

Julie STENTZ  
Mathilde FOUVRY  
Samuel BARDY



## Projet low-tech : logistique en mobilité douce

*Rapport final*

*Pôle Transition Ecologique et Solidaire*

*0.6 Planet, Veloma*

*28 mai 2021*



CentraleSupélec

# Table des matières

<b>I.</b>	<b>Introduction</b>	3
a.	Contexte	3
b.	Le projet	3
<b>II.</b>	<b>Les sous-systèmes</b>	4
1.	Le système de capteur	5
2.	Le contrôleur	5
3.	La motorisation	6
4.	La batterie	7
5.	Les freins	7
<b>III.</b>	<b>Les solutions étudiées</b>	7
1.	Le système de capteur	7
a.	Le principe	7
b.	1 <sup>er</sup> modèle	8
c.	2 <sup>ème</sup> modèle	12
d.	Conclusion sur les deux modèles	17
e.	Expériences	18
f.	L'étude du potentiomètre	18
g.	L'Assemblage des ressorts et du potentiomètre	24
2.	Le contrôleur	26
3.	La motorisation	26
4.	La batterie	27
<b>IV.</b>	<b>Les retours d'expérience</b>	27
<b>V.</b>	<b>Comment utiliser ce rapport ?</b>	27
	<b>Bibliographie</b>	28
	<b>Table des illustrations</b>	29
	<b>Annexes</b>	30

## I. Introduction

### a. Contexte

0.6 Planet est une association visant à adopter collectivement de nouveaux modes de vie afin de lutter contre les dérèglements climatiques. Elle travaille en collaboration avec l'association Veloma. Celle-ci cherche à participer à la transition énergétique dans le domaine de la vélo-logistique et de la basse technologie.

Dans les villes, les émissions de CO<sub>2</sub> dues à la circulation représente un enjeu environnemental majeur. Or, de nombreux trajets sont loin d'être efficaces, c'est le cas des camions de livraison : ils sont souvent peu remplis, et ce sont des véhicules qui émettent particulièrement beaucoup de CO<sub>2</sub>.

L'ambition de Veloma est donc de concevoir une remorque low-tech avec assistance électrique permettant de remplacer les camions de livraison (Figure 1). C'est-à-dire que la remorque doit avoir une conception simple, avec des matériaux recyclés, et doit être réparable facilement afin de minimiser son impact environnemental.



Figure 1 - Photo d'une remorque de vélo de Veloma (Veloma, 2019)

### b. Le projet

L'objectif de ce projet est de chercher des alternatives aux composants les plus polluants d'une remorque motorisée à trois roues, qui s'adapterait à tout type de vélo, capable de porter une charge de plus de 100kg. Celle-ci doit pouvoir s'attacher mécaniquement au vélo en quelques secondes et très facilement. Veloma souhaite qu'il n'y ait pas de connexions électroniques à faire entre le vélo et la remorque afin de faciliter leur attache.

Veloma (Veloma, 2019) (Charette, 2021) a déjà conçu des remorques semblables. Le schéma de leur remorque est représenté ci-contre (Figure 2).

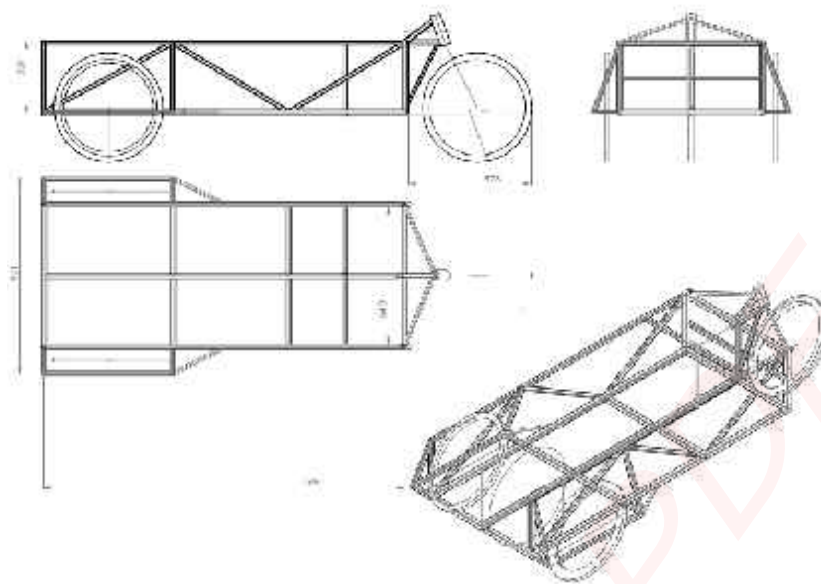


Figure 2 - Schéma remorque classique (ressource de ©Veloma)

Ce rapport ne se penche pas sur les caractéristiques de la remorque qui ont déjà été étudiées par Veloma. Cependant, Veloma souhaite changer le système de capteurs et certains autres paramètres qui seront détaillés par la suite.

Dans un premier temps, l'objectif est de lister les composants à remplacer. Pour cela, nous avons réfléchi avec Veloma à toutes les pistes sur lesquelles nous pouvions nous pencher. Il s'agissait principalement de comprendre le fonctionnement de la remorque déjà existante, et de faire des recherches bibliographiques.

Dans un second temps, nous nous sommes répartis sur les différents composants à remplacer, afin de chercher des alternatives low-tech à moindre impact environnemental. Pour cela, nous nous sommes renseignés sur des projets personnels de DIY, sur des forums ou sur des projets de Start-Up. Nous avons étudié la faisabilité de ces alternatives avec l'association.

Nous nous sommes ensuite lancés dans une approche plus théorique. Nous avons entre autres établi des modèles et fait des calculs pour vérifier la faisabilité de nos solutions avec plus de précision.

Enfin, nous avons testé ces alternatives expérimentalement. Veloma nous a notamment envoyé des pièces détachées, pour pouvoir mener à bien les expériences que nous avons préparé avec l'association.

## II. Les sous-systèmes

Tout d'abord, voici la liste des composants de la remorque, qu'il faudrait potentiellement remplacer. Les principaux sous-systèmes de la remorque sont le capteur de force entre la remorque et le vélo, puis le contrôleur qui calcule et envoie les informations données par le capteur au moteur de la remorque. Le moteur est alimenté par une batterie disposée sur la remorque. Enfin, la remorque doit être capable de freiner avec le vélo, grâce à un système mécanique.

## 1. Le système de capteur

Le capteur permet de réguler la puissance du moteur en fonction des besoins. Il recueille les informations à envoyer au contrôleur qui commandera à son tour le fonctionnement du moteur. Il peut capter différentes grandeurs différentes comme la force ou la position (qui vont être celles étudiées dans ce rapport).

Le plus commun pour les fabrications « DIY » de remorques motorisées (Chaillot, 2019) (c'est-à-dire les tutoriels de bricolage), ce sont soit les poignées à placer sur le guidon (la personne doit simplement l'activer pour faire tourner le moteur), soit des jauges de contrainte, fixées sur la tige qui relie la remorque au vélo. Il s'agit d'une résistance, qui se déforme sous l'action d'une force. Le capteur renvoie une tension qui varie avec la déformation de la résistance. Ainsi, lorsque le vélo change d'allure, une force est exercée sur la jauge située entre le vélo et la remorque.

Le système de poignée/manette n'est pas envisageable dans ce projet car nous ne devons pas relier le vélo et la remorque électroniquement. L'attache doit être mécanique, or il faudrait un câble électrique pour relier les moteurs de la remorque et la manette du vélo.

Veloma a déjà testé le fonctionnement d'une jauge de contrainte (comme le fait l'entreprise K-Ryole (K-ryole, 2019), une des seules à réaliser des remorques motorisées pour tout type de vélo). Mais l'objectif du projet est de trouver un système encore plus low-tech, c'est-à-dire avec moins d'électronique et plus de matériaux recyclés et réutilisés.

## 2. Le contrôleur

La fonction principale d'un contrôleur de moteur à courant continu est d'ajuster le courant fourni au moteur à partir d'une consigne fournie par le capteur situé au niveau de l'attache (scd, 2016). Il le fait avec une technique appelée modulation de largeur d'impulsion ou PWM. Les autres fonctions du contrôleur sont :

- Coupure basse tension : le but est de surveiller la tension de la batterie et arrêter le moteur si la tension de la batterie est trop faible. Cela protège la batterie d'une décharge excessive.
- Coupure de surchauffe : le but est de surveiller la température des transistors de puissance et arrêter le moteur s'ils deviennent trop chauds. Cela protège les transistors de puissance.
- Coupure de surintensité : le but est de réduire le courant vers le moteur si trop de courant est fourni. Cela protège à la fois le moteur et les transistors de puissance FET.
- Coupure du frein : le but est d'arrêter le moteur lorsque le frein est serré. C'est une fonction de sécurité : si l'utilisateur applique le frein et l'accélérateur, les freins gagnent.

Le contrôleur est donc une pièce indispensable au fonctionnement de la remorque motorisée. Cependant, les contrôleurs sont généralement des boîtiers importés de Chine (Figure 3). Il est donc dans la logique du projet d'en concevoir un nous-même.



Figure 3 - Image d'un contrôleur pour vélo électrique (Bikelec, 2016)

### 3. La motorisation

Il est possible de se procurer un moteur low-tech. En effet, il est possible d'apporter des modifications à un alternateur électrique de voiture pour le transformer en moteur électrique sans balais (Figure 4) (tchangly21, 2016) (tchangly21, 2016). Il s'agit donc d'un objectif du projet, de modifier un alternateur afin d'obtenir un moteur. Les alternateurs adaptés sont notamment les alternateurs Bosch ou Valeo de 120A. Ces alternateurs peuvent être achetés dans des casses automobiles avec un coût d'à peu près 25€. Les moteurs peuvent être placés sur les roues ou le châssis (de préférence).



Figure 4 - Image d'un alternateur de voiture, utilisable sur un vélo électrique (Belmont auto electrics, 2014)

#### 4. La batterie

Les batteries utilisées par Veloma sont des batteries Lithium Ion, qui sont problématiques vis-à-vis du développement durable, étant donné qu'elles nécessitent des matériaux rares, et qu'elles polluent considérablement.

L'étude d'autres types de batterie ou encore l'étude de la fabrication d'une batterie Lithium Ion low-tech sont envisagées afin de remplacer ces batteries polluantes.

#### 5. Les freins

Le système de frein a déjà été étudié par Veloma et fait partie des réussites. C'est un système mécanique qui fonctionne seul. La compression du bras de traction de la remorque quand le vélo et la remorque se rapprochent entraîne un étirement des câbles de frein qui enclenche les freins à disque mécanique situé sur les roues arrière.

### III. Les solutions étudiées

#### 1. Le système de capteur

##### a. Le principe

La jauge de contrainte mesure une force. C'est un capteur peu low-tech, car il est difficilement réparable et réutilisable. Le but est de le remplacer par un autre capteur plus low-tech : un potentiomètre linéaire. Celui-ci permet de mesurer une distance. Il est possible de relier ces deux grandeurs en utilisant un ressort (Tableau 1). L'idée est donc d'ajouter un ressort au niveau de l'attache et de mesurer son allongement avec un potentiomètre.

Tableau 1 - Tableau comparatif entre la jauge de déformation et le potentiomètre linéaire

	Jauge de contrainte	Potentiomètre linéaire
Entrée	Force, $F$ (N)	Déplacement linéaire, $\Delta l$ (m)
Sortie	Tension, $U$ (V)	Tension, $U$ (V)
Relation	$F = k\Delta l$ où $k$ est la raideur des ressorts au niveau de l'attache	

Le système de frein utilisé par Veloma est celui représenté en (Figure 5). Une pièce coulisse le long du bras de traction, et est pressée par un ressort sur la partie remorque du système. Lors du freinage, le ressort est comprimé. Les câbles de frein étant attachés à cette pièce, ils se serrent lors du freinage du vélo.





Figure 5 - Bras de traction et système de frein des systèmes de Veloma (ressource © Veloma)

La solution envisagée est la suivante : un ressort peut être rajouté entre la remorque et la pièce coulissante sur le bras de traction. Cette pièce bouge lorsque le vélo accélère ou ralentit, car elle est en équilibre entre les deux ressorts. Le potentiomètre mesure le déplacement de cette pièce.

#### b. 1<sup>er</sup> modèle

Notre démarche a d'abord été d'imaginer comment pouvaient être agencés les ressorts. Nous avons d'abord supposé que nous pouvions souder les ressorts à la pièce centrale. Ainsi, les ressorts sont soit en compression soit en extension, soit tous les deux à l'équilibre. Les schémas de fonctionnement sont présentés sur les figures ci-après (Figure 6, 7, 8).

A ce stade, nous n'avons que peu d'informations sur ce système qui n'avait pas encore été créé par Veloma. Nous utilisons donc des ordres de grandeurs assez vagues, qui seront ajustés par la suite.



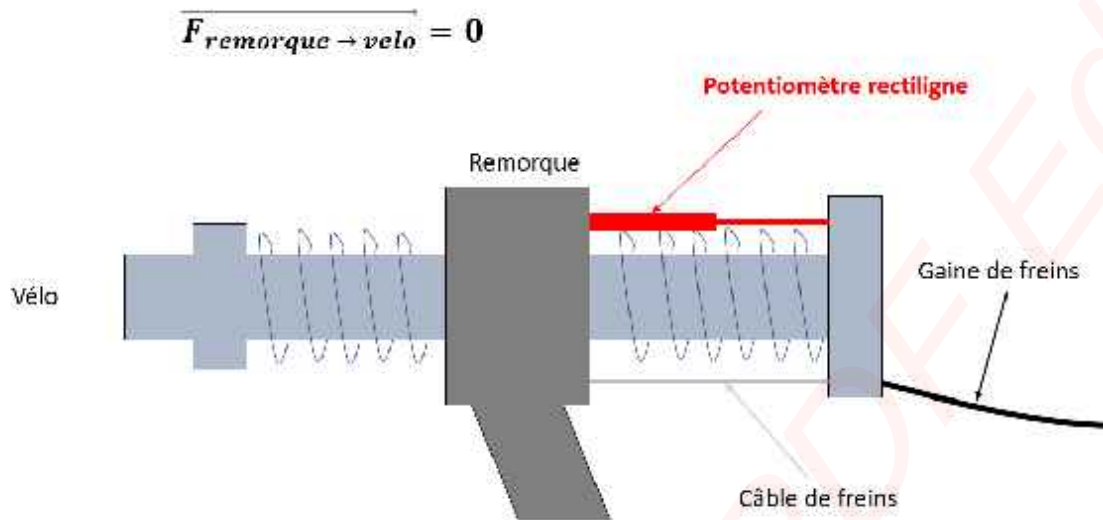


Figure 6 - Potentiomètre à l'équilibre (1<sup>er</sup> modèle)

Lors du freinage, la pièce en équilibre se rapproche du vélo (Figure 7). Le mécanisme de frein est toujours fonctionnel même en rajoutant un ressort : il suffit d'ajuster le serrage des freins.

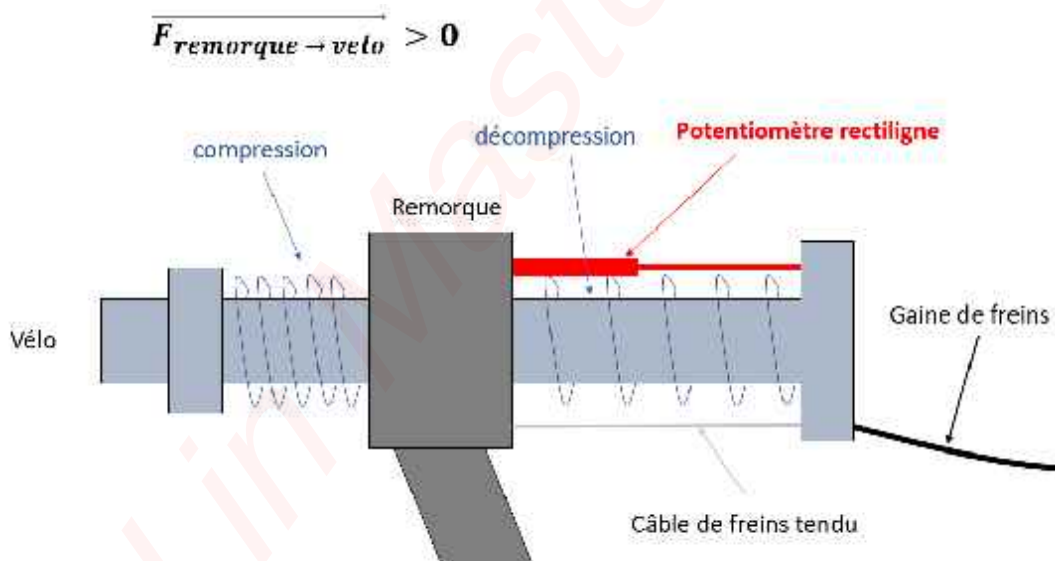


Figure 7 - Potentiomètre lors du freinage (1<sup>er</sup> modèle)

Lors de l'accélération, la pièce se rapproche de la remorque (Figure 8). Les freins se desserrent plus qu'avec le mécanisme original, il faudra régler les freins en conséquence, car la gaine risque de se décoller de la pièce d'attache...

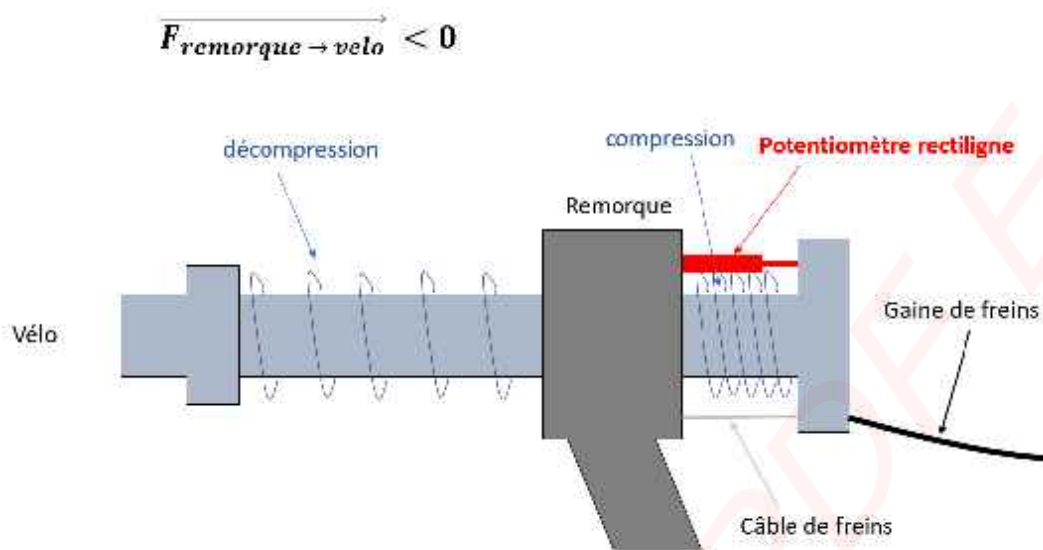


Figure 8 - Potentiomètre lors de l'accélération (1<sup>er</sup> modèle)

Nous avons établi un modèle pour le système de ressort, afin de déterminer quel type de ressort serait le plus adapté, et quelle devrait être la course du potentiomètre (Figure 9, 10).

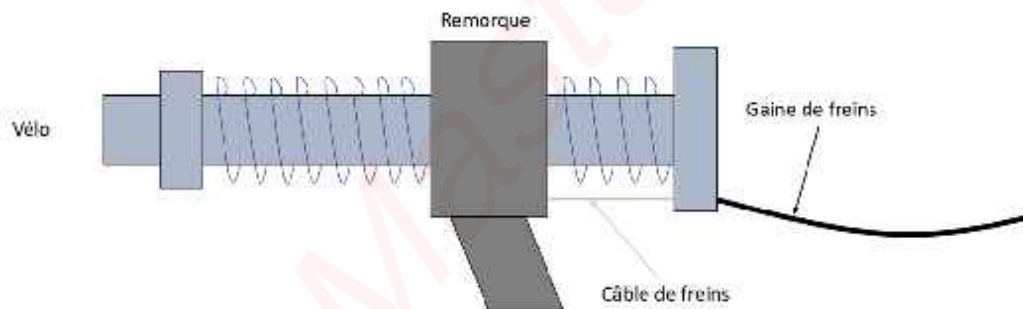


Figure 9 - Schéma de la remorque à l'équilibre (1<sup>er</sup> modèle)

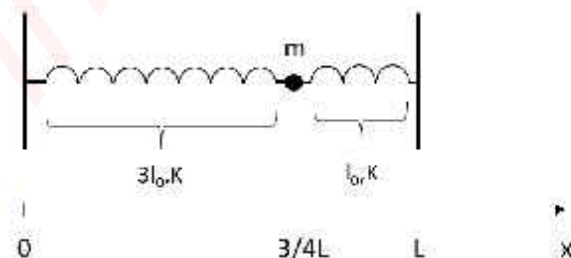


Figure 10 - Modélisation du système de ressorts (1<sup>er</sup> modèle)

L'objectif de cette modélisation est de dimensionner les ressorts, et déterminer la raideur que devrait avoir les ressorts pour que la remorque ait le bon comportement (c'est-à-dire que les ressorts ne se déforment pas sous une compression ou extension trop forte).

Nous pensons qu'il est plus pertinent de choisir le ressort côté remorque plus court. En effet, comme la décélération en cas de freinage sera bien plus élevée que n'importe quelle accélération, la course de la remorque sur le bras de traction du vélo doit pouvoir être bien plus grande en phase de décélération.

Nous souhaitons que les ressorts soient tels que pour une accélération maximale et une décélération maximale, la remorque reste entre 0 et L, sans que les ressorts soient totalement comprimés.

### Hypothèses :

Nous choisissons ici des hypothèses simplificatrices, avec des conditions extrêmes.

- Masse de la remorque : 200kg
- Pas de pente
- Accélération maximale :  $1,1 \text{ m/s}^2$
- Décélération maximale :  $5 \text{ m/s}^2$
- $L = 20 \text{ cm}$  et  $l_0 = \frac{1}{4}L = 5 \text{ cm}$
- Forces exercées sur la remorque :
  - Tension du ressort 1
  - Tension du ressort 2
  - Force de résistance au roulement
  - Poids et réaction du sol (se compensent)
- $C_{RR} = 0,003$  (Coefficient de frottement au roulement) (Fanchon, 2007)

### Calculs :

PFD appliqué à la remorque :

$$m\vec{a} = \sum \vec{F}$$

C'est-à-dire :

$$ma = K\left(2x - \frac{3}{2}L\right) - C_{RR}mg$$

Pour l'accélération maximale que l'on souhaite, on voudrait que la masse soit à  $\frac{5}{6}$  de la longueur totale, c'est-à-dire :  $x \approx 17 \text{ cm}$

### Résultats :

On obtient alors :

$$K \approx 6800 \text{ N.m}^{-1}$$

Pour cette valeur de la raideur du ressort, on obtient la course de la remorque sur le bras de traction du vélo (Figure 11).

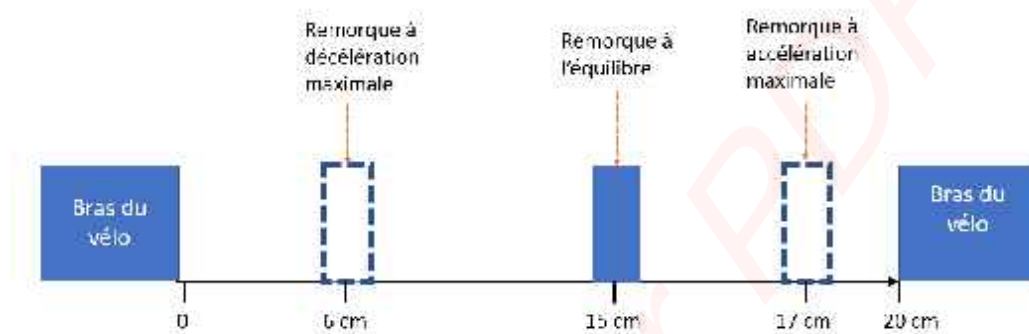


Figure 11 - Schéma de la course de la pièce attachée à la remorque (1<sup>er</sup> modèle)

Cependant, Veloma nous a envoyé le système auxquels ils pensaient. Ce modèle n'est pas adapté à la pièce que nous avons reçue. C'est pourquoi nous proposons un second modèle. Ce dernier modèle peut néanmoins être utile à garder pour avoir différents types de systèmes fonctionnels.

### c. 2<sup>ème</sup> modèle

Ce deuxième modèle découle du système de ressorts que nous a envoyé l'association. Ainsi, ce modèle se rapproche bien plus du vrai système que le modèle précédent. Contrairement à ce que nous avons imaginé, les deux ressorts sont identiques, et ils ne sont soumis qu'à une compression. En effet, ils ne sont pas attachés à la pièce centrale, donc au lieu d'être en extension, ils sont à l'équilibre, désormais plus en contact avec la pièce (Figure 12).



Figure 12 - Photo du système envoyé par Veloma, après assemblage des pièces

Nous avons pris en compte ces modifications des ressorts dans ce nouveau modèle. Les schémas de fonctionnement sont présentés ci-contre (Figure 13, 14).

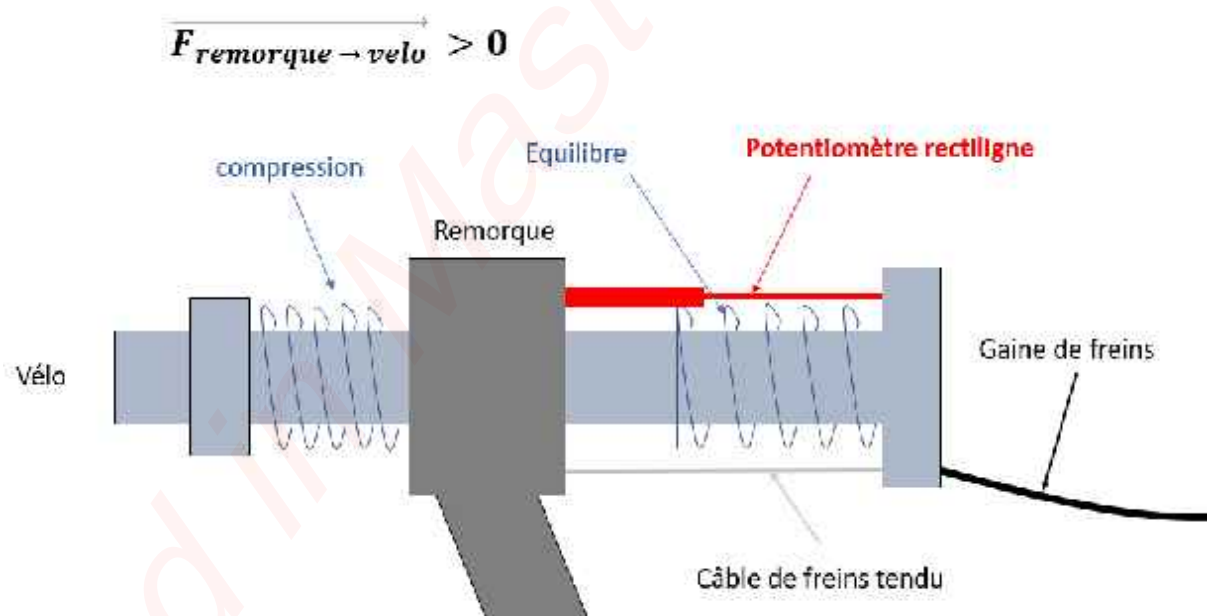


Figure 13 - Potentiomètre lors du freinage (2<sup>ème</sup> modèle)

Lors du freinage, la pièce en équilibre se rapproche du vélo (Figure 13). Le mécanisme de frein est toujours fonctionnel même en rajoutant un ressort : il suffit d'ajuster le serrage des freins.

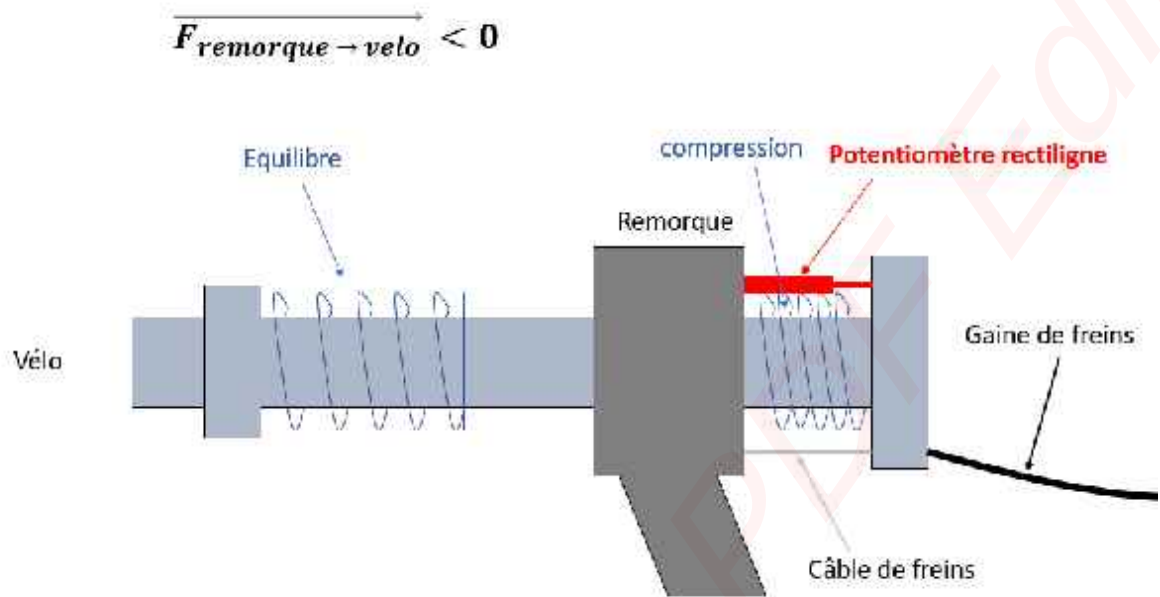


Figure 14 - Potentiomètre lors de l'accélération (2<sup>ème</sup> modèle)

Lors de l'accélération, la pièce se rapproche de la remorque (Figure 14). Les freins se desserrent plus qu'avec le mécanisme originel, il faudra régler les freins en conséquence, car la gaine risque de se décoller de la pièce d'attache...

Nous avons établi un modèle pour le système de ressort, afin de déterminer quelle devrait être la course du potentiomètre que nous voudrions utiliser (Figure 15, 16, 17).

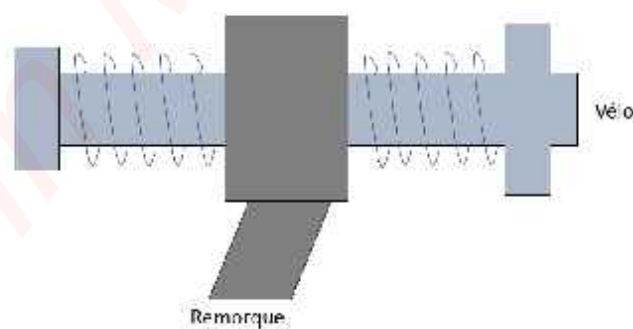


Figure 15 - Schéma de la remorque à l'équilibre (2<sup>ème</sup> modèle)

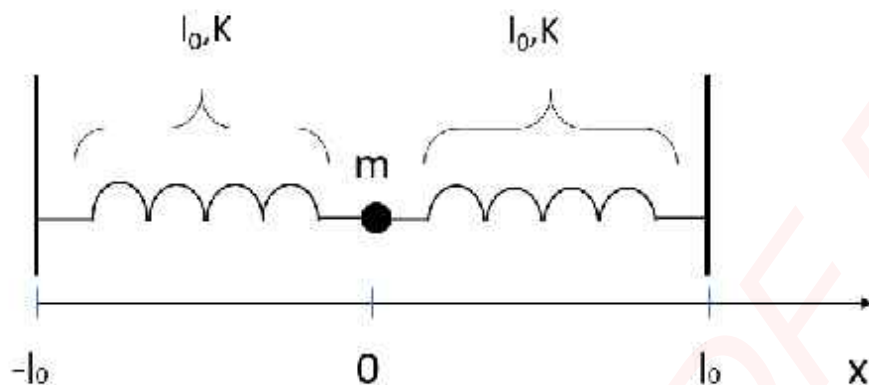


Figure 16 - Modélisation du système de ressort (2<sup>ème</sup> modèle)

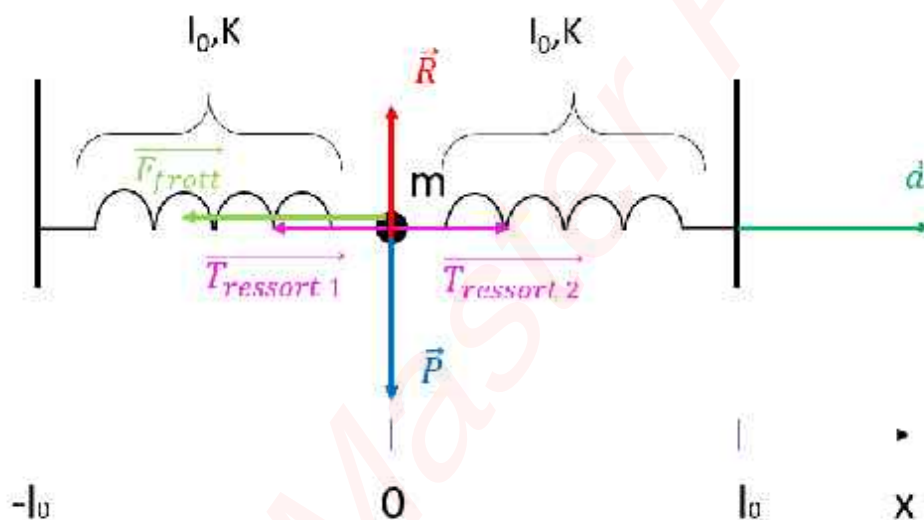


Figure 17 - Modélisation du système de ressort avec les forces exercées sur la remorque (2<sup>ème</sup> modèle)

Nous avons choisi de garder deux ressorts identiques, pour que cela corresponde au système que Veloma nous a envoyé.

Nous avons mesuré la raideur des ressorts que nous ont envoyé Veloma. Pour cela, nous avons soumis un ressort au poids d'une masse accrochée à celui-ci (Figure 18). Il suffit alors de mesurer l'allongement du ressort pour obtenir la raideur de celui-ci.





Figure 18 - Schéma de la mesure de la raideur d'un ressort et photo de l'expérience

On applique le Principe Fondamental de la Dynamique à la masse.

$$F = mg = K\Delta l$$

On obtient K car on connaît la masse, et on mesure l'allongement du ressort.

Après plusieurs mesures pour plusieurs masses différentes, nous obtenons une raideur de :

$$K \approx 7000 \text{ N/m}$$

C'est cette valeur que nous utiliserons pour les calculs. Cette valeur reste approximative car le ressort était légèrement penché à cause de la masse accrochée.

### Hypothèses :

Nous choisissons ici des hypothèses simplificatrices, avec des conditions extrêmes d'accélération et décélération. Nous avons ajusté les paramètres au système envoyé par Veloma.

- Masse maximale de la remorque : 200kg
- Pas de pente
- Accélération maximale :  $1 \text{ m/s}^2$
- Décélération maximale :  $1 \text{ m/s}^2$
- $l_0 = 5,5 \text{ cm}$
- $C_{RR} = 0,003$  (Coefficient de frottement au roulement) (Fanchon, 2007)
- $K = 7\,000 \text{ N/m}$
- Forces exercées sur la remorque :
  - Tension du ressort 1 (seulement en compression) :  $\overrightarrow{T_{ressort\ 1}} = +Kx \overrightarrow{u_x}$
  - Tension du ressort 2 (seulement en compression) :  $\overrightarrow{T_{ressort\ 2}} = -Kx \overrightarrow{u_x}$
  - Poids et réaction du sol (se compensent)

- Force de résistance au roulement (nous considérons que la résistance est due aux roues de la remorque) :  $F_{frott} = -C_{RR} \cdot mg \vec{u}_x$

### Calculs :

PFD appliqué à la remorque :

$$m\vec{a} = \sum \vec{F}$$

C'est-à-dire :

$$x < 0 : ma = -F_{frott} + T_{ressort 1}$$

$$\text{soit : } ma = -C_{RR}mg - Kx$$

$$x > 0 : ma = -F_{frott} - T_{ressort 2}$$

$$\text{soit : } ma = -C_{RR}mg - Kx$$

Pour une accélération maximale ou une décélération maximale, on obtient la valeur de la course totale suivante :

$$L = 2 \cdot |x| = 2 \times 0,029 = 5.8cm$$

Avec ce modèle, nous déduisons que le potentiomètre que nous devons choisir doit avoir une course de 6cm minimum.

#### d. Conclusion sur les deux modèles

Le modèle 2 se rapproche plus de nos expériences car il est basé sur le prototype de Veloma, avec deux ressorts identiques qui n'exercent qu'une force de compression. La démarche est également différente de celle du modèle 1. En effet elle aboutissait à la valeur théoriquement idéale de la course du potentiomètre que nous pourrions utiliser.

Cependant, le premier modèle reste intéressant car l'accélération maximale d'un vélo en ville est bien différente de sa décélération. En effet, le freinage, surtout en ville, peut être spontané et rapide contrairement à la phase d'accélération. Ainsi, l'idée de mettre deux ressorts de taille différente est une option qu'il faudra considérer par la suite.

### e. Expériences

Afin de vérifier la valeur théorique de la course de la pièce mobile entre les deux ressorts, nous avons fait une rapide expérience. Etant donné que nous n'avons pas de remorque à disposition, il nous fallait simuler la situation réelle de la remorque tirée par un vélo. Pour cela, nous remplaçons la remorque par un vélo et une personne assise dessus (pour simuler le poids de la remorque). Pour remplacer le vélo, nous tirons simplement la fausse remorque à la main, à la vitesse d'un vélo (car nous n'avons pas de deuxième vélo) (Figure 19).

Grâce à cette expérience, nous avons observé l'allongement des ressorts lors de l'accélération et de la décélération. Nous avons filmé le système de ressort, et à l'aide d'une échelle, nous avons pu mesurer l'allongement des ressorts avec le logiciel LatisPro. Nous obtenons alors une course allant 5 à 6cm. Cette course encadre bien la valeur trouvée précédemment.

Les erreurs sont dues à la parallaxe lors du film, mais surtout au fait que l'expérience est peu reproductible. L'accélération du coureur n'est pas toujours la même. C'est pour cela que nous donnons un intervalle plutôt qu'une valeur précise, qui n'aurait pas de réelle signification. Toutes nos mesures sont comprises dans cet intervalle.



Figure 19 - Photos de l'expérience consistant à mesurer l'allongement des ressorts lors des phases d'accélération et de décélération du vélo

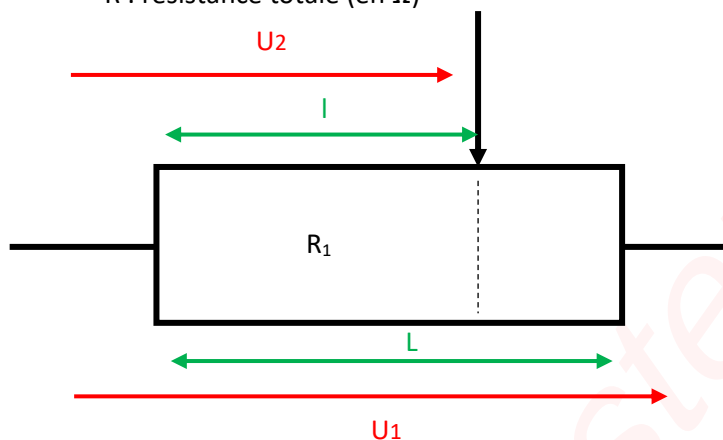
### f. L'étude du potentiomètre

L'approche envisagée consiste à remplacer la jauge de contrainte par un potentiomètre linéaire. Ce dernier permet de capter une distance, et la sortie du capteur est une tension. En effet, un potentiomètre a un fonctionnement plus simple, donc il est plus facile à réparer soi-même, à récupérer ou encore à fabriquer.

### Le Fonctionnement

Un potentiomètre est une résistance variable à trois bornes. Deux bornes sont situées aux extrémités, et une borne est en déplacement le long de la résistance grâce à un curseur. Le principe repose sur le fait qu'une résistance dépend linéairement de sa longueur (Figure 20).

- L : longueur du potentiomètre (en m)
- l : longueur au curseur (en m)
- $\rho$  : résistivité de la résistance (en  $\Omega\text{m}$ )
- S : surface en coupe de la résistance (en  $\text{m}^2$ )
- $U_1$  et  $U_2$  : tensions (en V)
- $R_1$  : résistance au curseur (en  $\Omega$ )
- R : résistance totale (en  $\Omega$ )



$$R = \frac{\rho L}{S} \quad R_1 = \frac{\rho l}{S}$$

Pont diviseur de tension :

$$U_2 = \frac{R_1}{R} U_1 = \frac{l}{L} U_1$$

Soit :  $\frac{U_2}{U_1} = \frac{l}{L}$

Figure 20 - Schéma de fonctionnement d'un potentiomètre

Ainsi, le rapport des deux tensions donne le rapport des distances. En envoyant la tension mesurée à la carte Arduino, il est possible de retrouver la position du curseur.



Figure 21 - Photo d'un potentiomètre linéaire de la Fabrique de l'école

Les paramètres qui permettent de choisir un potentiomètre sont la durée de vie (des millions de cycle), la sensibilité, et la course. La Fabrique de l'école possédait un potentiomètre de course 6cm et de précision 0,2mm (Figure 21). C'est celui que nous utilisons donc par la suite. Cependant, il serait plus confortable d'avoir un potentiomètre plus grand, pour être sûr de ne pas atteindre la butée du potentiomètre lors de l'accélération et décélération du vélo.

Nous avons voulu tester expérimentalement le fonctionnement d'un potentiomètre. Le premier capteur était un potentiomètre rotatif (plus classique que les potentiomètres glissières) fournit par la Fabrique, à l'aide d'une carte Arduino (Figure 22).

Nous avons ensuite réalisé le même montage pour un potentiomètre glissière correspondant plus à ce que nous cherchons.

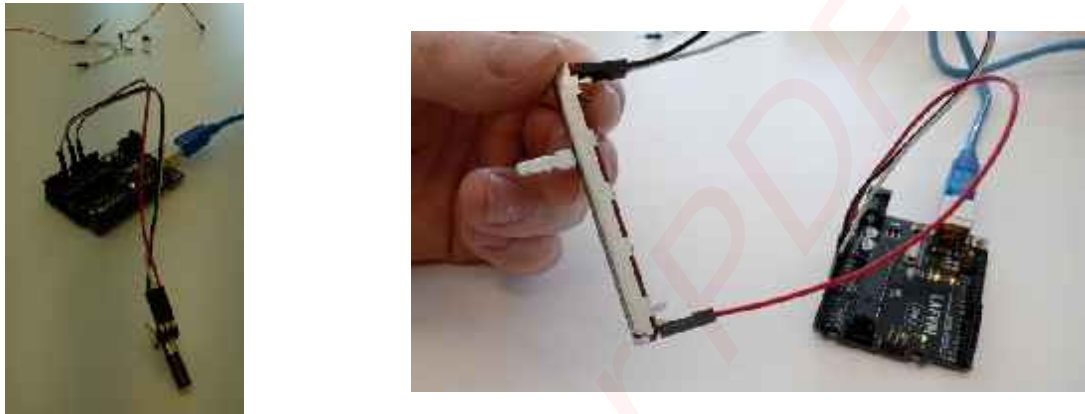


Figure 22 - Schéma du potentiomètre rotatif (gauche) et glissière (droite) avec la carte Arduino

Les résultats obtenus sont satisfaisants puisque le code Arduino renvoie une valeur entre 0 et 1023 proportionnelle à la position du curseur sur le potentiomètre.

### *Un potentiomètre low-tech ?*

Un potentiomètre est un capteur qui s'achète neuf : l'objectif serait ensuite de fabriquer un potentiomètre low-tech. Voici une première piste de fabrication : il est possible d'utiliser un rhéostat (résistance variable), dont la résistance varie avec un curseur fixé à la pièce en équilibre au milieu, ce qui permettrait d'obtenir une tension entre le curseur et le bout du rhéostat, proportionnelle à l'allongement (Figure 23).

Comment fabriquer un rhéostat ? L'idée générale est de mettre un matériau résistif dans une gaine en tube (Unisciel, 2012). Un curseur coulisse le long de ce tube, en contact avec le matériau au centre.

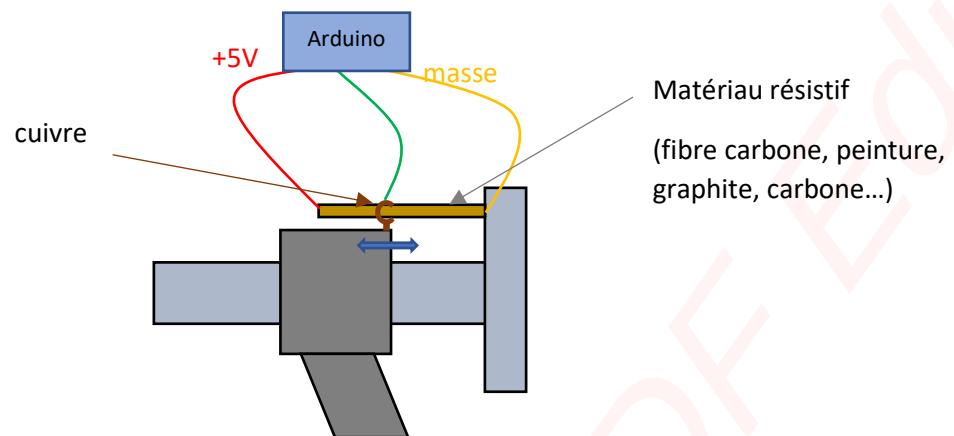


Figure 23 - Schéma du potentiomètre low-tech adapté à la remorque

Nous avons rassemblé une liste de matériaux résistifs que nous pourrions utiliser mais chacun a des inconvénients qui peuvent nuire à la réalisation d'un potentiomètre adapté au projet :

- L'utilisation de peinture conductrice à l'air libre ne paraît pas durable, la peinture finira par partir.
- La peinture conductrice à l'intérieur du tube pourrait ne pas sécher.
- Un mélange résine-poudre de graphite à l'intérieur d'un tube serait-il assez dense en graphite pour que cela reste conducteur ?
- Une mine de crayon très épaisse dans une gaine serait-elle assez robuste au frottement de l'anneau pour que le potentiomètre soit durable ?

L'usage de la mine nous paraît être le plus adapté à notre modèle. Même si le système pourrait manquer de durabilité, il est facilement remplaçable.

Nous avons réalisé le même montage qu'en figure 22, en remplaçant le potentiomètre par des bandes faites au crayon à papier. Comme nous pouvons le voir sur la photo ci-dessous (Figure 24), nous avons testé cela avec plusieurs types de crayon. Car en effet, les résultats divergent selon le crayon, c'est pour celui du milieu que l'expérience fonctionne le mieux. En revanche, même pour celui-ci, même si la valeur renvoyée par le code varie entre 0 et 1023, cela semble moins fiable qu'avec un potentiomètre réel, la proportionnalité est discutable.

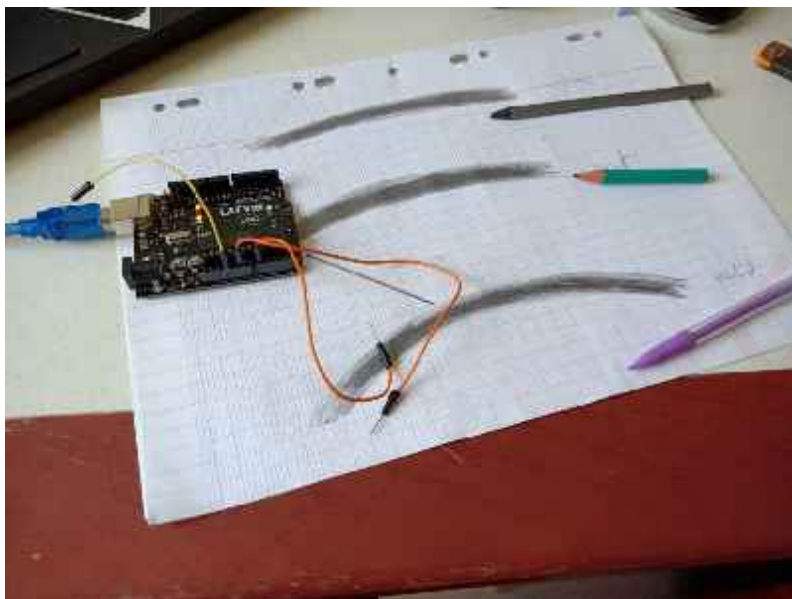


Figure 24 - Photographie de l'expérience sur le graphite en tant que potentiomètre

Ce montage était une première étape avant d'essayer de l'adapter à notre tige de remorque. Le premier montage auquel nous avons pensé est le suivant (Figure 25).

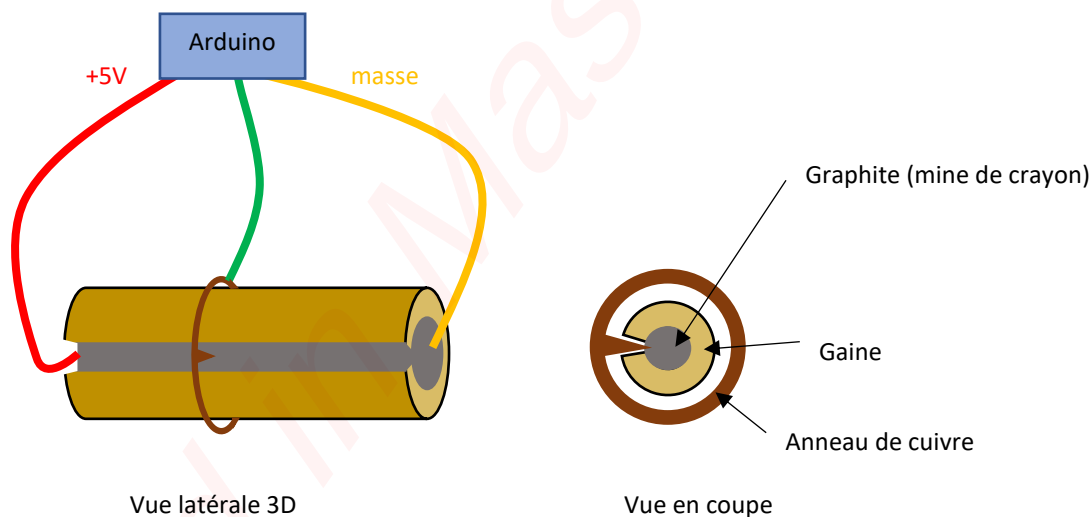


Figure 25 - Schéma du potentiomètre low-tech et du montage Arduino

Cependant, nous avons réalisé en faisant des expériences qu'une mine de crayon se comporte moins bien comme un potentiomètre que lorsqu'on dessine une bande sur une feuille de papier. Après avoir fait quelques recherches (Becq-Giraudon, 1989), nous pensons qu'il s'agit de la nature même du graphite : la résistivité n'est pas isotrope (c'est-à-dire qu'elle n'est pas identique dans toutes les directions). En effet, le graphite est formé avec des feuillets de carbone (Figure 26).



La résistivité est moins grande dans le plan des feuillets, car les atomes de carbone sont plus rapprochés. Dans la direction A, la résistivité est de l'ordre de  $10^5 \Omega \cdot cm$  tandis que dans la direction C, elle vaut  $10^8 \Omega \cdot cm$  (Becq-Giraudon, 1989)(Figure 26).

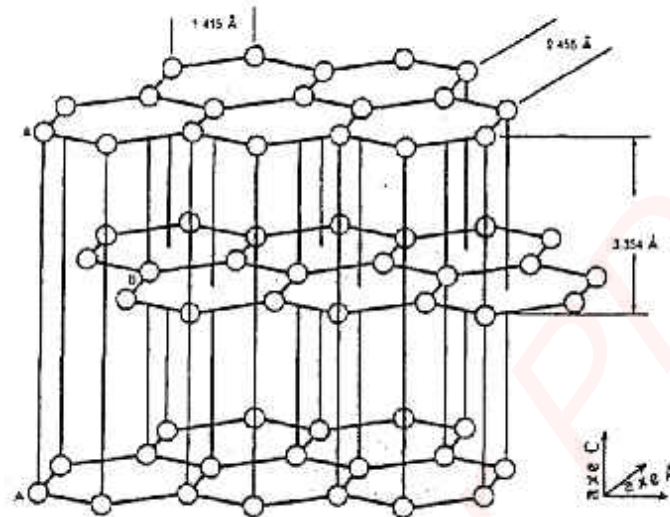


Figure 26 - Schéma de la formation moléculaire du graphite

Ainsi, il est finalement préférable de prendre une bande dessinée, car les feuillets de carbone sont déposés sur la feuille de manière aléatoire, et la résistivité est alors isotrope. Dans nos expériences, nous avons remplacé la mine de crayon par un tube de papier recouvert de graphite.

Une solution plus simple que de fabriquer un potentiomètre serait de récupérer un potentiomètre glissière sur une table de mixage et l'adapter au projet. Comme nous pouvons le voir sur l'image suivante (Figure 27), une telle table contient plusieurs potentiomètres de tailles différentes, destinés à être jetés si une table de mixage n'est plus fonctionnelle. Cette solution reste donc bien low-tech.



Figure 27 - Photo de potentiomètres glissières sur une table de mixage (friedapi, 2012)

### g. L'Assemblage des ressorts et du potentiomètre

#### *Potentiomètre de la Fabrique*

Dans un premier temps, nous avons décidé d'ajouter un potentiomètre glissière classique au système de ressorts, avant de tester un potentiomètre low-tech.

Nous avons fixé le potentiomètre à l'aide de colle et de scotch au bras de vélo, et le curseur est poussé par la pièce attachée à la remorque, et tirée par une ficelle (Figure 28, 29). Il serait plus efficace et plus sûr de souder le potentiomètre, mais nous voulions pouvoir l'enlever librement, et nous ne voulions pas abîmer le potentiomètre ou le roulement à bille.



Figure 28 – Vue de loin de l'assemblage des ressorts avec le potentiomètre

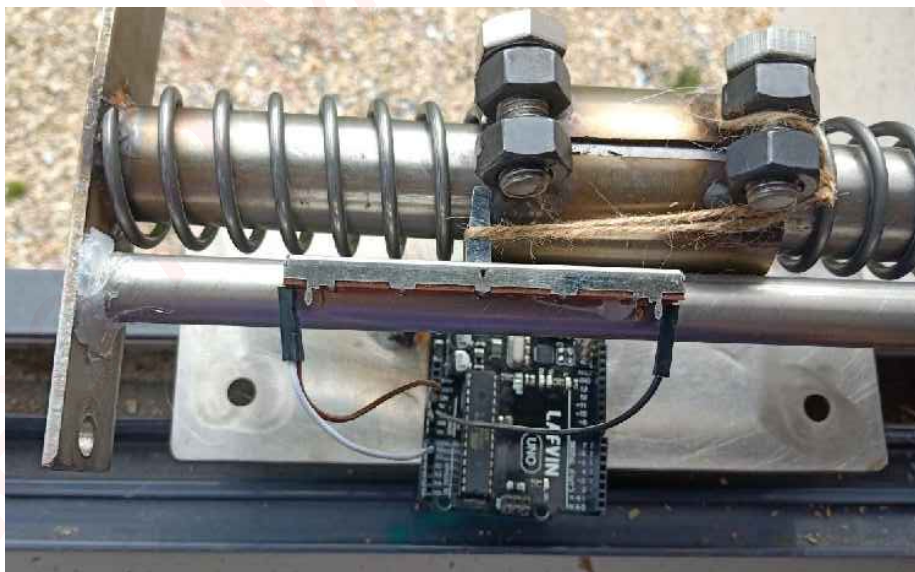


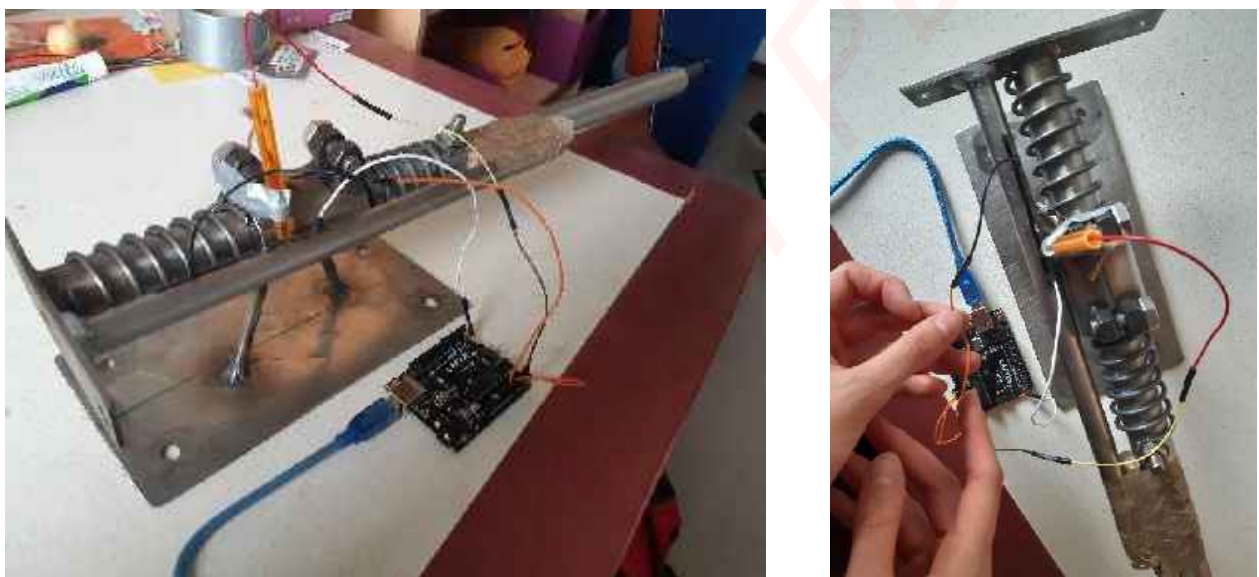
Figure 29 – Vue de près de l'assemblage des ressorts et du potentiomètre

Cette première version qui mérite quelques améliorations (comme la soudure des extrémités) est néanmoins adaptée au projet. En effet, lorsque nous simulons les mouvements de la pièce mobile sur le bras, le potentiomètre suivait parfaitement, les valeurs sorties par l'ordinateur avec le code Arduino étaient proportionnelles à la position.

Il faudrait également prévoir où accrocher/positionner la carte Arduino sur le bras de traction.

### *Potentiomètre low-tech*

La version finale de notre projet est la suivante, fonctionnant avec un potentiomètre low-tech (Figure 30).



*Figure 30 - Photographies de l'assemblage des ressorts avec le potentiomètre low-tech*

Un rouleau de papier colorié au crayon à papier a été inséré dans tube. Les trois fils sont en contact avec le graphite déposé sur le papier en passant par une fente et le fil du milieu est solidaire de la pièce mobile. Lorsque le vélo accélère ou décélère, le fil coulisse dans la fente et se déplace sur le graphite. Nous avons donc bien un potentiomètre linéaire low-tech.

De plus, toujours avec le même code Arduino, nous avons pu tester l'efficacité de ce potentiomètre, celui fonctionne aussi bien que lors des expériences sur une feuille de papier seule. Ainsi, la valeur sortante du code varie bien de 0 à 1023 avec la position du fil mais la proportionnalité n'est pas tout à fait vérifiée.

Notre prototype final ci-dessus fonctionne comme nous le souhaitons, il permet de montrer qu'il est possible de créer un potentiomètre à partir de peu de matériel et de l'utiliser comme capteur d'un système de remorque motorisée. Cependant, il a des inconvénients certains qui nuisent à son utilisation sur un système entier réel. En effet, premièrement la fente permettant de faire coulisser le fil est orienté vers le haut, le papier à l'intérieur serait donc mouillé à la première pluie et le potentiomètre deviendrait défectueux. Ensuite, le petit montage permettant de faire coulisser le fil

est plutôt bancale, il ne tiendrait peut-être plus après quelques chocs. Il faudrait plutôt imaginer une bague rigide qui coulisse autour du tube et qui permet de faire passer le courant, comme nous l'avons imaginé en figure 25.

## 2. Le contrôleur

En ce qui concerne le contrôleur, il existe un certain nombre de codes Arduino différents qui pourraient permettre de concevoir un contrôleur (Electronoobs, 2020) (Jean-Luc Plouc, 2019) (Jenkie, 2011). Mais ceux-ci ne sont pas forcément adaptés au projet de remorque motorisée avec un capteur sur la tige car ils sont bien souvent réalisés pour des vélos électriques ou d'autres engins électriques avec des poignées. L'étape suivante consiste donc à analyser ces codes et en réaliser un adapté au système. Cependant, ce n'est pas l'objectif prioritaire, car les membres de Veloma travaillent déjà sur cette partie, et ont plus de compétences sur ce sujet.

## 3. La motorisation

De la documentation existe sur la transformation d'un alternateur de voiture en moteur sans balais (tchangly21, 2016) (tchangly21, 2016). Voici un schéma explicatif du processus (Figure 26).

Le recyclage de vieux alternateurs s'inscrit parfaitement dans une démarche low-tech.

Nous sommes donc allés récupérer un alternateur de voiture dans une casse automobile.

Les étapes sont maintenant les suivantes (Figure 31) :

1. Enlever le cache en plastique
2. Enlever le pont de diodes
3. Etamer les bornes
4. Montage en étoile
5. Démontez le régulateur
6. Rebrancher le rotor

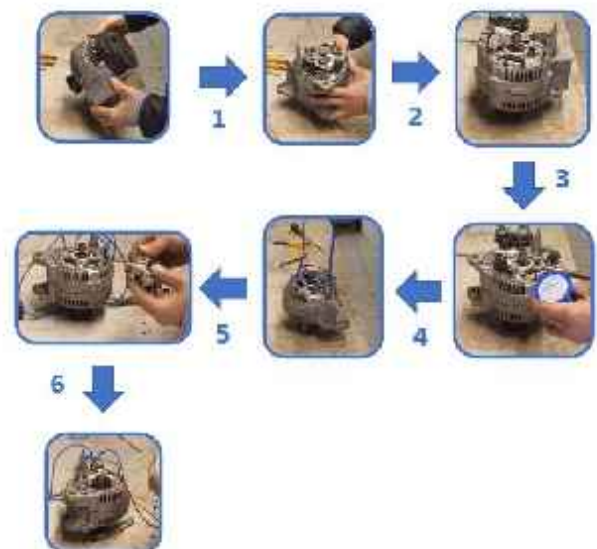


Figure 31 - Etapes de transformation d'un alternateur en moteur

En revanche, nous nous sommes arrêtés au cours de la démarche car Veloma est parvenu à réaliser un moteur de cette manière avant nous.



#### 4. La batterie

Nous avons étudié ces différents types de batterie existantes : les batteries Lithium-ion classiques, les batteries à Hydrogène et les batteries Sodium.

Les batteries à Hydrogène sont plus écologiques. Cependant, les manipulations pour les fabriquer sont compliquées et demandent beaucoup de matériaux différents ainsi que beaucoup d'outils de bricolage (romanursu French, 2018). Nous pensons donc que ce n'est pas une solution low-tech pour motoriser la remorque.

Les batteries Sodium sont encore sous la forme de recherche (Tiamat, 2020). Elles ne sont pas commercialisées et il y a très peu d'information disponibles à leur propos. Il ne s'agit donc pas d'une solution appropriée dans notre situation.

Enfin, les batteries Lithium-ion sont les plus utilisées. Elles ont un fort impact environnemental car elles utilisent des matériaux rares, et elles polluent grandement en tant que déchets (Coromines, 2021) Cependant, beaucoup de ces batteries sont jetées alors qu'elles sont encore utilisables. Dans notre cas, il est possible de créer une batterie pour la remorque à l'aide de batteries de vieux ordinateurs portables par exemple (Chaillot, 2019). Cette dernière solution nous semble être la plus faisable et la plus "low-tech" pour la remorque. Cette récupération permet à la remorque d'avoir un moindre impact environnemental.

### IV. Les retours d'expérience

Des retours d'expérience ont été obtenus via des groupes Facebook de vélocargos et de e-bike afin de pouvoir récolter des retours d'information : la plupart des avis sont très positifs, mais les inconvénients que nous avons trouvés sont les suivants :

- Moteur sur la roue arrière : pas adapté en cas de crevaison
- Pas toujours très maniables, surtout dans les virages
- Obstacles aux remorques (Figure 32)
- Faible puissance dans les montées



Figure 32 - Obstacle d'une remorque (Carrouee, 2008)

### V. Comment utiliser ce rapport ?

Ce rapport présente tout d'abord des recherches plus théoriques. Il contient notamment des recherches à propos du remplacement des batteries Lithium Ion, des moteurs à l'aide d'alternateur, mais aussi à propos du fonctionnement des potentiomètres et de la manière d'en fabriquer soi-même.

Ensuite, ce rapport contient nos calculs, modèles et expériences. En particulier, nous avons présenté deux modèles permettant d'utiliser un potentiomètre au lieu d'une jauge de contrainte.

Nous avons testé expérimentalement une de ces solutions, et nous avons présenté les résultats dans ce rapport. Nous présentons enfin comment fabriquer un potentiomètre low-tech.

Dans la continuité de ce projet, les objectifs suivants seraient :

- Remplacer définitivement la jauge de contrainte par un potentiomètre low-tech sur l'assemblage complet (tige et remorque).
- Modifier le système de ressort à partir d'un mixte entre les deux modèles (avoir un ressort plus long que l'autre).
- Remplacer le moteur par un alternateur recyclé.
- Utiliser des batteries Lithium-Ion recyclées.

## Bibliographie

Becq-Giraudon, J.-F. (1989). Mémento roches et minéraux industriels - Le Graphite. *Bureau de recherches géologiques et minières*.

Belmont auto electrics. (2014). *Auto Electrical*. Récupéré sur Belmont auto electrics: <https://www.belmontautoelectrics.com.au/autoelectrical/>

Bikelec. (2016). *Le contrôleur*. Récupéré sur Bikelec: <https://www.bikelec.fr/blog/le-controleur-00/>

Carrouee, B. (2008). *Les obstacles-présentation*. Récupéré sur FCDE: [http://www.circulationsdouces91.org/colloque\\_BenoitCarrouee\\_obstacles.html](http://www.circulationsdouces91.org/colloque_BenoitCarrouee_obstacles.html)

Chaillot, B. (2019). *Vélo électrique Solaire. Transport gratuit*. Récupéré sur Youtube: <https://www.youtube.com/watch?v=w6V8ITJ-d8w&t=661s>

Charette. (2021). *Charette, une remorque à vélo libre*. Récupéré sur <https://charrette.bike/>

Coromines, L. (2021). *Quel est l'impact écologique d'une batterie ?* Récupéré sur Greenly: <https://www.greenly.earth/blog/empreinte-carbone-batterie>

Electronoobs. (2020). *Arduino E-Bike ESC*. Récupéré sur Electronoobs: [http://electronoobs.com/eng\\_arduino\\_tut126.php](http://electronoobs.com/eng_arduino_tut126.php)

Fanchon, J.-L. (2007). *Guide de mécanique : Sciences et technologies industrielles*. Nathan.

friedapi. (2012). *Mixing Desk I*. Récupéré sur Deviant Art: <https://www.deviantart.com/friedapi/art/Mixing-Desk-I-310040514>

Jean-Luc Plouc. (2019). *ArduBike, an Arduino-Based E-Bike Controller*. Récupéré sur Create Arduino - Project Hub: <https://create.arduino.cc/projecthub/plouc68000/ardubike-250w-an-arduino-based-e-bike-controller-93a936>

Jenkie. (2011). *Arduino Pedelec Controller*. Récupéré sur Pedelec Forum: <https://www.pedelecforum.de/forum/index.php?threads/arduino-pedelec-controller.12810/>

K-ryole. (2019). *K-ryole - Divisez par 10 vos coûts de logistique*. Récupéré sur <https://k-ryole.com/>

- romanursu French. (2018). *Comment faire un mini générateur d'hydrogène*. Récupéré sur Youtube: <https://www.youtube.com/watch?v=gK-yXK7lbFQ>
- scd. (2016). *DC Motor Controller for Electric Bicycle*. Récupéré sur instructables circuits: <https://www.instructables.com/DC-Motor-Controller-for-Electric-Bicycle/>
- tchangly21. (2016). *Tuto en directe pour convertir un alternateur en moteur brushless part 1*. Récupéré sur Youtube: <https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=xwbl-CkrIZ8>
- tchangly21. (2016). *tuto en directe pour convertir un alternateur en moteur brushless part 2*. Récupéré sur Youtube: <https://www.youtube.com/watch?v=1utFeew0wSQ&list=RDCMUCxjpmUE0sf8MbvtG0wESQ1w&index=2>
- Tiamat. (2020). *Tiamat*. Récupéré sur <http://www.tiamat-energy.com/>
- Unisciel. (2012). *Faire un potentiomètre avec une mine de crayon*. Récupéré sur Youtube: <https://www.youtube.com/watch?v=7J7qyYpCz7k>
- Veloma. (2019). *Veloma | vélo cargo et basse technologie*. Récupéré sur <https://veloma.org/>

## Table des illustrations

Figure 1 - Photo d'une remorque de vélo de Veloma (Veloma, 2019) .....	3
Figure 2 - Schéma remorque classique (ressource de ©Veloma) .....	4
Figure 3 - Image d'un contrôleur pour vélo électrique (Bikelec, 2016) .....	6
Figure 4 - Image d'un alternateur de voiture, utilisable sur un vélo électrique (Belmont auto electrics, 2014) .....	6
Figure 5 - Bras de traction et système de frein des systèmes de Veloma (ressource ©Veloma) .....	8
Figure 6 - Potentiomètre à l'équilibre (1 <sup>er</sup> modèle) .....	9
Figure 7 - Potentiomètre lors du freinage (1 <sup>er</sup> modèle) .....	9
Figure 8 - Potentiomètre lors de l'accélération (1 <sup>er</sup> modèle) .....	10
Figure 9 - Schéma de la remorque à l'équilibre (1 <sup>er</sup> modèle) .....	10
Figure 10 - Modélisation du système de ressorts (1 <sup>er</sup> modèle) .....	10
Figure 11 - Schéma de la course de la pièce attachée à la remorque (1 <sup>er</sup> modèle) .....	12
Figure 12 - Photo du système envoyé par Veloma, après assemblage des pièces .....	13
Figure 13 - Potentiomètre lors du freinage (2 <sup>ème</sup> modèle) .....	13
Figure 14 - Potentiomètre lors de l'accélération (2 <sup>ème</sup> modèle) .....	14
Figure 15 - Schéma de la remorque à l'équilibre (2 <sup>ème</sup> modèle) .....	14
Figure 16 - Modélisation du système de ressort (2 <sup>ème</sup> modèle) .....	15
Figure 17 - Modélisation du système de ressort avec les forces exercées sur la remorque (2 <sup>ème</sup> modèle) .....	15
Figure 18 - Schéma de la mesure de la raideur d'un ressort et photo de l'expérience .....	16
Figure 19 - Photos de l'expérience consistant à mesurer l'allongement des ressorts lors des phases d'accélération et de décélération du vélo .....	18
Figure 20 - Schéma de fonctionnement d'un potentiomètre .....	19
Figure 21 - Photo d'un potentiomètre linéaire de la Fabrique de l'école .....	19



Figure 22 - Schéma du potentiomètre rotatif (gauche) et glissière (droite) avec la carte Arduino ..... 20  
Figure 23 - Schéma du potentiomètre low-tech adapté à la remorque..... 21  
Figure 24 - Photographie de l'expérience sur le graphite en tant que potentiomètre ..... 22  
Figure 25 - Schéma du potentiomètre low-tech et du montage Arduino ..... 22  
Figure 26 - Schéma de la formation moléculaire du graphite ..... 23  
Figure 27 - Photo de potentiomètres glissières sur une table de mixage (friedapi, 2012) ..... 23  
Figure 28 – Vue de loin de l’assemblage des ressorts avec le potentiomètre ..... 24  
Figure 29 – Vue de près de l’assemblage des ressorts et du potentiomètre ..... 24  
Figure 30 - Photographies de l'assemblage des ressorts avec le potentiomètre low-tech ..... 25  
Figure 31 - Etapes de transformation d'un alternateur en moteur ..... 26  
Figure 32 - Obstacle d'une remorque (Carrouee, 2008) ..... 27  
Figure 33 - Code Arduino permettant de lire la valeur de sortie du potentiomètre ..... 30

Tableau 1 - Tableau comparatif entre la jauge de déformation et le potentiomètre linéaire ..... 7

## Annexes

```
const int analogInPin = A0; // Analog input pin that the potentiometer is attached to

int sensorValue = 0; // value read from the pot
int outputValue = 0; // value output to the PWM (analog out)

void setup() {
  // initialize serial communications at 9600 bps:
  Serial.begin(9600);
}

void loop() {
  // read the analog in value:
  sensorValue = analogRead(analogInPin);

  // print the results to the Serial Monitor:
  Serial.print("sensor = ");
  Serial.print(sensorValue);

  // wait 2 milliseconds before the next loop for the analog-to-digital
  // converter to settle after the last reading:
  delay(2);
}
```

Figure 33 - Code Arduino permettant de lire la valeur de sortie du potentiomètre