

# La gravité pour avancer!

André Lapointe et Thomas Laplace

## 1. ABSTRACT

In the physics courses, students learn about a lot of formulas about the energy that depend on the mass, the height, the speed and the gravity. The most important formula is the law of energy conservation. This law links gravitational potential energy, kinetic energy and non-conservative work. In theory, all these formulas are true, but what about in a real-life experimentation? To verify it, we built a vehicle that uses the gravitational potential energy of a mass as a source of propulsion. After reading all the theory about the law of energy conservation, we came with four hypotheses. The first hypothesis is that the distance traveled is proportional with gravitational potential energy. It was invalidated because even if we doubled the mass, the gravitational potential energy did not double. The second one says that if we double the weight, gravitational potential energy and kinetic energy will also double. This one was invalidated because the weight increases the friction. The third one is the same as the first one, but we replace the weight with the height. This hypothesis was confirmed because our results show that if we double the height, the energy will also double. The last one is that if we double the weight or the height, the speed will increase by a factor  $\sqrt{2}$ . We couldn't confirm this one because it was impossible to calculate a precise speed.

**2. MOTS CLÉS :** Physique, énergie potentielle gravitationnelle, énergie cinétique, masse, hauteur, rendement énergétique.

## 3. INTRODUCTION

De nos jours le réchauffement climatique nous pousse à une course contre la montre pour trouver une source d'énergie avec un rendement énergétique élevé et qui ne pollue pas l'environnement. Cependant, trouver une source qui possède ces deux caractéristiques est très difficile. En effet, l'énergie solaire n'est pas polluante, mais possède un rendement énergétique de seulement 15%. L'énergie nucléaire est risquée à exploiter pour un faible rendement de 33%. L'énergie éolienne est propre, mais possède un rendement de 45% et dépend de la météo ce qui fait que cette source n'est pas constante (Internet 1). Au Québec, l'hydroélectricité est très présente et très efficace, cependant celle-ci nécessite de détruire des habitats pour construire les barrages (Internet 2). Donc il

serait intéressant d'exploiter l'énergie gravitationnelle puisque celle-ci ne représente aucun danger pour l'environnement et elle est une source d'énergie renouvelable. Le rendement énergétique peut se calculer avec la formule suivante (Internet 3) :

$$\text{Rendement énergétique} = \frac{\text{Quantité d'énergie utile (J)}}{\text{Quantité d'énergie consommée (J)}} * 100$$

Cette année dans le cadre de « Science on tourne », il est question de transformer l'énergie gravitationnelle pour faire avancer un véhicule de manière à lui faire faire le plus de tours possibles. Donc, il faut avoir le meilleur rendement énergétique possible. Selon le principe de la conservation de l'énergie, l'énergie potentiel gravitationnelle

se transforme complètement en énergie cinétique. La formule de l'énergie potentielle gravitationnelle est  $U_g = mgh$ , où  $m$  est la masse,  $h$  est la hauteur et  $g$  la constante gravitationnelle. Comme l'énergie cinétique est proportionnelle à l'énergie potentielle gravitationnelle, la hauteur et la masse doivent être proportionnelles à l'énergie cinétique.

Plusieurs hypothèses ont été émises à partir de la construction d'un bolide pour *Science, on tourne!* La première est que la distance parcourue par le véhicule est proportionnelle à l'énergie potentielle gravitationnelle initiale. La deuxième est que si la masse utilisée pour projeter le bolide double, l'énergie potentielle gravitationnelle et l'énergie cinétique vont doubler. La troisième est que si la hauteur à laquelle se situe la masse double, l'énergie potentielle gravitationnelle et l'énergie cinétique vont doubler. Finalement la quatrième est que si la hauteur ou la masse augmente d'un facteur deux, la vitesse va augmenter d'un facteur  $\sqrt{2}$ .

### Le Travail

La définition du travail (symbole :  $W$ ) en physique est la suivante : le transfert d'énergie causé par une force agissant sur un objet. C'est une quantité d'énergie et il est mesuré en joules. Le travail se calcule par le produit d'une force constante qui agit sur un objet et du déplacement qu'il subit. Puisque ce sont deux vecteurs, on obtient le produit scalaire suivant :  $W = \vec{F} \cdot \vec{s}$ .

### L'énergie Cinétique

On définit l'énergie cinétique en joule (symbole :  $K$ ) d'un objet possédant une masse  $m$  et se déplaçant à une vitesse de module  $v$  par la formule suivante :

$$K = \frac{1}{2}mv^2.$$

Selon le théorème de l'énergie cinétique, l'énergie cinétique finale est égale à l'énergie cinétique initiale additionnée au travail total

effectué entre l'instant initial et l'instant final. Il est donc possible d'écrire cette formule :  $W_{tot} + K_i = K_f$ .

### Le Principe De La Conservation D'énergie

Le travail de la gravité se calcule par la différence entre l'énergie potentielle gravitationnelle initiale et l'énergie potentielle gravitationnelle finale. De ce fait, on peut écrire la formule suivante :

$$W_g = U_{gi} - U_{gf}.$$

Le travail total peut être la somme du travail de la gravité et du travail non-conservatif. Ce dernier est le travail effectué par tout autre force, comme le frottement.

En combinant le théorème de l'énergie cinétique avec le travail de la gravité, la formule suivante est obtenue :

$$W_{nc} + U_{gi} + K_i = U_{gf} + K_f.$$

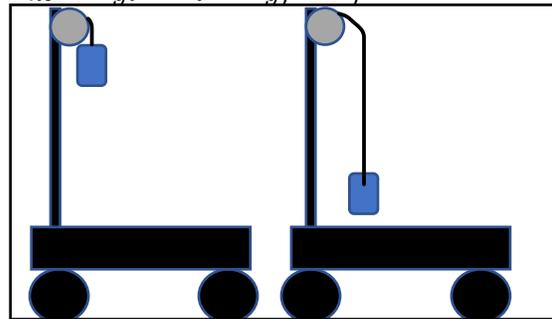


Figure 1. Le Principe De La Conservation D'énergie

Dans la figure 1, au départ l'objet est immobile, donc sa vitesse est de 0 m/s ce qui veut dire qu'il n'y a aucune énergie cinétique initiale. À ce même moment, la hauteur est maximale, donc l'énergie potentielle gravitationnelle initiale est aussi maximale. Ensuite juste avant que la masse touche l'engin, la hauteur est presque nulle donc il n'y a quasiment aucune énergie potentielle gravitationnelle finale. Juste avant que la masse touche le sol, sa vitesse est maximale, cela fait en sorte que son énergie cinétique finale est elle aussi maximale.

### **Le Défi De Science, On Tourne!**

Le défi de Science, on tourne de cette année consistait à utiliser l'énergie potentielle gravitationnelle pour faire tourner un engin autour d'un cercle. Théoriquement par le principe de conservation de l'énergie il est possible de transformer l'énergie potentielle gravitationnelle en énergie cinétique tout en respectant les normes du concours qui était d'avoir une masse totale de 4,5 kg et une hauteur maximale de 2 m. De plus, il faut que le premier tour se fasse le plus rapidement possible. Cependant, il y a du frottement ce qui fait en sorte que l'ensemble de l'énergie sera perdu au cours de l'expérimentation sous forme de chaleur, de bruit, etc.

### **Le Moment De Force**

Le moment de force représente l'efficacité d'une force à engendrer un mouvement de rotation autour d'un axe qui est défini par la force perpendiculaire multiplié par la longueur du bras de levier.  $\tau = F \times r$ . C'est une corde qui fait tourner les roues et l'essieu de l'engin, plus le rayon de l'essieu sera grand, plus il sera facile de faire tourner les roues. Comme il y a du frottement à différent endroit sur notre machine il faut avoir un moment de force minimum qui est plus grand que ce frottement dans le but de faire tourner les roues.

## **4.0 MÉTHODE ET MATÉRIELS**

Il a fallu commencer par tailler la plateforme de l'engin dans une planche de bois et percer un trou pour y insérer le mât qui était une tige filetée d'une grosseur de 5/16 de pouce. Cependant, celle-ci n'était pas assez solide pour supporter la masse qui descend. Le mât a donc été changé par une tige filetée d'un demi-pouce. Par la suite, les essieux sont composés de tiges filetées d'un-quart de pouce puisque ceux-ci rentrent parfaitement

dans un système de roulement à bille. Les essieux ont été fixés à la plateforme avec des demi-cercle en métal et des vis. En haut du mât, une poulie y était installée avec une corde reliée avec l'essieux du devant. La corde était entourée directement sur celui-ci et lorsque la masse tombait celle-ci se déroulait pour faire tourner les roues. Au départ, il était difficile de faire tourner les roues dû au moment de force qui était trop élevé. Pour vaincre celui-ci, un système de différentiel a été installé sur l'essieux. Comme il est possible de voir sur la figure 2, le système différentiel consiste à partir d'un cercle de rayon plus élevé pour vaincre le moment de force vers un cercle plus petit pour optimiser la distance parcourue par l'engin.



Figure 2. Système différentiel



Figure 3. Engin en bois sans le mât

Le premier système différentiel était constitué de ruban adhésif, le deuxième était en bois, mais ce n'était pas optimal donc un système différentiel en aluminium a été fabriqué par M. Martin Gagnon avec les mesures exactes pour l'engin ce qui a permis d'optimiser la distance parcourue et le temps du premier tour. Pour augmenter la quantité de corde qui est déroulée et par le fait même la distance parcourue, un système de palans composé d'un nombre différent de poulies selon la masse qui était accrochée en haut du mât. Pour une masse de 0,5 kg, c'était une poulie simple et pour une masse de 1 et 1,5 kg c'était un système de 2 et 3 poulies respectivement puisqu'avec une seule poulie, la masse aurait descendue trop vite. Avec celles-ci, il était plus facile de contrôler la vitesse de la masse pour réduire la perte d'énergie cinétique verticale inutile.

L'expérimentation consistait tout d'abord à déterminer la distance parcourue de l'engin avec 3 masses différentes à une hauteur de 1,5 m. Une fois les données recueillis, l'expérimentation a été reproduite, mais avec une hauteur de 1,0 m pour ainsi déterminer l'influence de la hauteur sur l'énergie potentielle gravitationnelle. Une fois toutes les données recueillis, différents calculs ont été fait sur le logiciel Excel soit pour trouver la distance parcourue en fonction de la circonférence et du nombre de tours effectués. Par la suite une vitesse approximative a pu être calculé en divisant la distance parcourue de l'engin par le temps que celui-ci a pris pour effectuer sa course. Finalement le facteur de frottement des roues ainsi que le ratio de la vitesse au carré sur la distance parcourue ont été calculé à l'aide du logiciel Exao qui permettait de déterminer la vitesse de l'engin à un moment précis. Pour ce faire, 6 essais ont été effectués avec le logiciel.

## 5.0 RÉSULTATS

Le tableau 1 contient les données recueillies lors de l'expérimentation selon une hauteur fixe de 1,5 m avec trois masses différentes. Pour chacune de ses masses cinq essais ont été effectués. Avec ces données il a été possible de calculer le ratio de l'énergie théorique sur la distance parcourue. Pour chacune des masses, l'énergie potentielle gravitationnelle, la distance moyenne ainsi que le nombre de tour moyen ont été calculé. Les données sur la distance parcourue se trouvent annexe (Tableau 10).

Tableau 1. Ratio de l'énergie théorique sur la distance parcourue selon différentes masses.

Masse $\pm$ 0,001 (kg)	Énergie théorique (J)	Tours moyen	Distance moyenne parcourue (m)	Écart type de la distance parcourue	Ratio de l'énergie théorique sur la distance parcourue $\pm$ 0,05
0,500	7,6	2,7	6,8	0,2	1,12
1,000	15,19	4,9	12,4	0,8	1,22
1,500	21,36	5,9	14,7	0,1	1,45

Le tableau 2 contient les données recueillies lors de l'expérimentation avec les trois masses différentes à une hauteur variant de 0,9017 à 1,5494m. À partir de ces données, le ratio de l'énergie théorique sur la distance parcourue en fonction des différentes masses et hauteurs a été calculé. L'écart type et la moyenne de chaque hauteur ont été calculés à partir de cinq données sur la distance parcourue qui se trouvent en annexe (Tableau 10 et 11). Pour chacune de ses masses cinq essais ont été effectués. Avec ces données il a été possible de calculer le ratio de l'énergie théorique sur la distance parcourue. Pour chacune des masses, la distance moyenne ainsi que le nombre de tour moyen ont été calculé. Les données sur la distance parcourue se trouvent annexe (Tableau 10).

Tableau 2. Ratio de l'énergie théorique sur la distance parcourue selon différentes masses et hauteurs.

Masse $\pm$ 0,001 (kg)	Hauteurs $\pm$ 0,008 (m)	Énergie théorique (J)	Tours moyen $\pm$ 0,1	Distance moyenne (m)	Écart type de la distance parcourue	Ratio de l'énergie théorique sur la distance parcourue $\pm$ 0,05
0,500	1,5494	7,60	2,7	6,8	0,2	1,12
	1,0414	5,11	1,9	4,9	0,1	1,05
1,000	1,5494	15,19	4,9	12,4	0,8	1,22
	1,0414	10,21	3,4	8,5	0,4	1,19
1,500	1,4526	21,36	5,9	14,7	0,1	1,45
	0,9017	13,26	3,9	9,7	0,4	1,37

Le tableau 3 contient la vitesse au carré qui a été obtenue grâce au logiciel Exao en procédant à six essais avec l'engin. Avec cette vitesse et la distance parcourue il a été possible de calculer le ratio de la vitesse au carré sur la distance. Ce tableau permet de faire un lien entre la vitesse et le frottement.

Tableau 3. Facteur de frottement des roues.

Vitesse (m/s) au carré	Distance (m)	Vitesse au carré sur la distance
0,0463	1,886	0,025
0,0442	1,886	0,023
0,0359	1,886	0,019
0,0316	1,886	0,017
0,0355	1,886	0,019
0,0351	1,886	0,019

Dans le tableau 4 il a été possible de calculer le facteur de multiplication du nombre de tours moyens en divisant le nombre de tours effectué par l'engin selon différentes masses allant de 0,5 à 1,5 kg par rapport à la masse de 0,5 kg.

Tableau 4. Facteur de multiplication du nombre de tours en fonction de la masse de 0,5 kg.

Masse $\pm$ 0,001 (kg)	Nombre de tours $\pm$ 0,1	Facteur de multiplication du nombre de tours par rapport à la masse de 0,5 kg
0,500	2,7	1
1,000	4,9	1,81
1,500	5,9	2,19

Dans le tableau 5, il a été possible de calculer le facteur d'augmentation des hauteurs en divisant, pour chaque masse, la plus grande hauteur par la plus petite hauteur. Par la suite, le facteur d'augmentation du nombre de tours a été calculer de la même façon que dans le tableau 4.

Tableau 5. Facteur de multiplication du nombre de tours en fonction de la hauteur.

Hauteur $\pm$ 0,008 (m)	Facteur d'augmentation de la hauteur $\pm$ 0,02	Masse $\pm$ 0,001 (kg)	Nombre de tours moyen $\pm$ 0,1	Facteur d'augmentation du nombre de tours $\pm$ 0,2
1,0414	1,00	0,500	1,9	1,0
1,5494	1,49		2,7	1,4
1,0414	1,00	1,000	3,4	1,0
1,5494	1,49		4,9	1,4
0,9017	1,00	1,500	3,9	1,0
1,4536	1,61		5,9	1,5

## 6.0 DISCUSSION

Puisque le bolide s'arrêtait après un certain nombre de tours, on pouvait dire que toute l'énergie cinétique était complètement perdue dû au frottement. Donc l'énergie cinétique est égale au travail due au frottement ( $K = W_{nc}$ ). Le bolide perdait énormément de vitesse dû au frottement, il était difficile de calculer sa vitesse, donc il était compliqué de faire un lien direct entre l'énergie potentielle gravitationnelle et la vitesse. En reformulant l'égalité entre l'énergie cinétique et le travail dû au frottement, on réalise que la vitesse au carré sur la distance est égale à la force sur la moitié de la masse. En effet, si le travail du au frottement est égale à l'énergie cinétique, il y a les relations suivantes :

$$Fs = \frac{1}{2}mv^2$$

$$\frac{2F}{m} = \frac{v^2}{s}$$

$$\frac{v^2}{s} = \text{Constante}$$

Le tableau 3 permet de faire le lien entre l'énergie cinétique et le travail du frottement étant donné que le ratio de la vitesse au carré sur la distance parcourue est le même. Comme le travail du frottement est proportionnel à la distance, il y a un lien de proportionnalité entre l'énergie cinétique et la distance. Puisque l'énergie potentielle gravitationnelle est en théorie proportionnelle à l'énergie cinétique et que l'énergie cinétique est proportionnelle à la distance (Tableau 3), on peut affirmer que théoriquement la distance est proportionnelle à l'énergie potentielle gravitationnelle. Pour la suite de l'analyse, il suffit de montrer qu'il y a un lien entre l'énergie potentielle

gravitationnelle et la distance au lieu de faire le lien entre l'énergie potentielle gravitationnelle et cinétique.

Cependant, à partir des résultats obtenus lors de l'expérimentation, il a été possible de faire un ratio de l'énergie potentielle gravitationnelle sur la distance parcourue pour différentes masses et hauteurs. En comparant ces ratios, on remarque qu'en doublant ou triplant une masse, le ratio ne reste pas le même. En effet dans le tableau 1, on peut remarquer que si la masse passe de 0,5 kg à 1 kg, le ratio passe de 1,12 à 1,22. Cette différence de n'est pas très grande étant donné l'incertitude sur le ratio qui est de 0,05. C'est deux valeurs concordent, mais si on triple la masse de départ le ratio passe de 1,12 à 1,45. Ceci peut s'expliquer par le fait que lorsque la masse dépasse un certain point, elle devient moins bien distribuée sur l'engin et augmente la force de frottement.

En ce qui concerne la hauteur (voir le tableau 2), lorsqu'on la double, l'énergie potentielle gravitationnelle double aussi. Le ratio de l'énergie potentielle gravitationnelle passe de 1,19 pour une hauteur de 1,041 m à 1,22 pour une hauteur de 1,549 m. Les ratios ne sont pas exactement identiques, mais lorsqu'on regarde l'incertitude qui est de 0,05 on peut affirmer que ces ratios sont sensiblement pareils. De même que pour les autres ratios dans le tableau 2.

Ce qui infirme notre première hypothèse qui était que la distance parcourue est proportionnelle à l'énergie potentielle gravitationnelle, étant donné que la masse n'est pas proportionnelle à l'énergie potentielle gravitationnelle.

Notre deuxième hypothèse était que si la masse double, l'énergie potentielle gravitationnelle et cinétique vont doubler. Puisque l'énergie cinétique est proportionnelle à la distance, il est possible de déterminer si celle-ci double en regardant

le nombre de tours effectué par l'engin. À partir du tableau 4, on peut affirmer que la distance double pratiquement si on double la masse. En effet, avec une masse de 0,5 kg on obtient une moyenne de 2,7 tours et si on double la masse à 1 kg on obtient une moyenne de 4,9 tours. Comme il y a une incertitude de 0,1 tour, on peut affirmer que si on double la masse, la distance parcourue sera 1,81 fois plus élevée et non 2 comme le prédisait la théorie. Lorsque la masse passe de 0,5 kg à 1,5 kg c'est un facteur 3 qui devrait apparaître, cependant dans le tableau 4 on peut voir un facteur de 2,19. Avec ces chiffres on voit que plus la masse augmente, plus le facteur de multiplication est éloigné de la valeur théorique. Ceci peut s'expliquer par le fait qu'en augmentant la masse, on change la façon dont le poids est distribué sur le véhicule ce qui augmente par le fait même la force de frottement qui agit sur l'engin. C'est pourquoi il effectue un nombre de tours moindre.

Notre troisième hypothèse était que si la hauteur double, l'énergie potentielle gravitationnelle et l'énergie cinétique double aussi. Comme l'énergie cinétique est proportionnelle à la distance, on peut trouver si celle-ci double en regardant si le nombre de tours effectué par le bolide double aussi. À partir du tableau 5, on peut affirmer que la distance augmente pratiquement du même facteur que la hauteur. Effectivement, avec une masse de 0,5 kg et une hauteur de 1,041 m, on a obtenu 1,9 tours. Avec la même masse et une hauteur de 1,549 le nombre de tours est 2,7. Ce qui veut dire qu'en augmentant la hauteur par un facteur 1,49, on augmente le nombre de tours par un facteur 1,42. Ensuite, pour la masse de 1 kg avec les mêmes hauteurs, on obtient respectivement 3,4 et 4,9 tours. Cela permet d'affirmer qu'en augmentant la hauteur par un facteur 1,49, le nombre de tours augmente par un facteur 1,44. Finalement, avec la masse de 1,5 kg et la hauteur de 0,902 m le nombre de tours était

de 3,9. Pour la même masse et la hauteur de 1,453 m on a obtenu 5,9 tours. Cela veut dire qu'en augmentant la hauteur par un facteur 1,61, on augmente le nombre de tours par un facteur 1,51. Avec les incertitudes, on peut affirmer que lorsque la hauteur double, l'énergie cinétique va doubler aussi.

Notre dernière hypothèse était que si la masse ou la hauteur augmente d'un facteur 2 alors la vitesse augmentera d'un facteur  $\sqrt{2}$ . Étant donné que c'est un système avec du frottement, il n'a pas de vitesse constante et il est alors impossible de déterminer à quel moment calculer celle-ci. De ce fait nous avons calculé la vitesse moyenne, mais ce n'est pas une valeur assez précise pour vérifier notre hypothèse.

## 7.0 CONCLUSION

La première hypothèse de l'expérimentation est que la distance parcourue est proportionnelle à l'énergie potentielle gravitationnelle. Cette hypothèse a été infirmée puisqu'en doublant la masse, l'énergie potentielle gravitationnelle n'est pas doublée même en regardant les incertitudes.

La deuxième hypothèse de l'expérimentation était que si la masse double, l'énergie potentielle gravitationnelle ainsi que l'énergie cinétique vont doubler. Cette hypothèse a été infirmée puisqu'elle était valable seulement lorsque la masse était peu élevée. Plus la masse était élevée, plus la force de frottement était également élevée, c'est pourquoi l'engin ne parcourait pas une distance plus élevée. Étant donné l'incertitude sur le nombre de tours qui est de 0,1 tour, et qu'on utilisait le nombre de tours pour calculer la distance parcourue, cela rend donc cette méthode peu précise même si l'incertitude de la masse était très faible soit 0,001 kg.

La troisième hypothèse de l'expérimentation qui était si la hauteur double, l'énergie potentielle gravitationnelle et l'énergie cinétique vont doubler. Cette hypothèse a été affirmée puisque lorsqu'on regarde les valeurs de la distance parcourue qui sont proportionnelles à l'énergie potentielle gravitationnelle, il est possible de remarquer qu'avec les incertitudes, l'énergie double si la hauteur double. Encore une fois cette

## **8.0 PERSPECTIVES D'AVENIR**

Comme perspectives d'avenir, il sera intéressant de faire les mêmes tests qui ont été effectués, mais avec plus de masses et de hauteurs différentes dans le but d'affirmer davantage la corrélation qui existe entre la masse, la hauteur et l'énergie potentielle gravitationnelle. De plus, l'utilisation d'un engin plus optimisé pour réduire le frottement permettrait d'obtenir des résultats plus proches de la théorie étant donné que le frottement sera moindre. Pour optimiser l'engin, il faudrait tout d'abord utiliser le corps du bolide en métal utilisé lors de la finale de *Science, on tourne!* puisque celui-ci est plus stable. Une utilisation d'un système de roulement à bille plus performant et plus lubrifié ainsi qu'un système de palan qui inclut un système de roulement à bille augmenterait les performances de l'engin tout en réduisant la force de frottement.

méthode n'est pas très précise étant donné l'incertitude sur le nombre de tours qui est de 0,1 tour.

En ce qui concerne la dernière hypothèse, il est impossible de vérifier si elle est vraie ou fautive puisqu'il a été impossible de calculer une vitesse suffisamment précise pour calculer le rapport des masses et des hauteurs avec la vitesse.

L'utilisation d'une imprimante 3D pour usiner les différentes parties de l'engin serait intéressante afin de réduire le poids et le frottement.

## **9.0 Remerciements**

Nous voulons tout d'abord remercier notre tuteur M. Jean-Norbert Fournier sans qui il nous aurait été impossible de réaliser ce projet et il nous a été d'une grande utilité en nous partageant son savoir, son temps ainsi que ses outils. Nous tenons également à remercier Martin Gagnon pour nous avoir soudé notre mat et pour avoir usiné notre système de différentiel. Nous voulons aussi remercier notre technicienne de laboratoire madame Jessica Maltais pour sa patience à notre égard et pour l'intérêt qu'elle portait à notre projet. Et pour terminer à Nicolas Perron-Bouchard et Julien Fillion qui nous ont grandement aidé dans la conception de l'engin à travers la session.

## RÉFÉRENCE

-Internet 1 : Gravity energy, Gravity Energy Ltd., consulté le 6 mai 2019,  
<http://gravityenergy.nl/efficiency>.

-Internet 2: Énergie hydroélectrique, Wikipédia, 20 avril 2019, consulté le 6 mai 2019  
[https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie\\_hydro%C3%A9lectrique](https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_hydro%C3%A9lectrique).

-Internet 3 : Le rendement énergétique, Alloprof, consulté le 6 mai 2019  
<http://www.alloprof.qc.ca/BV/pages/s1091.aspx>.

-Internet 4 : Tout savoir sur le défi, Science on tourne, consulté le 6 mai 2019,  
<http://scienceontourne.com/defi-2019/>.

**-Marc Séguin, Julie Descheneau, Benjamin Tardif, 2010, Physique mécanique tome A**

## ANNEXES

Tableau 7. Circonférence du cercle et son incertitude.

Rayon (m)	Incertitude (m)	Circonférence du cercle (m)	Incertitude (m)
0,4001	0,0008	2,514	0,005

Tableau 8. Énergie et rendement énergétique selon la hauteur 1.

Hauteur 1 (m) ± (0,0008)	Masse ± 0,001 (kg)	Énergie théorique	Incertitude énergie théorique	Énergie expérimentale	Incertitude énergie expérimentale	Rendement énergétique (%)
1,5494	0,500	7,60	0,02	X	X	X
	0,500	7,60	0,02	X	X	X
	0,500	7,60	0,02	X	X	X
	0,500	7,60	0,02	X	X	X
	0,500	7,60	0,02	X	X	X
1,5494	1,000	15,19	0,02	0,038	0,002	0,25
	1,000	15,19	0,02	0,074	0,004	0,49
	1,000	15,19	0,02	0,066	0,004	0,43
	1,000	15,19	0,02	0,065	0,004	0,43
	1,000	15,19	0,02	0,062	0,004	0,41
1,4526	1,500	21,36	0,02	0,137	0,007	0,64
	1,500	21,36	0,02	0,132	0,007	0,62
	1,500	21,36	0,02	0,122	0,006	0,57
	1,500	21,36	0,02	0,124	0,006	0,58
	1,500	21,36	0,02	0,119	0,006	0,56

Tableau 9. Énergie et rendement énergétique selon la hauteur.

Hauteur 2 ± 0,0008 (m)	Masse ± 0,001 (kg)	Énergie théorique	Incertitude énergie théorique	Énergie expérimentale	Incertitude énergie expérimentale	Rendement énergétique (%)
1,0414	0,500	5,11	0,01	0,034	0,005	0,66
	0,500	5,11	0,01	0,028	0,004	0,55
	0,500	5,11	0,01	0,027	0,004	0,52
	0,500	5,11	0,01	0,035	0,005	0,68
	0,500	5,11	0,01	0,033	0,004	0,64

1,0414	1,000	10,21	0,01	0,044	0,003	0,43
	1,000	10,21	0,01	0,039	0,003	0,38
	1,000	10,21	0,01	0,036	0,003	0,36
	1,000	10,21	0,01	0,039	0,003	0,38
	1,000	10,21	0,01	0,035	0,003	0,34
0,9017	1,500	13,26	0,02	0,135	0,010	1,02
	1,500	13,26	0,02	0,114	0,008	0,86
	1,500	13,26	0,02	0,094	0,007	0,71
	1,500	13,26	0,02	0,081	0,006	0,61
	1,500	13,26	0,02	0,133	0,009	1,01

Tableau 10. Vitesse, temps et distance parcourue selon la hauteur 1.

Hauteur 1 (m) $\pm$ (0,0008)	Masse $\pm$ 0,001 (kg)	Vitesse (m/s)	Incertitude de vitesse	Distance totale parcourue (m)	Incertitude (m)	Nombre de tours $\pm$ 0,1	Temps du 2e tour $\pm$ 0,2 (s)	Temps total $\pm$ 0,2 (s)
1,5494	0,500	X	X	7,0392	0,2654	2,8	7,62	X
	0,500	X	X	6,7878	0,2649	2,7	6,94	X
	0,500	X	X	6,68724	0,2647	2,66	7,47	X
	0,500	X	X	6,68724	0,2647	2,66	7,44	X
	0,500	X	X	6,68724	0,2647	2,66	6,1	X
1,5494	1,000	0,27593	0,00866	11,313	0,2739	4,5	8,06	41
	1,000	0,38529	0,01111	13,0728	0,2774	5,2	5,5	33,93
	1,000	0,36313	0,01035	13,0728	0,2774	5,2	5,9	36
	1,000	0,35965	0,01043	12,8214	0,2769	5,1	5,35	35,65
	1,000	0,35166	0,01102	11,8158	0,2749	4,7	5,29	33,6
1,4526	1,500	0,42795	0,01112	14,8326	0,2809	5,9	4,85	34,66
	1,500	0,41936	0,01104	14,5812	0,2804	5,8	5,16	34,77
	1,500	0,40324	0,01053	14,5812	0,2804	5,8	5,24	36,16
	1,500	0,40704	0,01047	14,8326	0,2809	5,9	5,6	36,44
	1,500	0,39798	0,01019	14,8326	0,2809	5,9	5,36	37,27

Tableau 11. Vitesse, temps et distance parcourue selon la hauteur 2.

Hauteur 2 $\pm$ 0,0008 (m)	Masse $\pm$ 0,001 (kg)	Vitesse (m/s)	Incertitude de vitesse	Distance totale parcourue (m)	Incertitude (m)	Nombre de tours $\pm$ 0,1	Temps du 2e tour $\pm$ 0,2 (s)	Temps total $\pm$ 0,2 (s)
1,0414	0,500	0,37	0,03	4,8	0,3	1,9	5	13
	0,500	0,33	0,02	4,8	0,3	1,9	6,54	14,31
	0,500	0,33	0,02	4,8	0,3	1,9	7,13	14,63
	0,500	0,37	0,02	5,0	0,3	2	6,41	13,51

	0,500	0,36	0,02	5,0	0,3	2	7,35	13,94
1,0414	1,000	0,30	0,01	9,1	0,3	3,6	7,47	30,45
	1,000	0,28	0,01	8,8	0,3	3,5	7,84	31,52
	1,000	0,27	0,01	8,3	0,3	3,3	8,2	30,79
	1,000	0,28	0,01	8,3	0,3	3,3	7,46	29,59
	1,000	0,26	0,01	8,3	0,3	3,3	8,5	31,38
0,9017	1,500	0,42	0,02	9,8	0,3	3,9	4,5	23,14
	1,500	0,39	0,01	9,6	0,3	3,8	6,05	24,5
	1,500	0,35	0,01	9,6	0,3	3,8	5,75	26,96
	1,500	0,33	0,01	9,3	0,3	3,7	5,89	28,22
	1,500	0,42	0,01	10,3	0,3	4,1	4,46	24,44