



Ergomètre de Joule-Foucault

Projet BA 1 2011-2012

Rapport final

LECOMTE Marceau, MARCHANT Nikita,
PLETSCHETTE Max, SAID Salim, VEKEMANS Benoit.

Groupe 14

Abstract

“Ergomètre de Joule-Foucault”, par Lecomte Marceau, Marchant Nikita, Pletschette Max, Saïd Salim et Vekemans Benoit, Université Libre de Bruxelles, 2011-2012

Nombre de mots : 6478

Cette année, le projet BA1 consiste en la construction d'un ergomètre permettant de chauffer de l'eau à l'aide des courants de Joule-Foucault. La finalité est de pouvoir chauffer un volume de 10 litres d'eau de 3 degrés en 15 minutes, et de développer une puissance de 250 Watt pendant au minimum une minute.

Le premier objectif du groupe a été de comprendre le principe des courants de Joule-Foucault et de modéliser leur action sur un conducteur en mouvement.

Le dispositif d'entraînement choisi par le groupe est un cyclo-ergomètre. Celui-ci, dérivé d'un vélo conventionnel, est relié par une chaîne au caisson contenant le frein magnétique, partie majeure de l'ergomètre de Joule-Foucault, constitué d'une plaque de cuivre et de 8 paires d'aimants disposés de part et d'autre de cette plaque.

“Joule-Eddy's ergometer”, by Marceau Lecomte, Nikita Marchant, Max Pletschette, Salim Saïd and Benoit Vekemans, Université Libre de Bruxelles, 2011-2012

This year's multidisciplinary project of BA1 was to build an ergometer that was able to heat water thanks to the Eddy currents principle. The main goal was to heat a volume of 10 liters of water by 3 degrees in 15 minutes, and to produce a power of 250 Watts for at least one minute. The first objective of the group is to understand how Eddy currents work. It has to model it's action on a conducting plate. The chosen machine is a cyclo-ergometer. A regular bicycle was modified for this purpose. The bike is linked to the magnetic brake by an axle and a chain. This system consists of a copper plate rotating between 8 pairs of magnets arranged on either side of the plate.

Table des matières

1	Introduction	1
2	Cahier des charges	2
3	Théorie	3
3.1	Force de Laplace	3
3.2	Courants de Foucault	4
3.3	Quantification de la force de freinage (frein magnétique)	5
4	Choix de l'ergomètre	7
4.1	Rameur	7
4.2	Cyclo-ergomètres	7
4.3	Conclusion	8
5	Modélisation	9
5.1	Transmission	9
5.1.1	Calculs des rapports de vitesse	9
5.1.2	Force appliquée sur les pédales	11
5.2	Frein magnétique	11
5.2.1	Choix du conducteur	11
5.2.2	Diminution du champ magnétique en fonction de la distance	12
5.2.3	Détermination du nombre d'aimants	12
6	Construction	14
6.1	Ergomètre	14
6.2	Structure	15
6.3	Cuve	16
6.4	Fixation des aimants	16
7	Expérimentations, pertes et rendements	18
7.1	Mesures	18
7.1.1	Dispositif de mesure	18
7.1.2	Expérience	18
7.1.3	Calcul du lambda expérimental	19
7.2	Pertes	20

7.3 Rendement	21
7.3.1 Rendement mécanique	21
7.3.2 Rendement thermique	21
7.3.3 Conclusion	22
8 Fonctionnement de groupe	23
9 Conclusion	24
A Annexes	I
A.1 Budget	I

Table des figures

1 Une Force s'applique sur les charges	3
2 Les Charges descendent	3
3 Frein magnétique	4
4 Circulation des courants	4
5 Volume dans l'entre-fer	6
6 Schéma de la transmission	9
7 Schéma d'un aimant cylindrique.	12
8 Tige filetée, dernier pignon et conducteur	14
9 Partie centrale de la transmission	15
10 Photo de l'ergomètre	15
11 Photo de la cuve	16
12 Disposition des aimants	17
13 Enrouleur	18
14 Appareil de mesure	18
15 Graphe de la puissance en fonction de la vitesse au carré	20

1 Introduction

Depuis quelques siècles, la révolution technologique en marche ne cesse d'amener des nouveautés dans beaucoup de domaines, plus variés les uns que les autres. Ceci dit, elle soulève également beaucoup de nouvelles problématiques, que les futurs ingénieurs se doivent de comprendre afin de pouvoir les négocier au mieux.

Nous vivons actuellement dans un monde ultra technologique, où beaucoup de tâches sont automatisées. La notion même d'énergie est très floue pour beaucoup, tant on dispose d'électricité facilement. Pourtant, il est important de se rendre compte de la quantité phénoménale d'énergie qu'on utilise quotidiennement.

Ainsi, le projet d'année des étudiants BA1 en ingénieur civil propose la réalisation d'un ergomètre capable de chauffer de l'eau, en utilisant uniquement les courants de Foucault. Quoi de mieux que de chauffer son eau à la sueur de son front, pour se rendre compte de ce que cela représente ?

Au-delà de la problématique, mener à bien un tel projet requiert certaines compétences, et engendre un réel apprentissage chez les étudiants, qui se doivent de passer par diverses étapes.

Ce dossier commencera par mettre en place la théorie nécessaire à la compréhension des courants de Foucault, élément indispensable à la modélisation du projet. Cette dernière sera ensuite développée, en expliquant les différents choix auxquels nous avons été confrontés. Par la suite, la construction de l'ergomètre et les expérimentations qui ont été menées seront abordées.

2 Cahier des charges

Extrait de « Guide du projet BA1 : L'Ergomètre de Joule-Foucault. » [8]

Il s'agit de concevoir et fabriquer un « ergomètre » à force de résistance magnétique dont le but est de chauffer de l'eau avec un haut rendement de conversion. Son fonctionnement devra être basé sur l'effet Joule associé aux courants de Foucault générés par le mouvement relatif entre un matériau conducteur et le champ magnétique d'un aimant permanent.

L'ergomètre devra répondre aux contraintes suivantes :

- La quantité d'eau à pouvoir chauffer est de 10 litres.
- La puissance de chauffe pouvant être atteinte et maintenue pendant au moins une minute est de 250 Watts.
- En partant de la température ambiante, l'eau doit pouvoir être chauffée à un taux de 3°C par quart d'heure.
- L'ergomètre doit être conçu pour permettre la mesure de la température en temps réel.
- L'ergomètre doit être conçu pour permettre un remplissage et une vidange aisée de l'eau.
- La cuve contenant l'eau ne peut pas présenter de fuites. Une protection contre les projections d'eau vers l'extérieur doit être prévue aux points d'ouverture s'ils existent.
- Il faut prévoir un dispositif simple de mesure des vitesses et des forces que doit exercer l'utilisateur de l'ergomètre dans différents régimes de fonctionnement (si nécessaire un démontage partiel rapide pourrait être fait pour réaliser cette mesure).
- L'ergomètre doit impérativement être portable et ses dimensions doivent lui permettre de passer par une porte de dimension standard (il peut être démontable si cela s'avère nécessaire au transport).
- Les pièces mobiles en mouvement rapide présentant des dangers de choc ou de pincement doivent faire l'objet de protections adéquates.
- La conception de l'ergomètre devra prendre en compte les contraintes ergonométriques permettant un usage prolongé sans risque pour l'utilisateur.

3 Théorie

La première étape du projet consiste à établir le cadre théorique indispensable à la compréhension des « courants de Foucault », afin de pouvoir les modéliser au mieux. Pour ce faire, il est nécessaire d'étudier les forces de Lorentz et de Laplace. Ces deux forces forment le frein magnétique, nécessaire à l'élévation de la température du conducteur par effet Joule. Les développements suivants sont principalement inspirés des références [3] et [4].

3.1 Force de Laplace

Soit un conducteur en mouvement placé dans un champ magnétique \vec{B} , animé d'une vitesse \vec{v} . Une force s'applique sur les charges de ce conducteur (Figure 1), selon la loi de Lorentz :

$$\boxed{\vec{f}_m = q\vec{v} \times \vec{B}}, \quad (1)$$

dans laquelle : $[\vec{f}_m] = \text{N}$, $[q] = \text{C}$, $[\vec{v}] = \text{m s}^{-1}$, $[\vec{B}] = \text{T}$. Ainsi, les charges du conducteur subissant une force \vec{f}_m vers le bas, sont animées d'une vitesse \vec{v}_i (dans le référentiel du conducteur), amenant les charges positives vers le bas, et par défaut de charges positives, les charges négatives vers le haut (Figure 2).

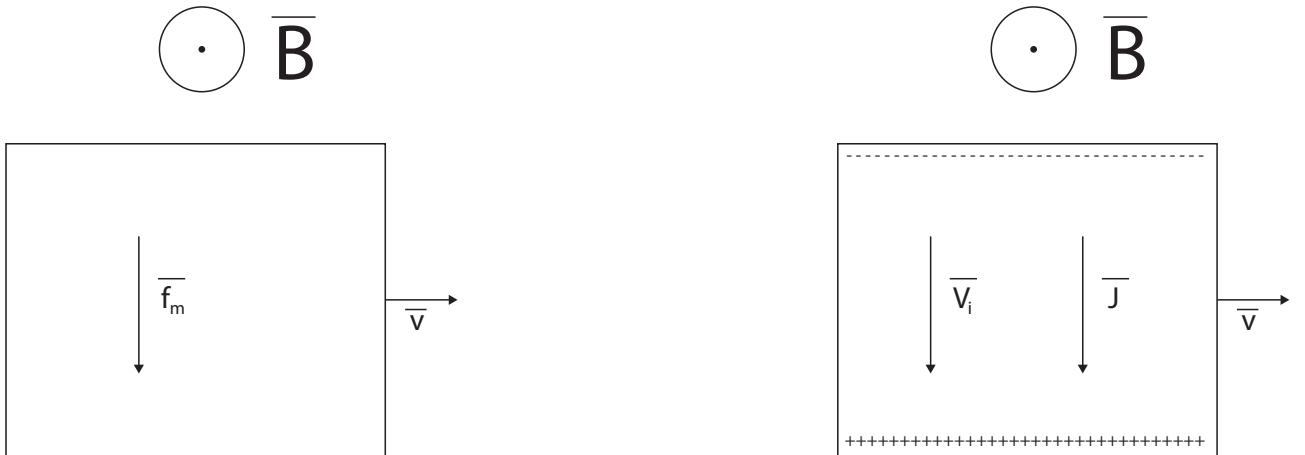


FIGURE 1 – Une Force s'applique sur les charges

FIGURE 2 – Les Charges descendent

On introduit ici la densité de courant J définie par :

$$J = \frac{I}{S} \quad (2)$$

avec $J = \eta_e q v_i$ et $[J] = \text{A m}^{-2}$, S étant la surface dans laquelle le courant passe ($[S] = \text{m}^2$). Les charges animées d'une vitesse \vec{v}_i et plongées dans le champ magnétique \vec{B} subissent à nouveau une force magnétique \vec{f}'_m dans le sens opposé à la vitesse \vec{v} du conducteur (Figure 3).

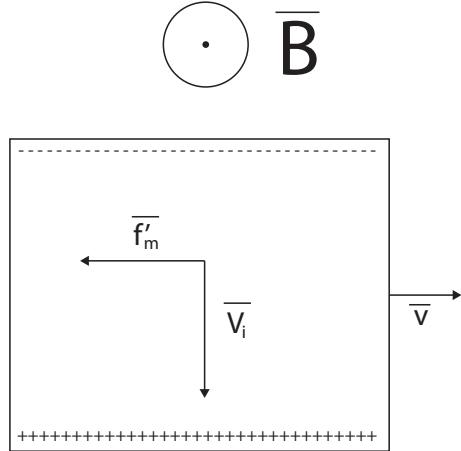


FIGURE 3 – Frein magnétique

Le conducteur subit ainsi une force \vec{F}_M (force de Laplace), dans le même sens que \vec{f}'_m pour contrer le mouvement initial \vec{v} . La force de Laplace peut être vue comme la force de Lorentz au niveau macroscopique.

3.2 Courants de Foucault

Malheureusement, cette force de Laplace n'existera pas indéfiniment et donc le frein disparaîtra. En effet, la polarisation du conducteur (séparation des charges positives et négatives) crée un champ électrique \vec{E}_s (Figure 4), ce dernier provoquant une force \vec{f}_E sur les charges. ($\vec{f}_E = q\vec{E}_s$). Ainsi, quand $\vec{f}_E + \vec{f}'_m = 0$, les charges ne bougent plus, il n'y a donc plus de force de Laplace.

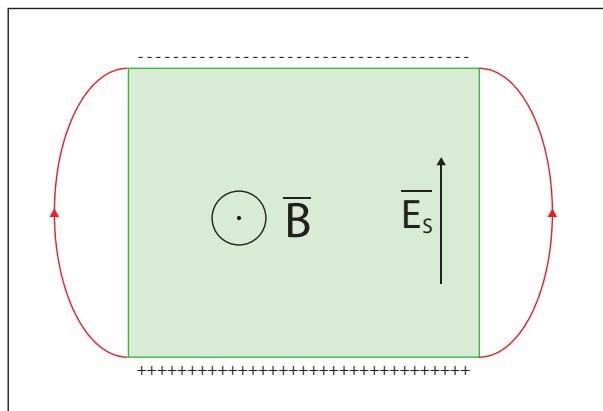


FIGURE 4 – Circulation des courants

Il existe cependant une solution : il suffit de restreindre la zone du conducteur plongée dans le champ magnétique, laissant une partie du conducteur hors de ce champ (on admet ici un conducteur beaucoup plus grand que la zone d'entre-fer de l'aimant, en vert sur la Figure 4).

Les charges peuvent donc circuler en dehors de la zone plongée dans le champ magnétique \vec{B} ,

sous l'influence du champ électrique \vec{E}_s (représenté en rouge sur la Figure 4). Il se forme ainsi une boucle qui ramène les charges positives en haut, permettant donc les « courants de Foucault » dans le conducteur.

3.3 Quantification de la force de freinage (frein magnétique)

Afin de quantifier la valeur de cette force de Laplace, il est judicieux d'établir un parallèle entre la force électrique et la force magnétique. De manière générale, la vitesse des charges v_i est proportionnelle à la force électrique f_E ($[f_E] = \text{N C}^{-1}$), qui est elle-même proportionnelle au champ électrique E ($v_i \propto f_E \propto E_s$). Donc :

$$v_i = \mu E_s, \quad (3)$$

Où μ est une constante qui dépend du conducteur, appelée la mobilité des électrons, $[\mu] = \text{m}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$.

On peut alors faire le rapprochement entre la force électrique f_E et la force magnétique f_m :

$$\begin{aligned} f_E &= qE_s, \\ f_m &= qvB, \end{aligned}$$

($\vec{v} \times \vec{B} = vB$ car \vec{v} et \vec{B} sont perpendiculaires). Nous pouvons donc faire le rapprochement :

$$E_s = vB. \quad (4)$$

Ce qui donne, dans (3) :

$$v_i = \mu vB.$$

Rappelons-nous de la densité de courant J vue au point 3.1 dans l'équation 2, et remplaçons v_i par son équivalent (3) :

$$J = \eta_e q v_i = \eta_e q \mu E.$$

Introduisons ici $\sigma = \eta_e q \mu$, la conductivité électrique ($[\sigma] = \text{S m}^{-1}$) que l'on peut retrouver dans des tables :

$$\begin{aligned} J &= \sigma E, \\ J &= \sigma vB. \end{aligned}$$

Par le même rapprochement que (4) :

$$I = S\sigma vB.$$

Schématisons la zone du conducteur placée dans l'entre-fer de l'aimant :

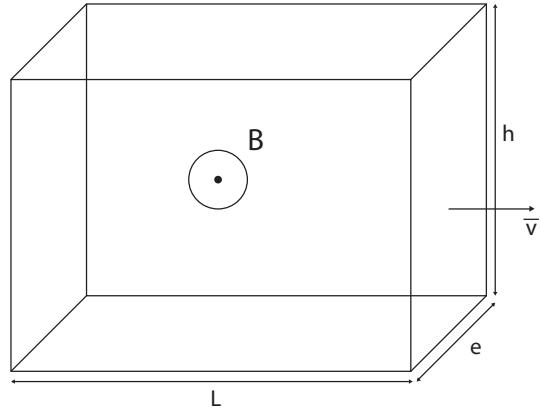


FIGURE 5 – Volume dans l'entre-fer

Définissons \vec{B} comme étant le champ dû à un seul aimant. Comme les aimants sont placés face à face, intéressons-nous à l'intensité induite par chaque paire d'aimants :

$$I = 2Lh\sigma v B, \quad (5)$$

Car $S = Lh$, où L est la longueur de l'entre-fer, h la hauteur et I l'intensité du courant ($[I] = \text{A}$). Reprenons notre force de Laplace qui vaut, pour chaque paire :

$$F_M = 2IeB,$$

En remplaçant I par l'expression déterminée ci-dessus (5), on a, pour la force de Laplace :

$$F_M = 4eLh\sigma v B^2,$$

eLh étant le volume de conducteur placé dans l'entre-fer ($[eLh] = \text{m}^3$). La force totale sera donc :

$$\boxed{F_M = 4NeLh\sigma v B^2}, \quad (6)$$

N étant le nombre de paire d'aimants. On arrive enfin à l'expression de la force magnétique (frein magnétique) proportionnelle à la vitesse.

$$\boxed{F_M = \lambda v}, \quad (7)$$

λ étant donc constant pour une même configuration des aimants et du conducteur, et valant :

$$\lambda = 4NeLh\sigma B^2.$$

L'équation 6 permet de modéliser au mieux l'ergomètre. En effet, en contrôlant les différents paramètres de configuration, on peut atteindre la puissance désirée. ($P = Fv$)

L'équation 7, quant à elle, permettra de comparer facilement les données expérimentales à la théorie.

4 Choix de l'ergomètre

Pour mener à bien ce projet, l'un des points essentiels est le choix de l'ergomètre. En effet, la suite des événements s'articule sur cette décision. Dès le début, une distinction a été faite entre deux types d'ergomètres : les rameurs et les cyclo-ergomètres.

4.1 Rameur

Bien qu'étant tous les deux capables de remplir le cahier des charges, les cyclo-ergomètres et les rameurs présentent beaucoup de différences en termes d'utilisation. Les rameurs mettent tout le corps humain à l'épreuve (y compris les muscles habituellement peu utilisés) et une certaine technique doit être mise au point par l'utilisateur pour qu'ils puissent être utilisés de manière efficace et sûre.

Le rameur présente aussi certaines difficultés spécifiques, telles que la mise en place d'un siège mobile ou d'un système d'enroulement de la corde. Pour que le conducteur puisse tourner de façon continue, il faudrait le raccorder au reste du mécanisme par une roue libre, ce qui rajoute encore un obstacle.

4.2 Cyclo-ergomètres

Les cyclo-ergomètres sont en contrepartie plus simples à utiliser. Ils font uniquement appel à des muscles fort entraînés et ne nécessitent pas d'adopter une technique d'utilisation particulière. La seule partie mobile est la transmission.

Plusieurs types de cyclo-ergomètres ont été étudiés :

- les vélos « assis »,
- les vélos « couchés »
- les vélos elliptiques.

Le dernier type étant trop difficile à fabriquer et peu puissant, il a été éliminé assez rapidement. Les différences entre les deux autres types de vélos sont assez minimes, la principale différence étant la position de l'utilisateur. L'avantage du vélo couché est qu'il sollicite moins le cœur [9] qu'un vélo classique. En effet, l'utilisateur étant couché, le muscle cardiaque doit fournir moins d'effort pour remonter le sang des jambes qu'en position assise. Cependant, récupérer un vélo couché s'est révélé hors de prix, voire infaisable, et en fabriquer un se serait montré fort compliqué ou, dans le meilleur des cas, aurait nécessité de lourds travaux de soudure. Un autre avantage du vélo classique est son système de vitesses déjà intégré, ce qui peut permettre une forte démultiplication ainsi qu'une souplesse dans celle-ci.

4.3 Conclusion

Ergomètre	Avantage	Désavantage
Vélo elliptique	Fait travailler bras et jambes	Récupération impossible Faible puissance ¹
Rameur	Utilise beaucoup de muscles Récupère l'énergie élastique ²	Fatigue trop rapidement Récupération impossible Technique à apprendre Beaucoup de parties mobiles
Vélo couché	Sollicite moins le coeur	Récupération impossible
Vélo assis	Récupération possible Mouvement continu Système de vitesses	Rendement pas maximum ²

TABLE 1 – Récapitulatif des avantages et inconvénients des différents ergomètres

Le choix s'est finalement porté sur un vélo assis. Son ergonomie, son système de vitesses, sa simplicité d'utilisation et de fabrication l'emportant sur les autres ergomètres.

1. L'amplitude des pédales étant trop petite, une grande force serait nécessaire pour développer un travail suffisant.

2. Une partie de l'énergie de compression des muscles sous le poids de l'utilisateur en marchant ou en courant est récupérée à la détente, un peu à la manière d'un élastique. En pédalant, cette énergie n'est pas récupérée.

5 Modélisation

Maintenant que la théorie est établie et que l'ergomètre est choisi, il est temps de passer à la modélisation. Le choix des différentes caractéristiques techniques de l'appareil se fait sur base de deux objectifs majeurs : le confort d'utilisation et la capacité à remplir les exigences demandées à moindre coût.

5.1 Transmission

5.1.1 Calculs des rapports de vitesse

Afin de savoir à quelle vitesse le conducteur peut tourner, il faut s'intéresser au rapport de vitesse entre le pédalage et le conducteur. Pour ce faire, la première étape est de déterminer expérimentalement (à l'aide d'un fréquence-mètre) la fréquence de pédalage la plus efficace et confortable. Celle-ci est environ de 1.5 tours par seconde, soit 3π rad/s. Appelons cette valeur ω_1 .

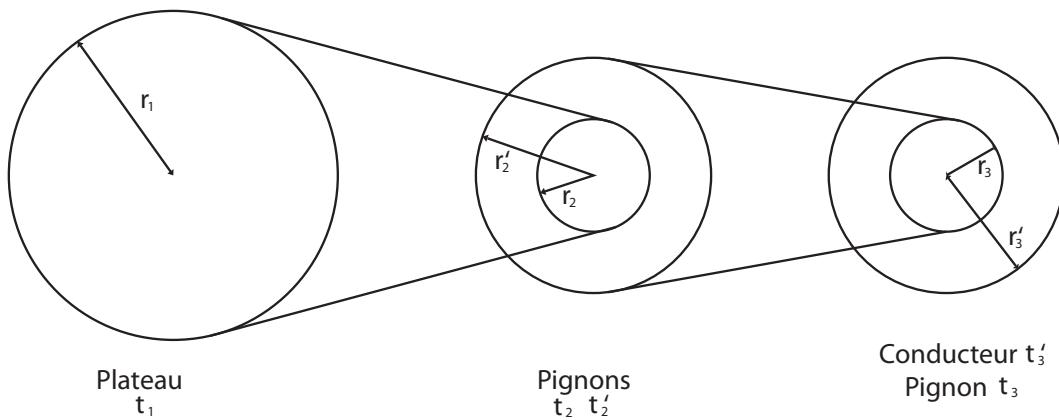


FIGURE 6 – Schéma de la transmission

Pour plus de précision dans les notations, le tableau ci-dessous reprend les différents éléments de la transmission ainsi que leurs caractéristiques. Comme sur un vélo classique, le plateau t_1 est relié par une chaîne au pignon t_2 . Une autre chaîne relie le pignon t_2' au pignon t_3 , attaché sur une tige filetée située à l'arrière du vélo, sur laquelle est fixé le conducteur. (Voir Figures 8 et 9)

nom	type	vitesse angulaire	rayon	vitesse à l'extrémité
t_1	plateau	ω_1	r_1	$v_1 = \omega_1 \cdot r_1$
t_2	pignon	ω_2	r_2	$v_2 = \omega_2 \cdot r_2$
t'_2	pignon	ω_2	r'_2	$v'_2 = \omega_2 \cdot r'_2$
t_3	pignon	ω_3	r_3	$v_3 = \omega_3 \cdot r_3$
t'_3	conducteur	ω_3	r'_3	$v'_3 = \omega_3 \cdot r'_3$

TABLE 2 – Récapitulatif des pignons

La vitesse à l'extrémité du plateau (t_1) est donnée par :

$$v_1 = \omega_1 r_1.$$

Or la vitesse à l'extrémité de t_1 est la même que celle à l'extrémité de t_2 :

$$\omega_1 r_1 = \omega_2 r_2 \Leftrightarrow \omega_2 = \frac{\omega_1 r_1}{r_2}.$$

Les vitesses angulaires ω_2 et ω'_2 sont identiques, donc :

$$v'_2 = \omega_2 r'_2 \Leftrightarrow v'_2 = \frac{\omega_1 r_1 r'_2}{r_2}.$$

Comme v_3 , la vitesse à l'extrémité de t_3 , est la même que v'_2 on a :

$$\frac{\omega_1 r_1 r'_2}{r_2} = \omega_3 r_3 \Leftrightarrow \omega_3 = \frac{\omega_1 r_1 r'_2}{r_2 r_3}.$$

La vitesse v'_3 du conducteur t'_3 vaut donc :

$$v'_3 = \frac{\omega_1 r_1 r'_2}{r_2 r_3} r'_3.$$

On a donc finalement la vitesse du conducteur liée à la vitesse angulaire ω_1 et aux différents rayons des pignons. Faisons apparaître les rapports $\frac{r_1}{r_3}$ et $\frac{r_2}{r'_2}$ dans la relation :

$$v'_3 = \omega_1 \left(\frac{r_1}{r_3} \right) \left(\frac{r'_2}{r_2} \right) r'_3, \quad (8)$$

où $\frac{r_1}{r_3}$ et $\frac{r'_2}{r_2}$ sont égaux aux rapports des dents sur chacun des pignons et où r'_3 est le rayon du conducteur. En utilisant les rapports les plus longs du vélo, la vitesse du conducteur devient :

$$v'_3 = 3\pi \left(\frac{42}{16} \right) \left(\frac{30}{14} \right) 0,07 = 3.7 \text{ m s}^{-1}.$$

5.1.2 Force appliquée sur les pédales

La force appliquée sur les pédales n'est autre que :

$$F = \frac{P}{v},$$

où P est la puissance ($[P] = \text{W}$) et v est la vitesse de pédalage (vitesse à l'extrémité des manivelles, où $[v] = \text{m s}^{-1}$). La vitesse angulaire de pédalage étant $\omega_1 = 3\pi \text{ rad s}^{-1}$ et la longueur de la manivelle $l = 0.17\text{m}$, la vitesse v est donc de :

$$v = \omega_1 l = 3\pi \cdot 0.17 = 1.60\text{m s}^{-1}.$$

La force que l'utilisateur doit appliquer sur les pédales est alors de :

$$\frac{250}{1,60} = 156.25\text{N}.$$

Cette valeur obtenue de la force rentre parfaitement dans les plages décrites par R. Leca [6] à propos des capacités humaines.

5.2 Frein magnétique

5.2.1 Choix du conducteur

Les deux critères principaux dans le choix du conducteur sont sa conductivité électrique et son prix. Les deux métaux utilisables sont donc le cuivre et l'aluminium. En effet, ce sont ceux qui ont les plus grandes conductivités électriques mis à part l'argent et l'or qui sont beaucoup trop chers (voir le tableau 3).

Après une recherche dans différents magasins et sites web, il a été possible de trouver du cuivre relativement bon marché. Malgré un rapport conductivité électrique/prix un peu inférieur à celui de l'aluminium, la conductivité supérieure ($58.0 \times 10^6 \text{ S m}^{-1}$ [7]) du cuivre permet d'utiliser une plaque plus fine et donc de perdre moins de champ magnétique, cela permettant de faire des économies sur l'achat des aimants.

Métal	Conductivité (S m^{-1})
Argent	62.1×10^6
Cuivre	58.0×10^6
Or	44.2×10^6
Aluminium	36.9×10^6

TABLE 3 – Conductivité électrique des matériaux les plus intéressants [5]

5.2.2 Diminution du champ magnétique en fonction de la distance

Les aimants ne pouvant pas être placés directement contre le conducteur, le champ magnétique à la surface de ce dernier ne correspond pas au champ magnétique à la surface de l'aimant. Il a donc fallu modéliser la perte de champ en fonction de la distance. Heureusement, le constructeur fournit une formule permettant de calculer le champ magnétique le long de l'axe de symétrie d'un cylindre (ici z) [1] :

$$B = \frac{B_0}{2} \left(\frac{D+z}{\sqrt{R^2 + (D+z)^2}} - \frac{z}{R^2 + z^2} \right),$$

B_0 étant le champ magnétique à la surface de l'aimant et B le champ au point z . $[B_0] = [B] = \text{T}$, le reste des variables sont en mètres.

Il a été décidé de placer les aimants à 5mm du conducteur, cette distance étant suffisamment faible pour ne pas perdre trop d'intensité de champ magnétique et suffisamment grande pour ne pas avoir de frottement.

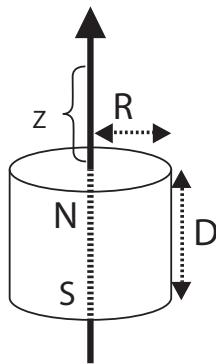


FIGURE 7 – Schéma d'un aimant cylindrique.

5.2.3 Détermination du nombre d'aimants

La force de Laplace F_M , qui s'oppose au mouvement du conducteur est décrite par l'équation 6 page 6) reprise ici :

$$F_M = NeLh\sigma v 4B^2,$$

on pose $S = hL$: surface de l'aimant. La formule devient donc :

$$F_M = NeS\sigma v 4B^2.$$

La puissance développée n'étant rien d'autre que la force multipliée par la vitesse, la puissance du frein magnétique peut donc s'écrire comme ceci :

$$P_M = NeS\sigma v^2 4B^2, \quad (9)$$

avec $[P_M] = \text{W}$. Remplaçons la vitesse par son expression trouvée au point 5.1.1 dans l'équation 8 :

$$P_M = \lambda \cdot v'_3^2,$$

avec :

$$\lambda = NeS\sigma 4B^2,$$

et :

$$v'_3 = \omega_1 \cdot \left(\frac{r_1}{r_3}\right) \cdot \left(\frac{r'_2}{r_2}\right) \cdot r'_3.$$

Afin de pouvoir calculer le nombre d'aimants, il faut fixer le plus de variables possible. La vitesse du conducteur v'_3 est connue car les rapports $\frac{r_1}{r_3}$ et $\frac{r'_2}{r_2}$ sont connus et que ω_1 et r'_3 sont connus. Comme spécifié dans la section 5.2.1, le cuivre est utilisé, ce qui fixe $\sigma = 59.6 \times 10^6 \text{ S m}^{-1}$. Le rayon du conducteur est fixé r'_3 à 0.07m (arbitrairement).

Le reste des variables dépendant des aimants, il reste à déterminer ceux-ci. Trois différents modèles d'aimants ont alors été envisagés (Voir tableau 4). Pour trouver N , il a suffit d'injecter les différentes caractéristiques des aimants ainsi que les constantes dans l'équation 9 avec $P = 250\text{W}$.

Référence	Forme	Diamètre	Hauteur	Rémanence
S-15-08N	disque	15mm	8mm	10,8T
S-25-07N	disque	25mm	7mm	10,8T
S-25-05N	disque	25mm	5mm	10,8T

TABLE 4 – Différents types d'aimants et leurs caractéristiques [2]

Pour le premier type d'aimants, cette puissance est atteinte avec 6 paires d'aimants, pour le deuxième type d'aimants, 2 paires d'aimants sont nécessaires pour atteindre les 250W et finalement pour le troisième type d'aimants, 3 paires d'aimants sont nécessaires.

L'utilisation des deuxièmes et troisièmes types d'aimants a été écartée car, en cas de soucis, par exemple si le frein magnétique est trop faible ou trop fort, l'ajout ou le retrait d'un aimant aurait été nécessaire, ce qui doublerait ou réduirait de moitié le champ magnétique, ce qui n'est évidemment pas une solution.

Le premier type d'aimants a donc été choisi. Vu que plus de paires sont nécessaires à obtenir la puissance demandée, le nombre d'aimants est plus facilement réglable en cas de problème.

Grâce à toutes ces données, il est possible de calculer $\lambda_{\text{théorique}}$ défini dans l'équation (3.3) :

$$\lambda_{\text{théorique}} = 4NeLh\sigma B^2 = 34.7$$

6 Construction

6.1 Ergomètre

Après avoir pris la décision d'utiliser un cyclo-ergomètre et après avoir modélisé le frein magnétique, la construction a pu commencer.

L'une des premières décisions prises concernant la construction fut de ne pas abîmer le vélo. Ainsi l'ergomètre serait adaptable à n'importe quel cycle. Un vélo a donc été récupéré et un home-trainer acheté d'occasion³. Grâce à ce dispositif, le vélo est très stable.



FIGURE 8 – Tige filetée, dernier pignon et conducteur

La question s'est alors posée sur le dispositif pour faire tourner la plaque du conducteur. La décision a été prise de placer le conducteur sur une tige filetée afin de pouvoir facilement fixer n'importe quelle pièce sur l'axe à l'aide d'écrous, grâce auxquels un pignon récupéré d'un autre vélo a été fixé. (Figure 8).

3. Le home-trainer a été acheté 50€ (voir budget en annexe) et sera revendu en fin d'année



FIGURE 9 – Partie centrale de la transmission

Une deuxième chaîne a ensuite été placée sur le pignon arrière du vélo, reliant celui-ci au pignon de la tige filetée. Ainsi, en pédalant, le conducteur est entraîné grâce aux deux chaînes.

6.2 Structure

Une ancienne armoire a été récupérée, dans laquelle deux trous ont été percés afin d'y placer des roulements à billes et l'axe du conducteur.



FIGURE 10 – Photo de l'ergomètre

6.3 Cuve

La cuve est un élément important de l'ergomètre. C'est elle qui va contenir les 10 litres d'eau à chauffer. Il est donc nécessaire qu'elle soit étanche et isolée.

Premièrement, il a fallu choisir un matériau. Le choix s'est porté sur du polystyrène extrudé, matériau usuellement utilisé dans l'isolation de bâtiments. Sa solidité permettant de construire entièrement la cuve dans ce matériau, et sa conductivité thermique étant très faible, celui-ci est un matériau idéal.

La cuve a été assemblée avec du silicone. L'intérieur de la cuve a ensuite été recouvert d'une couche de mastic étanche, afin de s'assurer que l'eau ne coulerait pas en dehors de la boîte.

Pour diminuer les pertes thermiques, un couvercle a évidemment été ajouté. Celui-ci a été réalisé en deux parties de façon à pouvoir le mettre et l'enlever rapidement et sans encombre. Une encoche est aussi présente pour pouvoir laisser passer le conducteur et l'axe.



FIGURE 11 – Photo de la cuve

6.4 Fixation des aimants

Pour obtenir la vitesse linéaire du conducteur la plus grande possible, les aimants doivent être placés le plus loin possible de l'axe de rotation du disque. (en restant néanmoins dans la zone de conducteur, le but étant d'obtenir des courants de Foucault). Ceux-ci sont donc placés le long d'un arc de cercle de 9 cm centré sur l'axe du conducteur (voir Figure 12).

Les aimants sont placés côte à côte avec une polarité à chaque fois inversée. Grâce à cette technique

les courants de Foucault s'intensifient. En effet, à chaque entre-fer d'un aimant se crée un champ électrostatique et comme les champs magnétiques sont à chaque fois inversés, les champs électrostatiques de chaque entre-fer sont en alternance à cause de la loi de Lorentz. Ceci donc permet aux électrons de compenser le défaut d'électrons de chaque côté. Il y a donc deux fois la possibilité de courants de Foucault : d'une extrémité de l'entre-fer à l'autre et entre deux entre-fers.

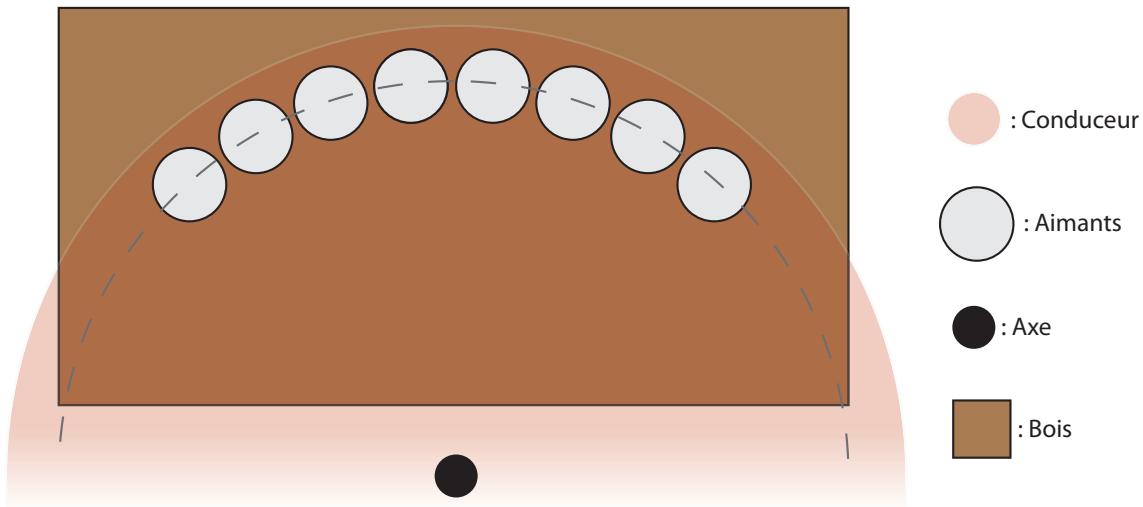


FIGURE 12 – Disposition des aimants

7 Expérimentations, pertes et rendements

7.1 Mesures

Ayant trouvé le lambda théorique (section 5.2.3), il faut maintenant trouver le lambda expérimental afin de calculer les rendements et de vérifier que nos pertes ne sont pas trop importantes. Lambda est défini comme liant la puissance au carré de la vitesse au bord du disque de cuivre. (Voir équation 7)

$$P = \lambda v_3'^2$$

Afin de déterminer λ , il faut passer par la fabrication d'un appareil de mesure permettant de développer une certaine puissance. Il ne reste donc plus qu'à mesurer la vitesse du conducteur pour déterminer λ .

7.1.1 Dispositif de mesure

Afin de développer une puissance mesurable, il suffit de laisser tomber des masses dans le champ gravitationnel, pendues à une corde enroulée autour d'un cylindre centré sur l'axe sur lequel se trouve le conducteur. L'axe étant à moins d'un mètre du sol, il a été nécessaire d'utiliser un poteau d'environ 2 mètres de haut afin de faire passer la corde par une poulie fixée au sommet, et ainsi allonger le temps de chute des poids. Ainsi, en considérant que la vitesse de chute est constante (en ne comptant donc pas les premiers instant de chute), la puissance développée par la masse n'est autre que :

$$P = m_{poids} g v_{poids}$$



FIGURE 13 – Enrouleur



FIGURE 14 – Appareil de mesure

7.1.2 Expérience

Ainsi, en connaissant la longueur de la chute du poids et en mesurant le temps de chute, il est possible de mesurer sa vitesse. Ensuite, en répétant l'expérience plusieurs fois avec des masses dif-

férentes, on obtient facilement une grande plage de valeurs afin d'avoir une valeur plus précise du lambda expérimental.

7.1.3 Calcul du lambda expérimental

En considérant qu'il n'y a pas de pertes entre le poids et le disque (l'axe du conducteur étant soutenu par des roulements à bille), on peut considérer que la puissance développée par le poids est égale à celle du frein magnétique. La puissance du frein devient donc :

$$P_{frein} = m_{poids} \cdot g \cdot v_{poids}.$$

Pour obtenir le lambda il ne reste donc qu'à diviser ce résultat par le carré de la vitesse du bord du disque. Pour trouver cette vitesse, il est d'abord indispensable de trouver la vitesse angulaire de l'axe. Celle-ci est égale à la vitesse du poids divisée par le rayon de l'enrouleur :

$$\omega_3 = \frac{v_{poids}}{r_{enrouleur}}.$$

Pour finalement trouver la vitesse du bord du disque de cuivre, il suffit alors de multiplier cette vitesse angulaire par le rayon du disque :

$$v_{disque} = \omega_3 r'_3.$$

En divisant finalement la puissance développée par le poids par le carré de la vitesse du bord du disque de cuivre, le $\lambda_{expérimental}$ vaut :

$$\lambda_{expérimental} = \frac{P_{poids}}{v'^2_3} = \frac{m_{poids} \cdot g \cdot v_{poids}}{\left(\frac{v_{poids}}{r_{enrouleur}} \cdot r'_3\right)^2}.$$

Ceci dit, le $\lambda_{expérimental}$ n'est rien d'autre que la pente du graphe de la puissance en fonction de la vitesse au carré. En portant les différentes mesures effectuées et en traçant la courbe de tendance des points, on obtient un $\lambda_{expérimental} = 52.5$.

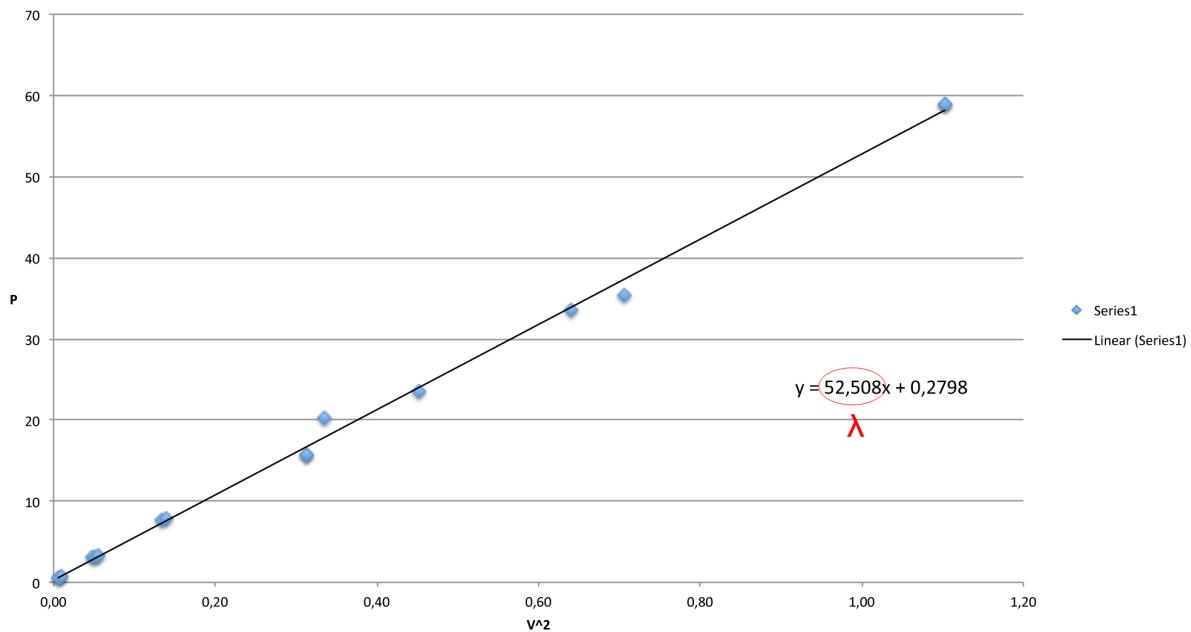


FIGURE 15 – Graphe de la puissance en fonction de la vitesse au carré

Ce résultat est relativement proche de celui obtenu théoriquement : ($\lambda_{théorique} = 34.7$). La différence s'explique par les pertes dues aux frottements et par les imprécisions de modélisation du champ magnétique.

7.2 Pertes

Maintenant que la valeur expérimentale de la force de freinage est établie, il reste à caractériser les pertes de l'ergomètre ainsi qu'à calculer son rendement.

Tout d'abord, les pertes possibles doivent être identifiées puis le(s) rendement(s) de notre ergomètre doivent être mesurés. Il y a deux catégories de pertes, les pertes thermiques et les pertes mécaniques. Comme pertes mécaniques, trois principales ont été identifiées :

- frottement de l'axe sur le bord de la cuve,
- frottement dans la chaîne,
- frottement dans les mécanismes du vélo.

Heureusement, à part la première, toutes celles-ci sont mesurables grâce à l'appareil de mesure décrit à la section 7.1.1, bien que les pertes doivent être soustraites dans l'appareil de mesure lui-même (le frottement de l'axe sur le bord de la cuve étant présent lors des mesures, il ne peut pas être pris en compte) et ajouter les forces de frottement n'apparaissant dans le vélo que lorsque la structure est sous tension.

Deuxièmement, les pertes thermiques ont été analysées. Les principales pertes se font par :

- les parois de la cuve,

- le disque/conducteur (puis via l'axe)
- échange avec l'air ambiant via les ouvertures du haut du caisson

Afin de mesurer ces pertes, la cuve a été remplie d'eau chaude à 42°C, puis elle a été placée dans l'ergomètre et la diminution de la température de l'eau a été mesurée. La conclusion de cette expérience fut que, si la température de l'eau est 25°C plus haute que la température extérieure, au plus 1°C par quart d'heure est perdu.

7.3 Rendement

Le rendement est défini comme étant la puissance utile divisée par la puissance totale $\eta_{tot} = \frac{P_{utile}}{P}$.

Ici, il est égal à $\eta_{méca} \cdot \eta_{therm}$.

7.3.1 Rendement mécanique

Le rendement mécanique ($\eta_{méca}$) est égal à $\frac{P_j}{P_j + P_f}$, P_j étant la puissance de chauffe des aimants et P_f la puissance des frottements. On peut donc assimiler P_j à $\lambda_{expérimental} \cdot v_3'^2$ (en négligeant donc les frottements dans les roulements de la cuve) et P_f à $\lambda' \cdot v_3^2$. λ' étant le coefficient liant la puissance des pertes au carré de la vitesse du disque et étant mesuré de la même façon de λ_{exp} mais en retirant le frein magnétique. Le coefficient λ' valant 6.5.

$$\eta_{méca} = \frac{P_j}{P_j + P_f} = \frac{\lambda_{exp} v_3'^2}{\lambda_{exp} v_3'^2 + \lambda' \cdot v_3^2} = \frac{\lambda_{exp}}{\lambda_{exp} + \lambda'}$$

Par conséquent l'ergomètre a un rendement mécanique de $\frac{52,5}{52,5+6,5} = 0,88$.

7.3.2 Rendement thermique

Le rendement thermique (η_{therm}) est égal à :

$$1 - \frac{H}{P_j},$$

H étant la puissance des pertes thermiques, car :

$$\eta_{therm} = \frac{P_u}{P_u + H} = \frac{P_u}{P_j} = \frac{P_j - H}{P_j} = 1 - \frac{H}{P_j},$$

avec P_u étant la puissance réellement utile pour chauffer l'eau. Etant donné que les pertes thermiques dépendent de la différence de température entre l'eau et l'extérieur, on peut considérer que si l'expérience commence à température ambiante et que l'eau n'est pas chauffée trop longtemps, les pertes seront nulles et donc le rendement égal à 100 %.

Cependant, afin de voir ce que vaudrait le rendement thermique après plusieurs heures de chauffe, l'eau a été portée à 42°C pour mesurer la diminution de température avec le temps (la température

ambiante valant 12°C). A cette température, les pertes sont de l'ordre de 50W, soit un rendement thermique d'environ 82%.

7.3.3 Conclusion

Rappelons-nous du rendement total, qui dépend de $\eta_{méca}$ et η_{therm} . Tant que la température ambiante est proche de celle de l'eau, le rendement thermique est proche de 100%, et $\eta_{total} \simeq 88\%$.

Au fur et à mesure que l'eau chauffe, le rendement thermique diminue, de même que le rendement total. Lorsque la différence de température entre l'eau et le milieu extérieur atteint une trentaine de degrés, $\eta_{total} \simeq 72\%$.

8 Fonctionnement de groupe

Le groupe était initialement composé de 6 personnes dirigées par un chef d'équipe. Un membre du groupe ayant arrêté les études d'ingénieur civil, le groupe ne comptait plus que 5 personnes à partir du mois de février.

Chaque semaine, au moins une réunion a lieu. Tous les membres du groupe ainsi que le chef de projet sont présents. À ces réunions, un secrétaire est désigné. Ce secrétaire a pour tâche de remettre, après la réunion, un rapport de la réunion sur dropbox. Ainsi, tous les membres du groupe peuvent se rafraîchir la mémoire avant la réunion suivante.

Ces rapports sont également pratiques quand une personne n'a pas pu être présente à une réunion. Elle peut alors lire ce qui a été dit à la réunion à laquelle elle n'était pas présente et être au courant de l'avancement du projet. Pendant ces réunions, chaque membre du groupe rapporte le travail et les avancements qu'il a effectués pour le projet durant cette semaine. De cette façon, le chef d'équipe et les membres du groupe sont au courant de l'état d'avancement du projet.

C'est aussi au cours de ces réunions que les décisions importantes sont prises. Le groupe parle notamment de la décision à prendre avec le chef de projet qui donne son avis pour que le groupe puisse prendre la décision la plus avantageuse. À la fin de chaque réunion, les tâches à effectuer pour la prochaine réunion sont réparties équitablement entre les membres du groupe.

Presque chaque semaine, le groupe fixe une deuxième réunion sans la présence du chef de projet. C'est notamment durant ces réunions que le travail sur l'ergomètre est effectué. Le groupe discute également de l'avancement des tâches de chacun et, si un membre du groupe ne comprend pas quelque chose, les autres membres du groupe lui fournissent des explications.

En dehors des réunions, le groupe communique essentiellement par mail. Les SMS sont aussi utilisés, ainsi que Skype qui a été un moyen d'organiser des vidéoconférences, permettant de se retrouver (ne serait-ce que virtuellement) facilement et rapidement.

Le groupe n'a pas toujours été très ponctuel durant le premier quadrimestre, mais s'est néanmoins bien amélioré au deuxième quadrimestre. Toutes les tâches ont été effectuées à temps, contrairement à ce qu'il arrivait parfois au premier quadrimestre, ralentissant l'avancement du projet. Le groupe n'a donc plus pris de retard sur le planning et tout s'est mieux déroulé.

L'ambiance au sein du groupe est restée bonne et le travail a toujours été partagé de façon équitable entre les membres du groupe.

9 Conclusion

Le projet tire à sa fin. L'ergomètre a été construit avec succès et il est donc temps pour le groupe d'écrire tout ce qu'il a appris durant ce travail. Ce projet nous a enrichi dans bien des domaines dont quelque-uns sont développés dans cette conclusion.

La première chose que ce travail nous a appris, c'est à faire des recherches sur des sujets scientifiques dont on n'a au préalable aucune notion. Chercher des livres dans une bibliothèque scientifique, trouver des sources fiables sur internet, etc.

Ce travail nous a également appris que l'écriture d'un rapport scientifique n'est pas une chose qui s'improvise. Elle se fait notamment en parallèle avec le déroulement du projet. Ce projet nous a également donné de la joie, particulièrement de savoir que notre ergomètre fonctionnait presque parfaitement, après avoir réussi à résoudre tous les problèmes.

Tout au long du parcours, nous avons également appris que certaines parties d'un projet étaient moins amusantes que d'autres, mais qu'elles ne devaient en aucun cas être négligées. Ces tâches moins drôles sont notamment aussi indispensables au bon déroulement d'un projet que les parties agréables.

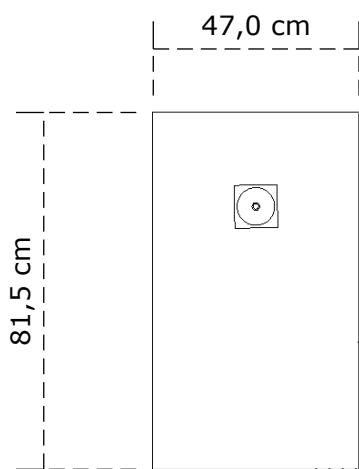
Tous ces éléments et bien d'autres encore ont donc permis à ce groupe d'évoluer, tant du côté humain que du côté technique de la gestion d'un projet.

A Annexes

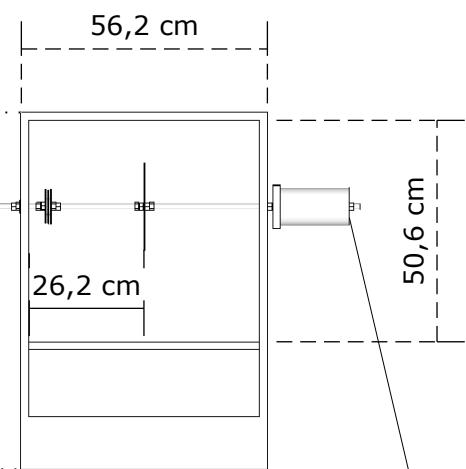
A.1 Budget

Libellé	Prix
Aimants	24.80 €
Plaque de cuivre	23.20 €
Isolant	12.05 €
Corde	3.67 €
Poulie	3.05 €
Porte-vélo	50 €
Total	116,67 €

Gauche



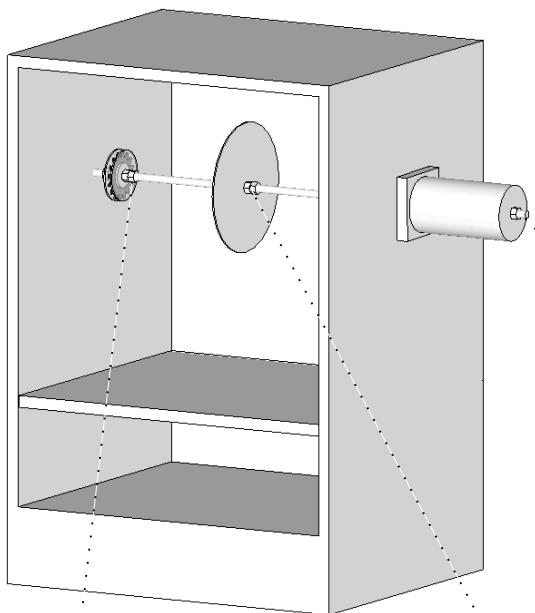
Face



1

4

Haut

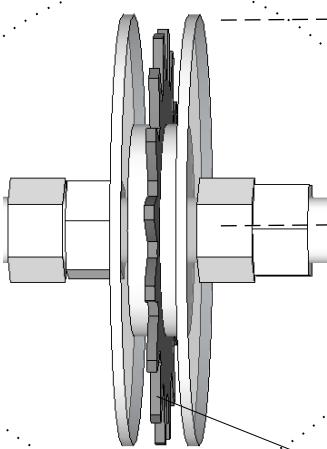


15,7 cm

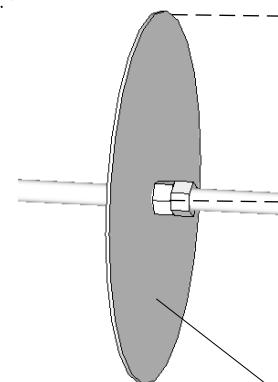
47,0 cm

10,0 cm

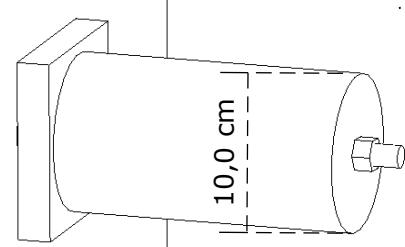
10,0 cm

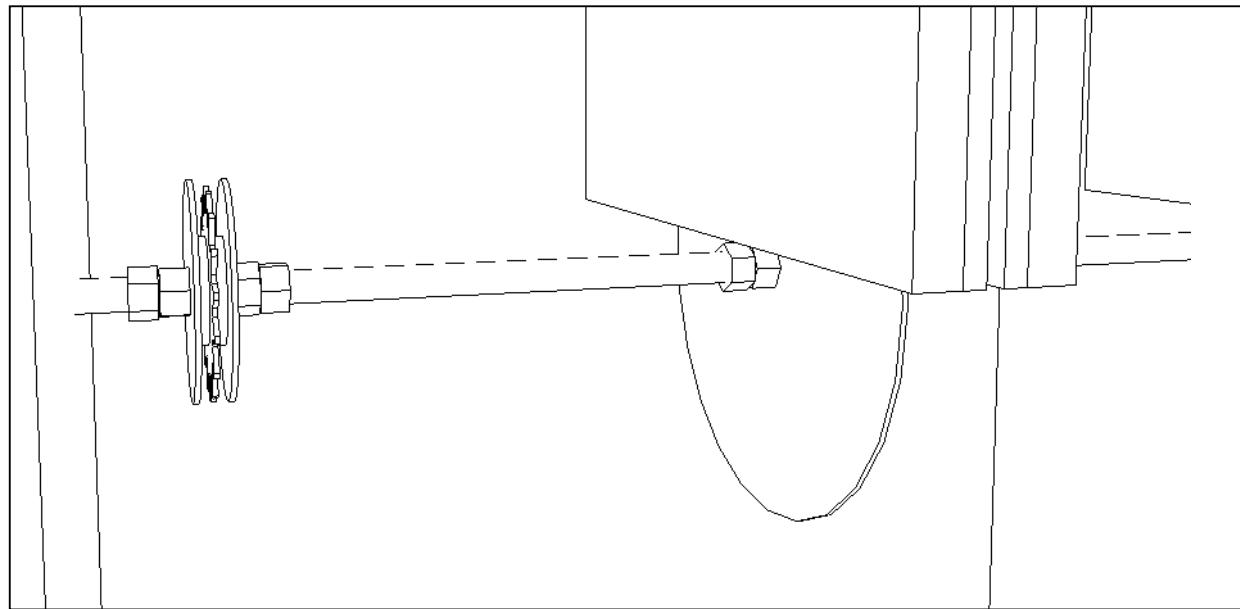
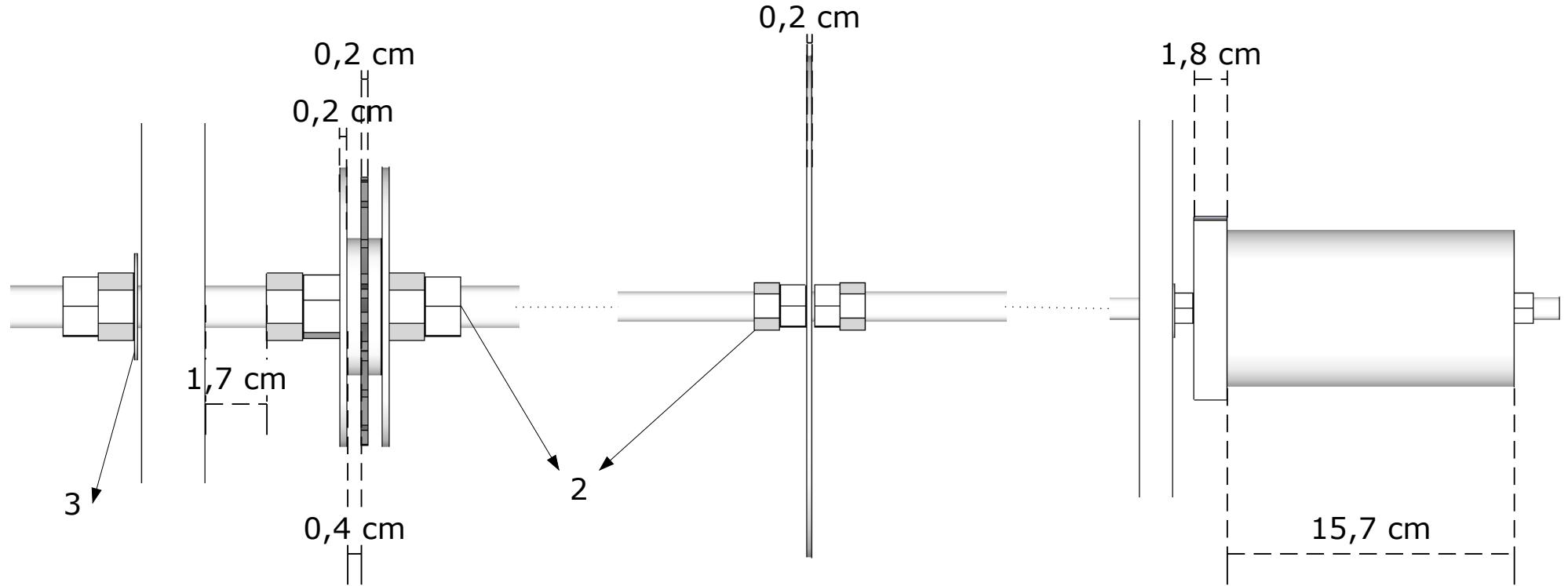


5



6





- 1: Tige filetée ø 12mm
- 2: Ecrou ø 12mm
- 3: Rondelle
- 4: Dispositif de mesure
- 5: Pignon
- 6: Plaque de cuivre

Références

- [1] Densité du flux magnétique. <http://www.supermagnete.be/fre/faq/flux>, 12 2011.
- [2] Site web de supermagnete. <http://www.supermagnete.be/>, 03 2012.
- [3] R. Brown. *Electricity & Atomic Physics*. Macmillan, 1973.
- [4] Marc Haelterman. *Physique Générale*. Presses Universitaires de Bruxelles, 2011.
- [5] Tibtech Innovations. Propriétés du cuivre et de ses alliages.
<http://www.tibtech.com/fr/conductivite.php>.
- [6] R. Leca. Biomécanique, le pédalage. <http://www.culturestaps.com/>.
- [7] Pierre NAUDOT, Dominique ARNAUD, Roger BIAIS, Jean BARBERY, and Bernard FAR-GETTE. Propriétés du cuivre et de ses alliages. <http://www.techniques-ingénieur.fr/base-documentaire/materiaux-th11/proprietes-des-métaux-et-des-alliages-42357210/propriétés-du-cuivre-et-de-ses-alliages-m4640/>, 04 1985.
- [8] Nadine Postiaux. Guide ba1 2011-2012. <http://bapp.ulb.ac.be/index/BAPPProjetsDocs.html>.
- [9] RF Reiser, ML Peterson, and JP Broker. *Understanding recumbent cycling : instrumentation design and biomechanical analysis*. Biomed Sci Instrum, 2002.