

STOCKER L'ÉNERGIE

De nos jours, nous savons produire de l'énergie mais il est encore très compliqué de la stocker. C'est pourquoi nous nous sommes intéressés à ce sujet. Ce dernier est primordial dans un monde où la conservation de l'environnement est vitale. Nous avons essayé de stocker l'énergie sous différentes formes. Grâce à nos expériences, nous avons pu comprendre certains principes permettant la conservation. Cependant, les résultats obtenus ne sont pas très concluants, car nous n'avons pas les moyens permettant d'obtenir des résultats optimaux. Cela nous a obligé à travailler dans la contrainte, et nous avons toujours tenté de résoudre les problèmes rencontrés. Ce projet a aussi été un moyen d'apprendre à travailler en groupe, ainsi que de combiner et coordonner nos efforts.

- Les Électrons Libres -

Les Électrons Libres

HASHIMOTO-CULLEN Chloé | DUBOS Pierre | GARIN Théo | VIVIER Pierre

Professeur encadrant : Philippe Ménétrier

Établissement : École Alsacienne, Académie de Paris

Introduction : l'énergie aujourd'hui

En 2015, le PDG de Tesla, Elon Musk, annonce que sa compagnie a développé un produit qui va révolutionner le monde de l'énergie. Le produit s'appelle le PowerWall pour les particuliers, et le PowerPack pour les commerces et pour les entreprises. Le monde s'enflamme : en effet, la technologie proposée par Tesla permettrait aux particuliers de se déconnecter du réseau général, car le PowerWall stocke l'énergie solaire produite par leurs panneaux. Musk déclare que cela va changer notre rapport à l'énergie.

Pourtant, la technologie derrière le PowerWall n'est pas révolutionnaire : il s'agit seulement d'une batterie lithium. Ces dernières se trouvent partout, comme par exemple dans les téléphones portables. Il est impossible de prétendre qu'il s'agit d'une technologie durable qui sera la base de l'énergie du futur. En effet, le nombre de cycles qu'une batterie lithium permet peut être augmenté grâce à de petits détails techniques, mais il reste limité.

Cela pose un autre problème : il faut donc ou recycler la batterie lithium une fois sa vie finie, ou la jeter. Comme il est moins cher de brûler les piles en fin de vie, c'est ce qui est fait le plus souvent. Il est donc très probable que le monde connaisse une pénurie de lithium dans les années à venir.

De plus, le lithium n'est pas le matériau le moins dangereux qui existe pour stocker de l'énergie. En effet, il s'enflamme lorsqu'il est en contact avec l'eau, et ne s'éteint que très difficilement. Il peut exploser quand il réagit avec l'oxygène : comme ce gaz constitue un cinquième de l'air, avoir une très grosse pile au lithium à domicile peut poser des problèmes de sécurité.

Le PowerWall de Tesla n'est donc pas le symbole de la révolution énergétique qui va changer le monde et nous sauver du réchauffement climatique. Nous avons donc voulu étudier des solutions physiques pour stocker l'énergie avant de la consommer sous forme électrique. En effet, il existe déjà de nombreuses technologies durables pour la produire. Si elles ne sont pas utilisées à une grande échelle, c'est parce qu'elles sont intermittentes. Les panneaux solaires ne servent à rien lorsqu'il est 4 heures du matin et que le Soleil ne s'est pas encore levé : il faut que quelque chose conserve l'énergie solaire produite la veille jusqu'à ce que le Soleil se lève le jour suivant. Il y a des technologies qui exploitent les énergies cinétique et potentielle de pesanteur pour conserver l'énergie électrique produite avant de la consommer sous forme électrique.

C'est ce que nous avons décidé d'explorer dans ce projet.

Quelles sont les technologies qui nous permettraient de stocker l'énergie de manière durable ?

Tout d'abord, nous avons étudié la technologie du supercondensateur. Ensuite nous avons regardé par le biais de quelques exemples comment nous pouvons utiliser l'énergie potentielle de pesanteur pour conserver l'énergie. Pour finir, nous avons étudié les possibilités d'exploiter l'énergie cinétique afin de stocker l'énergie.

Nous avons également réalisé des expériences sur le stockage grâce à l'air, mais nous n'avons pas fini de développer le sujet, c'est pourquoi il n'est pas inclus dans le mémoire, vous le retrouverez en annexe de ce dossier.

Introduction : (p 2)

- L'énergie aujourd'hui (p 2)
- Supercondensateur (p 4)

1. Energie potentielle de pesanteur (p 5)

- Principe (p 5)
- Expériences (p 6)

2. Gravity Light (p 12)

3. Volant d'inertie (p 14)

- Principe (p 14)
- Vitesse de rotation (p 15)
- Energie cinétique de rotation (p 15)
- Résultats (p 17)

Conclusion (p 18)

Remerciements (p 19)

Bibliographie (p 20)

Annexes (p 21)

Supercondensateur :

Après avoir visualisé la vidéo mise en ligne par Chemicum en 2013, nous avons voulu fabriquer un supercondensateur, pour étudier son fonctionnement. Cette vidéo a été récompensée par un prix en Estonie (pays d'origine de ses réalisateurs, Tavo Romann et Taavi Oja). Nous avons donc mis en œuvre le protocole suivant :

Découper de la maille de fer en petits rectangles. Enrouler le fil d'un tampon à récupérer en fer autour de la maille de fer de manière à ce qu'il soit très serré. Écraser du charbon actif (tel que celui qu'on utilise dans les filtres d'aquariums) avec un moulin à café. Mélanger la poudre obtenue avec de la colle époxy : appliquer le tout sur les plaques de fer, et compresser le tout. Dans une boîte de Tic-Tacs, alterner entre les "électrodes" ainsi fabriquées et de la toile en polypropylène (on a utilisé une protection hivernale pour paillage de plantes), afin que les plaques métalliques ne se touchent pas. Remplir la boîte de Tic-Tacs avec de la soude à 1 mol.L^{-1} et la charger pendant 24 heures en branchant les électrodes sur un générateur.

Après avoir chargé notre condensateur, il y a $4 \cdot 10^{-4}$ Farads à la sortie (la décharge s'effectue en 2 minutes environ). Ces valeurs correspondaient à celles que l'on voulait obtenir. Cependant, nous avons préféré remplacer notre supercondensateur par des condensateurs industriels afin d'avoir des mesures de plus grandes précisions en réduisant ainsi l'incertitude sur notre matériel.

Pour mieux comprendre leur fonctionnement, nous avons effectué un système de recharge et de décharge d'un condensateur dont les tensions aux bornes ont été mesurées grâce à une carte d'acquisition. Le condensateur est alors alimenté par un générateur 6 volts alimentant une résistance de $1 \text{ k}\Omega$. Ce circuit correspond au cycle de charge. Nous pouvons ainsi effectuer le montage du cycle de décharge en utilisant une résistance de $1 \text{ k}\Omega$ tout en reportant les valeurs des tensions d'entrée et de sortie du condensateur afin d'en connaître ses capacités. Nous avons effectué une deuxième expérience en alimentant le condensateur avec du 12 volts afin de montrer que le temps de décharge est deux fois plus longs.

C'est ainsi que nous avons pu comprendre le fonctionnement des supercondensateurs qui sont efficaces pour stocker l'énergie, mais possèdent une capacité de stockage réduite, et un temps de restitution très court, nous pouvons donc trouver mieux pour stocker de façon durable une énergie propre.

1. Énergie potentielle de pesanteur

Principe :

Un premier exemple de méthode de stockage d'énergie est les Stations de Transfert d'Énergie par Pompage (STEP).

Le réseau électrique mondial est conçu de telle sorte que la production d'électricité doit, à tout moment, être égale à la consommation. En effet, il y a peu de manières de stocker de très grandes quantités d'électricité. Cette configuration a une conséquence : le prix de l'électricité change toutes les demi-heures. Certaines centrales jouent donc sur cette fluctuation des prix.

Les STEP sont des usines hydroélectriques, plus petites que des barrages, et tournant avec une quantité d'eau limitée. Les stations fonctionnent toutefois comme des barrages, en faisant passer un volume d'eau d'une hauteur plus haute à une hauteur plus faible pour faire tourner une turbine et générer de l'énergie.

Lorsque le prix de l'électricité est haut, les centrales produisent et vendent. Ces stations ont une quantité d'eau limitée, et doivent en conséquence remonter l'eau descendue. Les STEP profitent de la fluctuation des prix pour remonter l'eau lorsque les prix sont bas. Lorsque la demande augmente, elle est de nouveau relâchée. Grâce à ce système, ces stations maintiennent l'équilibre entre production et consommation tout en faisant des bénéfices.

On consomme donc de l'électricité pour en produire plus tard, avec certaines pertes inévitables. Le rendement des STEP qui fonctionnent en circuit fermé (sans apport extérieur d'eau) varie entre 70 % et 85 %. Cette forme de stockage d'énergie est l'une des plus performantes aujourd'hui.

Si la production d'énergie est supérieure à la demande, le réseau électrique peut surcharger. Ce surplus d'énergie peut donc être absorbé par les STEP, qui remontent alors de l'eau. Les stations absorbent donc un surplus d'énergie problématique, mais aussi sauvegardent une énergie qui aurait été dissipée.

Ces stations illustrent le principe de stockage d'énergie grâce à l'énergie potentielle de pesanteur (*voir annexe 1.1*).

Expériences :

Nous souhaitons modéliser ce système en laboratoire. Nous allons donc pomper un volume d'eau vers un jerrican en hauteur pour le stocker, puis le faire passer dans une turbine. Cette dernière transforme son énergie potentielle de pesanteur en énergie électrique.

- Un bidon (possédant deux ouvertures, haute et basse) représente le bassin supérieur et un seau le bassin inférieur.
- Nous avons installé une pompe d'aquarium 230V au fond du seau, permettant d'envoyer l'eau du seau dans le bidon lors de la phase de pompage.
- Nous plaçons enfin une turbine (de notre création, baptisée Pétunia) entre la sortie basse du bidon et le seau. C'est elle qui génère de l'électricité en phase de turbinage.
- Nous mesurons la durée du pompage du volume d'eau vers le jerrican. En multipliant cette valeur par la puissance électrique, nous déduisons l'énergie nécessaire pour monter ce volume d'eau.
- Nous mesurons, grâce à une carte d'acquisition branchée au logiciel Synchronie 2006, la tension générée par Pétunia au cours du temps.
- En positionnant le bidon à des hauteurs variables, nous pouvons ainsi déduire dans quelle configuration le rendement énergétique entre la phase de pompage et celle de turbinage est le meilleur.

Le schéma de notre installation est illustré en annexe 1.2.

Nous avons tout d'abord vérifié que la tension du courant (en volts) est bien constante quand l'énergie utilisée par la pompe (en fonction des différentes hauteurs du jerrican) varie. De même, nous avons mesuré l'intensité du courant (en ampères), afin d'établir des valeurs moyennes et de pouvoir établir une constante pour le calcul de l'énergie électrique requise. (Notons que la hauteur est mesurée entre la surface libre de l'eau dans le seau et le point le plus haut du tuyau).

Nous avons obtenu les valeurs suivantes :

Variation de la tension et de l'intensité du courant en fonction de la hauteur de l'eau.

STOCKER L'ÉNERGIE

Hauteur (mètres)	Tension (volts)	Intensité (ampères)
0,275	231	0,0785
0,435	231	0,0793
0,605	231	0,0789
0,705	231	0,0790
0,820	231	0,0789
0,935	231	0,0791
1,040	231	0,0793

Nous observons que la valeur de la tension ne varie pas : $U = 231$ V. L'intensité varie très peu : en moyenne, $I = 79$ mA = 0,0790 A. (Toutes ces mesures ont été faites par le professeur, et ce de manière sécurisée.)

- Avec ces valeurs, nous calculons la puissance de l'électricité (il s'agit du courant général) : L'approximation de la puissance du courant est ici $P = 18,3$ W.

$$P = U \cdot I \Rightarrow P = 231 \cdot 0,0790 \Rightarrow P = 18,3 \text{ W}$$

- Nous avons ensuite réalisé une série de mesures du temps nécessaire pour remonter l'eau dans le bidon en fonction de hauteurs différentes.
- Nous avons ensuite calculé l'énergie potentielle de pesanteur (E_{pp}) de l'eau (en Joules). Pour cela, nous multiplions la masse de l'eau ($m = 6,515$ kg) par la valeur de l'intensité du champ de gravitation à Paris (nous prenons $g = 9,8$ m.s⁻²) et par la hauteur à laquelle on pompe l'eau. De plus, nous avons cherché l'énergie électrique consommée (E_{elec}) en multipliant la puissance électrique du courant (estimée à 18,3 W) par la durée du pompage.

Hauteur (m ; ± 0,01m)	Masse d'eau (kg ; ± 0,5kg)	Durée (secondes ; ± 1s)	E_{pp} (Joules)	E_{elec} (Joules)
0,0905	6,515	87	5,7781535	1592,1
0,2405	6,515	131	15,3552035	2397,3
0,301	6,515	135	19,217947	2470,5
0,3905	6,515	136	24,9322535	2488,8
0,5405	6,515	154	34,5093035	2818,2
0,6905	6,515	195	44,0863535	3568,5
0,841	6,515	276	53,695327	5050,8

Tableau de l'énergie potentielle de l'eau selon la hauteur à laquelle elle a été pompée.

Ce tableau nous permettra de calculer un rendement de l'énergie potentielle de pesanteur sur l'énergie électrique nécessaire au pompage de l'eau.

- Nous souhaitons trouver une fonction qui relie la hauteur du jerrican à l'énergie électrique nécessaire pour pomper l'eau jusqu'à cette hauteur. Nous utilisons Excel pour représenter les points et pour trouver une courbe de tendance.

Afin de travailler avec plus de précision, nous avons voulu calculer les incertitudes :

$$E_{elec} = P \cdot t = U \cdot I \cdot t$$

$$E_{pp} = m \cdot g \cdot h$$

$$Q = \frac{E_{elec}}{E_{pp}}$$

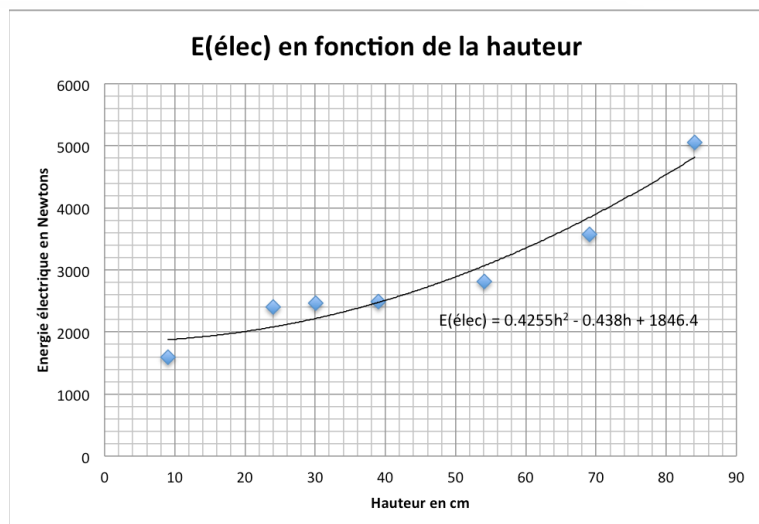
$$\Delta Q = Q \left(\frac{\Delta E_{pp}}{E_{pp}} + \frac{\Delta E_{elec}}{E_{elec}} \right) = Q \left(\frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta g}{g} + \frac{\Delta h}{h} + \frac{\Delta U}{U} + \frac{\Delta I}{I} + \frac{\Delta t}{t} \right)$$

$$\Delta Q = \left(\frac{2}{t} + 0 + \frac{0,2}{h} + \frac{0,5}{231} + \frac{0,5}{0,079} + \frac{2}{t} \right) \text{ car on émet l'hypothèse } m = k \cdot t \text{ avec}$$

$$\frac{\Delta m}{m} \leq \frac{\Delta t}{t} .$$

Avec cet outil, nous traçons la courbe suivante :

L'énergie électrique nécessaire pour monter l'eau à une hauteur donnée.



Nous observons qu'il y a un point optimal, où la hauteur de l'eau la plus élevée, pour une énergie électrique minimale. Afin de trouver ce point, nous dérivons l'équation obtenue afin de savoir quand le taux d'accroissement de la fonction est nul.

L'équation de la courbe est la suivante : $f(h) = 0.4255h^2 - 0.438h + 1846.4$

Nous la dérivons : $f'(h) = 2 \times 0.4255 \times h - 0.438 \iff f'(h) = 0.851 h - 0.438$

À présent, nous cherchons à savoir quand ce taux d'accroissement est nul.

Nous avons: $f'(h) = 0 \iff 0.851 h - 0.438 = 0 \iff 0.851 h = 0.438 \iff h = \frac{0.438}{0.851} \approx 0.515m$

Le taux d'accroissement est nul quand la hauteur de l'eau est de 52 cm environ. C'est donc la hauteur optimale pour que le moins d'énergie électrique soit consommé dans ces conditions.

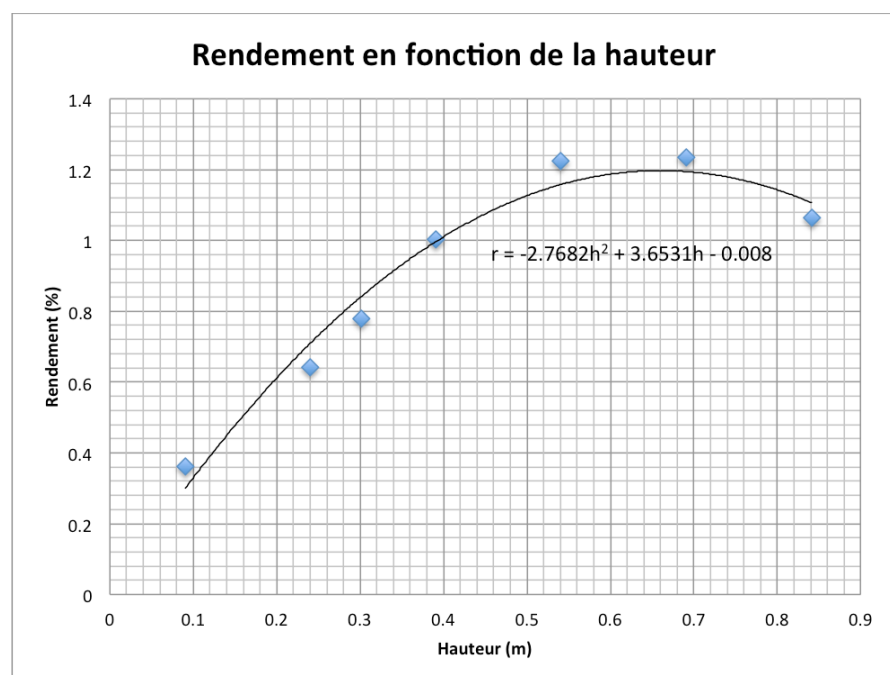
Désormais, nous allons nous intéresser au rendement de l'énergie potentielle de pesanteur sur l'énergie électrique consommée. Nous avons les valeurs suivantes :

E_{pp} (Joules)	9,05	24,05	30,1	39,05	54,05	69,05	84,1
$E_{élec}$ (Joules)	1592,1	2397,3	2470,5	2488,8	2818,2	3568,5	5050,8

Énergie potentielle de l'eau et énergie électrique nécessaire pour atteindre la position haute.

- Nous calculons ensuite le rendement pour chacune de ces valeurs, en multipliant le rapport de l' E_{pp} sur l' $E_{élec}$ par 100 :

Pourcentage du rendement (rapport de E_{pp} sur $E_{élec}$) et sa courbe de tendance.



La fonction qui à la hauteur associe le rendement est la suivante :

$$f(h) = - 2.7682 h^2 + 3.6531h - 0.008$$

Nous calculons la valeur de son maximum dans ces conditions : $\frac{-3.6531}{-2 \times 2.7682} = 0.66 \text{ m}$

Donc le rendement est le plus élevé quand l'eau monte à 66 cm environ. Il vaut à peu près :

$$f(0.66) = -2.7682 \times (0.66)^2 + 3.65318 \times 0.66 - 0.008 \approx 1.2 \%$$

Le meilleur rendement de cette expérience est donc inférieur à 2 %. Notre modélisation connaît plusieurs limites importantes. En effet, notre expérience ne comprend qu'un petit nombre de valeurs. L'équation obtenue pourrait donc encore être améliorée, afin de trouver une courbe plus précise. De plus, le rendement calculé est plus élevé que celui qu'on obtiendrait en réalité, car l'énergie potentielle de pesanteur ne sera pas entièrement utilisée.

Nous allons maintenant nous intéresser à la quantité d'électricité produite lorsque nous faisons passer l'eau dans une turbine. Nous avons réalisé cette expérience deux fois, en faisant varier la hauteur de chute de l'eau avant l'impact avec les pales de l'hélice. Lors de la première expérience, la distance était de 17 cm. Le graphique de la tension de l'électricité produite en fonction du temps lors de cette expérience ainsi que la représentation graphique du même phénomène lorsque la chute est de 29 cm, sont disponibles en annexe, respectivement 1.3 et 1.4.

Un courant d'une tension de moyenne de 0,037 V est créé de 3,5 à 100 s (première expérience). Il est logique que la tension créée diminue au cours du temps : étant donné que la quantité d'eau dans le bassin supérieur diminue, la vitesse de l'eau à sa sortie diminue aussi.

Lors de la deuxième expérience, nous avons un courant de tension moyenne 0,066 V de 2,3 à 62 s. Au bout de 63 s, la vanne est coupée et l'eau ne coule plus. Nous n'observons pas de diminution notable de la tension créée sur cette seconde expérience. En effet, la perte de vitesse due à la diminution du volume dans le bassin supérieur est négligeable par rapport à la vitesse finale de l'eau. Si nous avions prolongé l'expérience, nous aurions pu noter une évolution.

Etant donné que la vitesse d'un corps en chute libre évolue selon la formule $v = \sqrt{2gh}$ (g étant l'accélération de la pesanteur, et h la hauteur de chute) la vitesse d'impact de l'eau lorsqu'elle entre en contact avec la palle est plus importante lors de la seconde expérience.

La vitesse de l'eau lors de la première mesure est : $\sqrt{2gh} = \sqrt{2 \cdot 9,8 \cdot 0,17} \approx 1,8$ m/s.

La vitesse de l'eau lors de la deuxième mesure est : $\sqrt{2gh} = \sqrt{2 \cdot 9,8 \cdot 0,29} \approx 2,4$ m/s.

Cette différence explique la différence de tension de l'électricité créé.

Nous avons ainsi modélisé le fonctionnement des centrales STEP : l'électricité est stockée grâce à un déplacement d'eau.

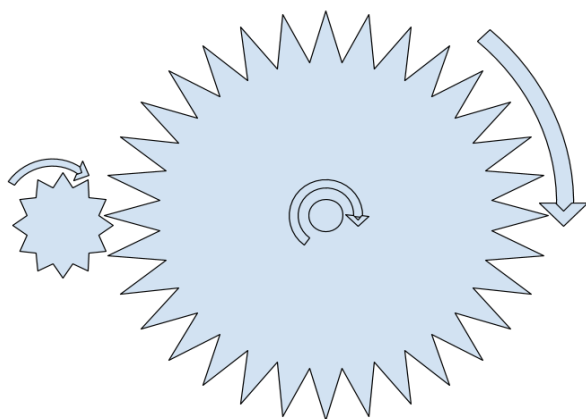
Il resterait un grand travail d'échelle à faire. En effet, il faut se souvenir que lorsque le système de pompage est utilisé à une échelle industrielle, il s'agit de plusieurs tonnes d'eau qui sont pompées à une grande hauteur. Il y aurait des pompes beaucoup plus puissantes, ainsi que des bassins avec un plus grand volume. De plus, nous n'avons pas travaillé ici avec un matériel qui était forcément très adapté aux besoins de l'expérience : notre turbine était artisanale, ce qui a grandement réduit son efficacité. Nous avons également utilisé une pompe d'aquarium dont la finalité n'est pas le relevage de l'eau mais sa circulation. De plus dans notre expérience, l'eau parvient au bassin supérieur avec une vitesse non nulle qui représente une énergie cinétique perdue. Cependant, nous pourrions suivre le même protocole à une plus grande échelle.

2. Gravity Light

Un deuxième exemple d'utilisation de l'énergie potentielle de pesanteur est la Gravity Light. C'est est une lampe qui utilise la gravité pour générer l'électricité nécessaire à son fonctionnement. Un projet humanitaire veut utiliser ce procédé pour fournir de l'électricité dans de nombreux pays en développement, notamment en Afrique subsaharienne et en Inde, où l'électricité n'est pas disponible facilement, et l'éclairage se fait avec des énergies non renouvelables. Outre les qualités écologiques et sociales de cette lampe, nous allons ici nous intéresser aux moyens employés par ce système pour stocker l'énergie.

Cette lampe se compose d'un corps principal, équipé d'un générateur et d'une DEL (diode électroluminescente) entre autres, duquel pend un sac, rempli d'objets lourds. Le principe est de remonter le sac, qui va descendre lentement, tout en actionnant une dynamo. Cette dernière produira suffisamment d'électricité pour alimenter la DEL. Voilà qui éclaire le nom de Gravity Light.

La gravity light utilise un système de poulies pour bénéficier d'une longue production d'électricité.



La Gravity Light cherche à produire de l'électricité pendant une durée maximale en ayant une hauteur de chute du poids limitée. La génératrice, pour tourner et produire de l'électricité, nécessite un couple faible. Un couple est défini comme étant le produit de la force tangentielle a la roue par le rayon de la roue : $C = R * F$. Le système d'engrenage permet à la roue à laquelle est accrochée la masse, de tourner k fois moins vite que la génératrice, la masse assurant un couple k fois plus important que le couple initial. Il en résulte que la masse descend très lentement, en faisant tourner une grande roue, qui, elle, fait tourner la génératrice R3.

Une énergie potentielle de pesanteur devient énergie cinétique, qui devient ensuite de l'électricité. L'électricité produite est de l'ordre de 0,1 W, ce qui peut sembler peu, mais, grâce aux progrès récents des DEL, peut alimenter jusqu'à 4 lampes en même temps.

Lorsque toute la puissance du générateur est envoyée vers une seule lampe, celle-ci dégage une lumière d'intensité 16 lumens. (*voir notre dispositif en annexe 2.1*)

- Ici, nous stockons de l'énergie grâce au positionnement en hauteur d'un objet. Nous avons accroché un poids de 100 g autour d'un générateur.
- Ensuite, nous avons ensuite laissé tomber le poids, ce qui a généré de l'électricité. En faisant passer cette énergie à travers une résistance, et en branchant celle-ci à Synchronie 2006, nous avons pu calculer la tension électrique produite.

Nous remarquons dans le graphique de la quantité d'électricité produite en fonction du temps, en annexe 2.2, que l'électricité produite a une tension maximale de 3 V. L'allure de cette courbe peut être expliquée assez simplement. Le poids, en tombant, gagne une énergie cinétique de plus en plus importante, selon la formule $v = \sqrt{2gh}$: la corde fait tourner le moteur, dont les frottements ralentissent la chute du poids. La vitesse n'est donc pas exactement égale à $\sqrt{2gh}$, mais nous indiquons ici la formule pour expliquer l'augmentation de la vitesse du poids. La tension de l'électricité augmente donc progressivement jusqu'à ce que le poids touche le sol. Lorsque le poids touche le sol, le moteur ne peut pas maintenir sa vitesse à cause des frottements : il tourne de plus en plus lentement, avant de s'arrêter.

Notre expérience illustre bien le système global de transformation d'énergie en plaçant un poids en hauteur pour ensuite le faire redescendre, mais représente mal le fonctionnement de la Gravity Light, dont le poids tombe longtemps et à une vitesse constante. Nous avons donc cherché à modéliser plus exactement le fonctionnement de cette lampe, et avons réglé le moteur de telle façon qu'il faille plus de force pour le faire tourner. Avec ce réglage, nous avons réussi à faire en sorte que le poids tombe à une vitesse constante. Dans ce cas, nous avons produit une tension moins grande (1V), mais pendant plus longtemps (4s) comme l'illustre le graphique ci-dessous (*voir annexe 2.3*).

Nous avons ensuite cherché à allumer une DEL avec notre moteur. La DEL ayant besoin d'une tension supérieure à 2V, nous l'avons donc allumée avec notre premier réglage, et ce pendant 0,8 s.

En plaçant un objet en hauteur puis en le faisant actionner une dynamo quand il descend, nous pouvons produire de l'électricité. Ceci illustre aussi le principe de stockage d'énergie par le biais de l'énergie potentielle de pesanteur (*voir annexe 2.4*).

3. Volant d'inertie

Nous pouvons maintenant nous intéresser à un autre type de stockage : le volant d'inertie. Le principe de ce stockage mécanique est de conserver une énergie électrique sous forme d'énergie cinétique de rotation. Le volant d'inertie est donc constitué d'une masse reliée à l'axe d'un moteur. Ce dernier entraîne la masse, qui, par sa rotation, stocke l'énergie sous forme cinétique. Cette dernière est reconvertie en énergie électrique quand le moteur est déconnecté. En effet, la masse continue d'effectuer des rotations jusqu'à son arrêt au bout d'un certain temps. Cette dernière partie est la plus intéressante car le moteur nous permet de récupérer l'énergie électrique. Il y a donc bien eu conversion d'énergie de différents types (ici mécanique et électrique) pour permettre ce stockage.

Nous avons ainsi créé notre volant d'inertie en laboratoire. Pour cela, nous avons utilisé comme masse cylindrique un plateau de tabouret en bois de diamètre 38 cm. Ce dernier est placé verticalement dans une enceinte fermée pour plus de sécurité. La masse est mise en rotation sur un axe d'un moteur "Mécano" de 6 V (alimenté par un générateur) sur un rapport de 3 à 1 permettant la mise en mouvement du volant d'inertie. Nous avons donc pensé qu'il était important de calculer la vitesse de rotation de notre masse. Pour cela nous avons conçu le protocole suivant :

- Coller des morceaux de papier dépassant de l'extrémité de la masse sur une partie de cette dernière sur environ 60°.
 - Placer à ce même niveau, un laser sur une plateforme éclairant les morceaux de papier.
 - De l'autre côté du laser placer un photorécepteur branché sur une résistance de 1 k Ω et relié à une carte d'acquisition permettant d'exploiter le logiciel Synchronie 6.
 - Allumer le moteur. Les morceaux de papiers vont ainsi empêcher à leur passage le laser d'atteindre le photorécepteur.
 - Sur le logiciel Synchronie, après l'enregistrement, nous pouvons calculer le nombre de tours par minute suite à la différence de tension enregistrée par le photorécepteur.
- Notre volant d'inertie et le dispositif pour compter les tours par minute ainsi que le volant d'inertie vu de côté, sont disponibles en annexe 3.1 et 3.2*

STOCKER L'ÉNERGIE

Nous avons ainsi pu calculer une vitesse de rotation de près de 8 tours par seconde soit $\omega(0) = 50.3 [2\pi] \text{ rad/s}$ la vitesse initiale du moteur avant de couper son alimentation. Cette vitesse de rotation est indispensable pour calculer l'énergie cinétique de rotation de formule $E_c = 1/2 J \cdot \omega(t)^2$.

Nous calculons la vitesse de rotation du volant d'inertie :

$$v = \frac{1}{T} \Leftrightarrow T = \frac{1}{v} \Leftrightarrow T = \frac{1}{8} = 0.125s$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{0.125} = 50.3 [2\pi] \text{ rad} \cdot s^{-1}$$

Nous cherchons à calculer J :

$$J = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^4 \cdot h = \frac{1}{2} \cdot 800 \cdot \pi \cdot 0.19^4 \cdot 0.02 = 0.033 \text{ kg} \cdot m^2$$

Ainsi nous pouvons calculer E_c :

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega^2 = \frac{1}{2} \cdot 0.033 \cdot 50.3^2 = 41.7 \text{ kg} \cdot m^2 \cdot s^{-2} \text{ soit } 41.7 \text{ J}$$

Il est alors intéressant de calculer la relation entre la vitesse de rotation, l'intensité du courant consommé par le moteur, et l'évolution de l'énergie électrique. Pour cela nous proposons l'expérience suivante :

- Relier le moteur à un ampèremètre. Observer son intensité. En déduire la quantité d'énergie consommée par le moteur.

Cette intensité à $\omega_{initiale}$ soit $\omega = 0$ (lorsque l'axe commence à tourner) est de $I = 1,8 \text{ A}$. La masse tourne de plus en plus vite ce qui a pour effet de baisser l'intensité du moteur. Cette dernière va donc diminuer en fonction du temps jusqu'à atteindre un seuil de $I = 1,2 \text{ A}$ à partir duquel nous couperons l'alimentation du moteur pour relier ce dernier à une résistance de 100Ω . Cet ampèremètre est relié à une la carte d'acquisition en EA_{1+} . Nous effectuons de plus le protocole précédent permettant de déterminer le nombre de tours par seconde en reliant le photorécepteur à la carte d'acquisition en EA_0 . En EA_2 de cette dernière, nous pouvons calculer la tension du moteur.

(note : EA_0 , EA_1 , EA_2 sont des ports de la carte d'acquisition)

Une fois que l'intensité du moteur vaut $I = 1,2 \text{ A}$, nous coupons l'alimentation de ce dernier pour le brancher à la résistance (100Ω). Nous observons alors le graphique suivant, obtenu grâce au logiciel Synchronie 2006 (voir annexe 3.3).

- Refaire l'expérience précédente en changeant la résistance du moteur pour une résistance 10Ω (voir annexe 3.4).

Sur ces deux enregistrements, nous pouvons voir la courbe noire qui représente le nombre de tours par seconde. En effet, l'intensité calculée au photorécepteur varie selon qu'il soit éclairé par le laser ou non. Ainsi quand le laser atteint le photorécepteur, la tension reste constante à près de 2,7 V alors que quand le laser est obstrué par les morceaux de papier, la tension augmente jusqu'à près de 4 V. Nous pouvons alors voir l'accélération et la décélération du volant par le rapprochement ou l'espacement des pics de la courbe.

La courbe bleue correspond à l'intensité lorsque le moteur consomme. Cette dernière est très faible et elle est nulle lorsque l'alimentation du moteur est coupée.

Enfin, la courbe rose est la tension produite par le moteur. Au début, cette tension est constante à 6 V et chute brutalement à près de 1 V. Cette chute s'explique par le fait que le moteur n'entraîne plus le volant mais c'est bien ce dernier qui entraîne le moteur. l'intervalle entre 95 secondes et 158 secondes, correspond à la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique. En effet, nous pouvons voir que le volant d'inertie décélère jusqu'à son arrêt complet. Nous avons donc bien stocké de l'énergie.

Nous calculons enfin le rendement entre l'énergie dépensée pour faire tourner le volant, et celle récupérée. Nous calculons dans un premier temps l'énergie dépensée, en phase de stockage pour maintenir le volant en rotation, avec une résistance de 100Ω . Sachant que l'intensité variait de 1,2 à 1,8 A, on en déduit $I_{\text{moy}} = 1,4 \text{ A}$. Et avec U la tension du générateur, on en déduit une puissance moyenne $P = U \times I_{\text{moy}}$. L'énergie générée au cours du temps est donc : $E = P \times t = 6 \times 1,4 \times 95 = 798 \text{ J}$

De plus nous avons déjà calculé l'énergie du volant qui est de 41,7 J. Il faut maintenant s'intéresser à la phase de restitution. Durant cette phase la tension est de 1.2 V et diminue jusqu'à être nulle. Pour la résistance de 100Ω nous pouvons calculer l'énergie sur un temps de 65 secondes :

STOCKER L'ÉNERGIE

$$E = \frac{U^2}{R} \cdot t = \frac{1,2^2}{100} \times 65 = 0,936 \text{ J}$$

Le rendement énergétique est alors :

$$\text{Rendement} = \frac{\text{Energie}_{\text{restitution}}}{\text{Energie}_{\text{volant}}} \times 100 = \frac{0,936}{41,7} \times 100 = 2,24 \%$$

Pour la résistance de 10 Ω nous pouvons calculer l'énergie sur un temps de 60 secondes dont la tension moyenne est de 1 V : $E = \frac{U^2}{R} \cdot t = \frac{1^2}{10} \times 60 = 6 \text{ J}$

Le rendement est alors :

$$\text{Rendement} = \frac{\text{Energie}_{\text{restitution}}}{\text{Energie}_{\text{volant}}} \times 100 = \frac{6}{41,7} \times 100 = 14,4 \%$$

L'investissement dans un volant d'inertie est estimé entre 1 000 et 4 500 \$/kWh par l'Agence Internationale de l'Energie. C'est cher par rapport à d'autres technologies (les batteries au lithium coûtent entre 500 et 2 300 \$/kWh). Cependant, cette différence est compensée par des coûts de maintenance faibles et par une importante durée de vie. Dans les trains et les métros, les volants d'inerties sont maintenant utilisés pour utiliser l'énergie du freinage lors du démarrage des engins. Par exemple, le métro de la ville de Rennes utilise un volant de 2,5 tonnes pour économiser ainsi 230 MWh en un an (c'est équivalent à la consommation totale d'énergie du métro en 11 jours).

Conclusion

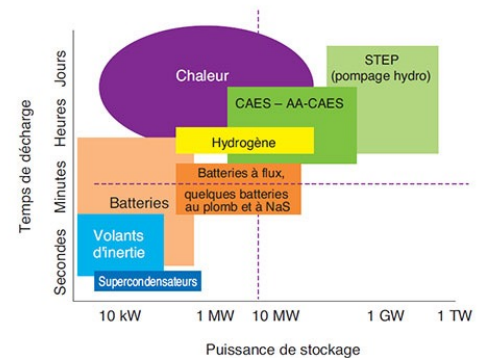
Toutes nos expériences ont été réalisées en laboratoire de lycée : les conditions étant limitées, nos calculs de rendement ne nous permettent donc pas d'isoler une solution idéale pour stocker de l'énergie. Cependant, selon l'analyse faite par l'IFPEN, il semblerait que les systèmes les plus intéressants à ce jour soient basés sur l'énergie potentielle de pesanteur. En effet, nous voyons que le pompage hydraulique permet de stocker de l'énergie de l'ordre du TeraWatt sur plusieurs jours. Ce n'est pas la seule solution à envisager : selon les cas de figure, un autre moyen pourrait être plus approprié.

Pour autant, ces solutions, comme notre rendement de pompage à 1,2% l'a montré, ne sont viables que si elles sont adaptées à une grande échelle. Il faut garder en tête que le stockage hydro-électrique a certes le meilleur rendement, mais que l'investissement vaut la peine en industrie seulement. En effet, le rendement que l'on obtient en laboratoire est tellement bas qu'il ne sert à rien d'investir dans une installation de petite taille. Les technologies explorées ne sont donc pas adaptées à un marché de particuliers.

De plus, les stations hydroélectriques utilisent essentiellement de l'eau douce. En raison des pénuries d'eau à venir, la question de leur durabilité à long terme se pose. Il serait peut-être plus raisonnable d'utiliser un autre corps pour assurer le transfert d'énergie potentielle de pesanteur. L'utilisation d'une eau non potable (comme de l'eau de mer par exemple) ne semble pas non plus forcément adaptée : l'énergie déployée pour l'acheminer en montagne réduirait drastiquement la rentabilité du système. Une solution imaginée en Californie est de faire monter et descendre des trains sur des reliefs selon la demande.

Pour les particuliers produisant de l'énergie à petite échelle, on peut, par exemple, envisager l'utilisation de volants d'inertie enterrés (afin d'éviter toute pollution visuelle), en utilisant un matériau durable. Couplé à des panneaux photovoltaïques ou éoliennes, le volant d'inertie peut être une bonne solution pour les particuliers (VOSS par Energiestro). Dans tous les cas, l'amélioration des rendements et la possibilité d'exploitation à long terme et à grande échelle passe par la persévérance de la recherche dans le domaine des énergies propres et renouvelables, ainsi que par la bonne volonté politique et citoyenne.

Les différentes technologies de stockage en fonction de leur puissance et du temps de décharge (autonomie)



Source : IFPEN d'après diverses sources

Remerciements

Nous tenons à remercier toutes les personnes ayant contribué à nos Olympiades de Physique et nous ayant aidé et soutenu durant notre parcours.

Tout particulièrement nos professeurs de physique Mr Ménétrier et Mme Piveteau toujours présents à nos côtés et disponible pour répondre à nos questions.

De plus nous remercions infiniment :

- Les chercheurs du CNRS du four solaire d'Odeillo, pour leurs réponses à nos questions en rapport avec les différents systèmes de stockages d'énergies propres (volant d'inertie, stockage thermique par le biais de l'alumine ...)
- Pauline Noell étudiante en ingénierie pour son aide sur la question des volants d'inertie, qui avait préalablement réalisé un TIPE sur ce même sujet.
- Enfin, Tavo Romann, chercheur en ingénierie et chimie des matériaux à l'université Tartu en Estonie, pour sa contribution et ses réponses à nos questions concernant le supercondensateur.

BIBLIOGRAPHIE :

Lindley, David. *The Energy Storage Problem*, Nature Vol 463, 7 Janvier 2010.

<http://www.forbes.com/sites/christopherhelman/2015/05/01/why-teslas-powerwall-is-just-another-toy-for-rich-green-people/#e08e69d4879b>

https://en.wikipedia.org/wiki/Tesla_Powerwall

<https://en.wikipedia.org/wiki/Lithium>

<http://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/hydroelectricite-stations-de-transfert-d-energie-par-pompage-step>

<http://www.humanosphere.info/2014/07/comment-construire-une-pompe-a-eau-qui-fonctionne-sans-electricite>

<https://sites.google.com/site/pompeabelier/> (maquette)

<https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/le-fonctionnement-d-un-barrage>

<http://tpe.tdcc.fr/fonctionnement-et-caracteristiques.html>

<http://gravitylight.org>

<https://www.indiegogo.com/projects/gravitylight-2-made-in-africa>

<https://fr.wikipedia.org/wiki/GravityLight>

<http://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/volant-dinertie>

https://fr.wikipedia.org/wiki/Coefficient_de_tra%C3%AEn%C3%A9e

https://fr.wikipedia.org/wiki/Masse_volumique#Gaz

<https://fr.wikipedia.org/wiki/A%C3%A9rodynamique>

http://www.ecosources.info/dossiers/Stockage_energie_volant_inertie

<http://www.ifpenergiesnouvelles.fr/Espace-Decouverte/Les-cles-pour-comprendre/Le-stockage-massif-de-l-energie/Les-technologies-actuelles-de-stockage-et-leur-etat-de-maturite>