

Travaux Personnels Encadrés

Courjaud Anaël
Dutrey Adrien
Lanternier Étienne

Physique



Sciences de
l'ingénieur

Catégorie: Transports et transferts:
Est-il possible de rendre notre trottinette électrique
entièrement autonome grâce à un frein électromagnétique
régénératif?

Sommaire :

I/ Introduction

II/ Freins électromagnétiques

1) Notions de champs magnétiques puis électromagnétisme :

- a. Champs scalaires
- b. Champs vectoriels
- c. Champs magnétiques
- d. Aimants permanents
- e. Électro-aimants

2) Fonctionnement d'un moteur :

- a. Moteur Brushed
- b. Fonctionnement du moteur Brushed
- c. Moteur brushless

3) Freins électromagnétiques :

- a. Principe de freins électromagnétiques
- b. Expériences
- c. Autres utilisation des freins électromagnétiques

4) Approfondissement par l'expérience : Fabrication d'un moteur maison

- a. Force de Lorentz
- b. Force de Laplace
Mise en évidence par expérience de la force de laplace
- c. Amélioration technique de notre moteur

III/ Les pertes et le potentiel de récupération

1) Les pertes :

a) Calcul des pertes internes :

- i) Rendement des câbles.
- ii) Rendement de l'ampèremètre.
- iii) Rendement du moteur.
- iv) Rendement pièces mécanique .

b) Calcul des pertes externes :

- v) Résistance de l'air .
- vi) Résistance au roulement .

c) Application des pertes calculées :

- vii) Détermination de la puissance utile (P_{utile}).
- viii) Détermination des puissances des résistances externes et application sur la trottinette électrique.
- ix) Conclusion partielle.

2) Le potentiel de récupération :

- a) L'énergie cinétique.
- b) Estimation de l'énergie récupérable par rapport à l'énergie consommée

IV/ Conclusion

V/ Sources

I/ Introduction

Les freins électromagnétiques sont de plus en plus utilisés comme par exemple dans les voitures électriques les plus récentes afin de récupérer de l'énergie et d'allonger l'autonomie de la voiture.

Mais comment peut-on récupérer de l'énergie grâce à un simple moteur brushed, et finalement qu'est-ce simplement qu'un moteur brushed? Nous verrons cela dans une première partie ainsi que les notions d'aimants permanents et d'électro-aimant notamment. Tout cela accompagné de certaines notions d'électromagnétisme.

Ensuite, nous verrons qu'une trottinette électrique, comme la quasi-totalité des machines électriques, est victime de pertes d'énergie. En effet, il y a notamment des pertes d'énergie dues à l'air ou encore au roulement par exemple. Nous verrons aussi dans cette deuxième partie l'énergie récupérée par le frein régénératif.

Ainsi, si on trouve que le gain est supérieur ou égal aux pertes, on pourra affirmer qu'il est possible de rendre notre trottinette totalement autonome en énergie.

Cependant, si notre recherche indique le contraire, nous serons obligé de la recharger plus ou moins souvent en fonction de la différence entre les pertes et le gain d'énergie.

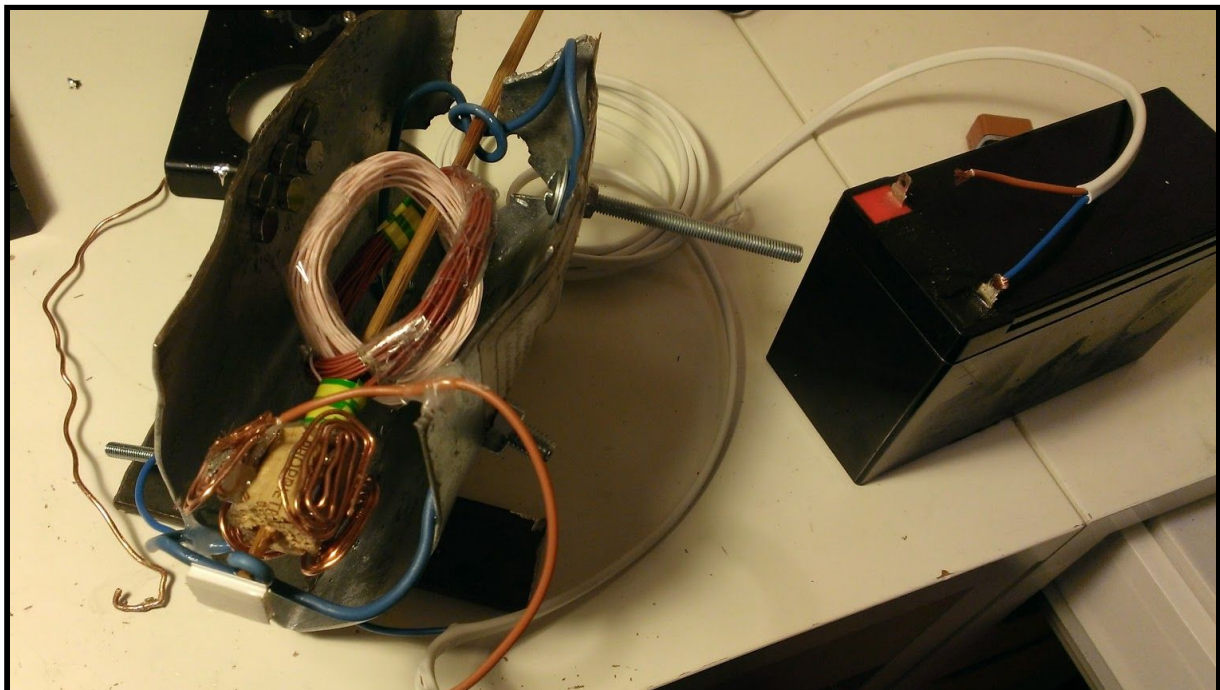


Pour pouvoir travailler sur notre problématique, il nous fallait bien un objet concret pour pouvoir faire des mesures, des expériences et être au courant de chacune de ses caractéristiques.

Nous avons donc construit une trottinette électrique à base de matériaux récupérés pour faire des économies et lutter contre le gaspillage. Exemple: le cadre est un bout de vieux portail, les roues proviennent d'un vieux vélo d'enfant récupéré et la plupart des bouts de ferraille additionnels sont des chutes de métaux gentiment données par le propriétaire d'une serrurerie à Pessac.

Cependant, le moteur, les batteries ainsi que le dérailleur et des gaines de frein ont été commandés sur internet.

Le temps de construction a duré environ deux mois avec des outils de l'atelier du père d'Anaël et nous sommes très fiers du résultat. Sa vitesse de pointe est d'environ 22 km/h et elle peut tenir environ une demi-heure voire plus (difficile à déterminer) à ce rythme, il y a une béquille, cependant elle est très lourde (environ 35 kg) et peu maniable. Nous avons appris de très nombreuses choses durant la construction, notamment l'art de la soudure à arc électrique. Nous avons complété avec plusieurs expérience également bricolées (notamment le moteur fait maison) pour mettre en évidence les bases de l'électromagnétisme ou réaliser certains calculs.



II/ Freins Électromagnétiques

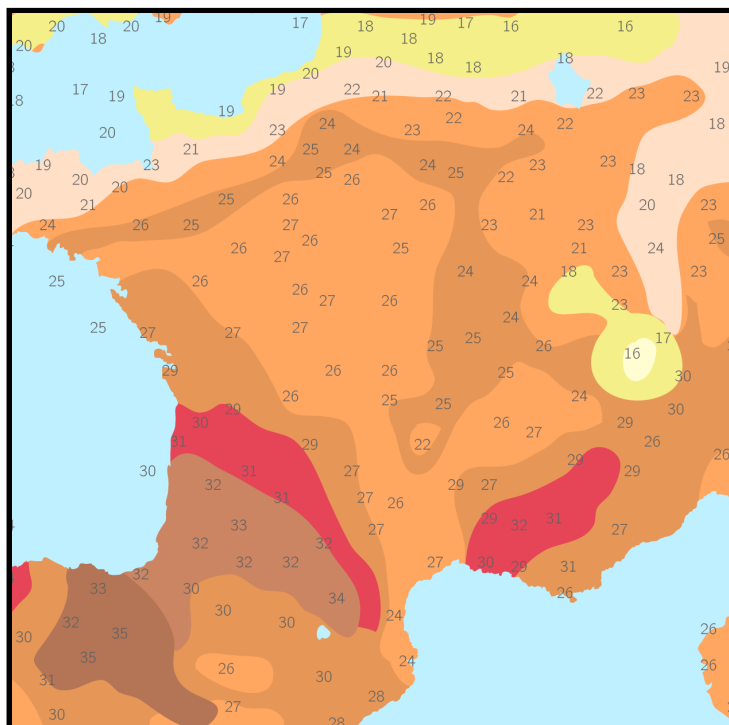
1) Notions de Champs magnétiques

Il existe plusieurs types de champs. On les utilise souvent dans la vie courante. Par exemple, la météo utilise énormément de champs pour illustrer ses propos. Elle utilise aussi bien les champs scalaires que vectoriels.

a) Champs scalaires :

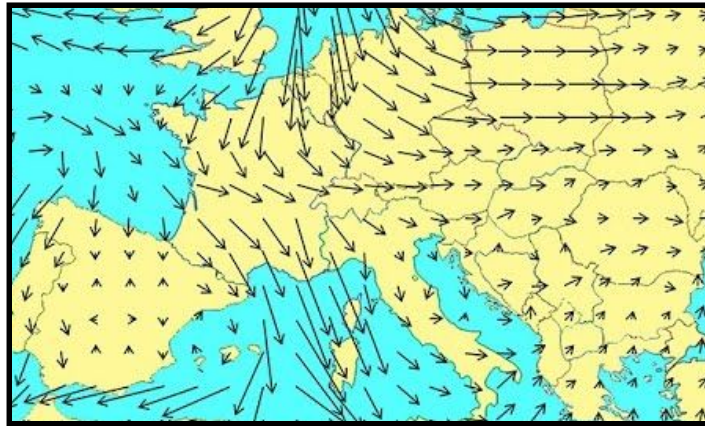
Un champ scalaire est une fonction qui associe plusieurs variables aux différents points de l'espace. Par exemple, on peut y retrouver des figurés avec une légende qui renvoient à des nombres (ou à un intervalle de nombres) ou tout simplement directement des nombres.

Ici, on peut voir qu'il y a un figuré de couleur qui représente un nombre et des nombres directement écrits.



b) Champs vectoriels :

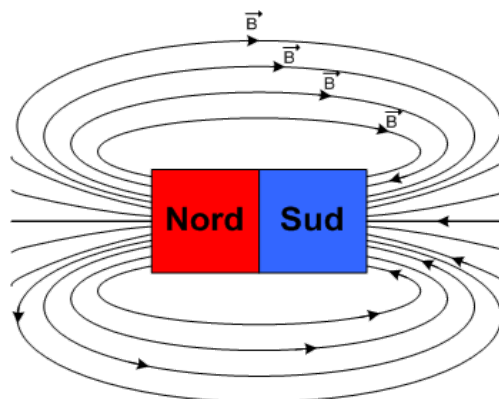
Un champs vectoriel est une fonction qui associe à chaque points de l'espace un vecteur. Il en existe de différentes utilisations aussi, mais on peut encore le retrouver dans le domaine météorologique.



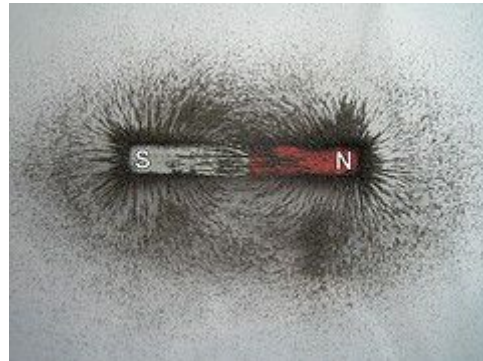
On remarque ici des flèches qui représentent des vecteurs décrivant la vitesse du vent. Plus la flèche est longue, plus le mouvement sera fort et rapide. On retrouve aussi ce type de représentation dans les champs magnétiques.

c) Champs magnétiques :

Les champs magnétiques, qui sont ceux qui nous intéressent, peuvent être créés par un aimant permanent, un électro-aimant, un simple courant électrique dans un fil, etc... On peut les représenter par des lignes qui sortent communément de l'aimant par le pôle Nord avant d'y rentrer à nouveau par le pôle Sud. Chaque ligne est une boucle fermée qu'on oriente par convention dans le sens Nord-Sud à l'extérieur de l'aimant (et Sud-Nord à l'intérieur) .



On peut mettre en évidence ces lignes de champ magnétiques en saupoudrant de la limaille de fer sur une vitre horizontale sous laquelle on a placé un aimant. La limaille s'organise en suivant ces lignes de champ comme sur l'image ci-dessous.

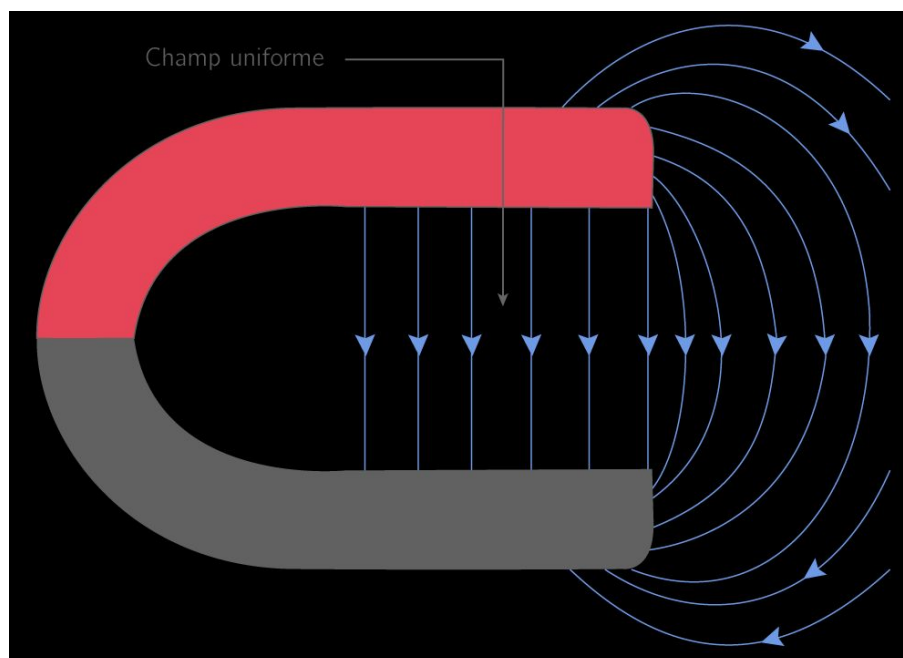


Si on zoome beaucoup à proximité de l'aimant, les lignes de champ y sont quasiment rectilignes et parallèles. Le champ magnétique peut y être considéré comme uniforme et décrit par un vecteur \vec{B}

d) Aimants permanents

Pourquoi les aimants ont-ils cette capacité d'attraction ?

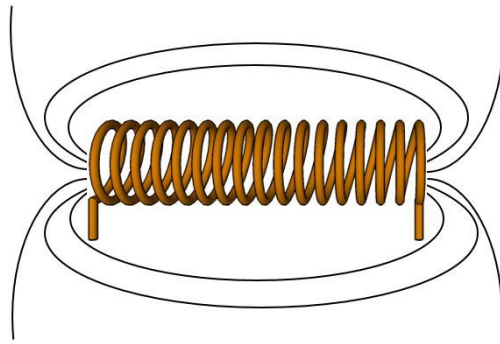
Il existe plusieurs types d'aimants (au néodyme, magnétite, etc...) et de formes différentes (en U, en cubes, en bâtonnets, en piécettes, etc...). Le point commun entre ces aimants est que les atomes qui composent les différentes matières d'aimants sont tous orientés d'une certaine façon, de sorte que les cortèges d'électrons des atomes se mettent à tourner dans le même sens, en rond autour de l'atome, au lieu de chacun dans un sens aléatoire. Ces manèges de cortège d'électrons forment ce que l'on pourrait appeler des "mini-bobines" toutes orientées dans le même sens Nord/Sud, toutes les énergies magnétiques s'additionnant jusqu'à donner la puissance globale de l'aimant entier.



e) Électro-aimants :

- Qu'est-ce qu'un électro-aimant?

Un électro-aimant est composé d'une bobine de fil de cuivre enroulée autour d'un coeur magnétique. Cela s'appelle un solénoïde.



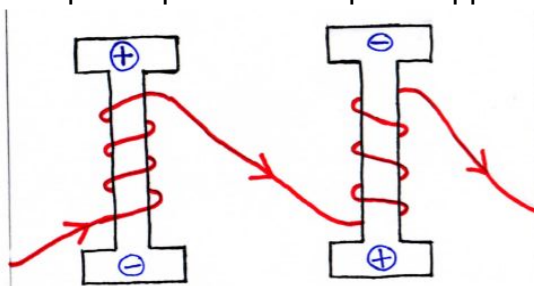
Il crée lui aussi un champs électromagnétique lorsque l'on fait passer un courant électrique dans le fil de cuivre. On peut le comparer à la cause du caractère magnétique des aimants permanents mais à plus grande échelle. Des électrons tournent en rond et créent un champ magnétique.

En fait, de manière générale, des électrons qui se déplacent dans un fil créent un champ électromagnétique. Deux câbles parallèles avec chacun un courant se déplaçant dans le même sens vont s'attirer . au contraire si les deux courants sont de sens inverse, alors ils vont se repousser. Seulement ces forces resteront très faibles car pas optimisées. c'est pour cela que l'on a créé des bobines pour faire passer plus de courant d'un coup (fois le nombre de tours) et la forme ronde fait en sorte que l'électroaimant aie une orientation Nord/Sud bien précise.

- Quel est l'intérêt d'un tel montage?

Les électro-aimants ont des propriétés très intéressantes. Premièrement, selon le sens du courant, on peut inverser les pôles de l'aimant. C'est très pratique pour les moteurs notamment. De plus, selon le sens d'enroulement de la bobine de fil de cuivre, on peut aussi inverser les pôles. Cela ne permet pas d'inverser les pôles rapidement, mais de faire une chaîne de solénoïdes avec le même fil de cuivre qui ont pourtant des pôles opposés.

Nous avons sur internet, mais ne trouvé donc avons préféré main. Tous les pas forcément un coeur cette forme.



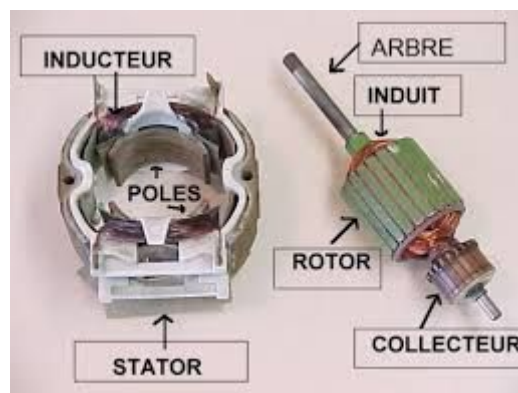
cherché ce schéma l'avons pas le faire à la électro-aimant n'ont magnétique de

2) Fonctionnement d'un moteur

a) moteur Brushed (à balais) :

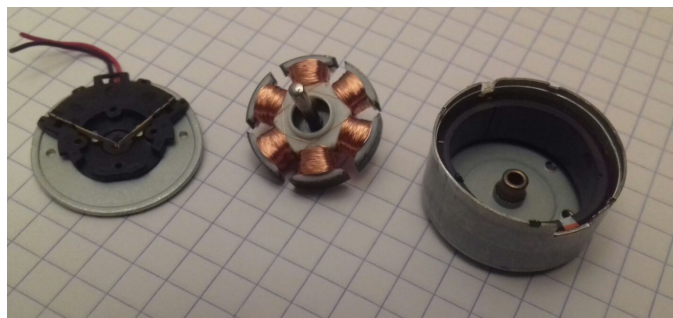
Pour notre trottinette, nous avons utilisé un moteur Brushed qui est le moteur le plus utilisé en courant continu. Même s'il existe énormément de types de moteurs différents (cf c. p-12).

Un moteur brushed est constitué de deux parties. Le stator et le rotor. Comme leur noms l'indique, le stator est fixe alors que le rotor, lui est en rotation. Il y a des aimants fixes sur le stator, et des électro-aimants sur le rotor.



Les trois éléments les plus importants d'un moteur Brushed sont:

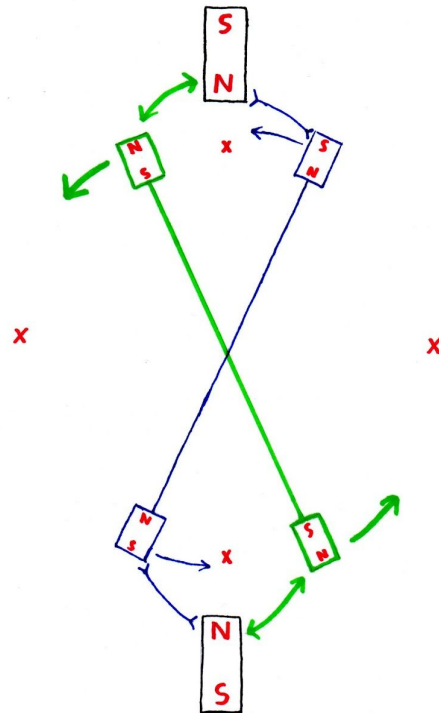
- Les électro-aimants (au milieu de la photo ci-dessous)
- Les aimants fixes (à droite sur la photo ci-dessous)
- Les balais ou charbons(à gauche sur la photo ci-dessous)



Nous avons ouvert un moteur Brushed afin de comprendre son fonctionnement.

Pour comprendre le fonctionnement d'un moteur, il faut tout d'abord savoir les phénomènes de répulsion et d'attraction dans les forces électro-magnétiques. Deux pôles identiques se repoussent et deux pôles opposés s'attirent.

b) Fonctionnement du moteur Brushed :

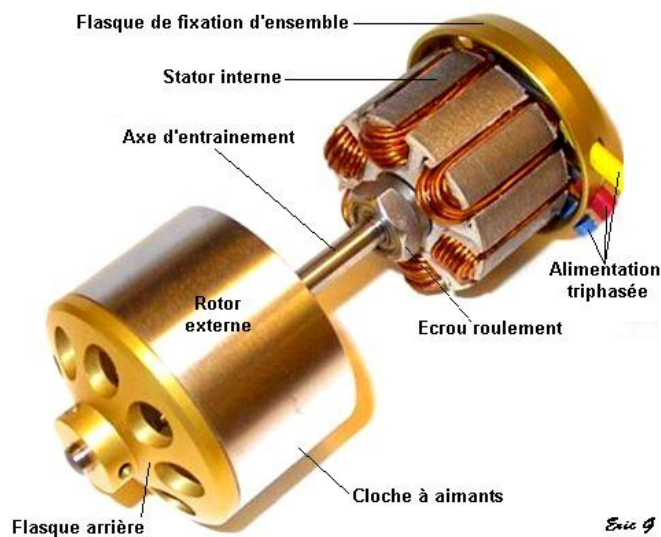


Nous avons encore une fois cherché un schéma simplifié du fonctionnement d'un moteur, mais nous avons préféré le faire nous mêmes car cela nous permettait de nous approprier le fonctionnement du moteur et de le comprendre vraiment.

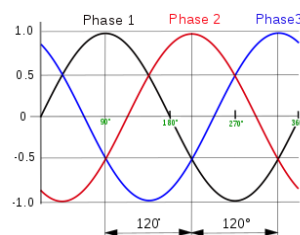
Premièrement, il faut savoir que ce schéma n'est qu'un schéma simplifié et que sur la plupart des moteurs Brushed, il y a plus de deux aimants fixes et deux électro-aimants (cf a). Sur ce schéma, la partie verte et la partie bleue représentent la même chose à deux moments différents. Partons du principe que la partie bleue est notre état initial. Les pôles les plus proches de l'aimant et de l'électro-aimants sont opposés. L'électro-aimant est donc attiré par l'aimant, et cela engendre un mouvement. Les croix rouges "X" représentent les endroits où il faudrait inverser le courant dans les solénoïdes afin de conserver la rotation. En effet, dans la partie verte (soit un peu après la partie bleue), on remarque que le courant a été échangé et que les pôles se sont inversés. Les électro-aimants et les aimants se repoussent donc et la rotation est conservée. En échangeant le courant des solénoïdes à chaque X , la rotation ne s'arrête jamais. Il y a donc une synchronisation à effectuer afin de perdre le moins d'énergie rotative possible.

c) Moteurs Brushless :

Cependant, même si nous avons utilisé pour construire notre trottinette un moteur Brushed, il existe une multitude d'autres types de moteurs. La principale différence entre les moteurs Brushed et les moteurs Brushless, est la présence ou non de balais. Ces balais servent à alimenter les solénoïdes en énergie électrique positive ou négative. En effet, il serait impossible de les relier à des fils sachant que ces solénoïdes sont en rotation la plupart du temps. Il s'agit de petites tiges de métal fin, qui viennent frotter contre les solénoïdes afin de les alimenter. Cependant, d'autres moteurs fonctionnent sans balais. Il s'agit des moteurs brushless (en anglais : sans balais). Pour ces moteurs, même si les solénoïdes sont à l'intérieur du moteur, ils sont sur le stator. C'est les aimants sur l'extérieur qui tournent en entraînant un axe. Il est alors beaucoup plus simple d'alimenter les solénoïdes. Ces moteurs sont souvent plus puissants que les moteurs Brushed. Les balais s'usent aussi assez facilement, il est donc plus simple d'utiliser un moteur Brushless dans la plupart des cas. Il existe aussi des différences entre les moteurs synchrones, et asynchrones notamment.



Ici, on peut voir que le rotor est effectivement externe et que les solénoïdes sont effectivement placés sur le stator de ce moteur. Finalement, nous pouvons observer que l'alimentation est en triphasé, ce qui permet en envoyant un courant alternatif d'avoir toujours du courant dans les bobi



3) Freins électromagnétiques

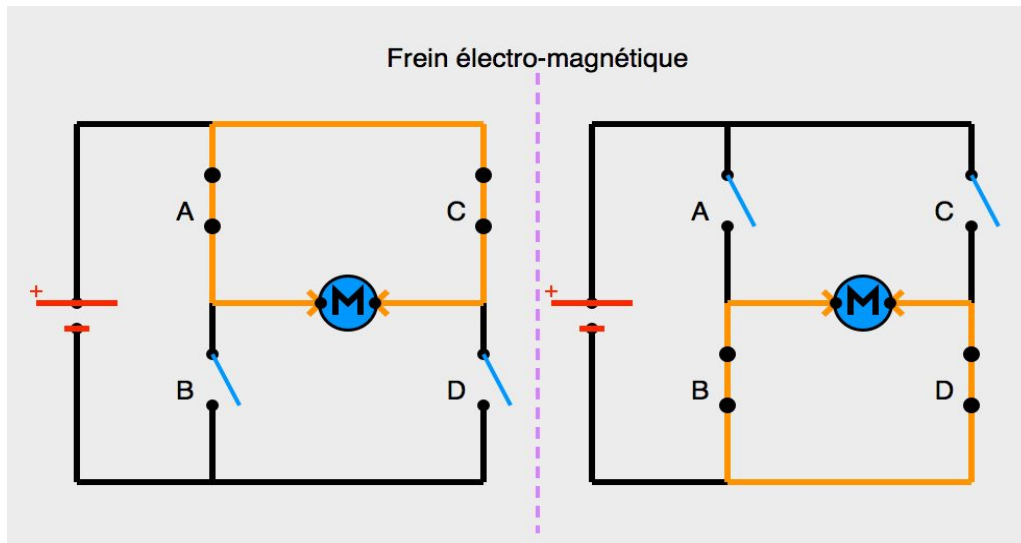
a) Principe de frein électromagnétique

Il y a plusieurs types de freins électromagnétiques dans un moteur (peut être traduit par frein moteur dans un moteur électrique) :

Lorsqu'un moteur est en roue libre (c'est-à-dire qu'il tourne à cause de sa force d'inertie mais pas à cause du courant), il génère un courant.

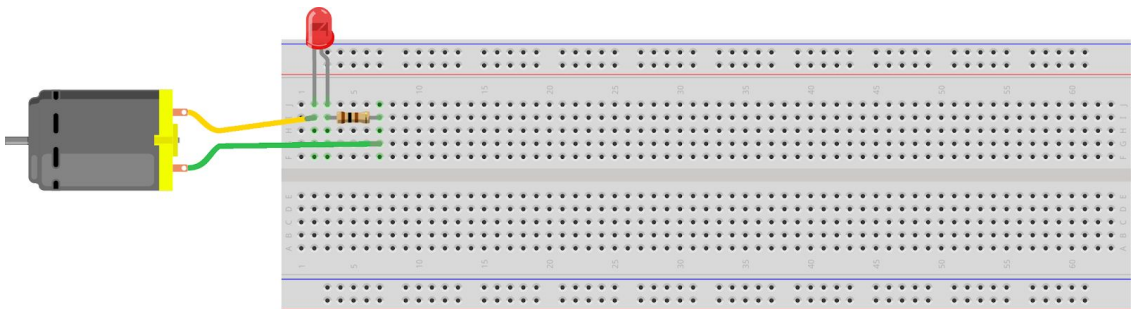
-Les freins électromagnétiques régénératifs: Le courant généré est utilisé pour recharger les batteries généralement par l'intermédiaire de certains branchements et de condensateurs ou transformateurs (mais on peut aussi faire sans mais ça sera moins efficace). En effet un moteur génère du courant grâce à son inertie ou l'inertie du véhicule si il est branché en pignon fixe (pas le cas de notre trottinette, en roue libre) mais ce courant n'a pas d'ampérage si le moteur est branché à rien et n'est freiné que par des petits frottements internes. Cependant il crée quand même un certain voltage à ses bornes mais pas d'ampérage car pas beaucoup de résistance. Par contre, dès que on le branche à des lampes ou des batteries par exemple, il va se mettre à se faire freiner pour créer de la puissance pour alimenter ces objets en énergie voir expérience où la diode s'allume dans clip vidéo.

-Les freins électromagnétiques non-régénératifs: Le courant généré est utilisé pour alimenter le moteur pour qu'il tourne dans le sens inverse au sens de son inertie. Le moteur s'envoie son propre courant à l'envers ! Ça permet de contrôler l'arrêt du moteur plutôt que de le laisser en roue libre. On peut réaliser un tel circuit en branchant notamment en "pont en H" avec des interrupteurs (transistors MOSFET). Cependant, plus la rotation est lente, moins le frein est efficace car moins d'énergie est créée pour aller à l'encontre. Cependant un tel freinage non régulé par les constructeurs reste un freinage extrêmement brutal (voir vidéo mise en évidence d'un type de frein électromagnétique. Il est donc très compliqué d'arrêter complètement un véhicule



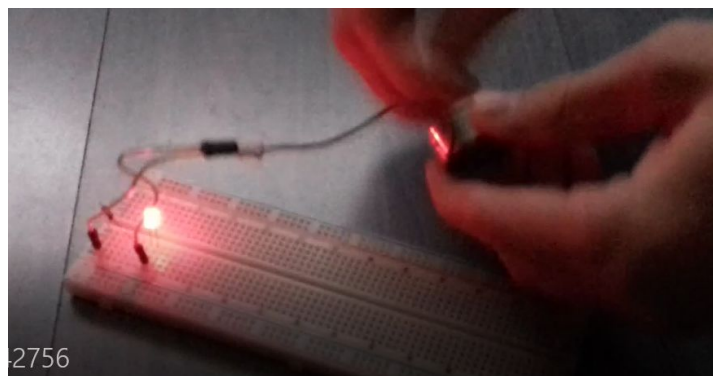
b) Expérience :

Nous avons fait l'expérience de brancher une diode sur un moteur Brushless grâce à une plaque de dérivation sans soudure.



fritzing

Nous avons réalisé ce schéma à l'aide d'un logiciel appelé fritzing. Cela permet d'utiliser une plaque de dérivation sans soudure sur l'ordinateur et de faire des schémas.



Voici une photo de l'expérience que nous avons réalisé.

En tournant l'axe du moteur à la main, la diode s'allume. Cependant, pour ne pas la griller, on est obligés de rajouter une résistance.

c) Autres utilisations de freins électromagnétiques :

Dans notre cas, nous étudions les freins électromagnétiques dans les trottinettes électriques, mais ils sont utilisés dans plusieurs cas tel que par exemple dans les voitures ou encore dans les camions.



En effet, pour les voitures de la marque Tesla, dont le patron est Elon Musk (ingénieur réputé mondialement), l'énergie des batteries est récupérée grâce à ces freins électromagnétiques régénératifs.

Il existe aussi les freins Telma, ces freins ne sont pas régénératifs et utilisent les courants de Foucault mais permettent à certains camions de freiner sans que les freins s'usent. C'est très pratique car les freins des camions s'usent et surchauffent très rapidement (encore plus que pour les autres véhicules) lorsqu'ils sont dans une descente à cause de leur poids.

Il existe également d'autres types de freins électromagnétiques mais avec un principe de fonctionnement un peu différent (pas dans des moteurs). Par exemple sur les circuits de certaines montagnes russes. Installé sur les rails, le frein ralentit ponctuellement la vitesse d'un wagon à un endroit voulu quand il passe entre un tel dispositif. Cela fonctionne également avec des champs magnétiques d'aimants permanents.



4) Approfondissement par l'expérience: fabrication d'un moteur maison

a. Force de Lorentz

Toute particule chargée électriquement traversant des lignes de champ magnétique subit une force orthogonale à sa vitesse et aux lignes de champ

Ce principe se traduit quantitativement par la formule suivante :

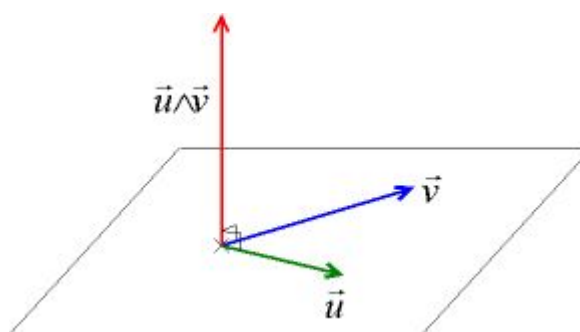
$$\vec{F}_{\text{mag}} = q\vec{v} \wedge \vec{B},$$

où le vecteur F_{mag} désigne cette force de Lorentz, q est la charge électrique de la particule en question, v est un vecteur correspondant à sa vitesse et B le vecteur décrivant le champ magnétique supposé uniforme à cet endroit.

Le \wedge est un opérateur appelé "produit vectoriel" défini par Wikipédia ci-dessous :

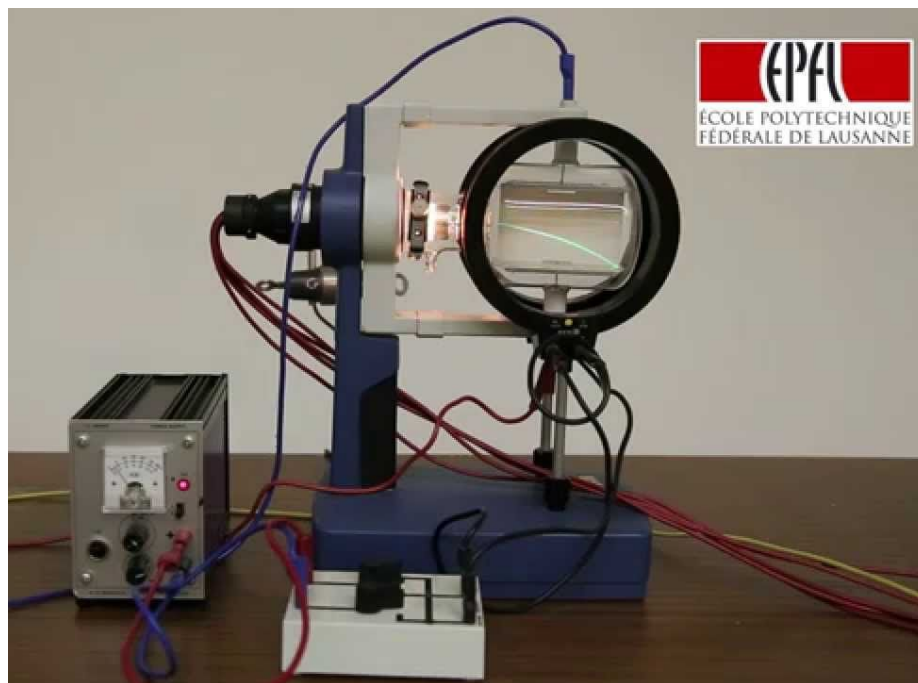
D'un point de vue géométrique, le **produit vectoriel** de deux vecteurs \vec{u} et \vec{v} de E non colinéaires se définit comme l'unique vecteur \vec{w} tel que :

- le vecteur \vec{w} est orthogonal aux deux vecteurs donnés ;
- la base $(\vec{u}, \vec{v}, \vec{w})$ est de sens direct ;
- $\|\vec{w}\| = \|\vec{u}\| \|\vec{v}\| \left| \sin(\widehat{(\vec{u}, \vec{v})}) \right|$.



Plus simplement, le vecteur F_{mag} est orthogonal aux vecteurs qv et B et son sens est donné par la règle des trois doigts de la main-droite ou du tire-bouchon : si je visse du vecteur qv vers vecteur B , le tire-bouchon va dans le sens de vecteur F_{mag}

Et la grandeur de F_{mag} en Newtons est égale à la charge q en Coulomb (positif ou négatif) multiplié par la vitesse v en secondes multiplié par l'intensité du champ magnétique B en teslas. (vrai quand les vecteurs qv et B sont orthogonaux).



Mise en évidence de la force de Lorentz. Le trait vert est un faisceau d'électrons dans une bouteille de gaz neutre à très basse pression. Les deux ronds noirs sont des bobines qui créent un champ magnétique presque uniforme dans la bouteille. On peut faire varier la courbure du faisceau en faisant varier l'alimentation des bobines.

b. Force de Laplace:

La force de Laplace est une application macroscopique de la force de Lorentz. Une tige conductrice de longueur L parcourue par un courant électrique d'intensité I plongée dans un champ magnétique (supposé uniforme) B subit une force F tel

que :

$$\vec{F} = I \times \vec{L} \wedge \vec{B}$$

(les barres sont des flèches de vecteur (probleme de logiciel d'édition))

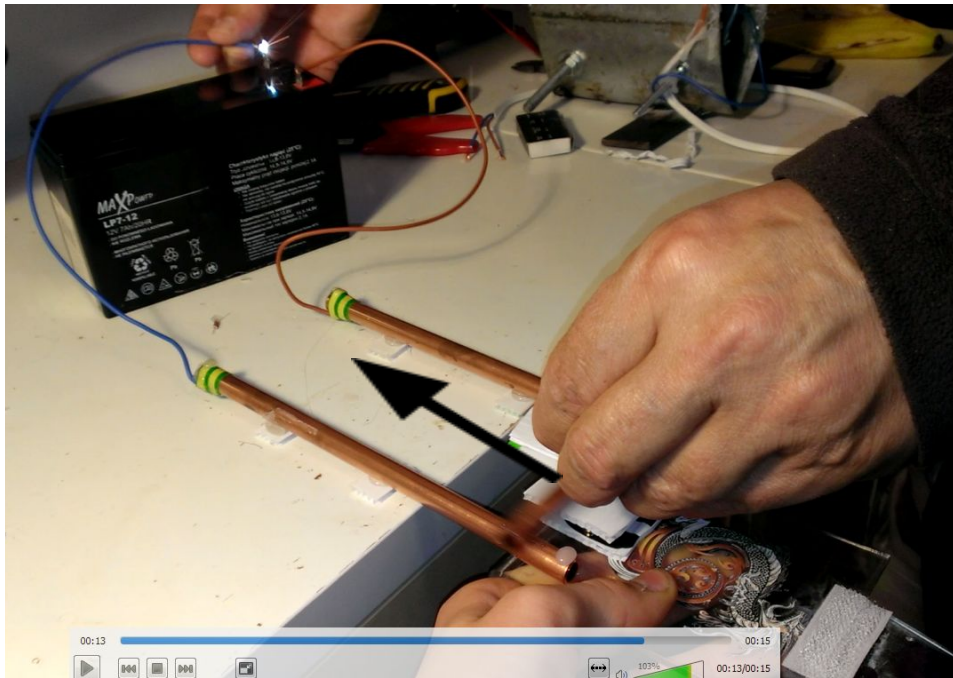
Le vecteur \vec{L} a la longueur et la direction de la tige et le sens est celui du courant qui la traverse.

La formule de Laplace se démontre à partir de la formule de Lorentz puisque le courant I sont des particules chargées électriquement qui se déplacent dans le conducteur. Elles sont donc déviées par le champ magnétique d'après la force de Lorentz mais sont retenues dans la tige ce qui une force sur la tige dans la direction de la déviation.

On a homogénéité des unités entre $q \times \vec{v}$ et $I \times \vec{L}$. En effet q est en coulomb, v est en $m * s^{-1}$ donc $q \times \vec{v}$ est en $C * m * s^{-1} = C * s^{-1} * m = A * m$.

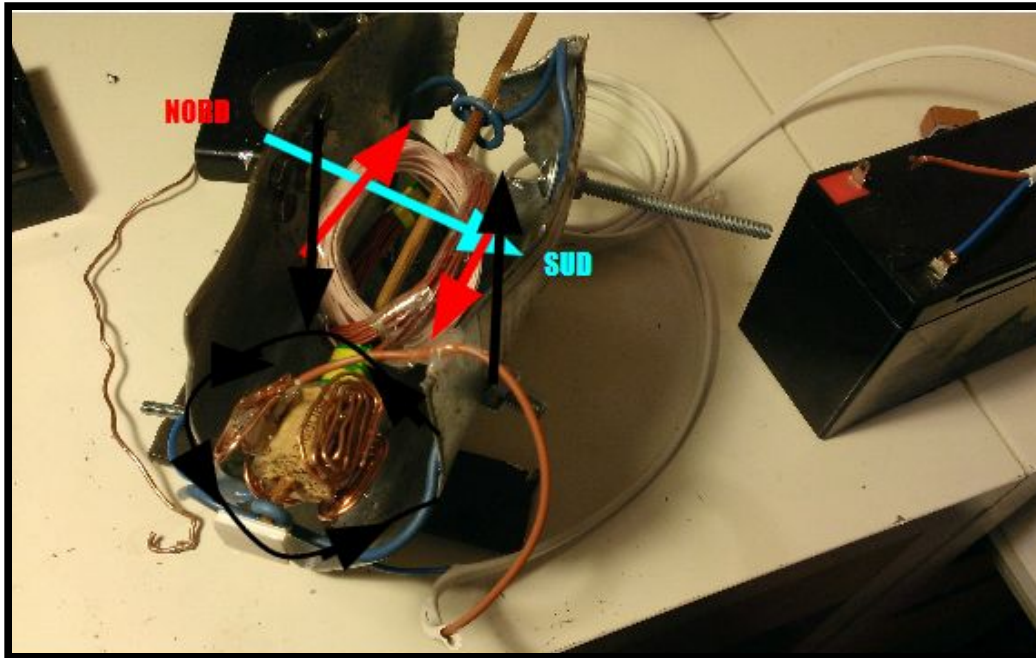
On tombe bien sur les unités de $I \times \vec{L}$.

Mise en évidence de la force de la force de Laplace



On a réalisé et filmé une expérience pour mettre en évidence la force de Laplace. Il s'agit de deux rails en cuivre non vernis parallèles et un peu en pente, de sorte à ce que quand on pose le troisième rail (en flou au niveau de la flèche rouge), il roule vers la droite de la photo avant d'être stoppé par des calles de colle chaude en bout de rail (voir vidéo). Quand la batterie (12 V) est branchée (étincelle bleu), le courant va du rouge vers le bleu/noir en passant par le rail en travers dans le sens de la flèche rouge. Ainsi, le circuit est fermé. Pour que la force de Laplace puisse agir, il faut appliquer un champ magnétique dans une direction orthogonale à la direction de la tige. On a donc placé des aimants en haut et en bas pour créer le champ magnétique à peu près uniforme (flèche bleu). Le courant passe dans le champ magnétique et est dévié vers la batterie grâce à la bonne orientation Nord/Sud du champ magnétique. Les électrons sont déviés et appliquent une force qui pousse le rail qui se met à rouler et monte la légère pente. On a bien transformé un phénomène électrique et magnétique en mouvement mécanique. C'est notre premier moteur ^^

c. Amélioration technique du notre "moteur"



Il n'y a plus une tige qui se déplace mais plein de fils dans les bobines. Il a fallu mettre en place les balais et le collecteur pour que le courant passe toujours dans le bon sens dans les pour les faire tourner. Mais c'est bien la force de Laplace qui actionne ce moteur comme avec notre rail de travers.

III/ Les Pertes et le potentiel de récupération dans la trottinette.

1) Les pertes :

Dans les prochains calculs, la puissance délivrée par les batteries reviendra souvent... Les batteries délivrent, en vitesse de croisière(vitesse max) de 6m/s, sans vent et avec Anaël en pilote, une Intensité d'environ 10 ampères sous une tension de 50 Volts environ, donc environ 500 Watts (valeurs données par des instruments de mesure(ampèremètre à aiguille et multimètre))(les batteries sont vendues comme des 12 V mais en réalité, elles sont plutôt de 12,5- 13 V et il y en a 4 en série. Donc environ 50 V)

a) Calcul des pertes internes :

i) Rendement des câbles.

*Effet joule : $P = R_c * I^2$ (en régime de courant continu)*

Avec P en Watts, exprime l'énergie consommée en passant par le matériau conducteur étudié. Cette puissance est souvent dissipée en chaleur généralement indésirable.

Rc en Ohms étant la résistance de la portion de câble étudiée.

I en Ampère étant l'intensité du courant électrique passant par la portion de câble étudiée.

Résistivité du cuivre = $17 * 10^{-9} \Omega * m$

C'est la résistivité d'un fil de 1 mètre de long sur $1m^2$ de section . Or nous avons mis du fil de cuivre de $2,5 mm^2$ de section.

Donc résistivité de nos fils = $17 * 10^{-9} / 2,5 * 10^{-6}$
 $= 6,8 * 10^{-3} \Omega * m^{-1}$

Nous avons mesuré, et le circuit fermé de la trottinette est composé de 2,1 m de fil de cuivre de 2,5mm² de section plus de fines couches de soudure en étain, qui sont pour le coup vraiment négligeable car elles sont très fines.

Donc la résistance du circuit de câble : $R_c = 1,4 * 10^{-2} \Omega$.

$$\text{(effet joule : } P = R_c * I^2 \text{)}$$

L'intensité qui passe est d'environ 10 ampères donc

$$P = (1,4 * 10^{-2}) * 10^2 = 1,4W$$

Donc quand une intensité de 10 Ampères passe dans le circuit, une puissance de 1,4 W serait dissipée en chaleur par Effet Joule.

$$\text{Rendement: } \mu_c = 1 - P/P_{bat}$$

$$\mu_c = 1 - 1,4W/500W$$

$$\mu_c = 1 \text{ (chiffres significatifs)}$$

ii) Rendement de l'ampèremètre.

Résistance de l'ampèremètre : R_a

Le vendeur de l'ampèremètre que l'on a utilisé indique une résistance très faible de $3 * 10^{-3} \Omega$

$$\text{effet joule : } P = R_a * I^2$$

le tout donnant 0,3 W, cette perte est également négligeable.

$$\text{Rendement : } \mu_a = 1 - P/P_{bat}$$

$$\mu_a = 1$$

iii) Rendement du moteur.

Rendement du moteur : μ_m

Ce moteur est haut de gamme et le vendeur indiquait un rendement supérieur ou égal à tension nominale (50 V) à 85%. C'est un moteur 750 W à train épicycloïdal commandé sur Internet.

iv) Rendement pièces mécanique .

Rendement des pièces mécaniques : μ_{reste}

chaîne, réducteur, roulement à billes dérailleur. La plupart étant de récupération et donc vieux et usé, on estime ce rendement à 95%.

b) Calcul des pertes externes :

i) Résistance de l'air .

La résistance à l'air se calcule grâce à une formule qui nous a demandé plusieurs expériences.

Force nécessaire pour vaincre la résistance de l'air : $F_{air} = \frac{1}{2} * \rho * S * C_x * v_a^2$

F_{air} s'exprime en Newtons (N).

ρ , qui est aussi une lettre grecque représente la masse volumique de l'air, elle s'exprime en kg/m^3 .

S est la surface frontale de ce que l'on étudie, ici, c'est la surface frontale de l'homme sur la trottinette plus cette dernière et elle s'exprime en m^2 .

C_x est appelé coefficient de forme aérodynamique et n'a pas d'unité.

v_a est la vitesse relative à l'air. Elle s'exprime en m/s.

Nous avons commencé par calculer la surface frontale S. Pour cela, nous devons projeter une lumière puissante sur la surface à calculer (dans le noir complet), pour pouvoir observer l'ombre à travers un grand tissu blanc, nous donnant une image en noir et blanc de la surface exacte, que nous avons pu photographier.



Nous avons ensuite utilisé le logiciel Inkscape, pour calculer l'aire de notre surface en y insérant notre photo. Le résultat affiché par le logiciel était de 0.65 m².

Après cette première expérience, nous avons calculé la masse volumique de l'air.

$$\rho = \frac{PM}{RT}$$

P = Pression de l'air (Pa)($kg * m^{-1} * s^{-2}$)
 M =Masse molaire de l'air ($kg * mol^{-1}$)
 R = Constante universelle des gaz parfaits ($8,3144621 J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$)
 T = Température (en Kelvin)

Calcul de M:

L'air est composé d'environ 79 % de N₂ et de 21% de O₂ en volume.

Masse molaire du O₂ : 32 g/mol

Masse molaire du N₂ : 28 g/mol

Calcul de la composition massique :

Pour O₂: $32 * 0,21 / (32 * 0,21 + 28 * 0,79) = 0,23$

L'air est composé d'environ 77 % de N₂ et de 23 % de O₂ en masse.

et donc :

Masse molaire de l'air = $32 * 0,23 + 28 * 0,77 = 28,92$ g/mol environ
 $= 0.02892$ kg/mol

repreons le calcul:

$$\rho = 1025 \text{ kg} * \text{m}^{-1} * \text{s}^{-2} * 0.02892 \text{ kg} * \text{mol}^{-1} / 8,3144621 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1} * 288.15 \text{ K} (=15^\circ\text{c})$$

$$\rho = 1.236 \text{ kg} * \text{m}^{-3}$$

N'ayant pas les capacités pour calculer C_x, nous avons décidé de prendre la valeur de C_x d'Usain Bolt étant égale à 1.2, d'après le site "Body Science", dans l'article [La physique du sprint: La performance de Bolt.](#)

Pour le calcul de la vitesse relative à l'air, nous avons fait une expérience, consistant à suivre la trottinette à pleine vitesse et avec les batteries chargées entièrement, avec un vélo donnant la vitesse précise grâce à un compteur.

Nous roulions à une vitesse de $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ et la vitesse du vent était négligeable.

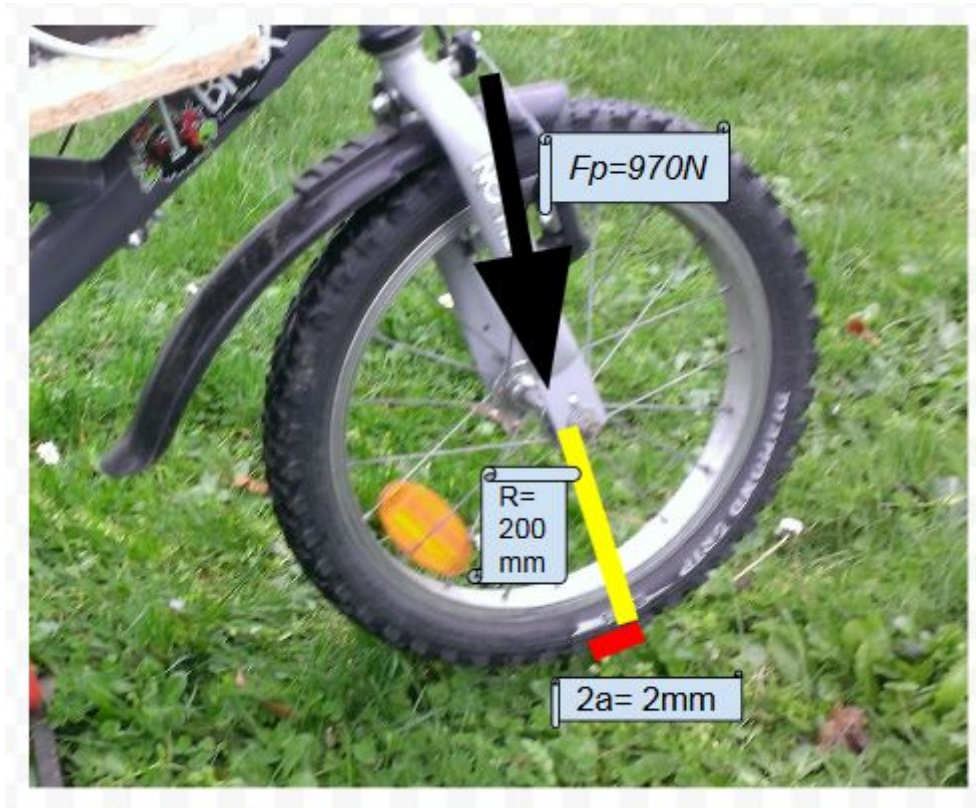
Maintenant que nous avons toutes nos valeurs, nous pouvons reprendre le calcul de résistance de l'air :

$$\begin{aligned} F_{air} &= \frac{1}{2} * \rho * S * C_x * V^2 \\ &= \frac{1}{2} * 1.236 * 0.65 * 1.2 * 6^2 \\ &= 17 \text{ N} \end{aligned}$$

La force nécessaire pour vaincre la résistance de l'air est donc d'environ 17 N avec Anaël aux commandes, sans vent et à une vitesse de $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

ii) Résistance au roulement .

Force nécessaire pour vaincre la résistance au roulement des pneumatiques sur le sol (bitume) : F_{roul}



F_p : poids de la trottinette et pilote = $97\text{kg} = 970\text{ N}$ (on fait les deux roues en une seule fois)

R : rayon de la roue = 200 mm

a : coefficient de résistance aux roulements (demi-longueur de contact au sol) = 10 mm

Le calcul F_{roul} s'exprime:

$$F_{roul} = (a/R) * F_p$$

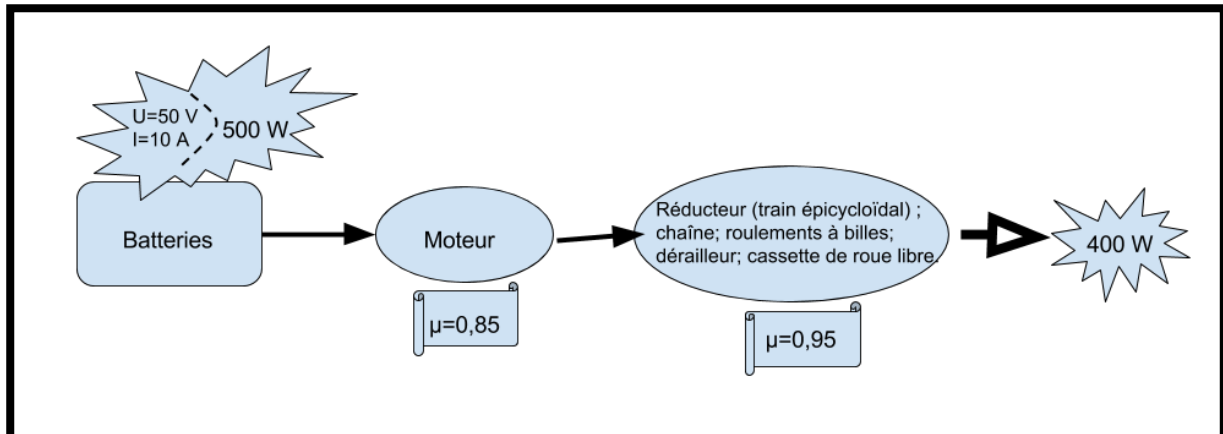
$$F_{roul} = 0,05 * 970\text{ N}$$

$$F_{roul} = 49\text{ N}$$

Donc la résistance au roulement est de 49 N avec Anaël au commandes.

c) Application des pertes calculées :

i) Détermination de la puissance utile (*Putile*).



On rappelle $\mu_m = 0,85$

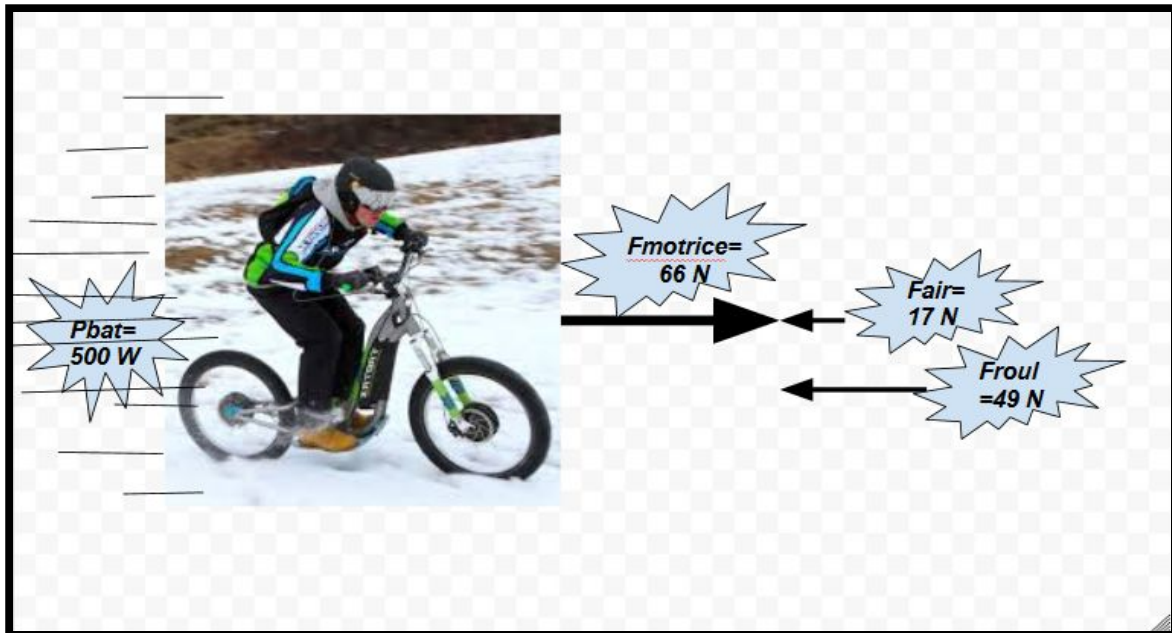
$\mu_{reste} = 0,95$

et μ_c et μ_a sont tombés égaux à 1 grâce aux chiffres significatifs. En réalité c'est une approximation mais les pertes dues à ces pièces sont négligeables.

On estime que les batteries délivrent 500 W ($U \cdot I$, valeurs données par les instruments de mesure) à la vitesse de 6m/s sans vent et avec Anaël aux commandes. Le symbole du rendement est la lettre μ . Avec, quand μ est égal à 1, aucune perte et 0 tout a été perdu. (ex: $\mu = 0,85$, 15% de l'énergie qui passe par cet élément est transformée en énergie indésirable (généralement en chaleur).

Donc après applications des rendements, on constate qu'il subsiste 400 W d'énergie mécanique utile qui propulsent la trottinette. 400 W est noté *Putile*.

ii) Détermination des puissances des résistances externes et application sur la trottinette électrique.



Dans notre cas, à ce stade, la trottinette se fait uniquement freinée par les frottements de l'air et par la résistance au roulement. Qui sont, respectivement de 17 N et 49 N.

$W = N * m * s^{-1}$. Donc les watts sont des newtons multipliés par une vitesse en $m * s^{-1}$, ici, la vitesse de la trottinette ($6\text{ m} * s^{-1}$).

on peut aussi noter $N = W / (m * s^{-1})$

Donc $F_{motrice} = P_{utile} / vitesse = 400\text{ W} / 6\text{ m} * s^{-1} = 66\text{ N}$

Donc on peut voir que la force motrice sert seulement à compenser les forces qui freinent pour entretenir la vitesse.

Pour réaliser ces calculs, nous avons respecté le nombre de chiffres significatifs donnés par nos instruments de mesures.

iii) Conclusion partielle.

On a pu voir que beaucoup d'éléments s'opposent à la progression de la trottinette que ce soit de les fils qui s'échauffent, l'interface roue/sol ou encore l'air qui forme un mur invisible à traverser à chaque instant.. Toutes ces contraintes poussent la trottinette à délivrer plus d'énergie. Ce n'est pas comme dans le vide intersidéral, ou une fois la vitesse de croisière atteinte, celle-ci n'est pas freinée et ne doit donc pas être entretenue. Ceci est le fléau de tous les constructeurs de véhicules : Il faut s'arranger pour offrir le moins de résistance possible au véhicule. Par exemple, notamment en chine, une ligne de train s'est affranchie de la résistance au roulement (tout simplement) en lévitant magnétiquement, au-dessus du sol. Cependant, les frottements de l'air demeurent encore. Elon Musk a initié un projet qui viserait à créer des mini-navettes dans un tube vide et également en lévitation magnétique. Ainsi les résistances sont pratiquement nulles mais il restera toujours un tout petit peu d'air qui réussira à freiner la navette.

On peut donc voir que l'on n'a encore jamais réussi à reproduire entièrement les conditions de voyage sans pertes externes que l'on trouve dans le vide intersidéral il fallait donc trouver une autre solution pour économiser de l'énergie. On a trouvé cette solution dans l'utilisation de freins électromagnétiques régénératifs... Mais sont-ils assez efficaces pour récupérer autant d'énergie que l'on en a dépensé ? Serait-ce rentable sur notre trottinette ?

2) Le potentiel de récupération :

a) L'énergie cinétique.

L'énergie cinétique E_c est l'expression de l'inertie (fait que la trottinette continue à avancer en roue libre et fait qu'elle mette du temps à atteindre sa vitesse de croisière). Elle s'exprime en joule et on peut aussi l'appeler "l'énergie cinétique accumulée."

L'énergie cinétique dépend uniquement de la masse m et de la vitesse v de la trottinette (transportant une personne) :

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2$$

Sur terrain plat, c'est la seule énergie récupérable par un éventuel frein électromagnétique régénératif.

Dans notre cas d'étude, on a :

$$E_c = \frac{1}{2} * 97 \text{ kg} * (6 \text{ m} * \text{s}^{-1})^2 = \frac{1}{2} * 97 * 36 * \text{ kg} * \text{ m}^2 * \text{ s}^{-2} = 1750 \text{ J}$$

(la trottinette et Anaël sont de masse $m = 97 \text{ kg}$ et leur vitesse de croisière $v = 6 \text{ m/s}$.
 E_c est l'énergie cinétique dans ces conditions.)

b) Estimation de l'énergie récupérable par rapport à l'énergie consommée

Pour calculer l'énergie récupérée lors d'un freinage régénératif à la vitesse de croisière et l'énergie dépensée pour atteindre cette vitesse, nous allons considérer un scénario tel que :

La trottinette avec Anaël aux commandes est arrêtée sur une route en bon état, le temps est clair et il n'y a pas de vent. Les batteries sont bien rechargées et la température est environ de 15°C. La trottinette et Anaël pèsent 97 kg ensemble. Les pneus sont correctement gonflés et Anaël est en T-shirt. La trottinette est assez solide pour supporter les batteries délivrant 50 V dès le début de l'accélération (la trottinette a normalement 4 vitesses correspondant à chacune une batterie branchée en série en plus pour maîtriser le voltage. Exemple: vitesse 1, une seule batterie de 12V branchée, vitesse 3, trois batteries de 12V branchées en série. Je démarre normalement en vitesse 1 pour éviter de casser la fixation moteur.)

Anaël a 100 m de libre avant de devoir freiner pour s'arrêter à une intersection un peu plus loin. On estime que La trottinette accélère de 1 (m/s)/s jusqu'à atteindre sa vitesse de croisière de 6 m/s. La trottinette prendrait donc 6 secondes pour atteindre sa vitesse maximum.

On estime que les batteries envoient en moyenne 20 ampères sous 50 V pendant l'accélération puis 10 ampères sous 50 V à sa vitesse de croisière. (On pourrait calculer un résultat précis sans toutes ces moyennes grâce à une intégrale mais on n'a pas le niveau et on a pas les mesures exactes en fonction du temps et de la vitesse).

L'énergie ou le travail E est l'expression d'une puissance P pendant une durée t
 $E = P \times t$ et quant aux unités du système international : $1J = 1W \times 1s$

E_{acc} étant l'énergie électrique dépensée pendant les 6 secondes d'accélération
 $E_{acc} = 1000 W \times 6 s = 6000 J$

distance d parcourue pendant une accélération constante:

$$d = \frac{1}{2}at^2$$

avec l'accélération $a = 1m/s^2$ et le temps $t = 6 s$

$$d = \frac{1}{2} \times 1 m s^{-2} \times (6 s)^2 = 18 m$$

donc, après l'accélération, il reste 82 m à parcourir. La trottinette va à 6m/s donc cette distance est parcourue en 14 s. On rappelle, que à vitesse de croisière, la trottinette consomme 500 W .

$$\text{Donc } E_{reste} = 500 * 14 * W * s = 7000 J$$

Donc, en tout, au moment où Anaël va freiner, la trottinette a consommé 13000 J
 Or, à cet instant et à partir de la fin de l'accélération, l'énergie cinétique était de 1750 J . En fait E_{reste} a seulement servie à compenser les forces qui freinent la trottinette (les pertes).

Donc à cet instant, Anaël décide de freiner grâce à son frein électromagnétique régénératif. Il pourrait donc récupérer 1750 J mais c'est sans compter les pertes internes, en effet l'électricité ainsi créée fait le chemin en sens inverse pour aller regagner les batteries et subit donc les rendements des pièces mécaniques puis du moteur. Donc $E_{recup} = E_c * \mu_m * \mu_{reste}$

$$E_{recup} = 1750 * 0,85 * 0,95 * J = 1400 J$$

Donc on peut bien voir que ce résultat est risible par rapport à l'énergie dépensée (à peine un dixième). Cela rajouterait environ 10% d'autonomie à la trottinette sur des trajets de ce genre (en très grande ligne droite, il n'y aurait quasiment jamais de récupération) et on est bien loin de l'autonomie totale de la problématique.

IV/ Conclusion

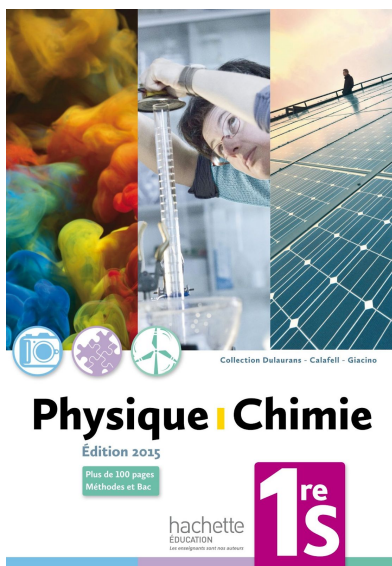
Après toutes ces recherches, nous pouvons affirmer qu'il serait impossible, avec les moyens que nous avons utilisé, d'obtenir une trottinette entièrement autonome. La batterie pourrait en revanche avoir une autonomie bien plus longue et permettrait de faire des économies d'énergie considérables. Nous avons tout de même trouvé un moyen, peu pratique cependant, de ne pas perdre de batterie. Il s'agirait de rouler seulement en descente, de façon à utiliser le moins possible les batteries, et en récupérant de l'énergie grâce au frein électro-magnétique. Malheureusement personne ne roule qu'en descente, et le trajet inverse utiliserait énormément d'énergie.

L'invention et la commercialisation de cette trottinette serait donc intéressante, malgré un prix relativement élevé, mais elle aurait le mérite d'être plus économique que les autres produits du marché. Nous pourrions aussi, pour approfondir ce sujet, faire des recherches sur les impacts environnementaux de notre produit, car c'est l'un des enjeux majeurs de notre futur. Les freins électro-magnétiques, eux sont cependant utilisés dans de nombreux domaines comme celui de l'automobile notamment.

V/ Sources

documentation utilisée :

-Livre de Physique-chimie de 1ère S:



-Wikipédia (freins électro-magnétiques, machine à courant continu, moteurs brushless, frottement à l'air etc.)

-google images

-<https://fr.telma.com/>

-youtube (vidéos sur les freins électro-magnétiques)

-livre des calculs de mécanique au CDI

Logiciels utilisés :

-Pinnacle Studio 15

-Inkscape

-Paint

-fritzing

Autres :

-Connaissances personnelles des parents

-pour la vidéo : "victory" de *two steps from hell*

Merci de regarder la vidéo sur la clé usb jointe au document.