourner. Inversement, lorsque deux pôles de polarité opposée sont a proximité, les champs magnétiques vont dans le même sens et les aimants vont s'attirer.

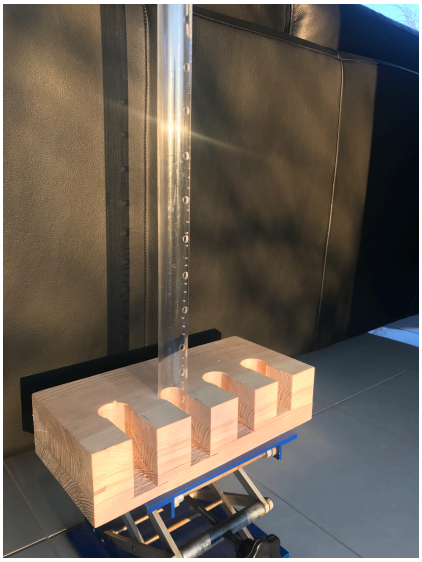
II. Etude de la répulsion magnétique à l'équilibre

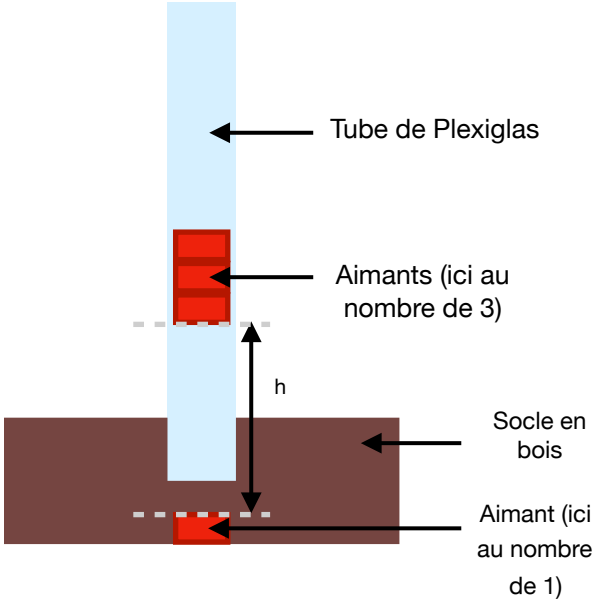
Comme vu précédemment les deux pôles similaires d'un aimant se repoussent. Les suspensions vont par la suite tirer profit de ce phénomène. Ainsi l'un de nos buts est donc de mesurer la force de répulsion entre les aimants en fonction de la distance qui les sépare. Pour cela nous allons donc effectuer différentes mesures en modifiant des paramètres tels que l'intensité du champ magnétique ou encore la masse.

A. Hauteur d'équilibre

1. Principe des mesures

Pour mesurer la force de répulsion des aimants, nous avons placé des aimants en néodyme cylindriques, orientés afin de se repousser, de telle manière que leurs axes soient alignés verticalement. Pour cela nous avons réalisé des structures en bois visibles ci-dessous. Le matériau choisi a été le bois car c'est un matériau que l'on peut facilement transformer mais surtout un matériau qui n'a aucune influence sur le champ magnétique, d'après l'une de nos expériences. Le trou du haut a été fait de telle manière qu'un tube en plexiglass puisse être emboité et ainsi tenu verticalement, tube dans lequel les aimants du dessus vont être insérés. Le tube en Plexiglas a été percé afin que l'air s'échappe. En effet, suite à des mesures nous avons observé que l'air en restant bloqué dans le tube, modifie la pression et par conséquent la distance h.



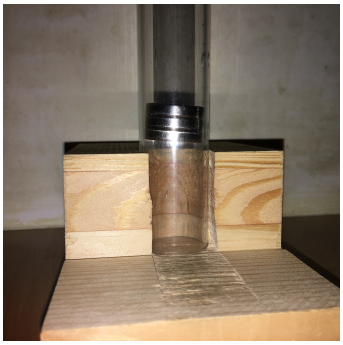


De gauche à droite : photo du montage; schéma du montage

Dans un premier temps, nous avons choisi d'effectuer nos mesures avec un seul aimant placé en dessous de la structure. Lors de nos premières expériences nous avons fait varier un seul paramètre : le nombre d'aimants placé dans le tube. La distance, notée h, qui sépare le haut de l'aimant placé dans la trappe du bas de la base du premier aimant en lévitation a été mesurée à chaque reprise.

2. L'influence de la masse

Nombre d'aimants dans le tube	**9**	**8**	**7**	**6**	**5**	**4**
Distance h (en cm)	4,3	4,35	4,5	4,65	4,9	5,1



À chaque reprise, un seul aimant se trouvait au bas de la structure. Pour un nombre d'aimants dans le tube inférieur à 3 comme on peut le voir sur la photo ci-contre, il devient très difficile de mesurer la distance h car celle-ci n'est pas constante. En effet, du fait de la légère différence entre le diamètre du tube et celui de nos aimants, les aimants dans le tube vont chercher à se retourner afin de présenter leur face sud face à la face nord de l'aimant du bas.

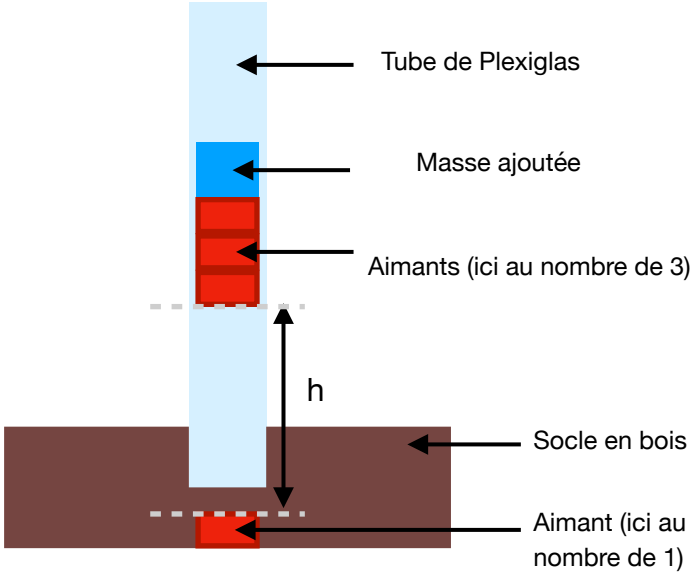
L'expérience qui a permis de déterminer la distance h en faisant varier le nombre d'aimants a été réalisée dans les mêmes conditions. La distance h mesurée dépend principalement de deux facteurs : la masse que représente les aimants et le champ magnétique des aimants. En déterminant l'intensité du champ magnétique $\overrightarrow{B}$ de nos aimants, nous nous sommes rendus compte que plus le nombre d'aimant est élevé, plus le champ magnétique est fort. Cependant il est important de souligner que si le nombre d'aimants est doublé, l'intensité du champ magnétique augmente certes, mais elle n'est pas doublée.

On peut donc écrire l'inégalité suivante : $\dfrac{m_2}{\|\overrightarrow{B_2}\|} \neq 2\dfrac{m_1}{\|\overrightarrow{B_1}\|}$

La masse est doublée mais l'intensité du champ magnétique n'est pas doublée. Il est donc logique que la distance h est d'autant plus grande lorsque le nombre d'aimant est faible.

B. Hauteur d'équilibre avec ajout de masse

1. Principe des mesures



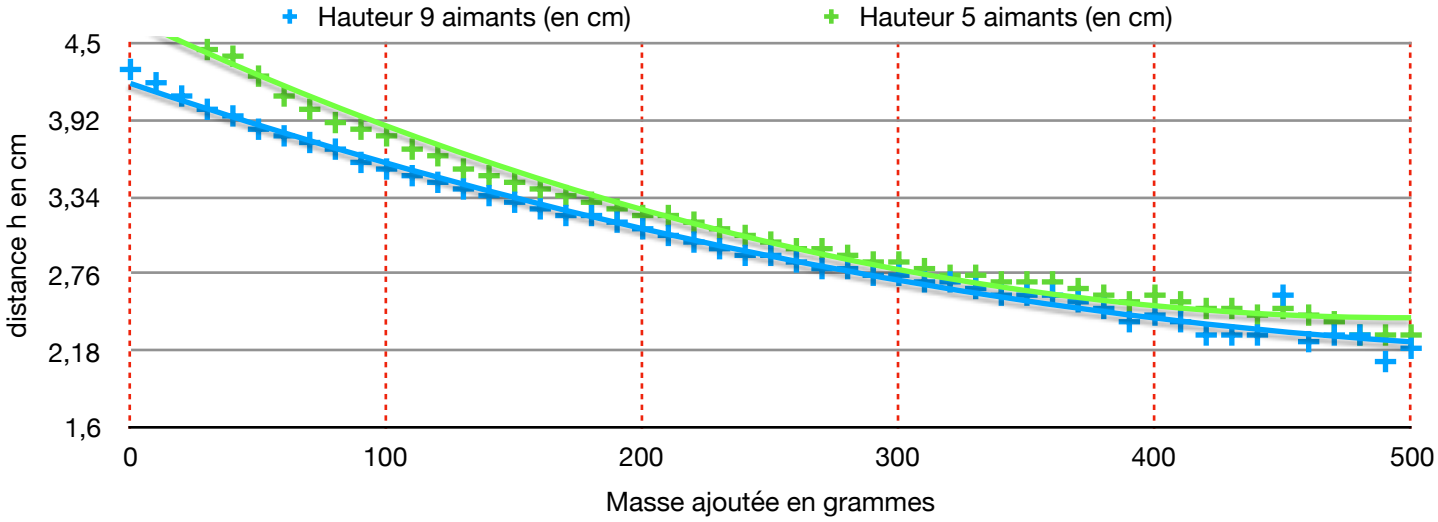
La masse semble donc posséder une grande influence sur la distance h. Pour mettre cela en évidence, nous avons fait varier la masse de tous les aimants en ajoutant un poids sur le dernier aimant en lévitation .

La distance h a été mesurée selon une masse ajoutée qui évoluait à chaque reprise de 10g jusqu'à une masse maximum de 500g.

2. Modélisation en fonction de la masse ajoutée

Observation : La distance h est d'autant plus faible lorsque la masse ajoutée est grande. En effet, en ajoutant une masse donnée, la masse globale du module que l'on appellera par la suite masse réelle augmente alors que l'intensité du champ magnétique reste la même. Le module de 9 aimants auquel une masse a été ajoutée est plus lourd qu'un module de 9 aimants auquel aucune masse n'est rajoutée, en revanche l'intensité du

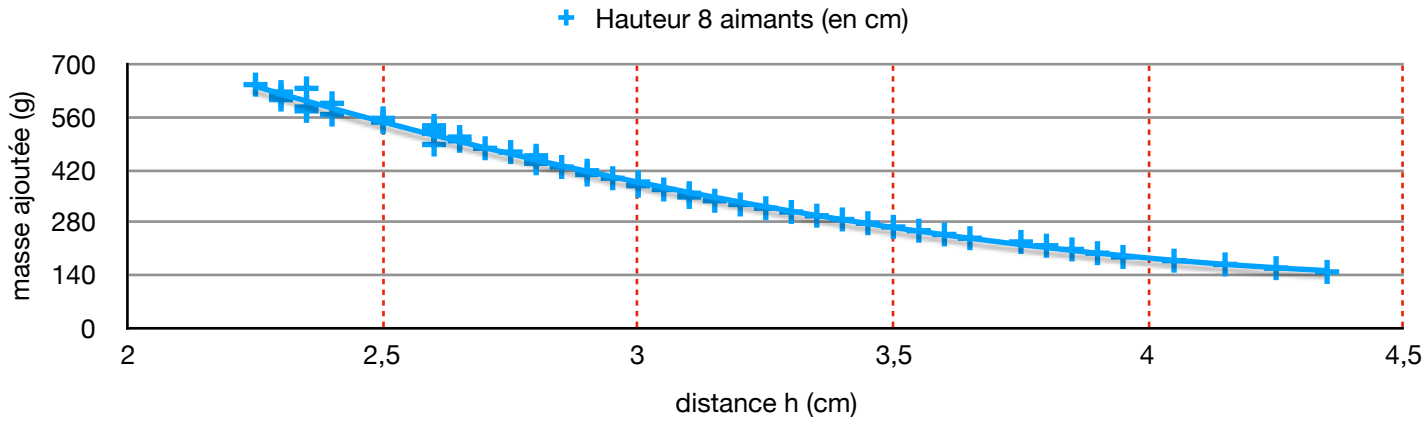
champ magnétique reste inchangée. Le module de 4 aimants auquel une masse a été ajoutée va donc descendre dans le tube jusqu'à atteindre un nouveau équilibre et la distance h va diminuer.



Graphique représentant la distance h en fonction de la masse ajoutée pour 5 et 9 aimants

3. Modélisation en fonction de la masse réelle

La masse réelle est notée m_{TOT}. $m_{TOT} = m_n + m_a$



Graphique représentant la masse ajoutée en fonction de la distance h pour 8 aimants

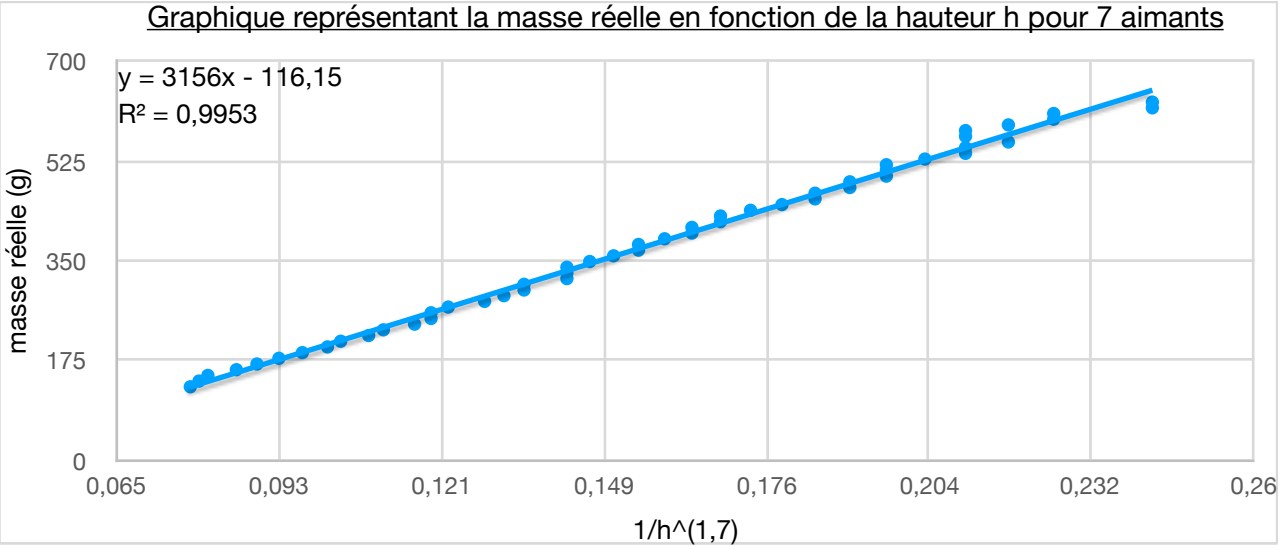
En modélisant une courbe, on trouve une parabole avec un coefficient de régression linéaire correct qui est égal à 0,9942. Cependant on obtient pas les mêmes paraboles lorsque le nombre d'aimants du haut varie. Pour 8 aimants on obtient la fonction $h(m) = 5{,}25 \times 10^{-6} m^2 - 0{,}008m + 5{,}31$.

4. À la recherche d'une loi (reliant h à la masse)

- Loi pour 7 aimants

Les différentes courbes précédentes représentant la hauteur en fonction de la masse réelle avaient une ressemblance aux courbes $\frac{1}{h^x}$. On devrait donc trouver une loi reliant h à la masse réel en $\frac{1}{h^x}$. Un calcul de régression montre que l'équation de la courbe s'écrit :

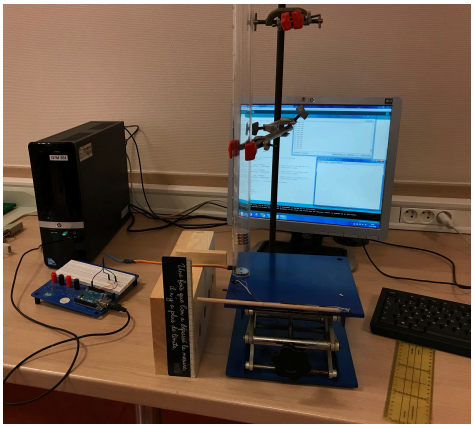
$m_{TOT} = 3156x - 116{,}15$. Si on suppose que l'exposant doit être exactement égal à 1,7 ; alors le graphique représentant m_{TOT} en fonction de $\frac{1}{h^{1,7}}$ peut être représenté approximativement par une droite.



C. Le champ magnétique dans notre système

1. Mesure de l'intensité du champ magnétique l'équilibre

Pour mesurer le champ magnétique au niveau de la distance h, une sonde à été déplacée dans le tube entre les aimants du haut et celui du bas. Nous avons utilisé la même sonde et la même plaque Arduino précédemment utilisées pour la cartographie du champ magnétique des aimants.



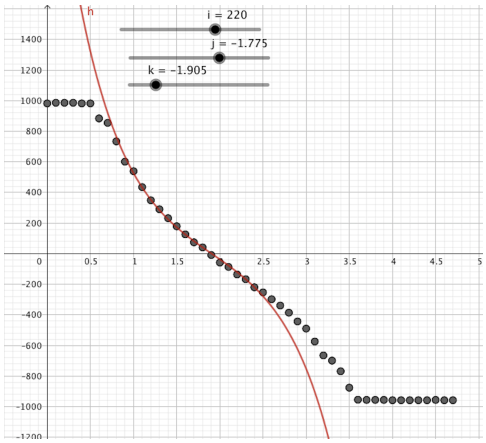
Dans notre montage, la sonde reste fixe. Le tube est déplacé de haut en bas de millimètre en millimètre à l'aide du support élévateur visible sur la photo. Ainsi on mesure l'intensité du champ magnétique chaque millimètre entre l'aimant du bas et celui du haut. Pour 4 aimants dans le tube, on obtient les graphique ci-dessous représentant l'intensité du champ magnétique en fonction de la distance h.

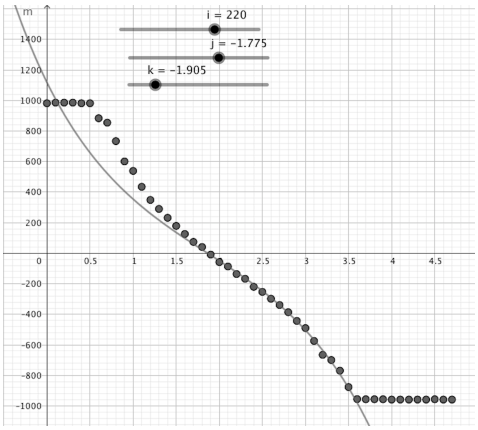
2. A la recherche d'une équation modélisant le champ magnétique

À un point donnée dans la distance d'équilibre, l'intensité du champ magnétique s'annule ce qui signifie que les forces magnétiques se compensent. Lorsque la sonde est située au plus proche des aimants, on obtient les mêmes valeurs. On obtient ce résultat car notre capteur sature à 0,1T or au plus proche des aimants, l'intensité du champ magnétique dépasse les 0,1T. Nous avons essayé de modéliser la courbe expérimentale obtenue. Il est très difficile de trouver une fonction qui correspond à chaque point. Lorsque le nombre d'aimant en haut et en bas est différent les données ne sont pas symétriques. En effet, on a

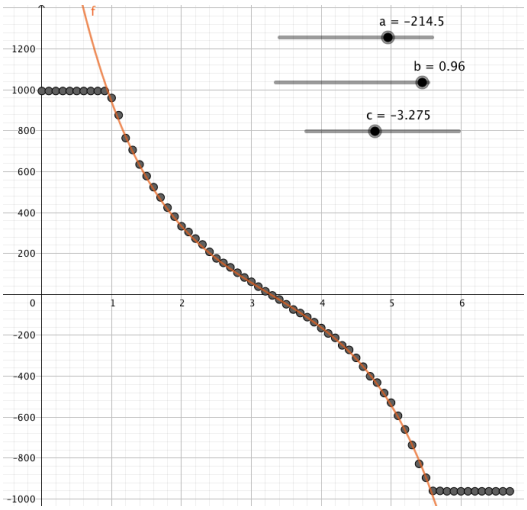
vu que le nombre d'aimant influence sur l'intensité magnétique. Une asymétrie du nombre d'aimant engendre une asymétrie de l'intensité magnétique.

Ainsi à l'aide du logiciel geogebra nous avons pu représenté l'évolution de l'intensité du champ magnétique en gauss en fonction de la position entre les aimants.



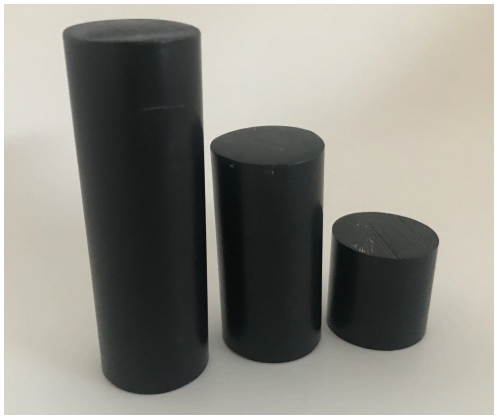


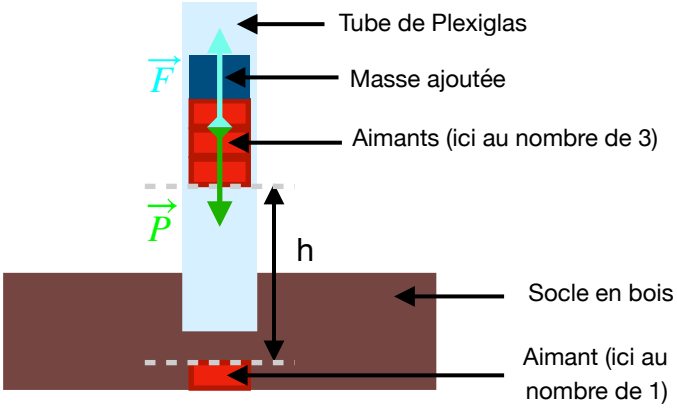
La même expérience avec un nombre d'aimant en bas et en haut symétrique a été réalisé :



D. Hauteur d'équilibre avec ajout de masse correspondant à la masse d'aimants

Nous avons ensuite étudié la variation de la distance h lorsque la masse ajoutée correspondait à un nombre d'aimant. Quelques mesures nous ont permis de déterminer la masse moyenne d'un aimant au dixième de gramme près.

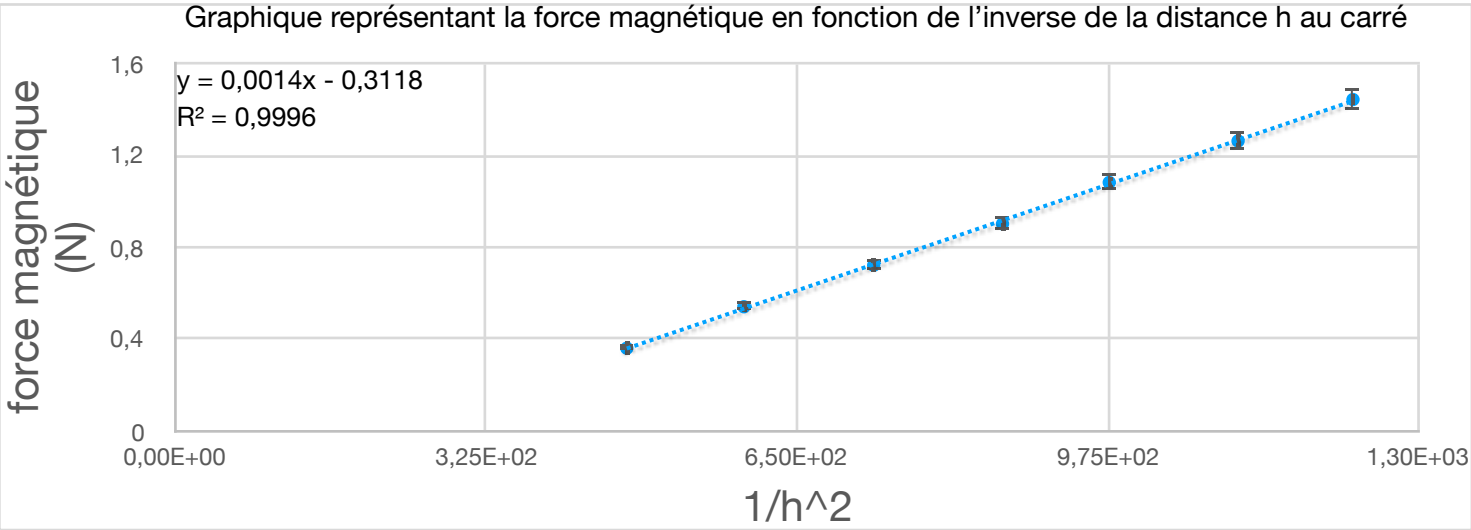




Un aimant a une masse de 18,4 grammes. Nous avons donc réalisé différents poids correspondant à la masse d'un, de deux et de trois aimants.
La distance d'équilibre est caractérisée par une compensation du poids par la force magnétique $\vec{F}$. À l'équilibre on a donc : $\|\vec{F}\| = mg$ avec g = 9,8 N.kg^{-1}
Avec un seul aimant, le module se retourne. Nous ne pouvons donc pas faire de mesure avec un seul aimant. Avec une masse en plus il ne peut se retourner.

Masse ajoutée (en g)	Masse réelle (en g)	Hauteur (en m)	Force magnétique (en N)
0	18,4	indéterminée	0,18032
18,4	36,8	0,046	0,36064
36,8	55,2	0,041	0,54096
55,2	73,6	0,037	0,72128
73,6	92	0,034	0,9016
92	110,4	0,032	1,08192
110,4	128,8	0,03	1,26224
128,8	147,2	0,0285	1,44256

En représentant la force magnétique en fonction de l'inverse de la distance h au carré on obtient une fonction affine.



Pour un nombre d'aimants différents dans le tube, l'exposant n'est pas tout le temps égal à 2.

III. Etude de la dynamique des oscillations libres

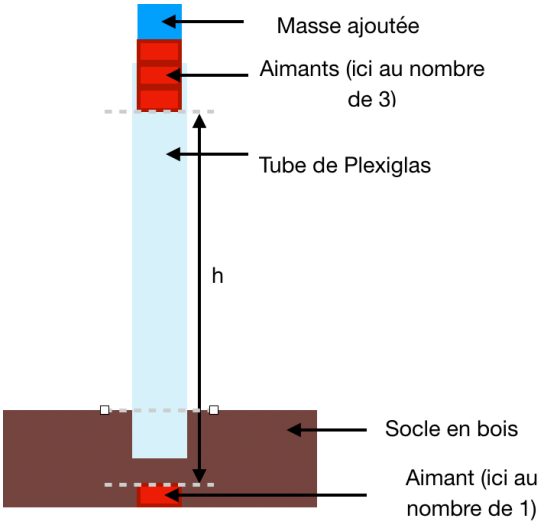
A. Expérimentation

1. Protocole général

Nous souhaitons dans cette partie étudier la dynamique de répulsion magnétique. Notre but est d'observer le comportement des aimants en répulsion lors d'oscillations en fonction de

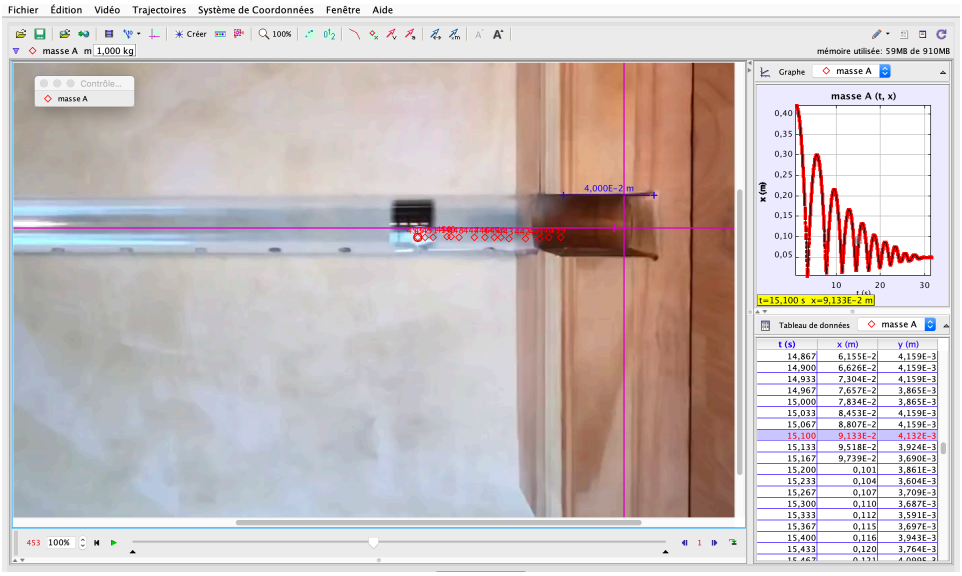
leur nombre, et de la masse que l'on ajoute. Ainsi, nous proposons l'expérience ci contre. Un ensemble d'un nombre n d'aimants, de masse m_n plus une masse ajoutée m_a sont lâchés d'une hauteur h_0 initiale. La masse d'un seul aimant est $m = 18{,}4\ g$. La masse totale du module est $m_{TOT} = m_A + m_n$.

Dans le socle en bois est placé un aimant (similaire à ceux lâchés). On prendra soin de vérifier que le groupe d'aimants lâché et l'aimant dans le socle en bois se repoussent bien, et donc qu'une même polarité se fait face.



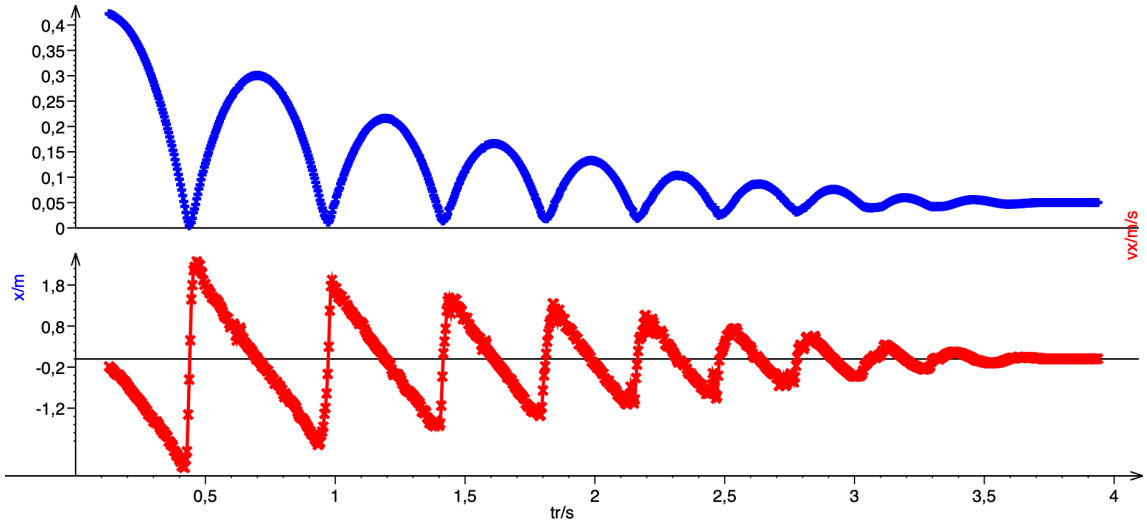
On choisi dans cette expérience de faire varier 2 paramètres l'un après l'autre séparément, n et m_a . On fixe h_0 (la hauteur initiale). On étudie ainsi la hauteur h (en mètres) du bas du dernier aimant au cours du temps (noté t en secondes). Pour étudier l'évolution de l'aimant dans le tube de PVC au cours du temps, on filme le dispositif avec un téléphone équipé d'une caméra capturant 240 images par seconde, au ralenti. On prendra soin de rétablir le temps réel car la vidéo obtenue est ralentie par un facteur 8.

A l'aide du logiciel Tracker on pointe automatiquement la position du bas de l'aimant oscillant sur la vidéo, image par image. En exemple, ici, le pointage automatique de la position de l'expérience 1 (détail des paramètres dans l'annexe partie B) avec le logiciel Tracker :



On exporte ces données sur le logiciel Regressi pour pouvoir les manipuler, calculer la vitesse verticale $v_x = \dfrac{dx}{dt}$ et l'accélération verticale $a_x = \dfrac{dv_x}{dt}$ (et par extension la somme des forces exercées sur les aimants)

En exemple, sur la page suivante un graphique résultant de l'exportation des données de l'expérience n°2 obtenues sur Regressi. En bleu la position en fonction du temps, en rouge la vitesse des aimants en fonction du temps.



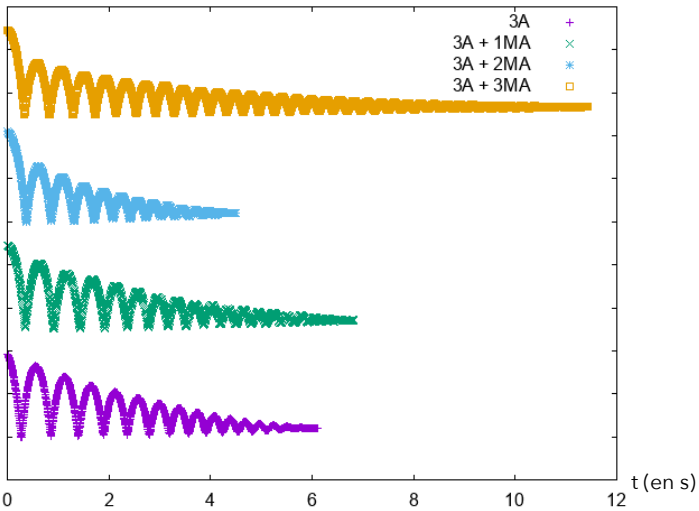
2. <u>Observations expérimentales (les courbes et résumés d'expériences se trouvent en annexe partie B)</u>

Observation n°1 : D'abord lorsque nous modifions uniquement le nombre d'aimants sans rajouter de masse nous constatons que pour les expériences 2, 3 et 4 la force répulsive magnétique n'a pas été suffisante pour empêcher les aimants de percuter le socle en bois lors de la première oscillation, et donc il faut noter une perte d'énergie.

Observation n°2 : Pour les expériences 2 et 5, et 4 et 7 on remarque que lorsqu'il y a une masse en plus l'amortissement est beaucoup plus long et les oscillations sont bien plus nombreuses et durent dans le temps, là où les aimants seuls oscillent moins et sur un temps plus court.

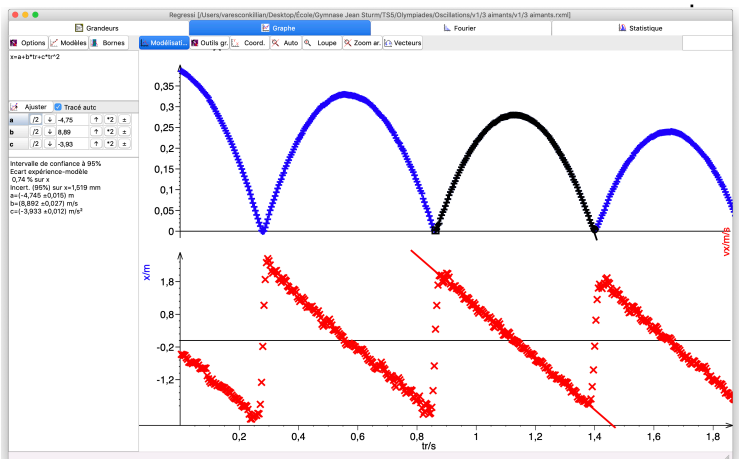
Observation n°2 bis : Toutefois, lorsque l'on compare les expériences 3 et 6 on constate le phénomène inverse : les aimants avec une masse relaxe plus vite et les oscillations sont moins nombreuses que sans masse. Cela semble contradictoire, nous supposons que des frottements avec le tube lors de l'expérience sont a l'origine de cette incohérence avec l'observation précédente.

Observation n°3 : D'après les expériences 3, 5 et 7, et comme nous pouvons le voir ci contre, plus on ajoute une masse importante sur les 3 aimants, plus il y a d'oscillations et plus le module met de temps avant d'être à l'équilibre, à relaxer.



Observation n°3 bis : Cependant, l'expérience n°6 entre en contradiction avec l'observation 3 ; l'ajout de masse a eu l'effet inverse (cf courbes ci-contre) : le module relaxe plus vite et oscille moins que sans masse. Notre hypothèse serait que des forces de frottements entre la masse ajoutée et le tube explique cette incohérence avec la remarque précédente

Observation n°4 : Comme on peut le voir, une oscillation a pu être modélisée par une parabole d'équation $x = c \times tr^2 + b \times tr + a$ à partir des données de l'expérience n°1 avec un écart aux valeurs inférieur à 1%. Cependant, l'ensemble de ces oscillations ne peut-être modélisé par une seule parabole. Nous avons donc pu remarquer que les oscillations peuvent en partie s'apparenter à des trajectoires paraboliques.

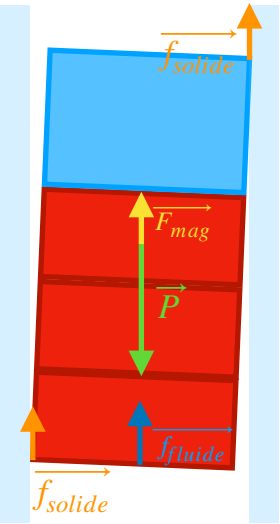


B. Visite du laboratoire ICUBE : utilisation d'une caméra à haute vitesse

Au sein du laboratoire ICUBE prenant place au sein du Centre National de Recherche Scientifique de Strasbourg nous avons pu résoudre un problème que nous avions rencontré lors de nos expériences. En effet, la caméra filmant 240 image par seconde n'est pas assez rapide pour filmer en détail le rebond du module d'aimant. Or ce rebond nous intéresse tout particulièrement car la force magnétique y est la plus intense. Le laboratoire où nous nous sommes rendus est spécialisé dans la fabrication de caméras à très haute vitesse et d'appareils optiques. A l'aide d'une caméra filmant 1000 images par seconde fabriquée par le laboratoire nous avons pu obtenir les données manquantes.

Suite à l'observation vidéo du déplacement de l'aimant dans le tube nous avons pu remarquer qu'il y a en fait des frottements secs ou frottements solides entre le tube et le module d'aimants. Nous avons donc complété notre modèle ainsi, et obtenu l'équation suivante en appliquant la seconde loi de Newton :

$$\vec{a} = \vec{g} + \frac{1}{m}\left(\overrightarrow{F_{mag}} + \overrightarrow{f_{fluide}} + \overrightarrow{f_{solide}}\right)$$



Voici ci contre un schéma résumant les différentes forces s'exerçants sur l'aimant dans le tube lorsqu'il chute. Comme nous avons pu le remarquer, lors des oscillations dans le tube de l'aimant la force magnétique pousse les aimants à frotter les parois du tube. En effet, la force magnétique tend a retourner l'aimant pour que les 2 pôles s'attirent, le tube l'en empêchant, ces frottements secs sont de plus en plus intense lorsque le module d'aimants est très proche de la base de la structure. C'est pour cette raison que nous avons ajouté ces frottements solides dans notre équation.

Exprimons maintenant les différentes forces s'exerçant sur le module d'aimant :

- Le poids : $\vec{P} = m\vec{g}$
- la force de répulsion magnétique : $\overrightarrow{F_{mag}} = \frac{K_{mag}}{h^{n_1}}\vec{k}$
- la force de frottement fluide $\overrightarrow{f_{fluide}} = -\alpha\vec{v}$
- la force de frottement solide aimants-tube $\overrightarrow{F_{solide}} = -\frac{\vec{v}}{||\vec{v}||}\frac{\beta}{h^{n_2}}$

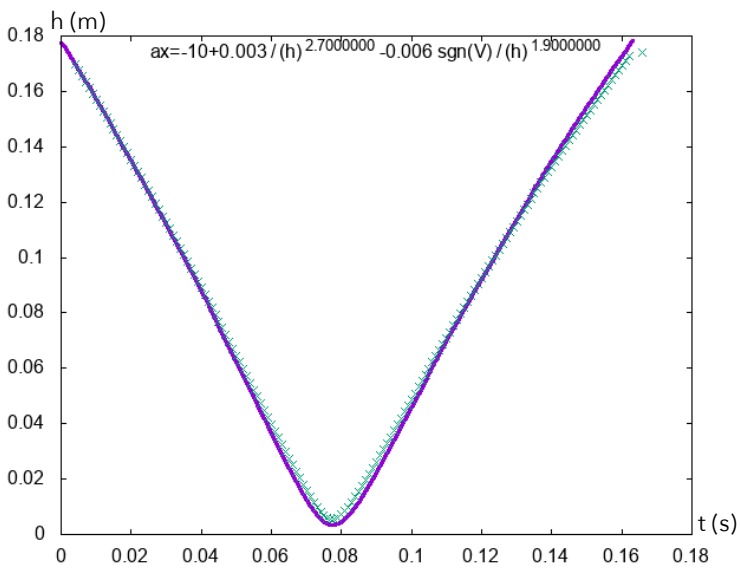
On obtient ainsi l'équation suivante par projection sur l'axe Oz orienté vers le haut :

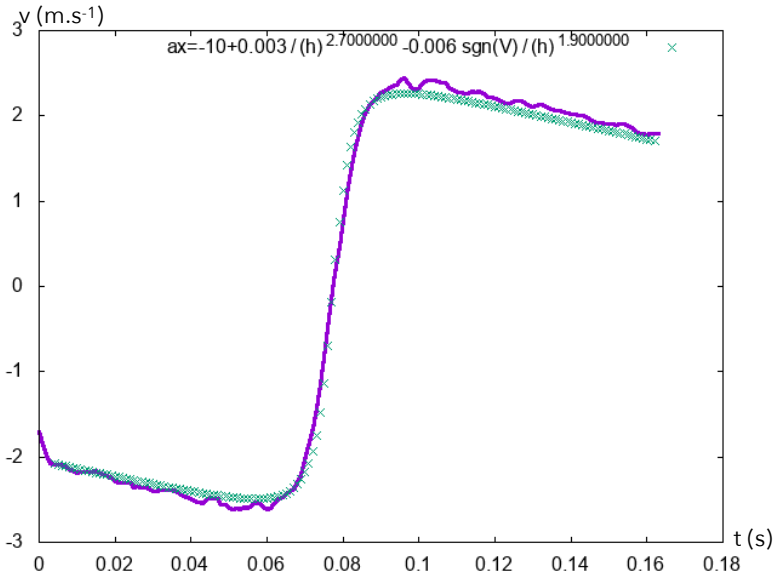
$$a_z = -g + \frac{1}{m}\left(\frac{K_{mag}}{h^{n_1}} - \alpha\frac{dh}{dt} - \frac{\beta}{h^{n_2}} signe\left(\frac{dh}{dt}\right)\right)$$

Afin de déterminer n_1 et n_2 nous allons exploiter les données obtenues au laboratoire ICUBE. Nous ne nous intéresserons qu'au rebond du module d'aimant, car le nombre d'images total devient trop conséquent à traiter sinon.

Suite à nos recherches (en annexe partie C), nous avons trouvé un modèle à l'aide de Scilab étant très proche de l'expérience, d'équation : $a_z = -10 + \frac{0{,}003}{h^{2{,}7}} - sgn(V)\frac{0{,}006}{h^{1{,}9}}$.

Voici un graphe représentant le modèle en vert et en violet l'expérience.





C. Conclusion

Nous constatons donc d'après nos expériences qu'une masse importante sur nos suspensions provoquera des oscillations plus nombreuses, et une durée accrue avant l'équilibre. Il nous faut donc trouver un moyen de limiter ces oscillations.

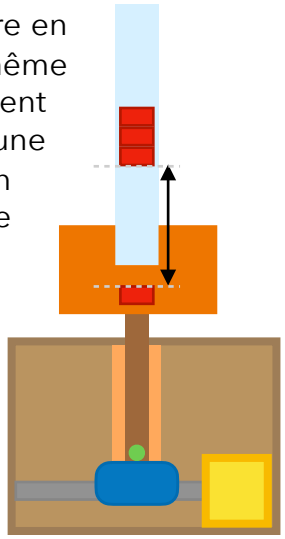
IV. Etude des oscillations à régime forcé

A. Expérimentation

1. Protocole général

Dans l'optique de créer des suspensions à répulsion magnétique, nous avons souhaité créer une expérience nous permettant de tester différentes configurations de ces premières, en simulant les conditions réelles d'une route possédant des imperfections. Nous avons donc créée une machine de test (cf schéma ci-dessous). Dans une caisse en bois (ici en brun clair) nous avons placé un moteur (ici en jaune), faisant tourner une barre métallique (en gris). Un cylindre (en bleu) a été vissé dans cette barre de manière

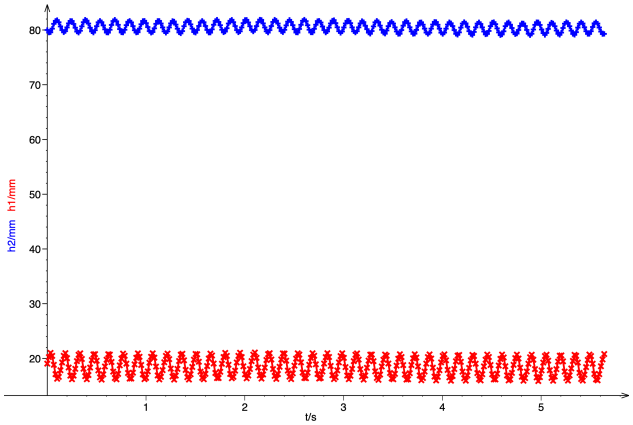
décentrée. Une seconde barre de métal (en vert) est vissée dans un cylindre en bois (en brun foncé) et repose sur le cylindre. Le cylindre en bois est lui même fixé à un rail de tiroir lui permettant de glisser verticalement sans frottement tout en étant parfaitement guidé. Enfin, est vissée à ce cylindre de bois une structure similaire à celle utilisée dans les expériences précédentes, avec en orange un socle contenant un aimant et un tube de plexiglass contenant le module d'aimant oscillant.



A l'aide d'un potentiomètre on règle la vitesse de rotation du moteur, nous permettant ainsi d'avoir différentes fréquences d'oscillation de la structure, et ainsi de trouver la fréquence de résonance de l'oscillateur. Nous filmons le dispositif une fois l'oscillation du module stabilisée, puis on applique la méthode de repérage vidéo et de traitement de données du paragraphe 1. partie III.A. On répètera l'opération afin d'avoir assez de vidéos et donc de données pour déterminer la résonance. On notera f_a la fréquence d'oscillation du module, A_a son amplitude; et f_s la fréquence d'oscillation de la structure, et A_s son amplitude.

Le graphique de Fourier fourni par Regressi nous aidera à déterminer la fréquence d'oscillation de la structure. Pour déterminer l'amplitude de l'oscillation de la structure et du module, nous ferons la moyenne des amplitudes de chaque période.

Voici ci contre un graphique représentant l'évolution de la hauteur de l'aimant (en bleu), et l'évolution de la hauteur de la structure (en rouge) en fonction du temps. Ici, on peut voir graphiquement que l'amplitude du module est plus faible que celle de la structure.



2. <u>Observations expérimentales (les courbes et résumés d'expériences se trouvent en annexe partie D)</u>

Observation n°1 : l'ajout de masse semble avoir une faible influence sur la fréquence de résonance. En effet, sur les différentes expériences, 1, 2 et 3, on remarque que la fréquence de résonance fondamentale est d'environ 3,85Hz ; peu importe la masse rajoutée.

Observation n°2 : l'amplitude maximale au niveau de la fréquence de résonance est nettement plus grande lorsque l'on rajoute une masse. En effet, si l'on compare les expériences 1, 2 et 3, on remarque que le rapport $\frac{A_a}{A_s}$ est plus grand pour l'expérience 3 que pour les expériences 2 et 1, et ce même rapport pour l'expérience 2 est plus grand que pour l'expérience 1.

Observation n°3 : On remarque un phénomène très particulier lors de l'expérience 3, phénomène moins perceptible dans l'expérience 2 et absent dans l'expérience 1. On ne compte pas une fréquence de résonance mais deux. En effet, on observe une première résonance, de fréquence $f_s = 3{,}85Hz$, puis une seconde, équivalent au double de la première : $f_s = 7{,}69Hz$. Lorsque l'on atteint cette deuxième fréquence de résonance, sorte d'harmonique de la première, l'amplitude maximale obtenue est plus faible que lors de la fondamentale.

Observation n°4 : La seconde résonance n'est pas perceptible lorsque la masse est trop faible. En deçà d'un seuil (qui reste à déterminer) la seconde résonance disparait. Ce phénomène se remarque par le fait que l'expérience 1 ne présente pas de seconde résonance, et l'expérience 2 en présente une dont l'amplitude d'oscillation est nettement moins grande que la première résonance.

Observation n°5 : Lorsque la fréquence dépasse un certain seuil, le module n'oscille presque plus, il atteint un équilibre et l'amplitude tend théoriquement vers 0. En effet, la structure effectue des allés-retours si rapide que l'inertie de l'aimant réduit son amplitude.

B. Interprétation

Dans l'observation n°2 nous remarquons que la masse fait augmenter l'amplitude maximale lors de la résonance. Ceci s'explique par le fait que la masse étant plus grande, l'énergie mécanique, qui dans notre système est constante (car la structure réinjecte constamment de l'énergie), est plus grande. Ainsi, plus la masse augmente, plus l'amplitude maximale est grande.

Aussi, dans l'observation n°3, on constate plusieurs résonances. Cela s'explique par le fait que contrairement à un oscillateur à ressort, notre module d'aimant n'est pas lié physiquement au bas de la suspension. Ainsi, si l'on double la fréquence de résonance, la structure a le temps de faire un allé-retour en plus durant la phase de vol de l'aimant. Lorsque celui-ci redescend, il est synchrone avec le mouvement de la structure. Ainsi, la structure réinjecte de l'énergie dans le système.

L'observation n°4 s'explique par le fait que le temps de vol du module lorsqu'on double la fréquence est inférieur au temps nécéssaire à la structure de fait un aller retour. Lorsque la masse est trop faible, le module a une inertie plus faible, et donc reste longtemps en l'air.

D'après nos recherches il semblerai que le problème rencontré appartiendrai au domaine de la physique non linéaire. Nos observations et interprétations sont en accords avec certains modèles, mais nous faisons le choix de ne pas continuer nos recherches sur cette voie car la physique expliquant ce phénomène est très complexe. Nous nous limiterons donc a nos interprétations.

C. Conclusion

Les expériences réalisées nous permettent de déterminer la ou les fréquence(s) de résonance. Ainsi nous savons à quel moment nos suspensions sont les moins efficaces.

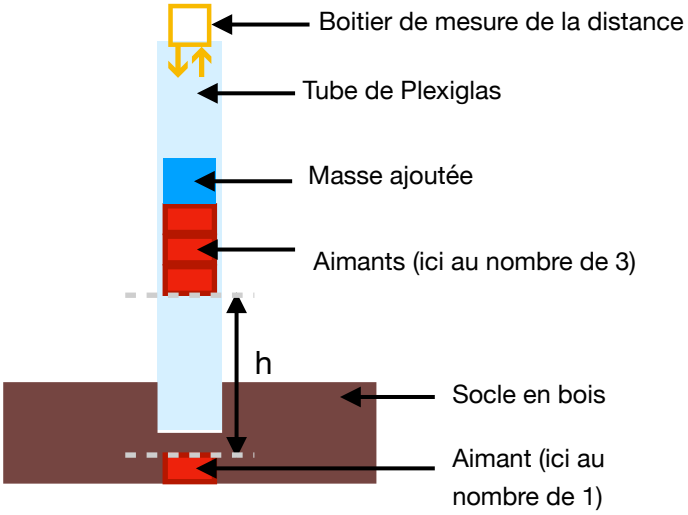
Nous pouvons ainsi tester différents modes de réduction de l'amplitude, comme les courants de Foucault ou l'induction.

Aussi, nous savons que la masse joue sur l'amplitude d'oscillation de nos suspensions et donc par conséquent il faut prendre soin de ne pas trop charger le véhicule.

V. Prospectives

A. Automatisation des mesures par infrarouge

Pour mesurer de manière automatique dans nos suspensions le déplacement des aimants nous utilisons un capteur de distance infrarouge relié a une carte Arduino. En effet, ce capteur envoie des impulsions laser infrarouges a une



fréquence de 50Hz et mesure le temps de parcours de l'onde. En connaissant le temps de parcours de l'onde et sa vitesse, il détermine la distance de l'objet. Voici un schéma du montage :

Les données récoltés par le capteur sont transmises a la carte Arduino, et celle ci les enregistre sur une carte SD. Ainsi nous n'avons plus besoin de faire un pointage manuel par vidéo de notre système, celui ci est réalisé automatiquement. Le capteur employé est le VL53L0X de Polulu, capable de mesurer des distances de 3cm a 2m avec une précision de l'ordre du mm et une fréquence de mesure de 50Hz.

B. Prototype

Pour les suspensions finales, nous avons eu l'idée de coupler plusieurs suspensions individuelles. La pièce ci-contre en aluminium a été réalisée. Dans chaque trou sera introduit des aimants. Cependant nous sommes encore entrain d'y réfléchir car pour coupler plusieurs suspensions individuelles il faudrait tout d'abord étudier l'influence qu'un aimant mis dans un trou a sur un aimant voisin.

Conclusion

D'un point de vue humain, ce projet nous a permis de mettre à l'épreuve notre patience, notre rigueur, et notre persévérance mais nous a également permis de forger un esprit d'équipe. Nous avons aussi appris à surmonter certains problèmes à travers nos recherches parfois compliquées et semées d'embûches. D'un point de vue scientifique, il nous a fallu redoubler d'ingéniosité pour élaborer des expériences et créer nos propres appareils de mesures. Nous avons eu l'occasion de travailler avec des outils tels que Géogébra, Scilab, Arduino ou encore Orphylab, dont nous aurons surement l'utilité dans nos études futures. Nous avons pu étudier en détail le phénomène de répulsion magnétique, que nous souhaitons exploiter par la suite afin de réaliser des suspensions. Le travail sur la dynamique de répulsion des aimants nous donne une idée du comportement de nos suspensions future face aux chocs de la route. Nous avons déjà en tête des pistes pour réduire les oscillations et éviter les chocs des aimants, et peut être pour contrôler la raideur des suspensions.

Remerciement

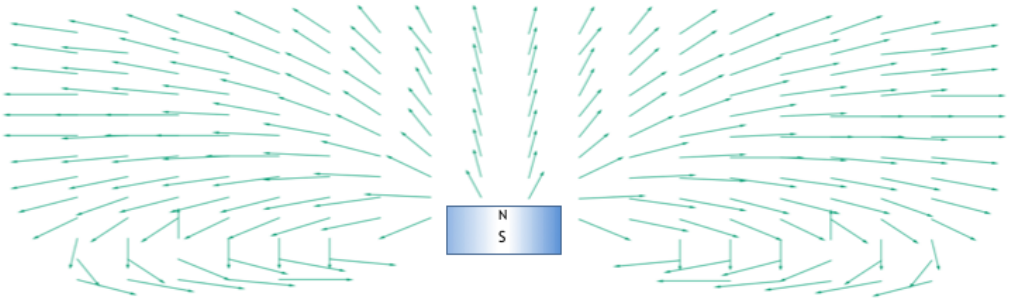
Nous tenons tout particulièrement à remercier notre professeur encadrant M. Lohner. mais aussi Mme Vonesch et M. Volgringer, professeurs de physique-chimie dans notre lycée, qui nous ont soutenus tout au long du projet, ainsi que M. et Mme Elophe respectivement professeur de mathématiques et préparatrice en salle de physique-chimie pour leur aide précieuse.

Références

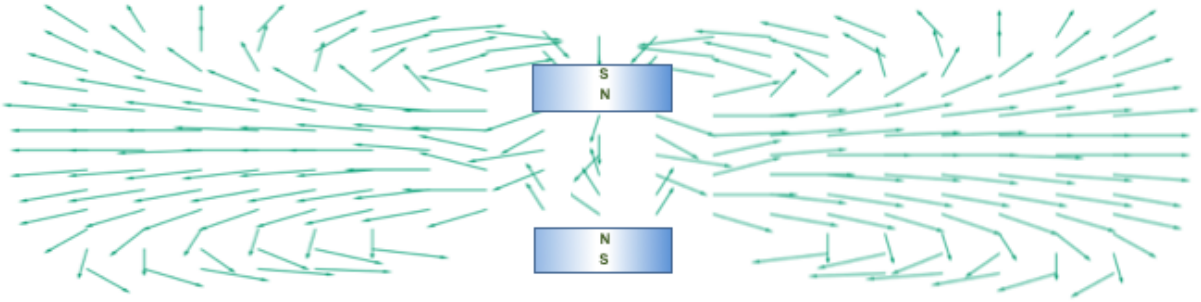
- Modèles et calcul des systèmes de suspension magnétique passive-développements et calculs analytiques en 2D et 3D des interactions entre aimants permanents, Hicham Allag. https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00569274/document
- L'effet Hall, Gilbert Gastebois. http://gilbert.gastebois.pagesperso-orange.fr/java/hall/theorie_hall.pdf
- Continuous-Time Ratiometric Linear Hall-Effect Sensor ICs. https://www.allegromicro.com/~/media/Files/Datasheets/A1301-2-Datasheet.ashx
- Magnetism. http://www.wright.edu/~guy.vandegrift/openstaxphysics/chaps/22%20Magnetism.pdf
- Cours de Magnétostatique, Jonathan Ferreira. http://ipag.obs.ujf-grenoble.fr/~ferreirj/enseignement/magneto_complet.pdf
- Spéciale PSI - Cours « Electromagnétisme » : http://sertella.free.fr/cours_psi_physique/electromagnetisme/foucault.pdf
- Claude Divoux, mai 2006 : http://www.physique-appliquee.net/physique/electromagnetisme/notions_d_electromagnetisme.pdf

Annexes

A) Le champ vectoriel des aimants



Champ vectoriel d'un aimant



Champ vectoriel de deux aimants en opposition

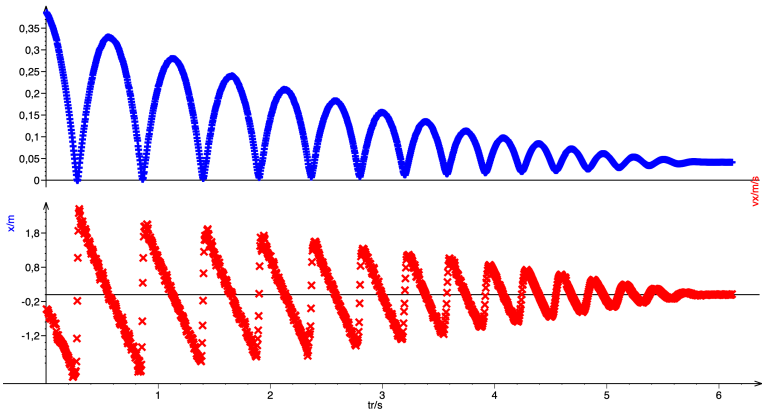
B) Résumés d'expériences et résultats

Expérience 1 :

Paramètres expérimentaux de l'expérience :

$m_a = 0\ g \quad n = 3 \quad m_3 = 55{,}2\ g \quad m_{TOTAL} = 55{,}2\ g \quad h_0 = 49{,}8\ cm$

Résultats de l'expérience :

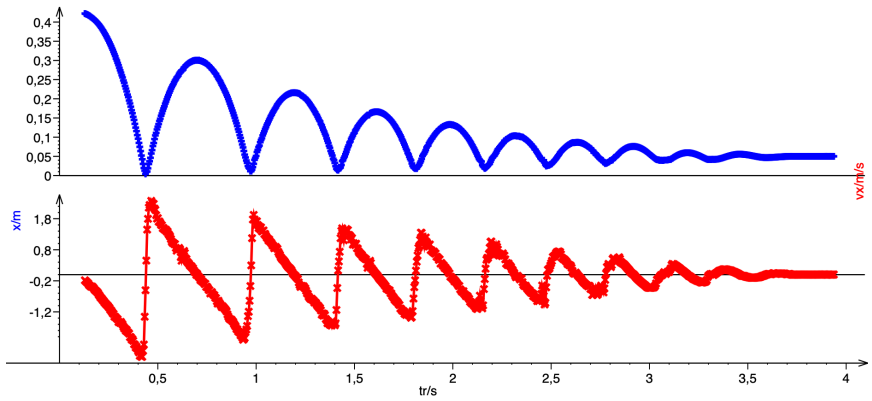


Expérience 2 :

Paramètres expérimentaux de l'expérience :

$$m_a = 0\ g \qquad n = 4 \qquad m_4 = 73{,}6\ g \qquad m_{TOTAL} = 73{,}6\ g \qquad h_0 = 49{,}8\ cm$$

Résultats de l'expérience :

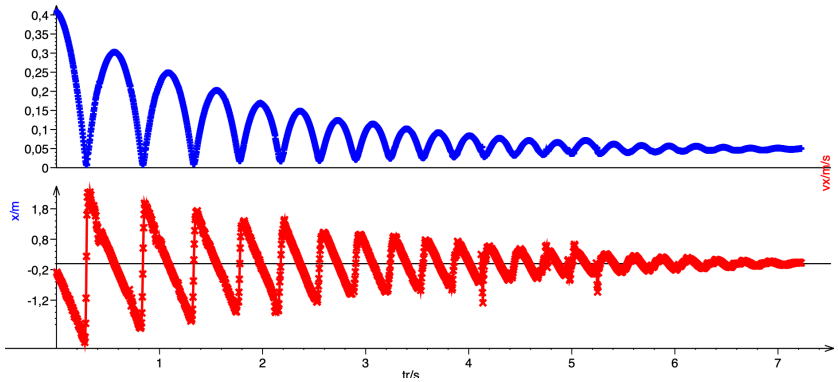


Expérience 3 :

Paramètres expérimentaux de l'expérience :

$$m_a = 0\ g \qquad n = 5 \qquad m_5 = 92{,}0\ g \qquad m_{TOTAL} = 92{,}0\ g \qquad h_0 = 49{,}8\ cm$$

Résultats de l'expérience :



Expérience 4 :

Paramètres expérimentaux de l'expérience :

$$m_a = 0\ g \qquad n = 6 \qquad m_6 = 110\ g \qquad m_{TOTAL} = 110\ g \qquad h_0 = 49{,}8\ cm$$

Expérience 5 :

Paramètres expérimentaux de l'expérience :

$$m_a = 18{,}4\ g \qquad n = 3 \qquad m_3 = 55{,}2\ g \qquad m_{TOTAL} = 73{,}6\ g \qquad h_0 = 49{,}8\ cm$$

Expérience 6 :

Paramètres expérimentaux de l'expérience :

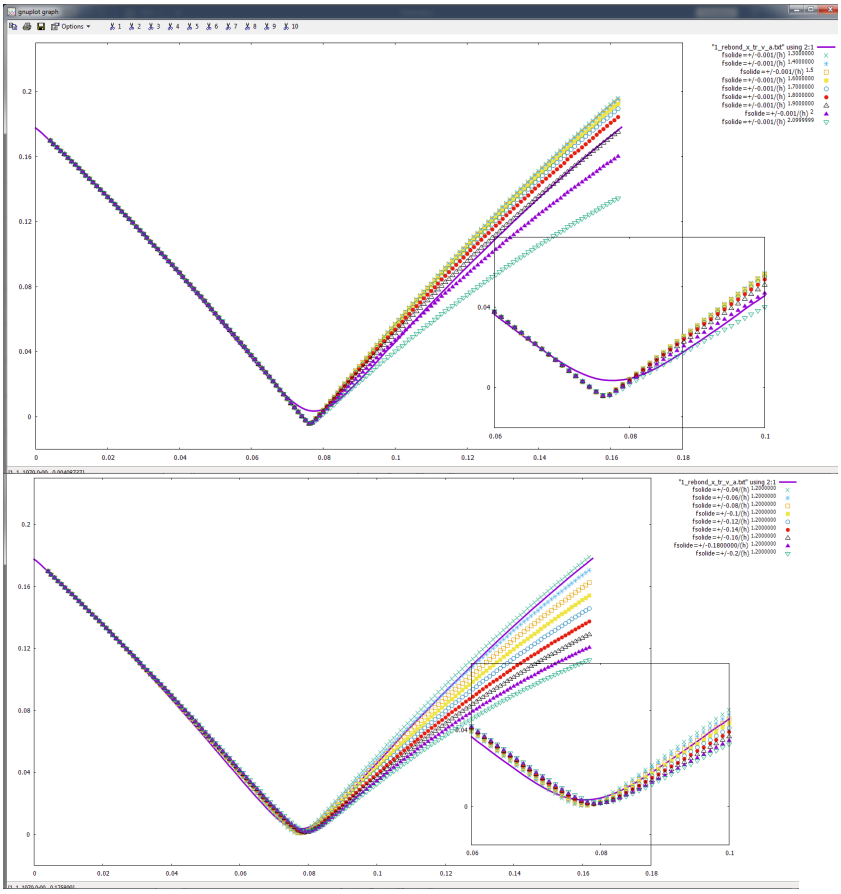
$m_a = 36{,}8\ g \qquad n = 3 \qquad m_3 = 55{,}2\ g \quad m_{TOTAL} = 92{,}0\ g \quad h_0 = 49{,}8\ cm$

Expérience 7 :

Paramètres expérimentaux de l'expérience :

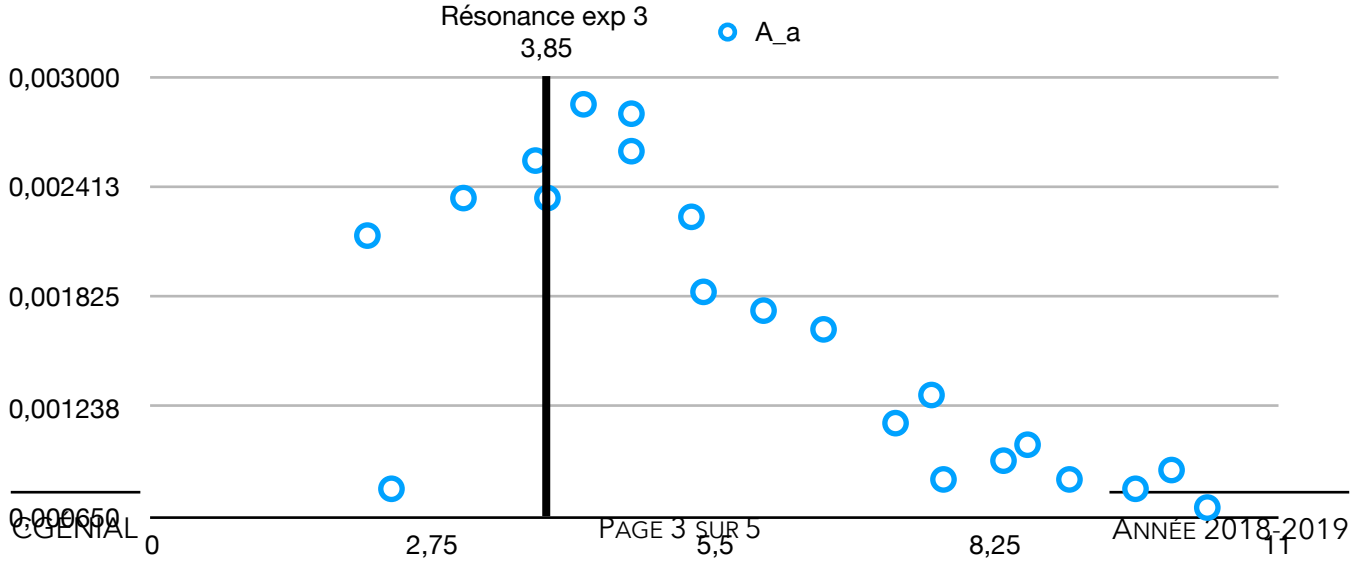
$m_a = 55{,}2\ g \qquad n = 3 \qquad m_3 = 55{,}2\ g \quad m_{TOTAL} = 110\ g \quad h_0 = 49{,}8\ cm$

C) Tentatives de modélisation



D) Résumés d'expériences et résultats

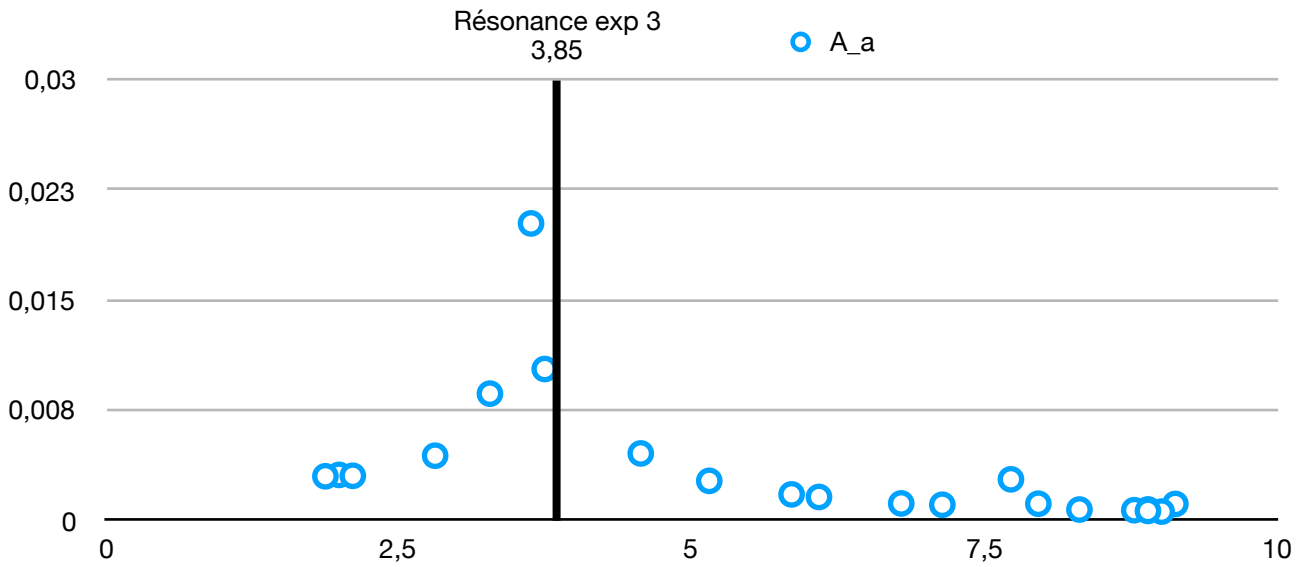
Expérience 1 :



Paramètres expérimentaux de l'expérience :

$$m_a = 0 \qquad n = 3 \qquad m_3 = 55{,}2\ g \qquad m_{TOTAL} = 55{,}2\ g$$

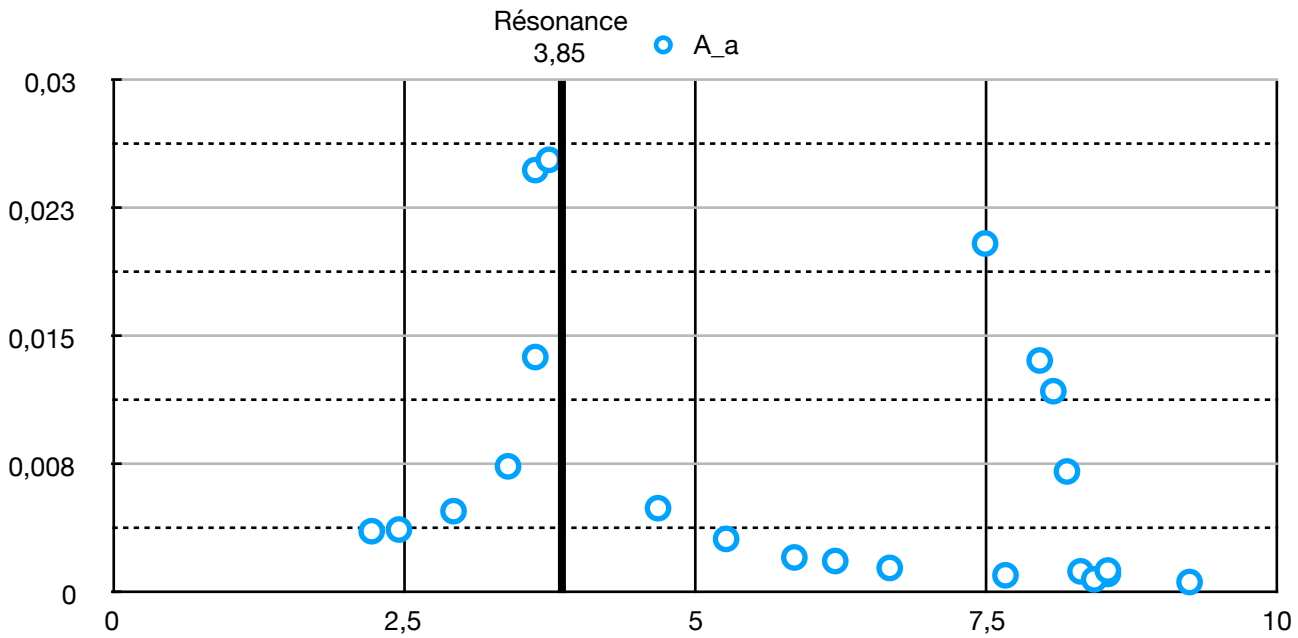
Expérience 2 :



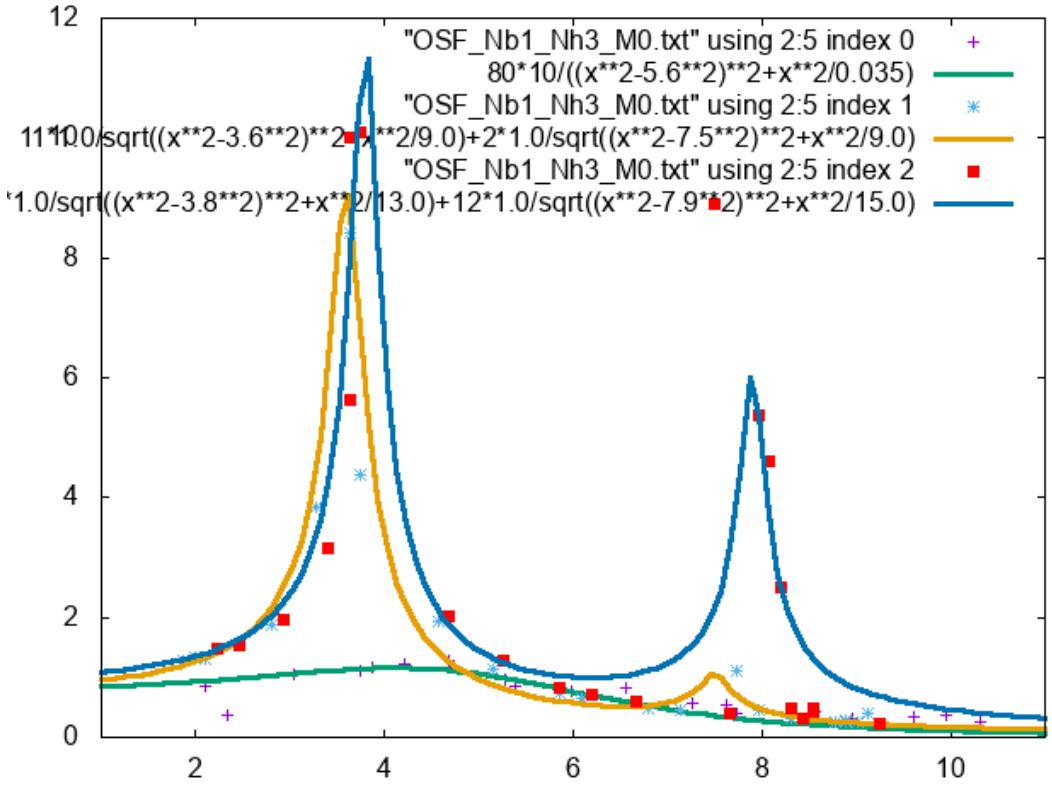
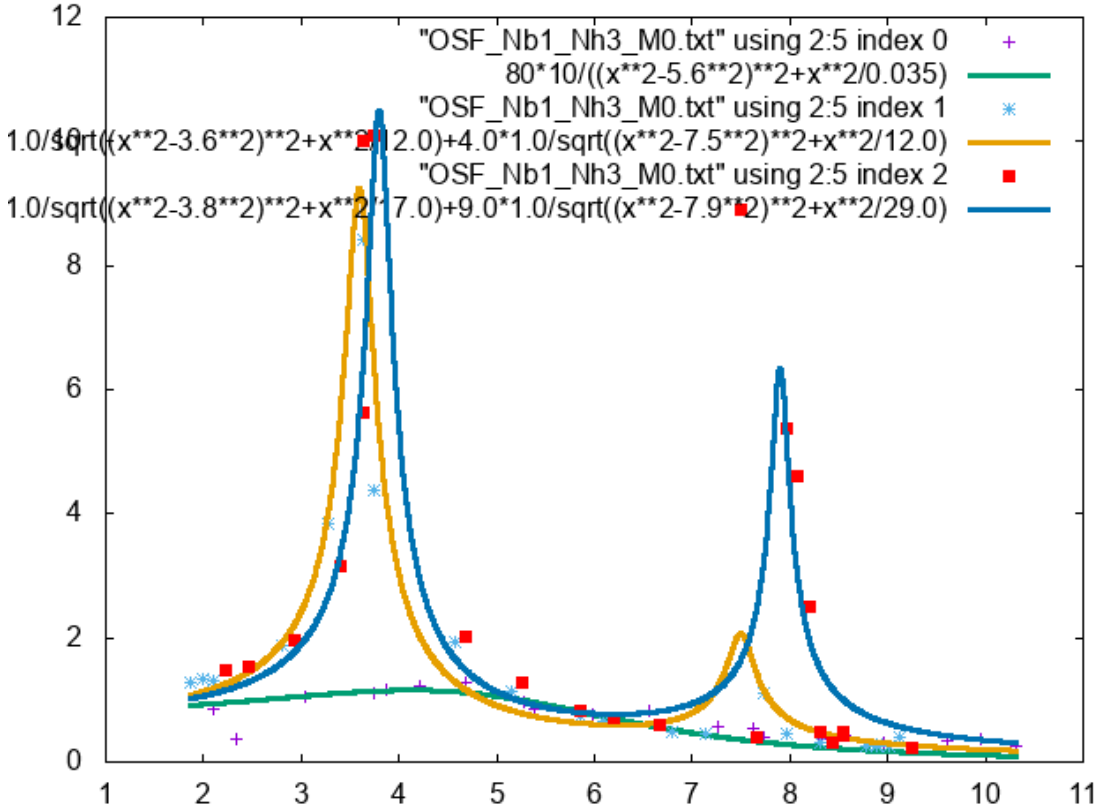
Paramètres expérimentaux de l'expérience :

$$m_a = 18{,}4\ g \qquad n = 3 \qquad m_3 = 55{,}2\ g \qquad m_{TOTAL} = 73{,}6\ g$$

Expérience 3 :



Paramètres expérimentaux de l'expérience :

$$m_a = 36{,}8\ g \qquad n = 3 \qquad m_3 = 55{,}2\ g \qquad m_{TOTAL} = 92{,}0\ g$$

Tentatives de modélisation des fréquences de résonance