

Lévitier pour avancer

Flavie Filion et Catherine Gendron

ABSTRACT

Much like the rest of the world, the amount of CO₂ emission in Canada is constantly increasing. This phenomenon is primarily explained by human activities such as transportation, which accounted for nearly 24% of the global greenhouse emissions in 2018 (Internet 2). Furthermore, a train can emit more than 14 tonnes of greenhouse gases per 1000 km. Thus, the creation of a train powered by liquid nitrogen and electricity could potentially reduce our ecological footprint as well as global warming. As part of this analysis, verification of many hypotheses will be completed to validate the use of this new method of transportation. Notions of magnetism and electricity addressed in the following article will be used to support widely-accepted theories. The first hypothesis is that a magnetic levitation maintains its speed until the superconductor is no longer in the air. Also, the properties of a superconductor allow us to verify the second hypothesis: a magnetic levitation train placed on a linear track and traveling at a speed that is inferior to the critical value will travel up until the end of the track, and then back to its initial position without falling off the track. In addition, the third hypothesis is that the height between the track and the superconductor is inversely proportional to its mass. Lastly, the fourth hypothesis is that the superconducting effect stops instantly. To conclude, after further experimentation it is possible to confirm the first three hypotheses and refute the fourth.

MOTS CLÉS : Physique, lévitation magnétique, champ magnétique, supraconducteur, aimant, train.

INTRODUCTION

Le réchauffement climatique est un enjeu de plus en plus important et c'est pourquoi plusieurs pays essaient de ralentir ce phénomène à l'aide de différentes actions inscrites dans des conventions comme l'accord de Paris (Internet 1). Cette entente consiste à réduire la production de gaz à effet de serre dont 24% des émissions mondiales sont produites par les moyens de transport (Internet 2). D'ailleurs, c'est pour cela qu'on encourage l'utilisation des transports en

commun. Par exemple, au Japon, le transport ferroviaire est devenu le moyen de transport principal en raison de la grande population du pays. Que ce soit le train, le métro ou le train à grande vitesse, le réseau ferroviaire à une longueur de 23 670 km. De plus, la Chine a développé un train à sustentation électromagnétique permettant d'aller jusqu'à une vitesse de 603 km/h pour ainsi faire gagner du temps aux utilisateurs. Puisque ce train ne touche pas au sol, il n'y a pas de force de frottement. Cependant la consommation énorme d'énergie ainsi que le coût exorbitant

de ces installations en valent-ils la peine ? (Internet 3). Si l'on prend en compte que les trains émettent approximativement 14 tonnes de CO₂ par 1000 km parcourus, l'utilisation d'un train à lévitation magnétique pourrait résoudre ce problème, car celui-ci utilise un moteur électrique (Internet 4).

Dans cette même optique, la vérification de différentes problématiques associées au train à lévitation serait intéressante pour déterminer la fiabilité de cette nouvelle méthode comme moyen de transport futuriste.

La première hypothèse émise propose que le train à lévitation magnétique conserve sa vitesse tant que celui-ci est dans les airs. De plus, il serait intéressant de savoir quel est l'effet de la masse sur le supraconducteur. C'est de ce sujet que la deuxième hypothèse traite : La distance entre le rail et le train, surélevé par l'effet de lévitation, est inversement proportionnelle à sa masse.

Selon les propriétés d'un supraconducteur, il serait possible d'émettre une troisième hypothèse : Un train à lévitation magnétique envoyé sur un rail de longueur finie, fait des mouvements d'aller-retour sans tomber du rail lorsque sa vitesse est inférieure à une certaine vitesse critique.

Finalement, la dernière hypothèse propose que le supraconducteur tombe instantanément sur le rail suite à son refroidissement, donc à la perte de son effet supraconducteur.

Le magnétisme et l'électromagnétisme

Le magnétisme est un phénomène qui a été observé et défini dans la Grèce antique, il y a très longtemps. Depuis, les connaissances que l'homme a acquises dans ce domaine ont grandement évolué et le magnétisme ainsi que l'électromagnétisme sont, aujourd'hui,

des outils très utiles. En effet, il est possible de retrouver ces notions sous forme d'aimants pour fixer des notes au réfrigérateur ou encore comme électroaimant qui sert, entre autres, d'outils pour soulever de grandes charges. En outre, ces applications sont possibles en raison de plusieurs physiciens, qui ont fait des recherches à ce sujet tel qu'Ampère, Faraday, Coulomb et Maxwell. En effet, les théories suivantes sont résumées par les quatre lois de Maxwell (Internet 5).

Les lignes de champ magnétique

Le champ magnétique est un concept qui permet de démontrer comment une force magnétique agit, soit à l'intérieur, autour ou dans l'espace. Par ailleurs, un champ magnétique est formé quand des électrons sont en mouvement circulaire (voir figure 1), cela dans un sens donné comme la figure ci-dessous.

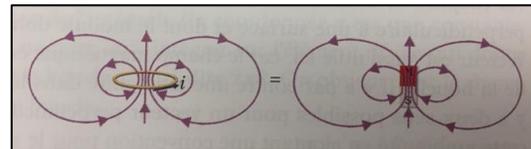


FIGURE 1. Formation d'un champ magnétique (R. Lafrance).

Aussi, le champ magnétique produit par un aimant est orienté du pôle Nord vers le pôle Sud comme représenté sur cette image.

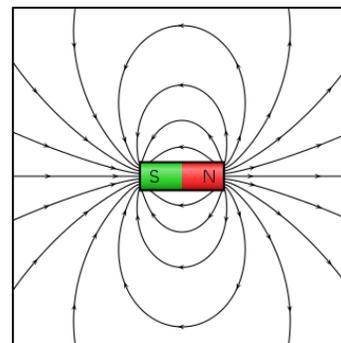


FIGURE 2. Lignes de champs magnétiques (Internet 6).

En effet, la boussole est un bon outil pour distinguer le pôle Nord du pôle Sud, car l'aiguille d'une boussole indique le sens du champ magnétique (Internet 7). Dans un matériel non aimanté, les électrons bougent de tous les côtés, créant ainsi un champ magnétique résultant nul. Cependant, dans des matériaux aimantés, les électrons effectuent des mouvements circulaires orientés dans le même sens, qui produisent un champ magnétique, faisant en sorte que leur effet s'additionne, en physique quantique, ce phénomène se nomme le moment magnétique. Effectivement, c'est pour cela qu'un aimant gardera son effet magnétique même si celui-ci se casse en plusieurs morceaux (Internet 8).

La susceptibilité magnétique

La susceptibilité magnétique est une constante de proportionnalité entre la magnétisation d'un matériau et le champ magnétique extérieur qui le magnétise. Tous les matériaux possèdent cette constante malgré qu'elle soit différente pour chacun pouvant ainsi faire augmenter, réduire ou ne pas affecter le champ magnétique résultant lorsqu'il est placé à l'intérieur d'un champ magnétique. Alors, le champ magnétique externe (B_0) n'est pas le même que celui dans le matériau (B_m). Par contre, il a été prouvé que le champ magnétique dans un matériau quelconque était proportionnel au champ magnétique externe exprimé par la formule: $B_m = (X_m + 1)B_0$ où X_m est la constante de susceptibilité magnétique. Chaque matériau a une constante différente, mais il est tout de même possible de regrouper certains d'entre eux soient les ferromagnétiques, les paramagnétiques, les diamagnétiques et les supraconducteurs.

Les ferromagnétiques, comme le fer, ont une constante de susceptibilité comprise entre 10^3 et 10^5 , ce qui a pour effet de faire grandement augmenter le champ magnétique. Par exemple, si on met un morceau de fer dans un

champ magnétique de 0,0001 Tesla, alors le morceau de fer produira un champ magnétique de 0,1 Tesla dû au moment magnétique de ses électrons. Eux aussi, les paramagnétiques tel que les métaux alcalins font augmenter le champ magnétique externe, mais de façon moins importante. Leur constante de susceptibilité est généralement voisine à 10^{-5} et varie en fonction de la température. Pour ce qui est des diamagnétiques, la constante de susceptibilité magnétique fait légèrement diminuer le champ magnétique, puisque celui-ci tourne habituellement autour de -10^{-5} et c'est le cas de l'argent, du plomb, de l'eau, du Bismuth, etc. La dernière catégorie est les supraconducteurs (H. Benson).

Le supraconducteur

Pour qu'un matériau soit supraconducteur, il doit présenter deux caractéristiques précises lorsque celui-ci est refroidi à sa température critique qui se situe souvent près du zéro absolu, soit $-273,15$ °C, donc 0 Kelvin. Ces caractéristiques sont les suivantes : une résistance nulle et l'expulsion de tout champ magnétique extérieur. Pour ce travail, seule la deuxième caractéristique soit l'expulsion de tout champ magnétique auquel il est soumis sera traitée. Cette caractéristique s'illustre par la figure ci-dessous.

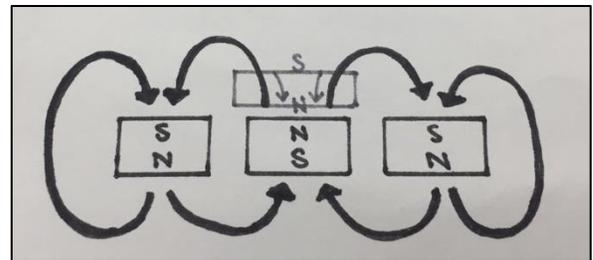


FIGURE 3. Fonctionnement d'un supraconducteur.

En effet, les lignes de champs magnétiques vont du Nord vers le Sud, mais comme le supraconducteur veut annuler les lignes de

champ formées par les aimants, le champ magnétique à l'intérieur du supraconducteur vont dans le sens opposé à celle produite par l'aimant. Le supraconducteur devient un aimant avec des pôles. Ceci a pour effet de surélever le supraconducteur puisque celui-ci et l'aimant se repoussent en raison de leurs pôles Nord qui se font face. De plus, les lignes de champ magnétique formé par les aimants font en sorte de garder le supraconducteur dans le centre du rail comme représenté sur la figure 7. L'explication de ce phénomène est associée à des notions très poussées de la physique quantique.

Les supraconducteurs ont une constante de susceptibilité magnétique égale à -1 , ce qui a pour effet d'annuler le champ magnétique extérieur. Par exemple, selon la figure 4, s'il y a un champ magnétique de 1 Tesla (lignes foncées partant de l'aimant) et que l'on place un supraconducteur, ce dernier produira un champ magnétique de -1 Tesla (lignes pâles qui partent du supraconducteur) et la somme des champs magnétiques seront nuls, comme l'illustre la figure suivante (H. Benson).

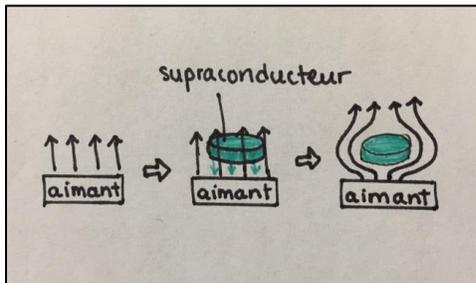


FIGURE 4. L'effet de l'ajout d'un supraconducteur sur les lignes de champ magnétique d'un aimant.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Pour ce qui est du matériel, certains n'étaient pas à notre disposition, donc nous avons dû nous les procurer. En outre, les deux supraconducteurs ont été empruntés de l'Université de Sherbrooke, les aimants et

l'azote liquide ont été achetés. Ensuite, les trains et les rails ont été fabriqués avec l'aide de professionnels (voir figure 5).



FIGURE 5. Photo des matériaux utilisés.

Un protocole de sécurité a été mis en place pour la manipulation de l'azote liquide. La photo suivante (figure 6) montre l'équipement nécessaire en vue du respect de ce protocole.



FIGURE 6. Photo de l'équipement de protection.

5,1 Piste

Lors de la fabrication des rails, plusieurs matériaux sont nécessaires pour faire en sorte que le supraconducteur se soulève et reste en place sur celui-ci. En effet, pour construire un rail ovale de 30 cm de rayon, ainsi qu'un linéaire de 75 cm, plus de 450 aimants sont nécessaires. De plus, il est important de placer les aimants sur une plaque de fer, où ils peuvent être aimantés afin de rester en place, car ceux-ci ont une forte attraction causée par des pôles inverses (Voir figure 7).

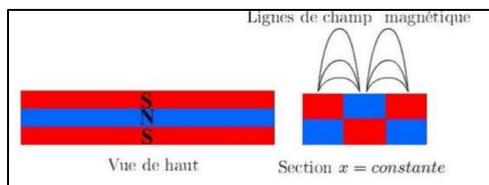


FIGURE 7. Lignes de champ faites avec trois aimants (Internet 11).

5,2 Disposition des aimants

La disposition des aimants de néodyme est une étape cruciale. Cela dit, nous avons utilisé la théorie qu'avec trois aimants, placés côte à côte, de façon à ce que l'orientation de deux aimants successifs soit inverse, produisent une stabilité ainsi qu'un champ maximal (Internet 9). En plus, lors de la construction du rail linéaire fini, il était important que les pôles des aimants des bouts soient les mêmes que ceux des côtés pour but d'avoir tous les mêmes pôles à l'extérieur. La figure ci-dessous présente la configuration de ces aimants de néodyme.

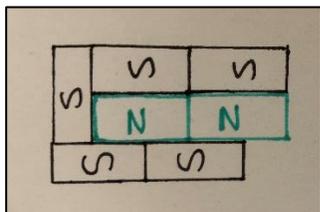


FIGURE 8. Disposition des aimants sur le rail linéaire fini.

Ceci explique la raison derrière le fait que nous avons fait des rails qui avait trois aimants de large, où l'aimant du centre avait un pôle inverse de ceux situés à ses côtés. Voici les rails qui ont été construits (voir figure 9).



FIGURE 9. Montage des rails.

5,3 Construction d'un réservoir

Pour la construction du réservoir fait pour contenir les supraconducteurs ainsi que l'azote, il faut prendre compte de la capacité isolante de celui-ci puis la légèreté de ce matériel (voir figure 11 dans l'annexe). Le cèdre est le matériel que nous avons utilisé pour créer ce petit train. En effet, celui-ci a une conductivité thermique de $0,077 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ (Internet 12).

5,4 Manipulations de l'azote liquide et du supraconducteur.

Le supraconducteur est une céramique constituée d'un mélange de Baryum de Cuivre et d'yttrium ($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$) qui est refroidi à 92 K , soit $-181 \text{ }^\circ\text{C}$ pour avoir des propriétés supraconductrices. Pour cela, il faut qu'il soit refroidi à l'aide d'azote liquide qui, elle, est à une température entre $-195,8$ et $-210 \text{ }^\circ\text{C}$, donc $77,35$ et $63,15 \text{ K}$ respectivement (Internet 10). Certaines précautions restent à prendre lors de la manipulation de l'azote, car plusieurs dangers y sont associés. Par exemple, celui-ci peut causer un risque de brûlure ainsi que de l'anoxie, qui est une diminution de la quantité de dioxygène. Ceci est la raison pourquoi il faut porter un masque protecteur, un sarot, des gants isolants puis avoir un espace ventilé.

RÉSULTATS

Le tableau présente la conservation de la vitesse d'une pastille supraconductrice ou d'un train supraconducteur sur un rail ovale et linéaire. C'est en filmant l'expérimentation qu'on a pu faire des tableaux de la distance en fonction du temps ce qui nous a permis de déterminer la vitesse du supraconducteur à différents instants. Avec ces résultats, une comparaison des vitesses initiales et finales a pu être établie.

Tableau 1. Vitesse initiale et finale lors de différents essais.

Essais	Vitesse initiale (m/s)	Vitesse finale (m/s)
Pastille rail ovale	$0,6 \pm 0,3$	$0,4 \pm 0,1$
Pastille rail linéaire	$0,29 \pm 0,09$	$0,27 \pm 0,05$
Train rail ovale	$0,6 \pm 0,3$	$0,7 \pm 0,3$
Train rail ovale	$0,462 \pm 0,3$	$0,4 \pm 0,2$
Train rail ovale	$0,30 \pm 0,08$	$0,21 \pm 0,09$

Pour vérifier la 2^e hypothèse, le graphique suivant (figure 10) montre la relation entre la masse qui était ajoutée au supraconducteur et la hauteur du supraconducteur (Voir tableau 4 en annexe pour les données).

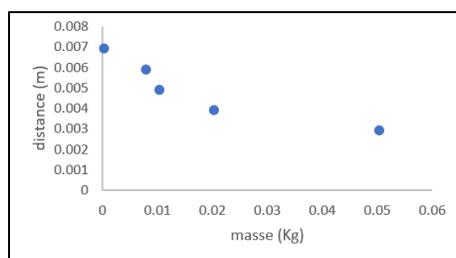


FIGURE 10. Graphique de la distance en fonction de la masse.

Pour vérifier la 3^e hypothèse, le supraconducteur était lancé sur le rail linéaire à des vitesses différentes. Le but était de savoir quelle était la vitesse maximale du supraconducteur qui lui permettait de faire un aller-retour sans dérailler. Le tableau suivant montre les résultats obtenus afin d'obtenir une approximation de la vitesse critique pour un rail droit de longueur finie. Donc, il contient des vitesses où il y a un déraillement ainsi que d'autres où le supraconducteur est revenu sans tomber du rail. Pour ces données, des vidéos de l'expérimentation ont été analysées.

Tableau 2. Vitesse critique du supraconducteur sur un rail d'une longueur finie.

Vitesse (m/s)	Déraillement
$0,4 \pm 0,2$	Oui
$0,39 \pm 0,08$	Oui
$0,3 \pm 0,1$	Oui
$0,242 \pm 0,007$	Non
$0,17 \pm 0,04$	Non
$0,15 \pm 0,03$	Non

Dans la même lignée que l'hypothèse précédente, une hypothèse a été ajoutée en raison des résultats intéressants obtenus lors de l'expérimentation soit, le train à lévitation magnétique, sur une piste circulaire, ne déraile pas de celle-ci tant que sa vitesse est inférieure à une certaine vitesse critique. Le tableau suivant représente les données obtenues pour approximer cette vitesse critique.

Tableau 3. Vitesse critique du supraconducteur sur un rail ovale.

Vitesse (m/s)	Déraillement
1,4 ± 0,6	Oui
1,2 ± 0,6	Oui
1,0 ± 0,4	Oui
0,8 ± 0,3	Non
0,5 ± 0,3	Non
0,2 ± 0,2	Non

De surcroît, à l'aide de l'expérimentation, visuellement il a été possible de vérifier si le supraconducteur tombe instantanément sur le rail après son refroidissement. Voici une photo illustrant ce phénomène.



FIGURE 11. Supraconducteur lors de sa perte de l'effet de lévitation.

DISCUSSION

Il a été plus difficile d'utiliser le train que le supraconducteur seulement pour confirmer ou infirmer nos hypothèses. En effet, un supraconducteur était plus fort que l'autre, ce qui faisait en sorte que le train n'était pas tout à fait égal par rapport à sa hauteur. Le derrière du train était plus bas que le devant, alors la pastille seulement a été utilisée pour faire la plupart des expérimentations. Comme le temps était restreint, car le supraconducteur refroidissait plus rapidement lorsqu'il n'était pas dans le réservoir d'azote liquide (train), une contrainte a été émise lors de la prise des

résultats. Puisque la pastille supraconductrice devenait blanche lorsqu'elle réchauffait et tombait par la suite, la contrainte était que les mesures devaient être prises avant que ce phénomène se produise.

Comme le prévoyait la première hypothèse, la pastille supraconductrice conserve la même vitesse tant que celle-ci est dans les airs (voir tableau 1), ce qui était prévisible en raison qu'il n'y avait aucun frottement pour la faire ralentir (conservation de l'énergie). Effectivement, les résultats obtenus lors de l'expérimentation sur le rail ovale ainsi que sur le rail linéaire concordent.

Pour ce qui est de la deuxième hypothèse, soit la hauteur du supraconducteur par rapport au rail est inversement proportionnel à sa masse a été confirmé. En effet, la courbe du graphique de la distance en fonction de la masse présenté dans la partie résultat montre bien cette proportionnalité inverse. Au départ, l'ajout de masse fait grandement diminuer la distance entre la pastille supraconductrice et le rail. Ensuite, à partir d'une certaine hauteur, il n'y a presque plus d'effet. Cela s'explique par les lignes de champ du supraconducteur qui se rapproche de plus en plus lorsque la masse augmente, puis à un certain moment, ces lignes de champ magnétique ne peuvent plus se rapprocher davantage. Cela dû au fait que la densité de ces lignes est très élevée, ce qui fait en sorte que la force magnétique est très grande proche de l'aimant.

Comme la troisième hypothèse le disait, la pastille supraconductrice envoyée sur un rail de longueur finie, fait des mouvements d'aller-retour sans tomber du rail lorsque sa vitesse est inférieure à une certaine vitesse critique (voir tableau 2). Ce résultat était aussi prévisible puisque les aimants avaient été placés de façon à ce que l'aimant du bout soit du même pôle que les rangées d'aimants extérieurs du rail (voir figure 8). Ceci avait

comme effet de garder le supraconducteur sur le rail (voir section 5,2). Suite aux résultats obtenus (voir tableau 2), il est possible d'affirmer que la vitesse critique se situe entre $0,242 \pm 0,007$ et $0,3 \pm 0,1$ m/s.

La dernière hypothèse qui propose que le supraconducteur tombe instantanément sur le rail suite la perte de son effet supraconducteur a été infirmée. Effectivement, lorsque la pastille refroidissait, elle s'abaisse progressivement sur le rail pour qu'un côté touche le rail et puis l'autre. Ceci s'explique par le fait que certaines parties de la pastille se refroidissent avant d'autres. L'extérieur de la pastille, exposée à l'air, se réchauffe plus rapidement et c'est à ce moment que la diminution de l'effet supraconducteur se fait sentir et que la pastille descend progressivement pour finalement se réchauffer totalement et tomber.

Lors de l'expérimentation, il a été possible d'émettre une cinquième hypothèse, dans la même lignée que la troisième hypothèse. Cette nouvelle hypothèse propose que le train à lévitation magnétique, sur une piste circulaire, ne déraile pas de celle-ci tant que sa vitesse est inférieure à une certaine vitesse critique. Encore une fois, à l'aide du tableau 3, il est possible de conclure que la vitesse critique pour un rail ovale est entre $0,8 \pm 0,3$ et $1,0 \pm 0,4$ m/s.

CONCLUSION

Les différentes expérimentations avec les pastilles supraconductrices ont permis de confirmer et d'infirmar les hypothèses qui avaient été émises. En effet, les trois premières hypothèses qui traitait sur la conservation de la vitesse de la pastille supraconductrice, la proportionnalité de la masse de celle-ci et de sa hauteur par rapport au rail ainsi que les allers-retours du supraconducteur sur un rail fini ont été

confirmé. Ensuite, la quatrième hypothèse émise sur la chute instantanée de la pastille sur le rail lorsque l'effet supraconducteur finit a été infirmée.

Ces résultats peuvent, cependant, avoir été influencés par le fait que le supraconducteur se réchauffait rapidement. Malgré la contrainte que nous avons établie, les résultats ont assurément été influencés par ce phénomène.

De plus, lors de la prise de mesure, l'imprécision de celles-ci peut avoir eu un effet sur la précision de nos résultats.

PERSPECTIVES D'AVENIR

L'utilisation de supraconducteurs ayant des forces supraconductrices identiques permet à la hauteur du train de rester égale à l'avant comme à l'arrière. Or, en faisant les expérimentations avec le train, il serait possible d'effectuer les expériences plus longtemps en raison du réservoir d'azote qui refroidit les pastilles en permanence et ainsi, avoir des résultats plus fiables. De plus, si l'expérience était à recommencer, il serait intéressant d'utiliser un train fait à l'aide d'une imprimante 3D (voir figure 12 en annexe) pour s'assurer de la plus grande légèreté possible du matériel et pour éviter les fuites d'azote liquide.

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, il n'aurait pas été possible de réaliser ce projet sans l'aide de plusieurs institutions, soit l'université de Sherbrooke, le CEC de Chibougamau ainsi que le cégep de Granby pour leurs conseils et prêt d'équipements. Un gros merci à Jessica Maltais, technicienne en laboratoire, pour avoir cru en notre projet au tout début ainsi que pour nous avoir aidé et accompagné tout au long de celui-ci. Ensuite, nous aimerions remercier Jean-Norbert Fournier, tuteur de ce projet et professeur de physique, pour son

aide dans la rédaction de cet article ainsi que dans la compréhension des notions de physique. Merci à Steve Gamache, titulaire du cours pour ses bons conseils ainsi que de nous avoir guidés dans l'élaboration et le respect de l'échéancier de ce projet. Finalement nous voulons remercier tous ceux qui nous ont fait un prêt de leur téléphone cellulaire lors de l'expérimentation

BIBLIOGRAPHIE

Internet 1, Maglev ; principe de fonctionnement, repéré le 19 février 2018 à

<https://trainalevitationmagnetique.wordpress.com/principes-de-fonctionnement/>

Internet 2, Ressource naturel Canada, Énergie et les émissions de gaz à effet de serre (GES). (2018, 1 avril). Repéré le 19 février à <https://www.rncan.gc.ca/energie/faits/energie-ges/20074>

Internet 3, Maglev, Le futur train à sustentation magnétique. (2017, 22 juin). Repéré le 19 février à <https://www.vivrelejapon.com/a-savoir/voyager-au-japon/maglev-train-sustentation-magnetique>

Internet 4, Émission de CO₂ des véhicules. (2018). Repéré le 20 février à <https://www.delijn.be/fr/overdelijn/organisatie/zorgzaam-ondernemen/milieu/co2-uitstoot-voertuigen.html>

Internet 5, Alloprof, L'histoire du magnétisme et de l'électromagnétisme. Repéré le 1 mai 2018 à <http://www.alloprof.qc.ca/BV/pages/s1172.aspx>

Internet 6, Champ magnétique, magnétostatique : Symétries, lignes de champ, (2017, 1 août). Repéré le 1 mai 2018 à https://fr.wikiversity.org/wiki/Champ_magnétique,_magnétostatique/Symétries,_lignes_de_champ

Internet 7, PHYSIQUE ET CHIMIE, Le champ magnétique, (2017, 18 décembre). Repéré le 1 mai 2018 à <http://webphysique.fr/champ-magnetique/> Internet 9

Internet 8, Champ magnétique, magnétostatique : Symétries, lignes de champ, (2017, 1 août). Repéré le 1 mai 2018 à https://fr.wikiversity.org/wiki/Champ_magnétique,_magnétostatique/Symétries,_lignes_de_champ

Internet 9, Dynamic-Mess, comment fonctionne un aimant?, (2014, 2 juin). Repéré le 1 mai 2018 à <http://www.dynamic-mess.com/physique/comment-fonctionne-un-aimant-et-champ-magnetique-19-108/>

Internet 10, MEGS, Fiche signalétique: Azote liquide. (2010, 6 janvier). Repéré le 13 mai à www.megs.ca/fr/Msds_f/PDF/azote-liquide_fr.PDF

Internet 11, Le Maglev, une solution d'avenir ? Repéré le 23 janvier 2018 à <http://maglevjaponais.eklablog.com/1-experience-p973366>

Internet 12, Classification de la conductivité thermique des matériaux employés dans le bâtiment. Repéré le 6 mai à <http://www.bilans-thermiques.fr/economies/conductivite-thermique-materiaux>

H. Benson, M. Lachance, M. Séguin, B. Villeneuve, B. Marcheterre., Physique 2 électricité et magnétisme, Pearson 5^e édition, 2015.

R. Lafrance, J. Parent, Physique 2 électricité et magnétisme, Chenelière éducation, 2014.

ANNEXE

Matériau	Conductivité thermique (W/m.K)	Masse volumique à 20°C (g/cm ³)
Cuivre	390	8,96
Aluminium	237	2,70
Carbone	129	3,15
Caoutchouc	0,36	0,86
Polystyrène expansé	0,036	0,015
Polystyrène extrudé	0,035	0,037
ABS	0,15	1,07

FIGURE 11. Propriété thermique de certains matériaux (Internet 12).



FIGURE 12. Projet de train à l'aide d'une imprimante 3D (Internet 11).

Tableau 4. Valeurs de la masse et de la distance pour le graphique de la figure 8.

Masse (kg)	Distance (m)
0,0000 ± 0,0001	0,007 ± 0,002
0,0077 ± 0,0001	0,006 ± 0,002
0,0100 ± 0,0001	0,005 ± 0,002
0,0200 ± 0,0001	0,004 ± 0,002
0,0500 ± 0,0001	0,003 ± 0,002