

Vagues d'énergie

Lycée Vauban du
Luxembourg



VAUBAN

ÉCOLE ET LYCÉE FRANÇAIS
DE LUXEMBOURG

Présenté par :
Amandine. B
Vladimir. D
Thibault. G
Alban. L
Marie. V
Aude. R

Olympiades de physiques 2024

Introduction :

Aujourd'hui, notre société est face à un problème environnemental important et il est nécessaire de trouver des sources d'énergies vertes. C'est pourquoi nous avons eu l'idée de développer un système qui permette de convertir l'énergie mécanique transportée par les vagues en énergie électrique, dans le but de remplacer autant que possible les énergies fossiles, émettrices de dioxyde de carbone, qui sont à l'origine de l'effet de serre et du réchauffement climatique.

Notre but est ainsi d'exploiter le mouvement naturel des vagues pour faire osciller un aimant dans une bobine et transformer le mouvement d'oscillations de l'aimant, en énergie électrique à l'aide du phénomène d'induction électromagnétique. Le système se composerait d'un flotteur de soulèvement (A) à la surface de la mer, qui suivrait le mouvement des vagues et alternerait phase de montée et de descente au rythme de la houle. Ce flotteur serait solidaire d'un aimant (C) via un bras de transmission transmettant le mouvement de la houle à l'aimant (B) et le ferait ainsi osciller périodiquement à l'intérieur d'une bobine (E) jouant le rôle de stator (D). La variation du champ magnétique produite par le mouvement de l'aimant à l'intérieur de la bobine permet ainsi de générer un courant électrique alternatif induit dans la bobine.

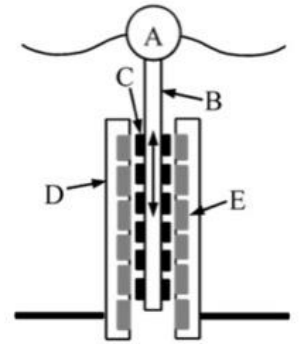


Figure 1 -Schéma en coupe verticale du système visant à générer de l'électricité à partir du mouvement de la houle

Mise en œuvre au laboratoire d'un dispositif expérimental modélisant la houle

Afin de reproduire le mouvement de la houle et faire osciller un aimant à l'intérieur d'une bobine fixe, nous avons choisi de fixer un aimant ayant une masse m à un ressort que l'on écarte de sa position de repos. Nous créons ainsi un système {masse + ressort} qui effectue un mouvement d'oscillations du autour d'une position d'équilibre située à l'intérieur de la bobine.

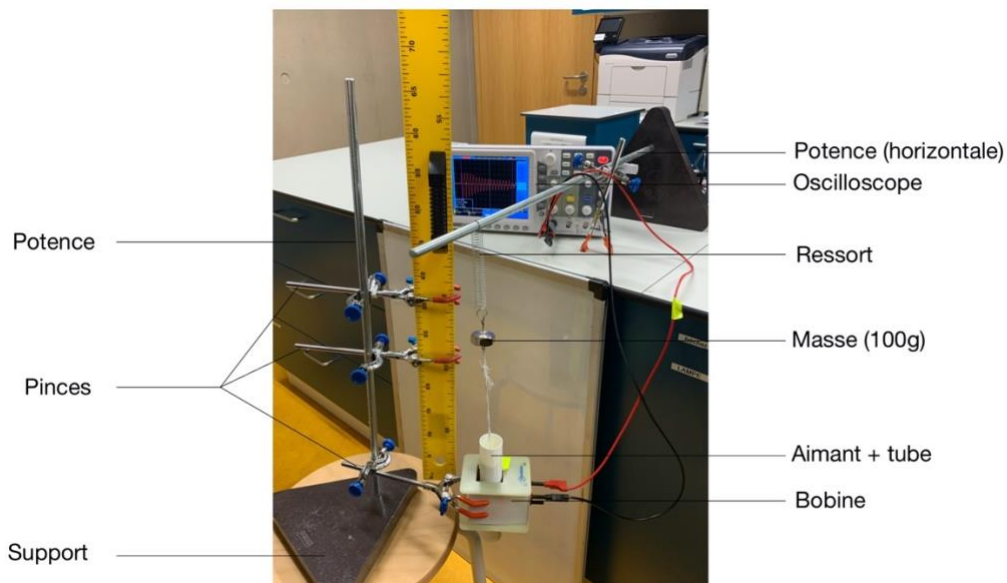


Figure 2 - Photographie du dispositif expérimental installé au laboratoire de physique

La génération de courant électrique :

Le déplacement de l'aimant à l'intérieur de la bobine dans la direction de l'axe du solénoïde, entraîne des variations de l'environnement magnétique de la bobine qui provoquent ensuite l'apparition d'une tension induite et entraînent la circulation d'un courant induit dans le circuit électrique connecté à la bobine : de l'énergie électrique est générée. Ce phénomène physique est nommé induction électromagnétique. Le signal électrique induit est ensuite visualisé et étudié à l'aide d'un oscilloscope.

Nous nous sommes alors fixés comme objectif d'optimiser le système expérimental afin d'obtenir la puissance électrique la plus élevée possible.

Dans ce rapport, nous détaillerons tout d'abord dans une première partie la mise en place et à l'adaptation de notre dispositif expérimental et expliquer les ajustements que nous avons faits afin de le rendre plus efficace. Nous présenterons ensuite, l'étude qui nous a permis d'identifier les paramètres expérimentaux qui modifient la puissance électrique générée et la nature de leur l'influence. Notre objectif étant toujours d'obtenir la puissance électrique la plus importante possible.

Enfin, nous avons réfléchi à la conversion du courant alternatif généré par notre système en courant continu, afin de nous permettre de stocker l'énergie produite dans un condensateur et réfléchir au rendement de conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique de notre dispositif.

Sommaire:

| | | |
|-----|--|----|
| 1 | Adaptation du dispositif expérimental et études préliminaires | 4 |
| 1.1 | Détermination expérimentale des constantes de raideur des ressorts | 4 |
| 1.2 | Lien entre la période T des oscillations et la masse..... | 4 |
| 1.3 | Position de l'aimant dans la bobine (génération d'un signal alternatif) | 5 |
| 1.4 | Nécessité d'un mouvement vertical de l'aimant | 5 |
| 1.5 | Mise en place d'un système oscillant à deux ressorts : | 8 |
| 2 | Influence des différents paramètres du système sur la puissance électrique générée ... | 10 |
| 2.1 | Puissance en régime sinusoïdal | 10 |
| 2.2 | Étude de l'influence de l'amplitude des oscillations | 10 |
| 2.3 | Étude de l'influence de la fréquence des oscillations..... | 11 |
| 2.4 | Étude de l'influence du nombre de spires de la bobine | 12 |
| 2.5 | Étude de l'influence de la force de l'aimant | 12 |
| 2.6 | Conclusion | 13 |
| 3 | Redressement du signal : créer une tension continue à partir d'une tension alternative | 14 |
| 3.1 | Redressement monoalternance..... | 14 |
| 3.2 | Redressement bialternance | 15 |
| 3.3 | Ajout d'un condensateur sur un double redressement périodique | 16 |
| 4 | Gestion des incertitudes..... | 17 |
| 5 | Conclusion | 18 |

1 Adaptation du dispositif expérimental et études préliminaires

Dans cette première partie de notre dossier nous allons présenter comment nous avons mis en place et optimisé le dispositif expérimental au lycée afin de générer un courant électrique alternatif par induction électromagnétique.

1.1 Détermination expérimentale des constantes de raideur des ressorts

Force de rappel d'un ressort :

Un ressort maintenu à une de ses extrémités exerce sur un objet accroché à son autre extrémité une force appelée force de rappel dont les caractéristiques sont les suivantes :

Direction : celle du ressort

Sens : si le ressort est étiré, la force est dirigée de l'objet vers le ressort si le ressort est comprimé, la force est dirigée du ressort vers l'objet

Point d'application : point de contact entre le ressort et l'objet

Norme : $F = k \cdot (l - l_0)$ où k est une constante appelée constante de raideur du ressort, l_0 est la longueur à vide du ressort et l la longueur sous tension du ressort (lorsque l'objet est accroché) avec F en N, k en $N \cdot m^{-1}$ et les longueurs en m.

Protocole expérimental :

Nous avons mesuré l_0 : la longueur initiale à vide de chacun des ressorts, puis : la longueur l_1 de ces ressorts lorsqu'on y suspend une masse de 100 g. La masse marquée est alors soumise à deux forces : son poids et la tension ou force de rappel exercée par le ressort sur la masse marquée. Lorsque le système est à l'équilibre et la masse immobile, d'après la première loi de Newton, ou principe de l'inertie, nous savons que les forces appliquées à la masse se compensent et ainsi :

$$\vec{T} + \vec{P} = 0$$

Par conséquent, à l'équilibre, les deux forces sont opposées et de même norme et il vient : $m \cdot g = k (l_1 - l_0)$ soit $k = \frac{m \cdot g}{l_1 - l_0}$

Nous avons ensuite utilisé cette relation pour calculer la constante de raideur de tous les ressorts à notre disposition au laboratoire. Nous avons ainsi à disposition donc de ressorts dont les constantes de raideur vont de 1,5 à 70 $N \cdot m^{-1}$.

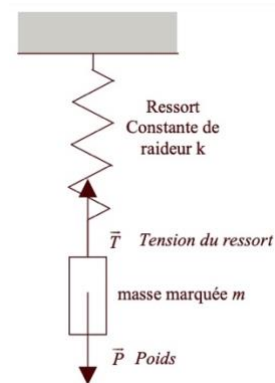


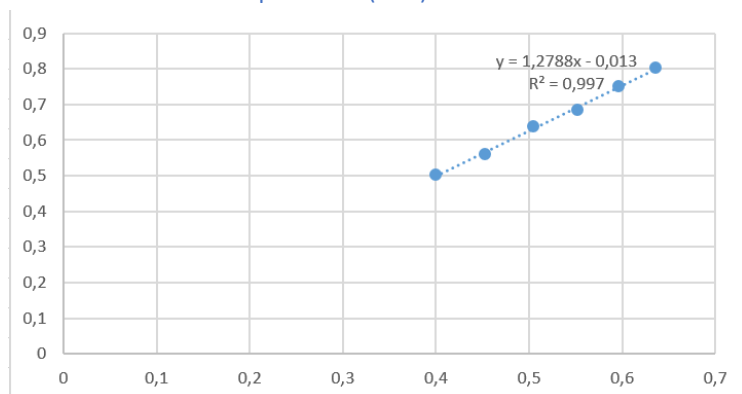
Figure 3 - Représentation des forces sur un ressort au repos

1.2 Lien entre la période T des oscillations et la masse

Afin de prévoir la fréquence d'oscillation du système {masse-ressort} et de pouvoir faire varier cette fréquence d'oscillation en modifiant la raideur du ressort utilisé ou bien la masse suspendue, nous avons eu besoin de trouver la relation mathématique reliant la période du phénomène oscillatoire aux différents paramètres du système {masse+ressort}.

- 1) Afin d'étudier l'influence de la masse nous avons fait varier la valeur de la masse marquée accrochée au ressort et mesuré la période du phénomène oscillatoire en conservant constants l'écartement de la masse par rapport à la position d'équilibre du système et la constante de raideur du ressort.

Évolution de la période T (en s) des oscillations en fonction de la masse m suspendue au ressort



Modélisation :

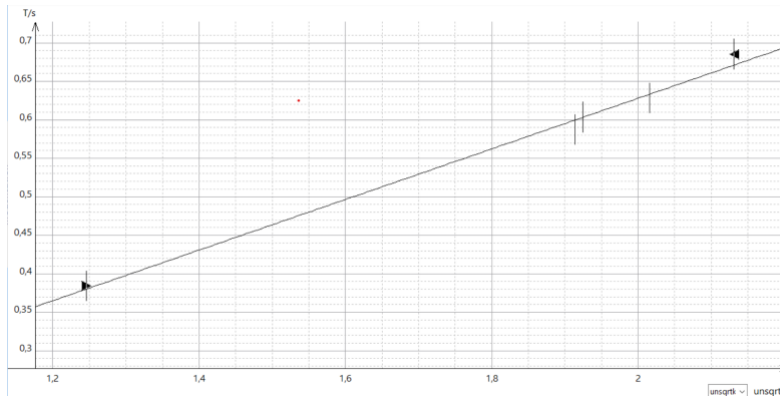
$$T = 1,27 \sqrt{m} + 0,013$$

il est donc possible de conclure que la période est proportionnelle à \sqrt{m}

Figure 4 - Démonstration expérimentale de la proportionnalité de la période T d'un système {masse-ressort} à la racine carrée de la masse suspendue

- 2) Afin d'étudier l'influence de la constante de raideur k du ressort nous avons fait varier la valeur de la constante de raideur en utilisant plusieurs ressorts et mesuré la période du phénomène oscillatoire en conservant constants l'écartement de la masse par rapport à la position d'équilibre du système et la masse suspendue au ressort.

Évolution de la période T (en s) des oscillations en fonction de la racine carrée de la constante de raideur k du ressort



Modélisation :

Les résultats expérimentaux sont compatibles avec un modèle linéaire lorsque l'on trace $T = f\left(\frac{1}{\sqrt{k}}\right)$

Il est donc possible de conclure que la période est inversement proportionnelle à \sqrt{k}

Figure 5 - Démonstration expérimentale de l'inversement proportionnalité de la période T d'un système {masse-ressort} par rapport à la racine carrée de la constante de raideur k

A l'aide de nos résultats expérimentaux nous avons alors calculé le rapport $\frac{T}{\sqrt{\frac{m}{k}}}$ avec toutes les valeurs expérimentales dont nous disposons. Nous avons ainsi pu observer que ce rapport est constant et en moyenne égal à $6,25 \cong 2\pi$ sur notre série statistique, ce qui valide bien la relation qu'il est possible de trouver dans la littérature pour un système {masse-ressort} :

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

1.3 Position de l'aimant dans la bobine (génération d'un signal alternatif)

L'aimant oscille dans une bobine qui est intégrée dans un circuit électrique contenant une résistance. Lorsque l'aimant oscille au bout du ressort, les variations du champ magnétique \vec{B} à l'intérieur de la bobine permettent de générer un signal électrique dans le circuit électrique. Le signal électrique est alors enregistré aux bornes de la résistance et visualisé à l'aide d'un oscilloscope. Dans un premier temps nous obtenions des signaux non sinusoïdaux, lors du déplacement de l'aimant et il est rapidement apparu que pour obtenir une sinusoïde, il est nécessaire de faire coïncider la position au repos de l'aimant avec le centre de la bobine de sorte que son mouvement oscillatoire soit symétrique de part et d'autre du milieu de la bobine. L'alternance positive de la tension générée lors de la phase de descente de l'aimant est alors symétrique de l'alternance négative de la tension générée lors de la phase de montée de l'aimant à travers la bobine. De cette manière on obtient un signal réellement sinusoïdal :

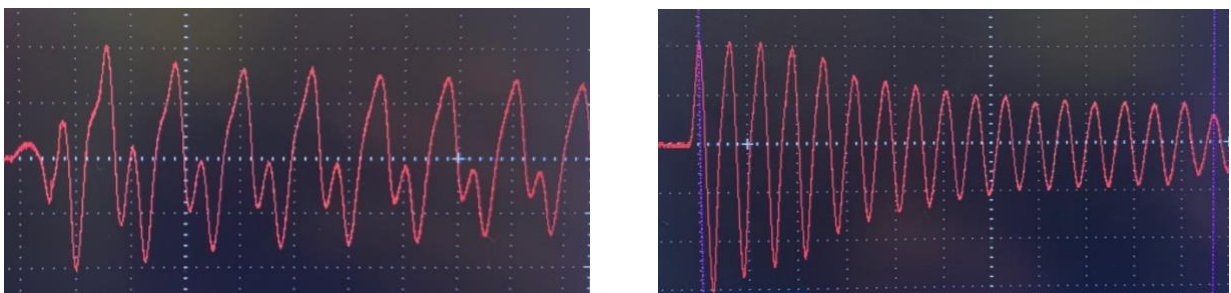


Figure 6 – Si les oscillations de l'aimant ne sont pas symétriques par rapport au centre de la bobine, le signal électrique généré n'est pas sinusoïdal (à gauche). Le réglage précis de la position d'équilibre du système masse-ressort au centre de la bobine permet d'obtenir un signal sinusoïdal (à droite)

Conclusion : Avant toute utilisation du système, il est important de faire coïncider le centre de la bobine avec la position d'équilibre de l'aimant suspendu au ressort afin de générer un signal sinusoïdal.

1.4 Nécessité d'un mouvement vertical de l'aimant

Une fois les oscillations centrées par rapport à la bobine, nous avons été confrontés au problème du mouvement non idéal de l'aimant au bout du ressort :

- qui génère des aberrations du signal électrique. En effet, du fait de la symétrie imparfaite du système, le mouvement de l'aimant dans la bobine n'était généralement pas vertical lors des oscillations, et l'aimant entraînait régulièrement en collision avec les parois de la bobine ce qui générerait des dérives horizontales et empêchait d'obtenir un signal sinusoïdal.
- qui ne permet d'envisager un apport d'énergie continu au dispositif sans que l'excitation du ressort ne conduise à des mouvements aberrants.

Nous avons envisagé de guider l'aimant pour éviter les chocs sur les parois de la bobine et pour le contraindre à un mouvement vertical. Nous avons ainsi décidé de concevoir un tube pour guider l'aimant dans la bobine lors de ses oscillations et nous avons fabriqué notre propre tube grâce à un logiciel 3D de conception et une imprimante 3D à disposition au Makerspace / Fablab de notre lycée. Cependant en utilisant ce tube nous avons généré des frottements par contact lors du mouvement de l'aimant, ce qui entraînait un amortissement trop important et trop rapide des oscillations, ne permettant pas une étude fiable des signaux électriques générés. C'est pourquoi nous avons essayé de réduire ces frottements de deux façons différentes :

- en utilisant de l'huile WD40 pour favoriser un coulisement avec des frottements réduits.
- en fabriquant un tube de diamètre plus large pour limiter le contact entre l'aimant et le tube.

Toutefois, ces deux modifications n'ont pas donné le résultat escompté et les frottements restaient trop importants. Nous sommes ainsi arrivés à la conclusion que l'utilisation d'un tube pour guider le mouvement vertical de l'aimant entraînait un amortissement total des oscillations en moins de deux périodes et empêchait donc d'obtenir une conversion satisfaisante de l'énergie mécanique en énergie électrique.

Il a donc été décidé de travailler sans tube de guidage et de favoriser l'oscillation verticale de l'aimant en s'assurant des réglages initiaux du dispositif et en veillant à la mise en oscillations parfaitement verticale du système {masse-ressort}. Toutefois, puisqu'une seule excitation initiale du système {masse-ressort} était possible, nous avons constaté un amortissement rapide des oscillations ne permettant pas de modéliser convenablement le mouvement des vagues. Nous avons donc étudié théoriquement et expérimentalement l'amortissement des oscillations du système {masse-ressort} vertical.

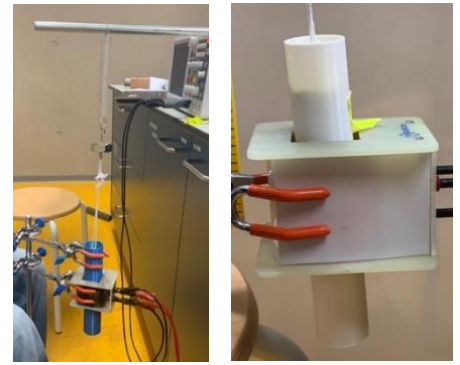
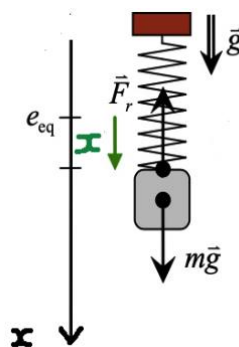


Figure 7 - Mise en place d'un tube de guidage de l'aimant afin d'assurer son mouvement vertical

Étude théorique du système {masse-ressort} vertical :

Équilibre du système {masse-ressort} au repos :

$$\begin{aligned} \Sigma \vec{F} &= \vec{0} \\ \vec{F}_r + m \vec{g} &= \vec{0} \\ -k(l_{\text{eq}} - l_0) + mg &= 0 \\ k(l_{\text{eq}} - l_0) &= mg \\ (l_{\text{eq}} - l_0) &= \frac{mg}{k} \\ l_{\text{eq}} &= \frac{mg}{k} + l_0 \end{aligned}$$



Étude dynamique :

Appliquons la 2^{ème} loi de Newton à la masse suspendue au ressort :

$$\begin{aligned} \Sigma \vec{F} &= m \vec{a} \\ \vec{F}_r + m \vec{g} &= m \vec{a} \\ -k(l - l_0) + mg &= m\ddot{x} \\ -k(l_{\text{eq}} + x - l_0) + mg &= m\ddot{x} \\ -kl_{\text{eq}} + kl_0 + mg &= m\ddot{x} + kx \\ m\ddot{x} + kx &= 0 \\ \ddot{x} + \frac{k}{m}x &= 0 \end{aligned}$$

En posant $\omega_0^2 = \frac{k}{m}$, la solution mathématique de l'équation est du type : $x(t) = A \cos(\omega_0 t + \varphi)$

Donc $\dot{x}(t) = -A \omega_0 \sin(\omega_0 t + \varphi)$

Conditions initiales : $\dot{x}(t = 0) = -A \omega_0 \sin(\varphi) = 0 \Rightarrow \sin(\varphi) = 0 \Rightarrow \varphi = 0$

$x(t = 0) = A \cos(\varphi) = l_{\text{éq}} + \Delta x \Rightarrow A = l_{\text{éq}} + \Delta x$

finalement : $x(t) = (l_{\text{éq}} + \Delta x) \cos(\omega_0 t)$

Si l'on tient compte des frottements et de l'amortissement des oscillations, la solution est du type :

$$x(t) = (l_{\text{éq}} + \Delta x) \cos(\omega t) \times e^{-\lambda t}$$

La fonction cosinus donne des oscillations, tandis que la fonction $e^{-\lambda t}$ est un facteur codant la décroissance progressive de l'amplitude car $-\lambda < 0$. On observe donc des oscillations dont l'amplitude diminue, c'est-à-dire des oscillations amorties. Les courbes $e^{-\lambda t}$ et $-e^{-\lambda t}$ forment une enveloppe à l'intérieur de laquelle la fonction va osciller à cause du fait de la fonction cosinus. Les frottements ont ainsi pour effet de diminuer progressivement l'amplitude des oscillations jusqu'à ce qu'il n'y en ait plus. On définit aussi la pseudo-période $T = 2\pi/\omega$ car on a une régularité temporelle dans les oscillations, de pseudo-période T , mais le phénomène n'est pas réellement périodique car l'amplitude n'est pas la même, d'où le terme de **régime pseudo-périodique**.

Il est possible de démontrer que la pseudo-période du signal obtenu est donnée par la relation : $T = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega_0^2 - \lambda^2}}$

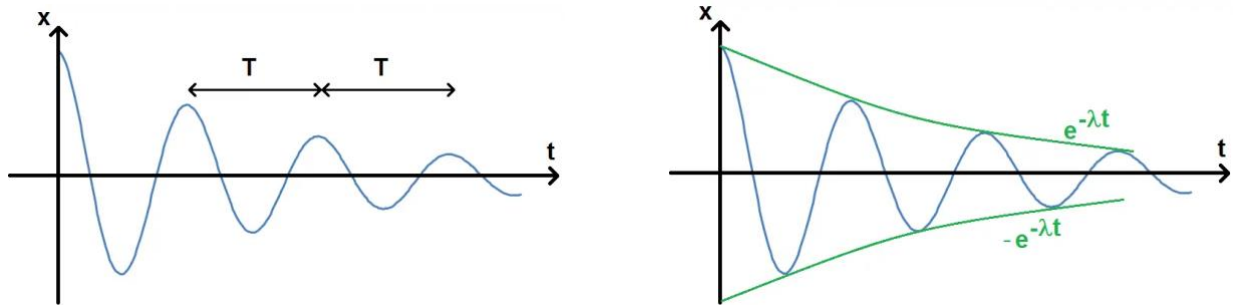


Figure 8 - Illustration du régime pseudo-périodique : l'amplitude du signal diminue au cours du temps du fait de la fonction exponentielle.

Étude expérimentale du système {masse-ressort} vertical : oscillations amorties

On remarque que les maxima de la tension électrique générée $V_{gen}(t)$ ont des valeurs décroissantes au cours du temps. Lorsque l'amplitude A des oscillations mécaniques du système masse-ressort diminue, la tension V_{gen} diminue également. Le système masse-ressort perd de l'énergie et les deux phénomènes électrique et mécanique sont caractérisés par la même constante d'amortissement que nous avons déterminée en relevant les maxima successifs de la tension au cours du temps et en modélisant l'enveloppe du signal électrique. La modélisation des résultats expérimentaux confirme bien la décroissance exponentielle et nous a permis de mesurer le temps caractéristique de cet amortissement.

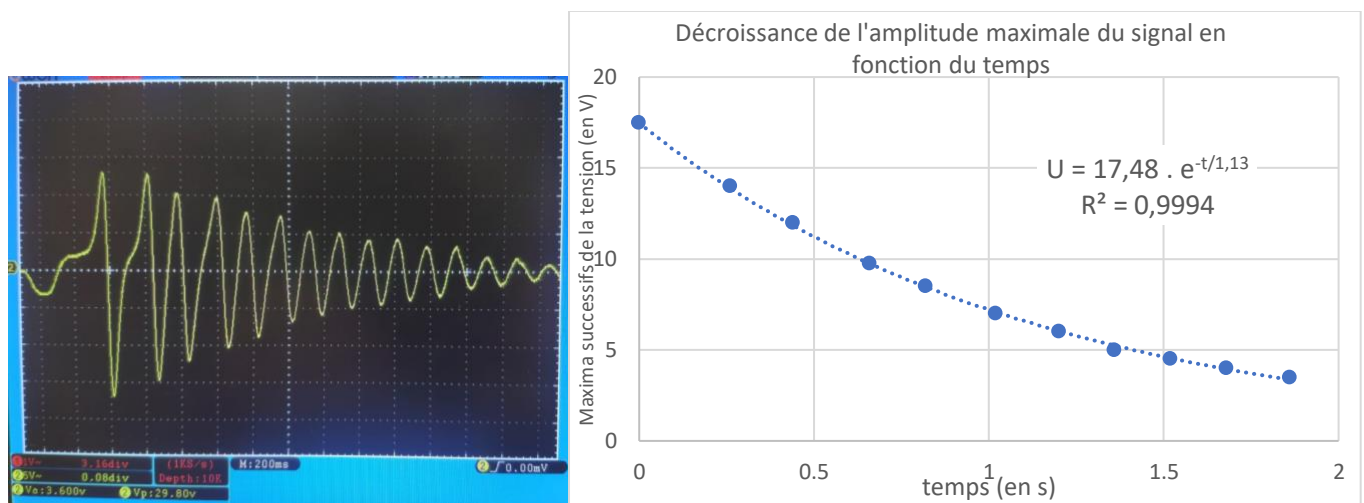


Figure 9 - Évolution (à gauche) et modélisation (à droite) de l'amplitude des oscillations au cours du temps

Vagues d'énergie - Lycée Vauban

Le temps caractéristique du phénomène d'amortissement est ainsi $\tau = 1,13 \text{ s}$ (pour une masse $m = 255 \text{ g}$ suspendue à un ressort de constante de raideur $k = 29 \text{ N.m}^{-1}$)

A ce stade de notre étude, le dispositif expérimental n'est pas satisfaisant car nous observons un amortissement mécanique trop rapide avec un temps caractéristique $\tau = 1,13 \text{ s}$ compliquant l'analyse des signaux électrique et ne permettant pas de modéliser convenablement des vagues pour lesquelles l'apport d'énergie est continu et le mouvement entretenu.

1.5 Mise en place d'un système oscillant à deux ressorts :

Afin de limiter l'amortissement des oscillations du système, nous avons alors eu l'idée de mettre en place un système à double ressort. Ce système permettrait de limiter les pertes d'énergie de notre système oscillant et d'avoir des oscillations sur un temps plus long.

L'idée est la suivante : l'aimant de masse m est accroché à deux ressorts de même constante de raideur tendus au-delà de leur longueur à vide et qui exercent donc chacun sur le ressort une force de rappel. Le système est initialement au repos et l'aimant se trouve à sa position d'équilibre. Nous écartons alors l'aimant de sa position d'équilibre et lâchons l'aimant. Il s'ensuit des oscillations au cours desquelles tout déplacement vers le bas (resp. vers le haut) de l'aimant entraîne une élongation accrue du ressort situé en haut (resp. en bas) exerce alors une force de rappel plus importante sur l'aimant et favorise son déplacement vers le haut (resp. le bas). À la suite de l'action successive des deux ressorts on obtient des oscillations entretenues de l'aimant à l'intérieur de la bobine.

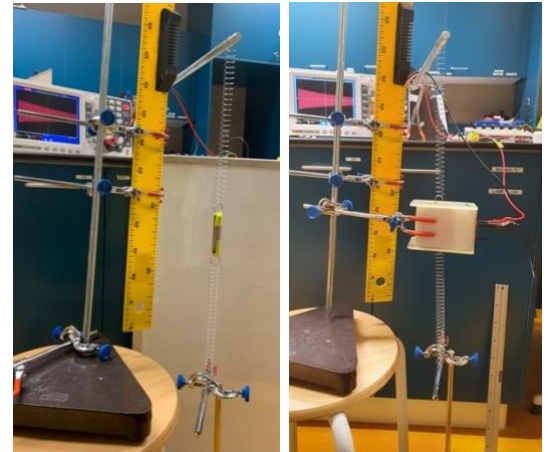


Figure 10 - Dispositif d'oscillations à double ressorts (avec et sans la bobine)

Etude théorique du mouvement :

Equilibre :

Le système étudié est l'aimant dans un référentiel terrestre supposé galiléen.

Bilan des forces :

- \vec{F}_1 : la force de rappel exercée par le ressort 1 sur l'aimant, verticale vers le bas
- \vec{F}_2 : la force de rappel exercée par le ressort 2 sur l'aimant, verticale vers le haut
- \vec{p} : le poids de l'aimant, vertical vers le bas

Caractère négligeable du poids dans notre étude :

- Norme du poids $p = m \times g$
donc $p = 68 \times 10^{-3} \times 9,81 \approx 0,67 \text{ N}$
- la force du ressort F_1 sachant $F_1 = k \times (l_1 - l_0)$
donc $F_1 = 29 \times (20,5 - 2) \cdot 10^{-2} \approx 5,37 \text{ N}$

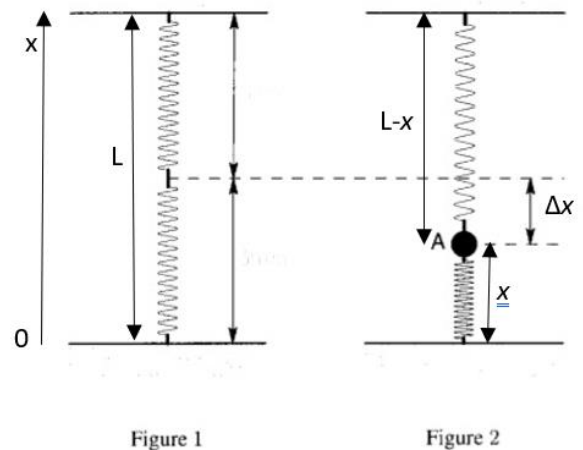
Ainsi, la norme du poids représente-t-elle à peine 12% d'une des forces de rappel exercées par les ressorts sur l'aimant et nous négligerons donc son influence dans l'étude qui suit.

Étude dynamique :

D'après la deuxième loi de Newton : $\sum \vec{F}_{ext} = m \times \vec{a}$

$$\begin{aligned}\vec{F}_1 + \vec{F}_2 &= m \times \vec{a} \\ -k(x - l_0) + k((L - x) - l_0) &= m \times \ddot{x}(t) \\ -2kx + kL &= m \times \ddot{x}(t) \\ m\ddot{x}(t) + 2kx(t) &= kL \\ \ddot{x}(t) + \frac{2k}{m}x(t) &= \frac{kL}{m}\end{aligned}$$

Résolution mathématique :



Vagues d'énergie - Lycée Vauban

- Solution particulière : $x_{\text{éq}} = \frac{L}{2}$ ainsi $\ddot{x} = 0$ et l'équation est vérifiée $0 + \frac{2k}{m} \times \frac{L}{2} = \frac{kL}{m}$
- Solution équation homogène : $x(t) = C \times \cos(\omega_0 t) + D \times \sin(\omega_0 t)$ avec $\omega_0^2 = \frac{2k}{m}$ soit $\omega_0 = \sqrt{\frac{2k}{m}}$
- Solution générale : $x(t) = C \times \cos(\omega_0 t) + D \times \sin(\omega_0 t) + \frac{L}{2}$

Conditions initiales : à $t = 0$ $v(t = 0) = \dot{x}(t = 0) = 0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ et $x(t = 0) = \frac{L}{2} + \Delta x$

1. Calcul de C : $x(t = 0) = \frac{L}{2} + \Delta x = C \times \cos(0) + D \times \sin(0) + \frac{L}{2}$ donc $C = \Delta x$

donc $x(t) = \Delta x \times \cos(\omega_0 t) + D \times \sin(\omega_0 t) + \frac{L}{2}$

2. Calcul de D : $v(t) = \frac{dx}{dt} = \dot{x}(t) \rightarrow \dot{x}(t) = \Delta x \times \omega_0 \times (-\sin(\omega_0 t)) + D \times \omega_0 \times \cos(\omega_0 t) + \frac{L}{2}$

$\dot{x}(t = 0) = 0 = \Delta x \times \omega_0 \times (-\sin(0)) + D \times \omega_0 \times \cos(0) + \frac{L}{2}$ donc $D = -\frac{L}{2\omega_0}$

→ Finalement : $x(t) = \Delta x \times \cos(\omega_0 t) - \frac{L}{2\omega_0} \times \sin(\omega_0 t) + \frac{L}{2}$

Étude de l'amortissement :

De la même façon que lors de l'étude de l'oscillateur amorti (paragraphe 1.4.), nous avons récupéré l'enveloppe du signal et mesuré le temps caractéristique d'amortissement des oscillations avec le système à double ressort (voir figure 11). La modélisation de cette courbe avec un modèle exponentiel décroissant, est concluante et il apparaît que le phénomène d'amortissement se fait sur avec une constante de temps de l'ordre de 15,4 s.

Ainsi **l'amortissement des oscillations au cours du temps est-il environ 14 fois plus faible** dans le cas du système double ressort par rapport à l'amortissement pour un système simple ressort du paragraphe 1.4

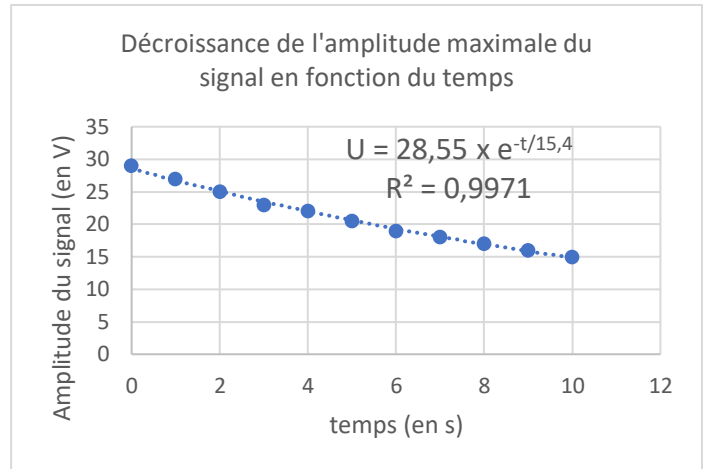


Figure 11- Évolution (à gauche) et modélisation (à droite) de l'amplitude des oscillations au cours du temps dans le cas du système à double ressort.

En conclusion, le système à double ressort présente un amortissement beaucoup plus faible et permet de reproduire de façon satisfaisante les oscillations continues des vagues et c'est pourquoi il a été retenu pour toutes l'étude qui fait suite.

2 Influence des différents paramètres du système sur la puissance électrique générée

Notre objectif étant de développer un système générant le maximum d'électricité, ce qui dans le cadre de notre étude la puissance électrique la plus élevée possible, nous nous sommes attachés à étudier l'influence des différents paramètres de notre dispositif sur la puissance électrique du signal généré.

Dans un premier temps, nous avons dû nous intéresser au concept de puissance en régime sinusoïdal qui diffère légèrement du régime continu étudié habituellement au lycée, afin de définir une méthode de mesure et de calcul de la puissance électrique d'un signal alternatif. Nous avons, dans un deuxième temps, fait varier les différents paramètres caractéristiques de notre dispositif expérimental et étudié leur influence sur la puissance électrique générée.

2.1 Puissance en régime sinusoïdal

Au-delà des concepts de période et de fréquence connus au lycée nous avons eu besoin de définir la pulsation ω en radians par seconde qui est définie par : $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$

Tension efficace U_{eff} et intensité efficace I_{eff}

Si une tension alternative sinusoïdale $u(t)$, de valeur maximale U_{max} , et une tension continue U_{eff} appliquées à une même résistance provoquent l'apparition d'une même quantité de chaleur en un temps identique (effet Joule), alors on dit que U_{eff} est la valeur efficace de $u(t)$.

On a : $U_{eff} = \frac{U_{max}}{\sqrt{2}}$ avec U_{eff} et U_{max} en volts et de façon analogue on définit l'intensité efficace : $I_{eff} = \frac{I_{max}}{\sqrt{2}}$ avec I_{eff} et I_{max} en ampères.

Une tension sinusoïdale alternative U s'écrit sous la forme :

$$u(t) = U_{max} \cos(\omega t + \varphi) = U_{eff} \sqrt{2} \cos(\omega t + \varphi)$$

La puissance active (ou puissance réelle), notée P (en watts); correspond à la puissance moyenne fournie au cours d'une période T . Pour un courant $i(t)$ et une tension $u(t)$, la puissance instantanée s'écrit : $p(t) = u(t) \times i(t)$. L'expression de la puissance moyenne P est donnée par l'expression suivante : $P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) \cdot dt$

En terminale, nous admettons que le calcul de P donne : $P = U_{eff} \times I_{eff} = \frac{U_{max} \times I_{max}}{2} = \frac{U_{max}^2}{2R}$

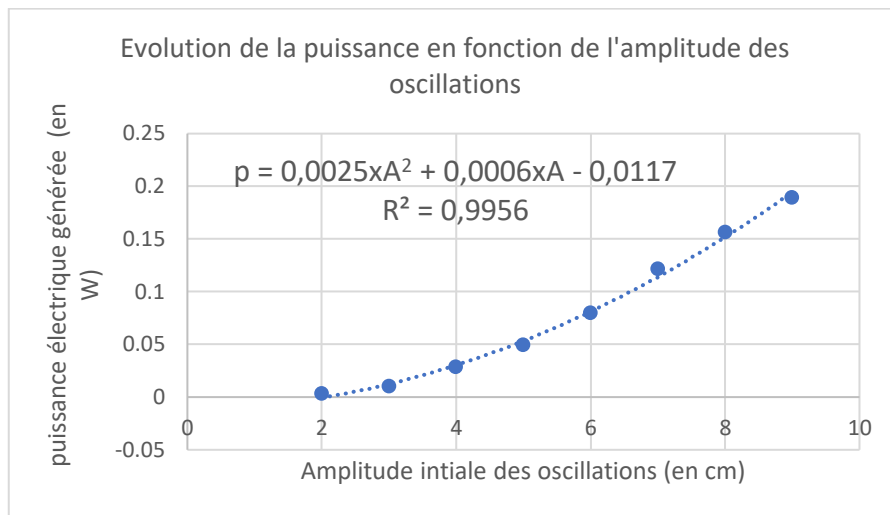
Dans toutes les expériences qui suivent nous avons fait varier les différents paramètres du système et mesuré la tension efficace du signal électrique généré puis calculé la puissance électrique fournie.

2.2 Étude de l'influence de l'amplitude des oscillations

Protocole :

En conservant constants tous les autres paramètres de l'expérience, nous faisons varier uniquement l'amplitude des oscillations en modifiant l'écartement du système par rapport à sa position de repos. Pour cette expérience, nous avons donc gardé constants la fréquence des oscillations (même ressort et même masse), la force de l'aimant et le nombre de spires de la bobine.

Résultats expérimentaux :



Modélisation :

$P = 0,0025 A^2 + 0,0006 A - 0,0117$

Le modèle le plus en accord avec nos points expérimentaux est un modèle de type fonction polynôme du 2nd degré.

Figure 12 - Modélisation de l'évolution de la puissance électrique générée en fonction de l'amplitude des oscillations

Modélisation :

Nous avons modélisé les résultats expérimentaux par une fonction polynôme du second degré puisque ce modèle semblait en accord avec les résultats expérimentaux.

Conclusion :

Plus l'amplitude des oscillations est grande, plus la puissance électrique générée est importante. Afin de maximiser la puissance fournie par notre dispositif (et donc l'énergie produite) il est donc important de permettre les oscillations du ressort les plus amples possibles (autant que le permet le système).

2.3 Étude de l'influence de la fréquence des oscillations

Protocole :

En conservant constants tous les autres paramètres de l'expérience, nous avons fait varier uniquement la fréquence des oscillations en modifiant la constante de raideur du ressort et la masse suspendue au ressort. Pour cette expérience, nous avons donc gardé constants la force de l'aimant et le nombre de spires de la bobine et la méthode de mise en mouvement de du système (même écartement initial par rapport à la position d'équilibre). La période et la fréquence sont alors calculées à l'aide de la relation présentée dans le paragraphe 1.5)

Résultats expérimentaux :

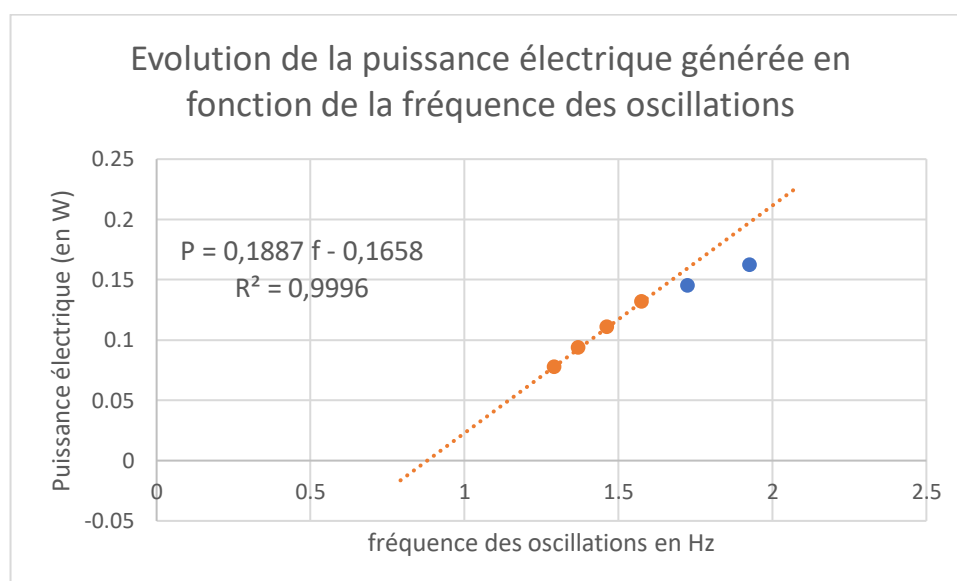


Figure 13 - Modélisation de l'évolution de la puissance électrique générée en fonction de la fréquence

Interprétation :

La puissance électrique générée semble être proportionnelle à la fréquence des oscillations pour des fréquences comprises entre 1 et 1,7Hz. Plus la fréquence augmente et plus la puissance générée augmente dans ce domaine. Toutefois pour des fréquences au-delà de 1,7 Hz on observe un écart au modèle linéaire, infléchissement peut être rationalisé avec la loi de Lenz qui nous explique que la bobine voit apparaître à ses bornes une tension qui par ses conséquences tend à s'opposer aux causes qui lui donnent naissance et donc au mouvement de l'aimant.

Ainsi, pour générer la puissance la plus élevée possible, il faut essayer d'atteindre une fréquence optimale d'oscillations comprise entre 1,5 et 2 Hz, domaine de fréquences dans lequel la puissance générée est élevée sans subir trop fortement les effets de la loi de Lenz.

Ceci est cohérent avec le phénomène d'induction sur lequel nous nous sommes renseignés : la tension aux bornes de la bobine augmente avec la rapidité de variation du champ magnétique à l'intérieur de celle-ci. Ainsi nous avons établi une relation empirique entre les grandeurs expérimentales qui est cohérente avec ce phénomène et il est aisé d'admettre que plus la fréquence d'oscillation f est grande (à amplitude maximale fixée), plus la vitesse de l'aimant est grande et donc la puissance électrique générée est élevée.

2.4 Étude de l'influence du nombre de spires de la bobine

Protocole :

Nous avons décidé d'utiliser notre bobine à disposition pour modifier le nombre de tours et ainsi voir son influence sur la puissance. Pour ce faire, il est important de garder les autres paramètres constants, notamment, l'aimant, la masse, l'amplitude initiale des oscillations et la constante de raideur du ressort. Ainsi, durant l'intégralité de cette expérience nous avons utilisé un ressort avec un constante de raideur de 29, une masse de 255g, le même aimant que depuis le début et une amplitude de 7cm et nous avons fait varier le nombre de spires de la bobine.

Résultats expérimentaux :

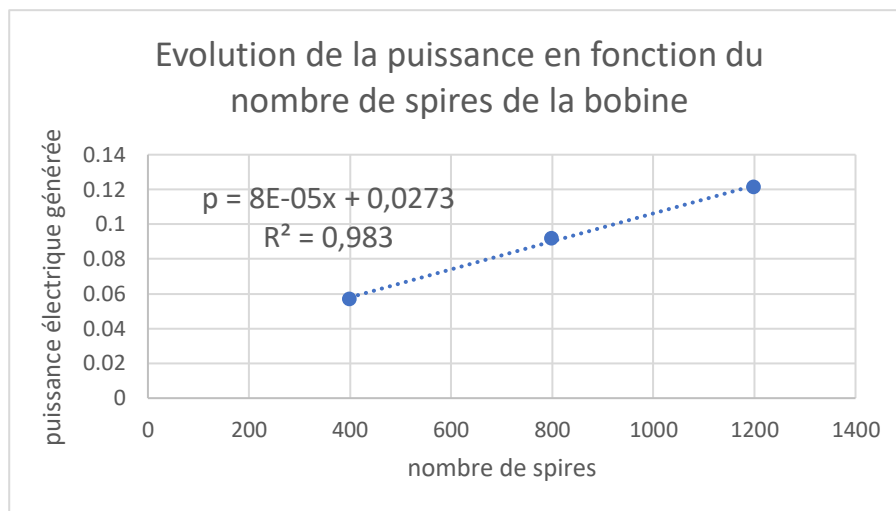


Figure 14 -Modélisation de l'évolution de la puissance électrique générée en fonction du nombre de spires de la bobine utilisée

Interprétation :

Cette expérience, nous permet de conclure que, plus le nombre de tours est élevé, plus la puissance sera élevée. Ainsi nous devrions chercher à avoir le plus grand nombre de tours possibles pour optimiser l'énergie obtenue.

2.5 Étude de l'influence de la force de l'aimant

Protocole :

Nous aurions souhaité étudier l'évolution de la puissance électrique générée en fonction de la force de l'aimant utilisé. Pour cette expérience, il faut faire varier la force du champ magnétique généré par l'aimant et garder constants le nombre de spires de la bobine, la méthode de mise en mouvement de du système (même écartement initial par rapport à la position d'équilibre) et la fréquence d'oscillation du système {masse-ressort}.

Problèmes rencontrés :

Nous disposons bien de plusieurs aimant créant des champs magnétiques d'intensités différentes. Toutefois nous ne sommes par parvenus à mesurer de façon fiable le champ magnétique créé par ces aimants ce qui n'a pas permis d'étudier l'influence de l'intensité du champ magnétique sur la production d'énergie. Les tests de mesure de l'intensité du champ magnétique ont été réalisés à l'aide de l'application smartphone phyphox. Il aurait fallu s'équiper d'un teslamètre mais au vu du coût d'un tel équipement nous avons renoncé à cette mesure et cela reste pour le moment un axe de travail de notre projet. En première approximation il nous semble logique de considérer que plus le champ magnétique est intense et plus le courant électrique généré lors de son mouvement est important. Proportionnalité qui peut être retrouvée dans la formule liant le champ magnétique et l'intensité du courant électrique dans un solénoïde infini : $B = \mu_0 N I$.

2.6 Conclusion

A l'aide de toutes ces expériences, nous avons pu démontrer que pour générer le maximum d'énergie possible avec notre dispositif, nous devons faire en sorte d'avoir l'amplitude des oscillations la plus élevée permise par notre dispositif et une fréquence aussi élevée que possible, ces deux paramètres revenant à imposer un mouvement rapide de l'aimant dans la bobine et donc des variations rapides du champ magnétique ce qui est cohérent avec les lois de l'induction électromagnétique.

La puissance électrique générée est aussi plus importante lorsque le nombre de spires de la bobine est plus élevé. Ainsi, de façon évidente, il est possible de générer une puissance plus importante en associant plusieurs aimants et plusieurs bobines. Un stator contenant un ensemble de bobines fixes (solénoïde cylindrique), dans lequel se déplacerait un ensemble d'aimants permanents (bras oscillant, voir Figure 1) oscillant au centre du stator permettrait de générer une puissance électrique plus importante. Toutefois, au vu du matériel à notre disposition nous nous sommes limités à l'étude de l'oscillation d'un seul aimant dans une bobine.

3 Redressement du signal : créer une tension continue à partir d'une tension alternative

Afin de pouvoir stocker l'énergie électrique produite par le système mécanique oscillant couplée à la bobine, un système de captage d'énergie est nécessaire.

Notre dispositif expérimental produit un courant alternatif (AC) ce qui implique que le sens de circulation du courant électrique s'inverse périodiquement.

Toutefois, afin de nous adapter à des appareils fonctionnant en courant continu mais aussi afin de pouvoir stocker dans un condensateur l'énergie électrique générée, nous avons dû mettre en place un système permettant de convertir notre courant alternatif en courant continu (DC), qui ne circule que dans un sens. Sinon, le condensateur se chargerait et se déchargerait périodiquement.

Dans cette partie, nous allons présenter le circuit électrique que nous avons mis en place pour redresser le courant alternatif.

- Il permet de transformer le courant alternatif en courant continu, dans un premier temps à l'aide d'un circuit redresseur mono-alternance pour valider le principe, puis par l'intermédiaire d'un pont de diodes pour obtenir un redressement bi-alternance
- Il permet de capter et de stocker l'énergie électrique produite à l'aide d'un circuit RC permettant de lisser la tension électrique

3.1 Redressement monoalternance

Afin d'obtenir un courant continu, nous avons décidé d'opter dans un premier temps pour un circuit redresseur monoalternance. Pour cela, nous avons ajouté une diode à notre circuit. Elle permet le passage du courant dans un seul sens, appelé le sens passant.

La diode est un dipôle électrique polarisé possédant une borne + (anode) et une borne - (cathode) (cf. Fig.).

Le courant peut traverser la diode lorsque les 2 conditions suivantes sont remplies :

- L'anode est polarisée positivement (connectée au pôle positif) et la cathode est polarisée négativement (connectée au pôle négatif) ;
- La tension appliquée est supérieure à la tension de seuil U_0 : la différence de potentiel entre la cathode et l'anode de la diode doit être suffisamment importante pour que la diode soit passante et conduise le courant.
- Si la polarisation est inversée, la diode se comporte comme un « interrupteur ouvert ».

Afin de connaître les caractéristiques des diodes disponibles au laboratoire de notre lycée, nous avons commencé par tracer expérimentalement leurs caractéristiques.

La caractéristique d'un dipôle :

On appelle caractéristique d'un dipôle la courbe représentant l'intensité $I(A)$ qui le traverse en fonction de la tension $U(V)$ à ses bornes. Elle permet de connaître les points de fonctionnement d'un dipôle, c'est-à-dire l'ensemble des couples (U, I) associés à ce dipôle.

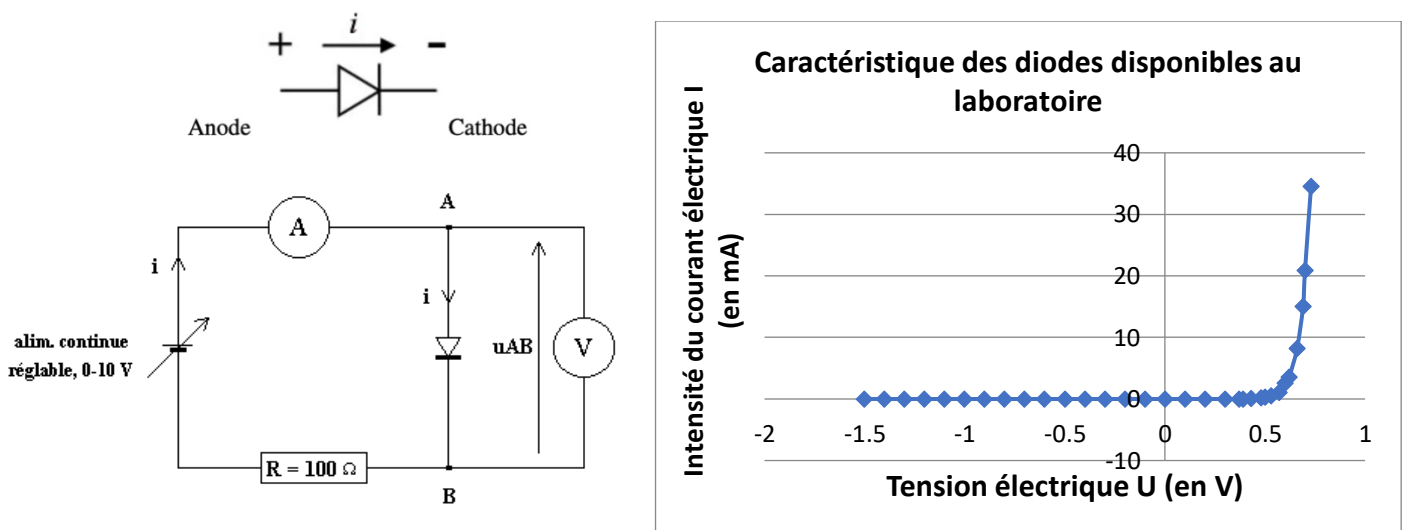


Figure 15 - Symbol standardisé d'une diode (à gauche en haut), montage expérimental utilisé pour le tracé de la caractéristique (à gauche en bas) et tracé expérimental de la caractéristique des diodes disponibles au laboratoire (à droite)

La caractéristique obtenue illustre bien le fonctionnement d'une diode et fait apparaître une tension de seuil U_0 aux environs de 0,35 V qui est cohérent avec des diodes au germanium. La tension seuil serait d'environ 0,7V pour une diode au silicium.

Pour valider le montage de redressement, nous décidons de l'appliquer d'abord à un signal connu et régulier : la tension alternative et sinusoïdale d'un GBF (générateur basse fréquence). Nous réglons le GBF sur une fréquence de 1Hz environ : la tension varie entre des alternances positives et négatives (courbe jaune sur la photo ci-après).

Nous positionnons la diode dans notre circuit de sorte que le courant électrique ne puisse passer que dans une direction spécifique. Ici, le courant ne peut passer que pendant la demi-période correspondant à l'alternance positive de la tension alternative. En effet :

- Lorsque la tension alternative devient positive, la diode devient conductrice et laisse passer le courant (on dit qu'elle est passante)
- Lorsque la tension est négative, la diode bloque le courant, et ainsi l'alternance négative est éliminée. Cela s'explique par le fait que la tension d'entrée est inférieure à 0, donc la différence de potentiel entre la cathode et l'anode de la diode n'est pas suffisamment importante.

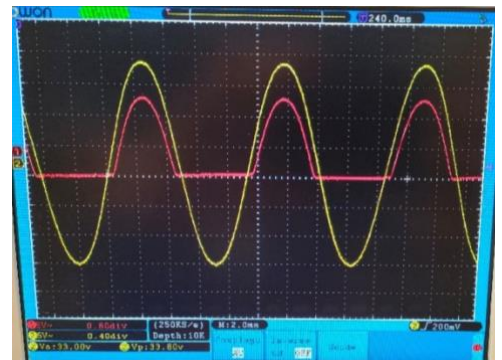


Figure 16 - Illustration du redressement mono-alternance obtenu à l'aide d'une diode et d'un signal GBF. En jaune : signal généré / en rouge : signal redressé

Nous obtenons ainsi la tension redressée mono-alternance (courbe rouge ci-contre).

3.2 Redressement bialternance

Après ce premier succès, nous savons désormais qu'il est possible de supprimer l'alternance négative de la tension alternative à l'aide d'une diode.

L'étape suivante consiste à construire un circuit permettant de capter plus efficacement l'énergie des oscillations mécaniques. Comme il n'est pas possible de stocker l'énergie électrique d'un courant alternatif dans un condensateur (le condensateur se chargerait et se déchargerait périodiquement), il nous faut d'abord redresser le courant alternatif en un courant continu. Nous allons faire cette fois un redressement double alternance grâce à un pont de diodes. Ce système permet de récupérer 2 fois plus d'énergie qu'une simple alternance. Nous cherchons donc à avoir le signal de sortie présenté ci-dessous :

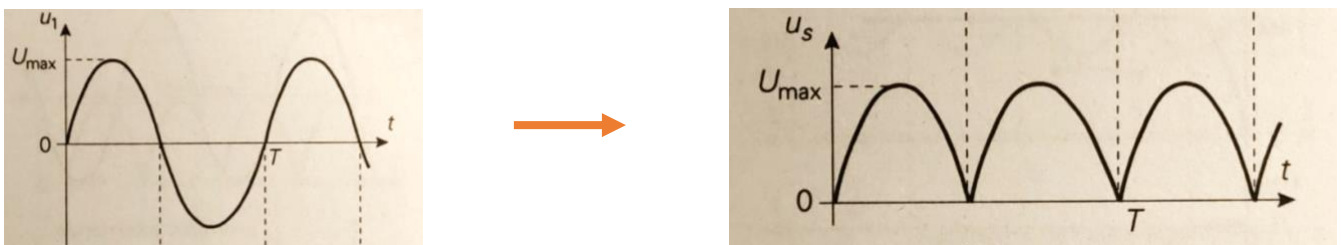


Figure 17 - Illustration du principe du redressement double-alternance - à droite : signal alternatif en entrée / à gauche : signal alternatif bialternance

Afin de mettre en œuvre ce redressement, nous utilisons une platine d'expérimentation (dite "planche à pain" ou "breadboard"), des fils conducteurs minces (rouges pour la tension d'entrée U_e et jaunes pour la tension de sortie U_s), des pinces crocodile et 4 diodes identiques. Nous assemblons notre circuit avec les 4 diodes sur la platine de façon à obtenir un circuit comme on peut le voir sur l'image ci-contre. Ce circuit nous permet de passer de redresser notre signal par bialternance et de passer d'une période de 12ms à 6ms.

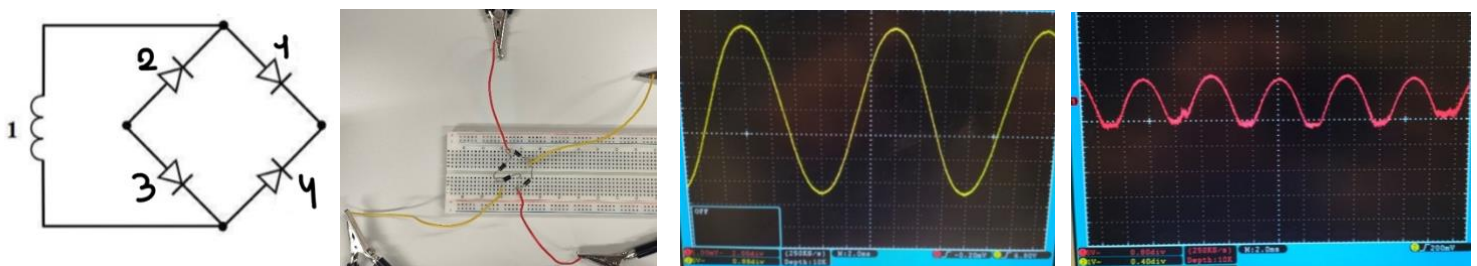


Figure 18 - De gauche à droite : Schéma électrique du pont de diodes utilisé, mise en oeuvre sur la breadboard, signal d'entrée et signal de sortie redressé

Le pont de diode suit un fonctionnement simple (cf. schéma ci-dessus) : si le courant alternatif arrive du sens violet, alors la diode 1 va laisser passer le courant vers la boucle contenant le condensateur et les diodes 2 et 4 vont bloquer le courant, à la manière d'un interrupteur ouvert. Si le courant alternatif arrive du sens vert, alors la diode 4 va laisser passer le courant vers la boucle contenant le condensateur et les diodes 1 et 2 vont bloquer le courant.

Schéma du montage complet permettant de :

- Récupérer la tension produite aux bornes de la bobine u'_e (voir figure 22) (tension entrant dans le pont de diodes via les câbles rouges cf. page précédente)
- La redresser grâce au pont de diodes
- La lisser grâce à un condensateur et une résistance en dérivation branchés.

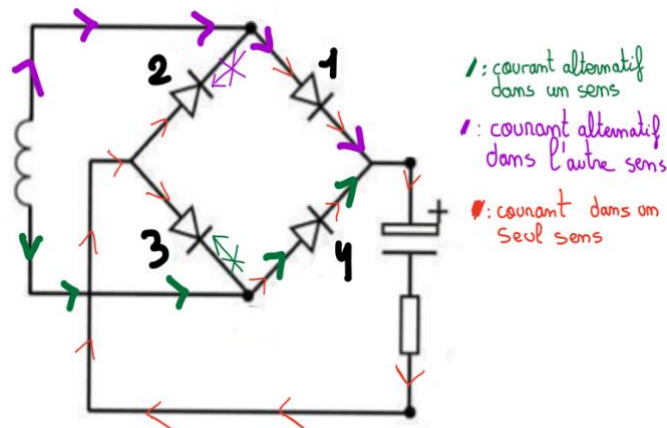


Figure 19 - Principe de fonctionnement du pont de diodes

3.3 Ajout d'un condensateur sur un double redressement périodique

Après avoir fait ce double redressement grâce au pont de diodes, nous branchons également un condensateur et une résistance pour pouvoir lisser notre signal. En effet, le condensateur permet que la tension redescende moins vite. Le circuit formé du condensateur de capacité C en farads (F) et de la résistance R en ohms (Ω) constitue un circuit RC qui sera étudié plus tard durant l'année de terminale, et dont nous avons étudié les caractéristiques. Nous avons appris qu'un circuit a un "temps de réponse" appelé constante de temps τ tel que : $\tau = R \times C$. En pratique, nous avons appris qu'au bout d'une durée d'environ 5 fois la constante de temps, le circuit RC est soit totalement chargé si on l'a mis en charge, soit totalement déchargé si on l'a mis en décharge. Ainsi, plus nous augmentons la résistance R (C étant constant), plus nous augmentons la constante de temps du circuit et plus nous parvenons à amortir le signal. Mais ce faisant nous diminuons également de beaucoup l'amplitude du signal électrique.

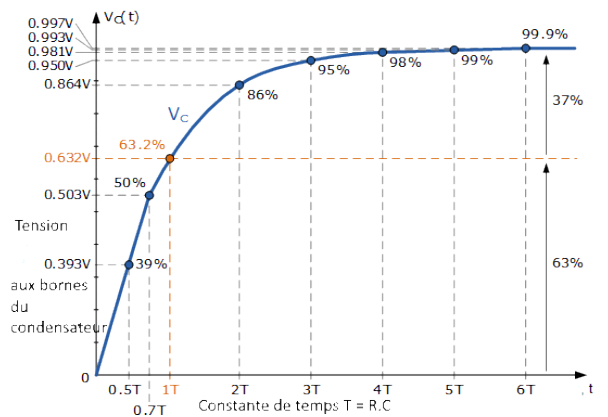


Figure 20 - Graphique théorique présentant l'évolution de la tension aux bornes d'un condensateur au cours de sa charge

Pour illustrer la notion de constante de temps, voici ci-contre le graphique théorique indiquant le taux de charge d'un condensateur en fonction du temps écoulé, en multiples de la constante de temps τ .

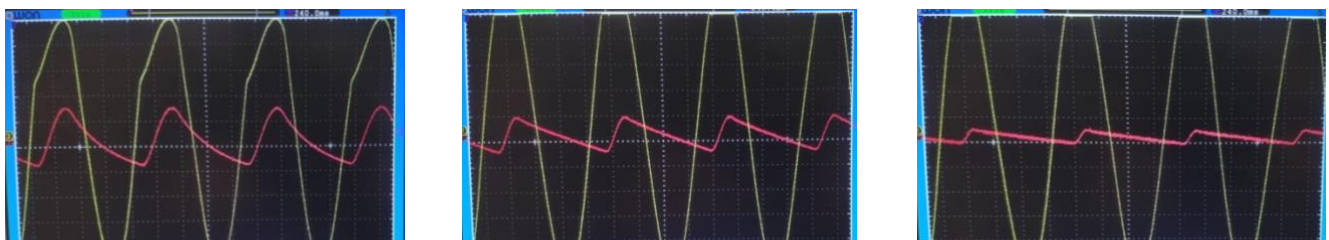


Figure 21 - Redressement mono-alternance avec lissage pour 3 constantes de temps croissantes l'expérience est réalisée successivement avec une résistance de 500 Ω puis de 1000 Ω et enfin de 100 000 Ω

Vagues d'énergie - Lycée Vauban

L'effet du condensateur est clairement visible sur les courbes ci-dessus : il aplanit la tension (il la lisse) et la fait tendre vers un signal continu ; néanmoins, il est à noter que le lissage est accompagné d'une baisse d'intensité importante (et $I = U/R$).

Finalement, si l'on ajoute un condensateur, on obtient un montage avec un courant continu. Le condensateur peut alors stocker l'énergie électrique. La tension de sortie U_s est mesurée et visualisée à l'oscilloscope.

Pour tester le montage de redressement bi-alternance, nous avons à nouveau utilisé un GBF pour générer une tension alternative sinusoïdale "propre" et régulière, sans lissage. Ci-dessous une photo après notre test de validation du circuit de redressement : elle montre le résultat observé et mesuré à l'oscilloscope du redressement d'une tension sinusoïdale alternative de fréquence : $f = 1\text{Hz}$. Les alternances redressées ont bien une fréquence double de 2Hz (2,5 carreaux en abscisse, avec 1 carreau = 200ms).

Une fois branché, le condensateur lisse la tension déjà redressée par bi-alternance (figure 22 – milieu) ; nous obtenons alors un signal qui tend vers un signal continu (figure 22 droite).

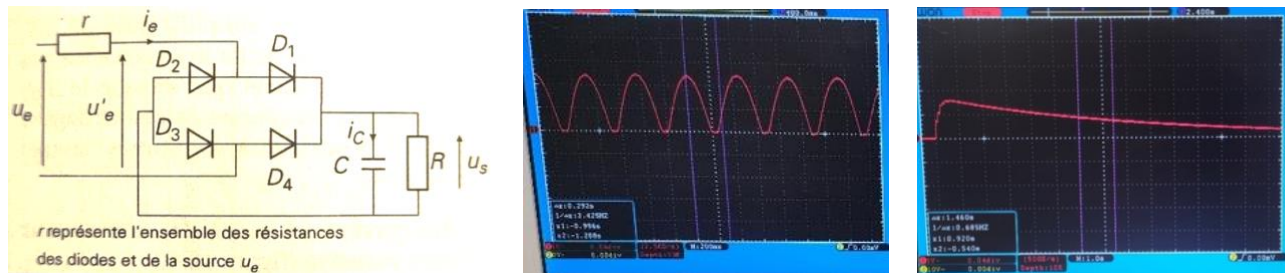


Figure 22 – (à gauche) : Schéma électrique du montage en pont de diodes couplé à un circuit RC / (au milieu) signal redressé bi-alternance avec un fréquence double de celle du signal d'entrée / (à droite) : signal amorti par le condensateur et un circuit RC présentant une grande constante de temps.

4 Gestion des incertitudes

Pour se rapprocher un maximum des valeurs exactes, nous avons répété plusieurs fois les mesures pour chaque expérience (entre 5 et 8 fois pour chaque expérience afin de permettre un traitement statistique). Nous avons ensuite fait la moyenne de toutes ces mesures, et c'est cette valeur-là que l'on a prise en compte pour tracer les courbes. Lorsque certaines mesures semblaient aberrantes et trop éloignées de la moyenne, nous les avons éliminées avant de calculer la moyenne retenue comme valeur expérimentale.

Ensuite, nous avons aussi estimé les incertitudes des différentes grandeurs mesurées. Étant donné que nos expériences sont majoritairement réalisées à la main, il est important de prendre en compte les différentes sources d'erreur de nos manipulations. Les différents appareils de mesure que nous utilisons présentent, eux aussi, un incertitude de mesure qu'il est important de prendre en compte dans l'étude.

De plus, dans de nombreuses expériences, nous avons eu besoin de calculer la puissance électrique $P = U \times I$ à partir des valeurs de la tension U_{\max} et de l'intensité I_{\max} . L'incertitude $u(P)$ sur la valeur de la puissance calculée à partir de nos mesures, à l'aide de la formule des incertitudes composées :

$$u(P) = P \sqrt{\left(\frac{u(U_{\max})}{U_{\max}}\right)^2 + \left(\frac{u(I_{\max})}{I_{\max}}\right)^2}$$

Remarque 1 : lorsque l'amplitude des oscillations est trop petite, l'aimant se déplace très peu et le signal s'amortit très rapidement du fait des frottements : les résultats expérimentaux ont alors peu de sens.

Remarque 2 : Il existe une variabilité de l'ordre de 5-10% des résultats lors des mesures expérimentales. Notamment en raison de la difficile mise en mouvement de l'aimant (écartement initial par rapport à la position d'équilibre difficile à fixer précisément). Ainsi, afin de gagner en précision, nous avons donc répété 7 fois la mesure de chaque grandeur et calculé la moyenne. Dans chaque série de mesures, nous avons éliminé les deux valeurs les plus éloignées de la moyenne et pris comme résultat final la moyenne des 5 valeurs restantes.

5 Conclusion et perspectives

Nous sommes parvenus à mettre en place un système permettant de créer et de stocker de l'énergie à partir d'oscillations mécaniques. Nous avons décidé d'aborder séparément les parties mécanique et électrique de notre étude afin d'isoler les difficultés et de valider notre système expérimental.

Dans un premier temps, nous avons mis en place puis amélioré et optimisé la partie mécanique du projet (mode opératoire, limitation des frottements, adaptation empirique du matériel, etc.). Au cours de cette étude, nous nous sommes rendu compte que le système idéal était un système à double ressort, permettant de simuler des vagues des océans avec des oscillations presque constantes avec un amortissement faible des oscillations.

Nous avons ensuite abordé la question de la puissance électrique générée et nous sommes notre étude a démontré que pour maximiser la puissance produite par notre système, il fallait la plus grande amplitude possible, la plus petite période possible et le plus grand nombre de spires possible dans la bobine. Ce qui est cohérent avec les lois de l'induction électromagnétique, phénomène physique sur lequel repose notre dispositif de production d'énergie.

Ensuite, nous nous sommes concentrés sur la partie électrique du montage afin d'obtenir le meilleur signal possible. Nous avons appris à caractériser un courant alternatif, à le redresser en courant continu, afin de pouvoir charger un condensateur.

La charge du condensateur nous permet ainsi de stocker l'énergie produite, ce qui était l'objectif de notre projet. L'utilisation de notre dispositif basé sur l'utilisation de l'énergie de la houle pourrait notamment être mis en place dans le cadre du stockage d'énergie électrique dans des batteries pouvant alimenter des lieux isolés sur la côte tel qu'un phare.

Nous avons donc mis en place un système capable de convertir des oscillations mécaniques en courant électrique, puis de transformer ce courant pour pouvoir le stocker pour une utilisation ultérieure. Nous pourrions ainsi théoriquement utiliser le mouvement des vagues pour produire de l'énergie électrique, et nous croyons fermement en cette énergie d'avenir, qui est peu polluante et renouvelable puisque les vagues sont naturellement causée par le vent en surface de la mer.

Au-delà de ce compte-rendu nous poursuivons le développement de notre système, avec comme objectif de stocker une énergie suffisante pour ensuite alimenter un petit appareil électrique. Cela nous permettrait ainsi d'évaluer le rendement de conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique réalisée par notre système. Nous souhaiterions enfin nous intéresser à la mise en place d'une maquette captant directement le mouvement des vagues à la surface de l'eau et le transmettant et l'amplifiant pour faire fonctionner notre convertisseur.



Nous sommes heureux de l'expérience de recherche que nous ont offert les olympiades de physique et des nombreux phénomènes physiques qu'il nous a été donné de découvrir et d'étudier au travers de ce projet et de notre travail d'équipe.

Bibliographie :

La bibliographie et sitographie sur laquelle s'adosse notre étude est en constante évolution car nous continuons poursuivons les recherches, c'est pourquoi nous vous proposons de consulter la dernière version en cliquant sur le lien ci-dessous :

[Bibliographie.docx](#)