

CONUS Céline  
GERMAIN Célia  
MOUFFAK Samia  
OBERHAUSER Lucie

# *La montre solaire mécanique*

*ou*

*Comment stocker l'énergie solaire sous forme  
mécanique ?*



Olympiades de physique 2007  
Lycée Jean Monnet Annemasse

# SOMMAIRE

<i>I. La transformation de l'énergie solaire en énergie mécanique.</i> .....	1
1. Les composants étudiés. ....	3
LES CELLULES PHOTOVOLTAIQUES OU PANNEAUX SOLAIRES	
LES MOTEURS_	
LES RESSORTS PLATS	
2. Adaptation et liaison des composants entre eux. ....	5
Cellule et moteur	
Caractéristique de la cellule	
Point de fonctionnement	
Moteur et ressort	
Couple du moteur	
Couple du ressort	
Le pas linéaire	
La démultiplication	
Les condensateurs	
3. Rendements. ....	15
Bilan des énergies	
La cellule	
Le moteur	
Le ressort	
<i>II. Application de la transformation à l'horlogerie mécanique.</i> .....	25
Introduction : pourquoi l'horlogerie ?	
1. Première étape : branchement direct. ....	26
2. Deuxième étape : avec les condensateurs et l'interrupteur manuel. ....	27
3. Troisième étape : avec le comparateur à double seuil. ....	29
4. Quatrième étape : avec une commande automatique. ....	32

# I. La transformation de l'énergie solaire en énergie mécanique

## 1. Les composants étudiés

A partir de notre projet, nous avons pu déterminer que le montage final, auquel nous voulions parvenir, serait composé d'au minimum trois éléments : un panneau solaire, un moteur et un ressort plat, agencés dans ce même ordre.

### LES CELLULES PHOTOVOLTAIQUES OU PANNEAUX SOLAIRES

Une cellule photovoltaïque est un moyen moderne de fournir de l'énergie, utilisé de plus en plus fréquemment, notamment dans les entreprises, mais aussi chez les particuliers.

Grâce à l'excitation des électrons par le rayonnement d'une source lumineuse (de préférence solaire), contenus dans le silicium qui la compose, la cellule est capable de fabriquer un courant électrique.

Dans notre montage, elle est la base du fonctionnement du système puisque c'est notre générateur.



*Exemple de panneaux solaires*



### LES MOTEURS

Les moteurs électriques sont des systèmes capables de transformer de l'énergie électrique en énergie mécanique.

Dans notre montage, le moteur est donc chargé de convertir l'énergie électrique que lui fournit la cellule en énergie mécanique ensuite emmagasinée dans un ressort.

Sa position charnière entre la cellule et le ressort en fait le composant le plus délicat du circuit puisqu'il doit s'adapter aux deux le mieux possible.

*Exemples de moteurs électriques*

## LES RESSORTS PLATS

Pour notre montage nous avons choisi des ressorts plats, très utilisés en horlogerie, car ceux-ci sont moins encombrants et plus pratiques que les ressorts droits, pour notre projet.

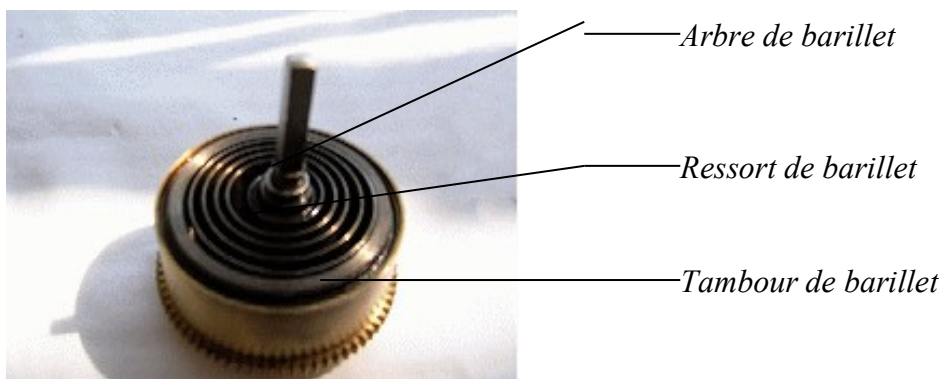
Le ressort est l'un des éléments clef du montage que nous avons effectué. Le ressort serré, grâce à la photopile, est en effet synonyme de la réussite du stockage de l'énergie solaire en énergie mécanique.



*Exemple d'un ressort spiral brut*

Ce type de ressort est généralement utilisé en horlogerie. Notre exemple est donc composé de:

1. **Tambour de barillet** : Boîte cylindrique qui sert de logement au ressort et de pivotement à l'arbre de barillet, sur lequel est fixé un engrenage. Un dégagement sur le diamètre intérieur permet la fixation du ressort pour assurer l'entraînement du tambour.
2. **Ressort de barillet** : Lame de section rectangulaire logée dans le tambour.
3. **Arbre de barillet** : Axe pivotant à travers le tambour, permettant la fixation du ressort par le crochet situé sur la bonde.
4. **Couvercle de barillet** : il ferme la boîte contenant le ressort. Il permet également le pivotement de l'arbre de barillet.



*Un ressort plat complet (mécanisme d'horloge)*

## 2. Adaptation et liaison des composants entre eux

### Cellule et moteur

#### Caractéristique de la cellule

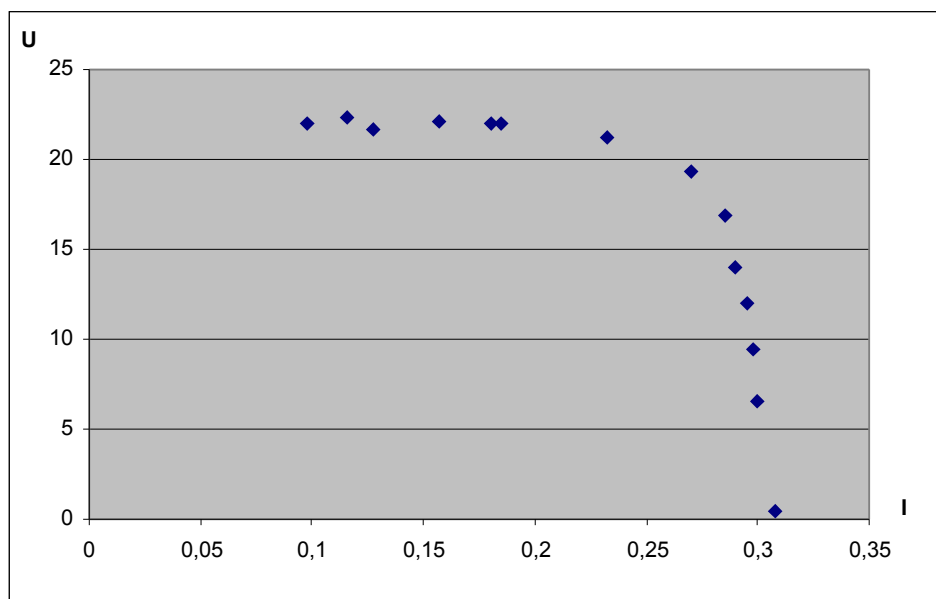
Possédant préalablement une cellule photovoltaïque, nous avons du l'étudier pour connaître ces paramètres et ensuite pouvoir lui adapter un moteur.



*Photo de la cellule photovoltaïque étudiée et utilisée*

Pour cela, nous avons élaboré sa caractéristique dans de très bonnes conditions d'ensoleillement (100 000 lux).

*Remarque :* Le lux est une unité de mesure de la puissance d'un rayonnement visible. En conditions de temps optimales, le soleil est capable de fournir un rayonnement compris entre 120 000 lux et 130 000 lux.



Caractéristique de la cellule : courbe tension/intensité

Une caractéristique est une courbe représentant l'intensité que fournit l'élément étudié et sa tension. Elle permet de voir pour quelles valeurs de ces deux paramètres, le composant atteint une puissance idéale. La puissance se calculant par le produit de l'intensité et de la tension, par lecture graphique, nous observons que la puissance de la cellule est la plus élevée pour environ 20V et 0,27A.

## Point de fonctionnement

Il existe deux types de dipôle : actif ou passif.

Vis à vis de la cellule, notre moteur est passif ou dit en convention récepteur, c'est à dire qu'il reçoit l'énergie fournie par la cellule.

Un ensemble Générateur- Récepteur fonctionne correctement quand on peut trouver un point pour lequel le récepteur et le générateur ont la même tension et la même intensité. On appelle ce point le point de fonctionnement du système. Pour le connaître, on établit la caractéristique de chacun des deux composants, et le point se trouve à l'intersection des deux caractéristiques.

Mais il y a un problème : il est très difficile de tracer la caractéristique d'un moteur.

D'après la caractéristique de la cellule, l'idéal serait d'avoir un moteur fonctionnant à 20V de tension et 0,27A d'intensité pour un rendement et une exploitation maximale des capacités de celle-ci, mais nous ne disposons pas d'un tel moteur.

En fait, la tension et l'intensité de la cellule réellement fournies dépendent du récepteur que l'on branche dessus. Dans notre cas, la plupart des moteurs ne fonctionnent pas en branchement direct ou seulement sous un fort ensoleillement !

Nous décidons donc de trouver le moteur demandant le moins possible de puissance pour fonctionner et ayant un système de réduction adapté. Nous le trouverons dans une boutique spécialisée dans le modélisme.



*Photo du moteur sélectionné*

## Moteur et ressort

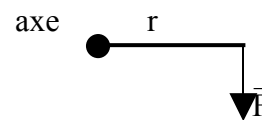
Une fois le moteur sélectionné, il nous faut trouver le ressort à lui adapter. Dans cette partie du montage, le moteur devient actif, il est en convention générateur vis à vis du ressort, qui lui est en convention récepteur. Cependant, ici, on ne peut pas utiliser la caractéristique pour déterminer le point de fonctionnement puisque le ressort n'est pas défini par une tension et un courant. En revanche, le ressort et le moteur ont en commun un autre paramètre : le couple.

### Couple du moteur

Le couple est une grandeur mécanique qui désigne un effort en rotation appliqué à un axe. Il se calcule de la manière suivante :

$$C = r \times F$$

C: couple en Nm  
r : rayon en mètre  
F : force en Newton



Pour le calculer, nous avons mis en place une expérience avec des masses de plus en plus lourdes fixées à l'axe de rotation du moteur :



*Photo de l'expérience réalisée pour le calcul du couple du moteur*

En faisant marcher le moteur, nous avons pu remonter une masse de 700g, avec un engrenage de rayon 0,0065 m ce qui nous a permis de déterminer un couple de 0,0455 Nm.

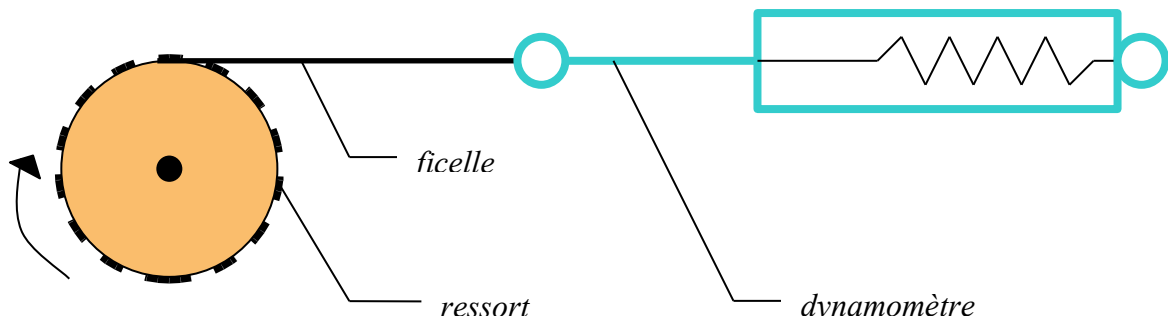
*Remarque :* Cette valeur n'est pas maximale car nous n'avons pas essayé de remonter une masse de plus de 700g. Cela signifie que le couple trouvé n'est sans doute pas le couple maximum du moteur, mais il est suffisant.

## Couple du ressort

Le couple du ressort doit être légèrement inférieur à celui du moteur pour que celui-ci l'enroule facilement.

Il se calcule de la même façon que pour le couple du moteur.

Pour le calculer, nous avons mis en place cette expérience. Nous avons observé la force nécessaire pour faire tourner le ressort d'un certain angle.



*Schéma de l'expérience vue ci-dessus*

Nous obtenons le tableau de valeurs suivant en fonction de l'angle de rotation du ressort :

<b>Rayon (m)</b>	<b>F(N)</b>	<b>couple (N.m)</b>
0,023	0	0
0,023	0,17	0,0039
0,023	0,31	0,0071
0,023	0,45	0,010
0,023	0,63	0,0145
0,023	0,8	0,018
0,023	1,05	0,024
0,023	1,2	0,028
0,023	1,5	0,0345
0,023	1,65	0,038

Remarque : La valeur du couple variant sans cesse, il arrivera un moment où elle sera supérieure ou égale à celle du couple du moteur. L'enroulement du ressort ne sera alors plus possible après une rotation d'un certain angle.

Les valeurs du couple du ressort trouvées par les expériences, confirment que le ressort choisi est adapté au moteur

Remarque : D'autres ressorts auraient sans doute été mieux adaptés mais compte tenu de la rareté des ressorts plats sur le marché, notre choix fut très limité.



Après avoir défini le ressort adapté au moteur, nous avons du trouver un moyen de les lier. Pour cela nous avons placé un engrenage sur la tige du moteur compatible avec celui situé sur le tambour de barillet. Pour que deux engrenages coïncident parfaitement, il faut qu'ils aient le même pas linéaire.

### Le pas linéaire

Le pas linéaire est une grandeur dépendante du diamètre et du nombre de dents d'un engrenage. Il se calcule selon la formule :

$$X = \frac{d\pi}{z}$$

X: pas linéaire  
d : diamètre en cm  
Z : nombre de dents



L'engrenage du tambour de barillet possède 72 dents et un diamètre de 4,6 cm donc il a comme pas linéaire 0,20.



L'engrenage placé sur la tige du moteur possède 19 dents et un diamètre de 1,4 cm donc il a comme pas linéaire 0,23.



L'écart observé entre ces deux valeurs étant très faible, il n'empêche pas la coïncidence entre les engrenages.

*Photo du moteur enroulant le ressort grâce aux engrenages*

Un ressort enroulé lentement accumule plus d'énergie (puisque elle augmente en fonction du temps), c'est pourquoi le moteur est équipé d'un train démultiplicatif d'engrenages.

## La démultiplication

La démultiplication d'une force peut se faire à l'aide d'engrenages. Le principe de départ est « dent pour dent », c'est à dire qu'une dent entraîne toujours une autre dent d'engrenage. Les rapports entre les engrenages se calculent proportionnellement aux diamètres des systèmes, en comptant le nombre de dents à la circonférence des engrenages.

Par le calcul suivant, nous obtenons le nombre de tours d'un engrenage par rapport au précédent.

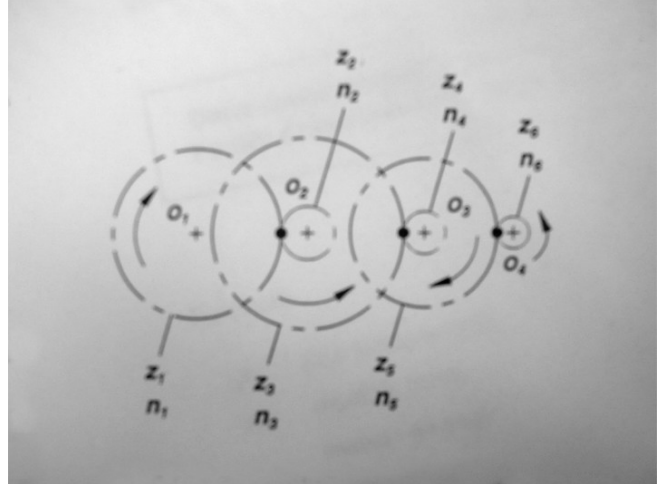
$$n_2 = \frac{z_1 n_1}{z_2}$$

$n_1$  : nombre de tour du premier engrenage

$n_2$  : nombre de tour du second engrenage

$z_1$  : nombre de dent du premier engrenage

$z_2$  : nombre de dent du second engrenage

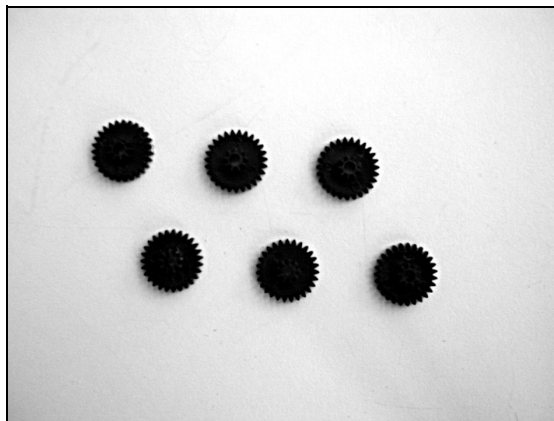


*Train démultiplicatif d'engrenages*

Démultiplication des engrenages du moteur :

Les engrenages du moteur étant tous identiques il est possible d'établir un coefficient de démultiplication, dans ce cas le coefficient est 3.

A chaque fois que l'on ajoute un engrenage, on démultiplie la force par 3. Si on met 6 engrenages on démultiplie les forces par 18.



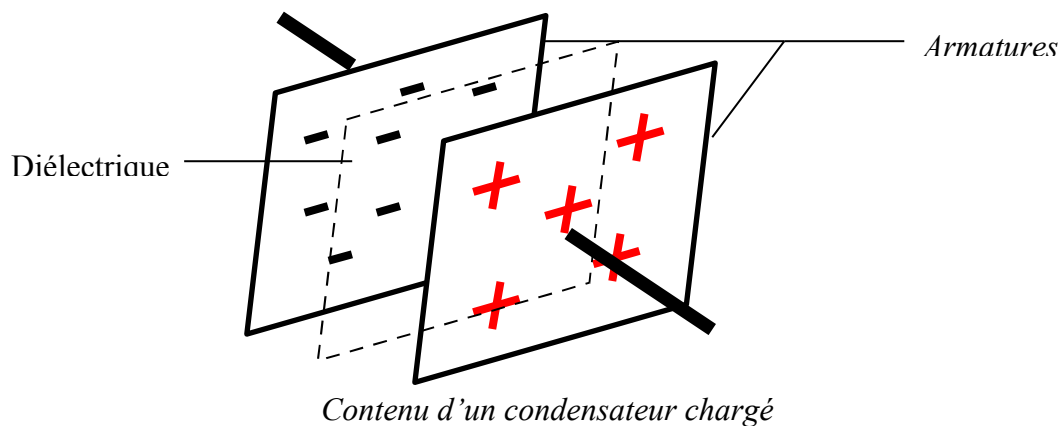
*Engrenages du moteur*

## Les condensateurs

La luminosité n'est pas toujours suffisante pour permettre à la cellule de fournir la puissance nécessaire au fonctionnement du moteur et donc à l'enroulage du ressort. Alors, pour pallier à d'éventuelles mauvaises conditions météorologiques, nous avons du utiliser des condensateurs.

Un condensateur est un dispositif capable d'accumuler l'énergie fournie par un générateur. Cette charge électrique est ensuite libérée dans sa totalité dans le circuit si on le lui permet.

Il est composé de deux armatures métalliques séparées par un isolant appelé diélectrique. Ainsi, placé en série dans un circuit fermé, il bloque les électrons sur une de ses plaques, créant un excès de charge négative d'un côté et un déficit sur l'autre plaque. Cet état de stabilité est maintenu grâce à un champ électrique qui s'établit entre les deux charges opposées.



La capacité d'un condensateur se calcule selon la formule :

$$C = \epsilon \frac{S}{e}$$

C : capacité en farad

S : surface en m<sup>2</sup>

e : distance entre les deux plaques en m

$\epsilon$  : permittivité du diélectrique

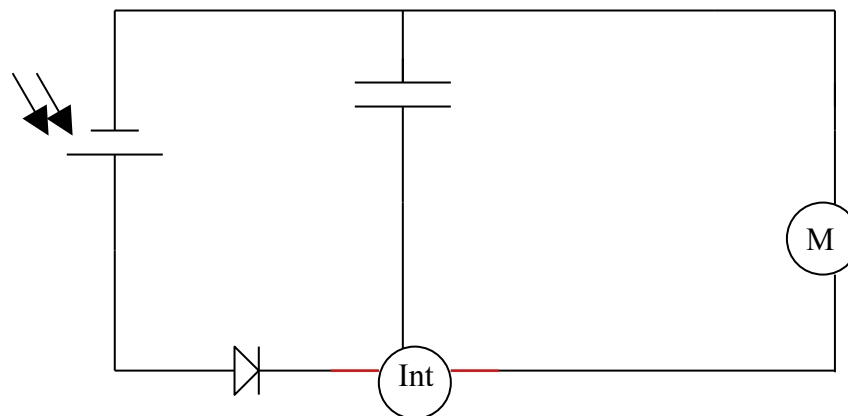
Lorsque le condensateur a atteint son maximum de capacité, il cesse de se charger et garde toute l'énergie stockée même si on ouvre le circuit.

Pour augmenter la capacité d'un condensateur, il suffit d'en brancher autant qu'on veut en dérivation les uns avec les autres.




*Condensateur (à droite) et sa boîte*

Nous avons choisi d'utiliser deux condensateurs pour obtenir une capacité totale de  $9400 \mu\text{F}$ . En insérant les condensateurs dans le montage nous obtenons ce circuit :



*Schéma normalisé du montage*

 Moteur

 Interrupteur double position



*Photo de l'interrupteur*

Les condensateurs ne se déchargeant donc pas seuls, nous avons installé un interrupteur entre les deux différentes sections du circuit, pour obliger les électrons accumulés, grâce au courant circulant dans la première partie, à passer dans la seconde partie, vers le moteur. Une fois que le transfert a eu lieu, on referme le circuit premier pour accumuler de nouveau de l'énergie dans les condensateurs et ainsi de suite.

*Remarques* : Le système comme nous l'avons conçu nous oblige à actionner manuellement l'interrupteur à chaque accumulation des condensateurs, ce qui, en pratique, est très gênant et inconcevable pour l'utilisation quotidienne. Il faudrait un système automatisé équipé de capteurs pouvant détecter la saturation des condensateurs et relâcher l'énergie à ce moment , puis se remettre en position initiale.

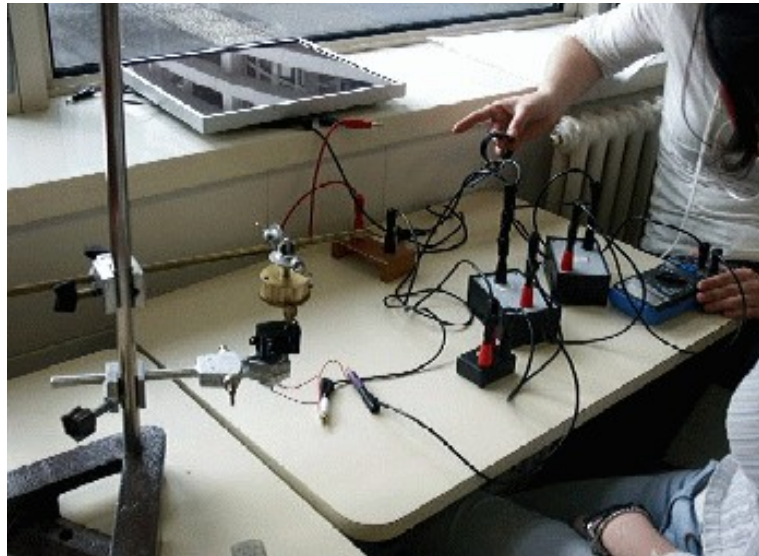
La diode est présente dans le montage pour empêcher le courant de passer dans le mauvais sens en cas d'erreur de branchement, ce qui pourrait endommager la cellule.

Grâce aux condensateurs, nous pouvons donc faire fonctionner notre système même par faible ensoleillement.

Au final, deux solutions s'offrent à nous quant au fonctionnement du système. Nous pouvons donc utiliser ou non les condensateurs selon la puissance de la luminosité. L'idée étant cependant d'utiliser ce système quotidiennement, il est préférable de toujours avoir recours aux condensateurs afin d'anticiper sur les variations de l'ensoleillement au cours d'une journée.



*Photo du montage sans les condensateurs*



*Photo du montage avec les condensateurs*

### 3. Rendements

#### Calcul des énergies

Le montage, à présent fonctionne. Nous pouvons effectivement stocker de l'énergie mécanique dans un ressort. Cependant, nous avons tout de même dû calculer les énergies fournies par chaque dipôle pour savoir si le système est rentable et si les pertes sont importantes ou non.

- La cellule

Une cellule photovoltaïque possède ses propres caractéristiques. En effet, toutes les cellules ne possèdent pas la même taille, la même efficacité et donc n'ont pas les mêmes rendements d'énergie.

Les panneaux solaires sont caractérisés par une instabilité de leurs rendements : les facteurs environnementaux jouent un rôle important dans la qualité des rendements d'une cellule : par exemple, plus la température de la cellule est élevée et plus ceux-ci sont faibles.

La température, la luminosité, l'orientation, la position ou encore la période (saisonnière) sont des facteurs influant sur l'énergie solaire reçue par la cellule.

De plus, ces conditions ne pouvant être contrôlées et programmées, toutes les mesures prises avec la cellule ne sont valables que pour un moment donné : la puissance varie constamment et si les conditions requises ne sont pas adaptées, c'est le système tout entier qui se retrouve pénalisé par les mauvais rendements de la cellule.

Pour calculer l'énergie lumineuse fournie par le soleil, nous avons dû faire une estimation car il est impossible de le faire étant donné les variations incessantes des conditions météorologiques et géographiques.

Au dessus de l'atmosphère, une cellule reçoit un rayonnement de  $1360 \text{ W/m}^2$ .

Nous avons donc fait notre estimation, évidemment en dessous de l'atmosphère, qui arrête une importante quantité de rayonnement, à une inclinaison de la cellule avec le zénith de  $45^\circ$  environ, sous ciel clair et à une heure optimale (12h00-13h00).



*Montage réalisé dans les conditions ci-dessus*

Ces différents paramètres nous ont permis d'évaluer une énergie moyenne reçue d'environ 600 W/m<sup>2</sup>.

*Remarque :* Une formule du calcul de l'énergie lumineuse existe mais elle est fautive. Elle nous donne une valeur de 146 W/m<sup>2</sup>, ce qui est bien trop faible (= estimation sous ciel nuageux)

A partir de cette énergie, nous avons pu calculer la puissance de la cellule. Nous disposons d'une cellule de 0,097 m<sup>2</sup>.

$$E = P / S \quad \text{donc} \quad P = E \times S$$

E : éclairement en W/m<sup>2</sup>

P: puissance en W

S : surface en m<sup>2</sup>

La puissance de la cellule est donc, dans ces conditions, égale à 58,2 W, ce qui n'est pas mal pour le type de cellule que nous avons. L'énergie que fournit la cellule se calcule comme celle du moteur :  $E = P \cdot \Delta t$ .



Temps en secondes	Puissance lumineuse W	Energie lumineuse J
0	58,2	0
17	58,2	989
25	58,2	1455
36	58,2	2095
45	58,2	2619
55	58,2	3201
63	58,2	3666
150	58,2	8730
167	58,2	9719
233	58,2	13560

*Tableau de l'énergie lumineuse*

- Les condensateurs

L'énergie d'un condensateur se calcule selon la formule :

$$E = \frac{1}{2} \cdot CU^2$$

E : énergie en J  
C : capacité en farad  
U : tension en V

Ainsi, nous obtenons régulièrement une énergie égale à 1,88 J au niveau des condensateurs, lorsqu'ils sont chargés par la cellule.

- Le moteur

Dans les mêmes conditions, nous avons pu calculer la puissance et l'énergie du moteur.

$$P = U \times I$$

et

$$E = P \times \Delta t$$

P : puissance en W

U : tension en Volt

I : intensité en ampère

E : énergie en J

$\Delta t$  : temps en secondes

Tension en volts	Intensité en ampères	P électrique en W
11,2	0,21	2,3
11,2	0,21	2,3
9,2	0,22	2,0
9,2	0,22	2,0
9,2	0,22	2,0
9,2	0,22	2,0
10	0,21	2,1

*Tableau de la puissance électrique*

Comme les conditions sont toujours variables, pour être plus précis nous avons pris une tension et une intensité moyennes à 10V et 0,21A.

Cela nous fait donc une puissance moyenne de 2,1W.

Cependant, toujours dans un souci de précision nous avons utilisé les différentes moyennes de puissances du tableau pour calculer l'énergie.

<b>P électrique en W</b>	<b>Temps en secondes</b>	<b>Energie électrique en J</b>
2,1	0	0
2,1	17	35,7
2,1	25	52,5
2,1	36	75,6
2,1	45	94,5
2,1	55	115
2,1	63	132

*Tableau de l'énergie électrique*

- Le ressort

Pour calculer l'énergie du ressort plat nous avons adapté une formule de calcul de l'énergie de ressorts de compression.

Cette formule est :

$$E = \frac{kx^2}{2}$$

$E$  : énergie en joules

$k$  : constante de raideur en N/m

$x$  : distance d'étirement du ressort en m

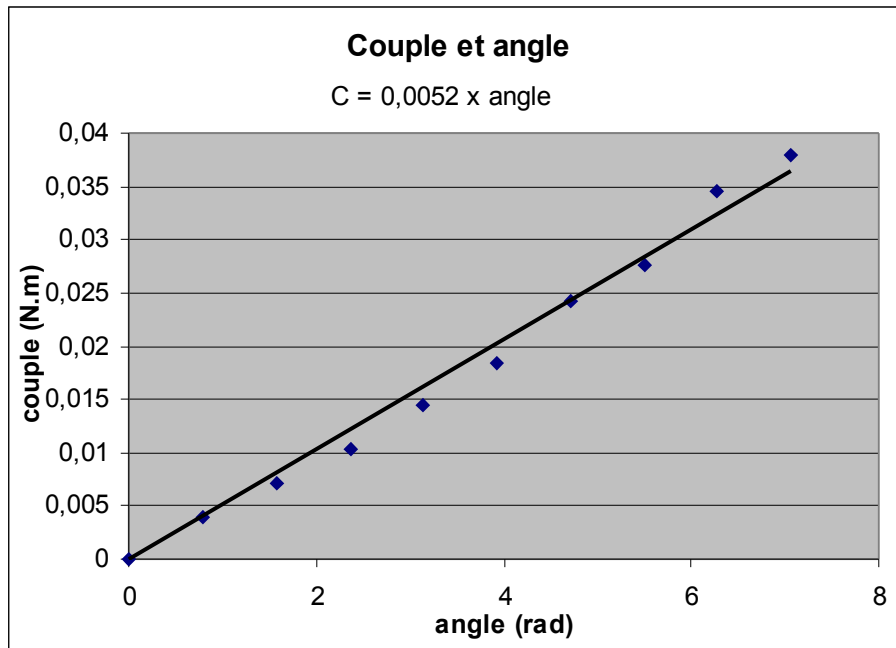
Le ressort possède une caractéristique linéaire, donc l'angle de torsion est proportionnel au couple, la constante  $k$  est alors égale à :

$$k = \frac{C}{\theta}$$

$\theta$  : angle en radian

$C$  : couple en N.m

$k$  : constante de proportionnalité (« raideur »)



Ce graphique nous montre bien que le couple et l'angle sont proportionnel. La constante k est égale au coefficient directeur de la droite : 0,0052.

Dans ce cas, nous savons que, dans le cadre des ressorts de compression :

$$E = \frac{kx^2}{2}$$

avec une force F proportionnelle à l'allongement x :  $F = k.x$ .

Par identification (F avec C et x avec l'angle  $\theta$ ), nous avons pu adapter cette formule aux ressorts plats :

$$E = \frac{k\theta^2}{2}$$

Nous obtenons le tableau de valeurs suivant :

Angle en radians	Energie du ressort J
0	0
3,14	0,026
4,71	0,058
6,28	0,10
7,85	0,16
9,42	0,23
10,99	0,31
12,56	0,41
15,7	0,64
18,84	0,92
21,98	1,3
25,12	1,6
28,26	2,1
31,4	2,6
37,68	3,7

*Tableau de l'énergie du ressort*

### Rendements

Grâce au calcul des énergies nous pouvons étudier les rendements du système. Ceux ci nous permettent de savoir si notre montage est efficace ou non. Ils se calculent selon la formule :

$$\eta = \frac{Eu}{Ei}$$

$\eta$  : rendement

Eu : énergie réellement utilisée (ou utile)

Ei : énergie fournie

Ainsi, nous avons calculé les rendements au différents passages et transformations de l'énergie dans chaque dipôle.

Nous obtenons les valeurs suivantes au niveau...

...de la transformation de l'énergie lumineuse en électrique

Energie lumineuse J	Energie électrique J	Rendement
0	0	0
989	35,7	3,6
1455	52,5	3,6
2095,2	75,6	3,6
2619	94,5	3,6
3201	115,5	3,6
3666,6	132,3	3,6
4132,2	149,1	3,6
5238	189	3,6
6343,8	228,9	3,6
7333,2	264,6	3,6
8730	281,4	3,2
9719,4	293,3	3,0
11058	307,1	2,8
13560,6	354,4	2,6

*Calcul du rendement lumineuse/électrique en %*

Le rendement est proche de 3 % tout au long des mesures. Cette valeur est cohérente quand on sait qu'une cellule à Silicium amorphe a un rendement proche de 6% en général.

...de la transformation de l'énergie électrique en mécanique

Energie électrique J	Energie du ressort J	Rendement
0	0	0
35,7	0,0256	0,072
52,5	0,0577	0,11
75,6	0,102	0,14
94,5	0,160	0,17
115,5	0,231	0,20
132,3	0,314	0,24
149,1	0,410	0,275
189	0,641	0,34
228,9	0,923	0,40
264,6	1,26	0,475
281,4	1,64	0,58
293,3	2,08	0,71
307,1	2,56	0,835
354,4	3,69	1,0

*Calcul du rendement électrique/mécanique en %*

Grâce à ces calculs, nous pouvons constater que les rendements sont extrêmement faibles. Comme hypothèses d'un si faible rendement, nous pouvons imaginer :

- un moteur électrique a un rendement faible de l'ordre de 10 %
- le système de réduction doit engendrer des pertes
- le ressort engendre lui aussi une grande perte pendant son mouvement.
- ...

Nous pouvons aussi nous poser la question de notre modèle de calcul d'énergie du ressort. Nous n'avons trouver aucune formule donnant l'énergie accumulée par un ressort plat spiral et la notre n'est peut-être pas aussi bonne que nous le pensons.

...de la transformation de l'énergie lumineuse en mécanique  
(= rendement total)

Energie lumineuse J	Energie du ressort J	rendement total
0	0	0
989	0,0256	0,0026
1455	0,0577	0,0040
2095	0,102	0,0049
2619	0,16	0,0061
3201	0,231	0,0072
3666	0,314	0,0086
4132	0,41	0,0099
5238	0,641	0,012
6343	0,923	0,0145
7333	1,26	0,017
8730	1,64	0,019
9719	2,08	0,021
11058	2,56	0,02
13560	3,69	0,027

*Calcul du rendement total en %*

Ces calculs n'apportent pas plus de conclusions que le tableau précédent.

De plus, nous savons que le calcul de l'énergie lumineuse n'étant pas facile, il ne vaut mieux pas commenter ce rendement.

## **Conclusion provisoire**

Ainsi, nous pouvons conclure que notre montage, dans la théorie comme dans la pratique, fonctionne : nous pouvons en effet stocker l'énergie solaire sous forme mécanique dans un ressort.

Cependant, les rendements ainsi que les énergies sont très faibles et notre matériel reste assez peu adapté. Nous n'avons pas eu beaucoup de choix et donc, nous n'avons pas pu utiliser les meilleurs éléments. Tous ces facteurs ont fait que nous n'avons pas pu tirer le maximum des capacités des composants et que le montage est très imparfait. Malgré cela, nous pourrions l'utiliser pour l'horlogerie où les rendements seraient suffisants au fonctionnement d'une montre.

Toutefois, nous pensons qu'à plus grande échelle ce système n'est guère utilisable car pas assez rentable. Néanmoins, nous sommes persuadées que l'idée n'est pas irréalisable et qu'avec beaucoup d'améliorations, nous pouvons peut-être l'envisager comme un moyen intéressant d'utiliser l'énergie, dans le respect de l'environnement, pour les générations à venir.



## II. Application de la transformation à l'horlogerie mécanique

Pourquoi l'horlogerie mécanique ?

Nous avons vu que les rendements de notre système Moteur – Ressort utilisés dans la première partie sont faibles. On ne peut donc utiliser cette transformation d'énergie que dans un cadre très particulier. Notre application ne doit pas avoir besoin de beaucoup d'énergie dans le temps mais plutôt à des intervalles de temps réguliers.

Comme notre ressort sort d'une horloge mécanique, nous avons pensé que notre système pourrait servir de remontoir pour une horloge mécanique.

En effet, le remontoir d'une horloge est directement relié à un ressort dit « moteur ». Celui-ci permet d'entretenir le mouvement de l'oscillateur servant de base de temps dans l'horloge.

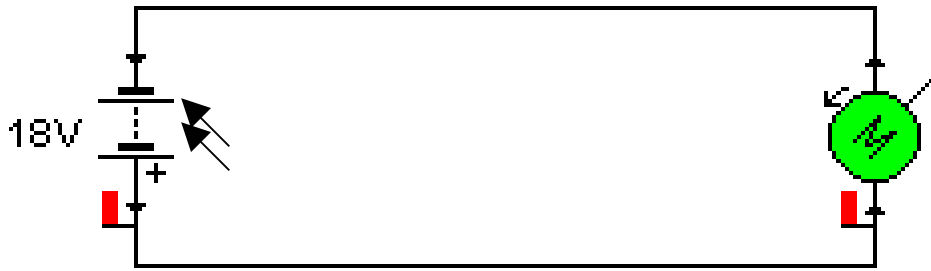


*Mécanisme d'une horloge mécanique : la pièce n°1 est le ressort moteur*

Nous essayerons de remonter le ressort par l'extérieur, ayant appris, à nos dépens, qu'il est dangereux (pour l'horloge) de démonter une horloge ...

La différence (importante ?) avec notre première étude est que le ressort est bloqué par un système de cran à l'intérieur de l'horloge.

## 1. Première étape : branchement direct

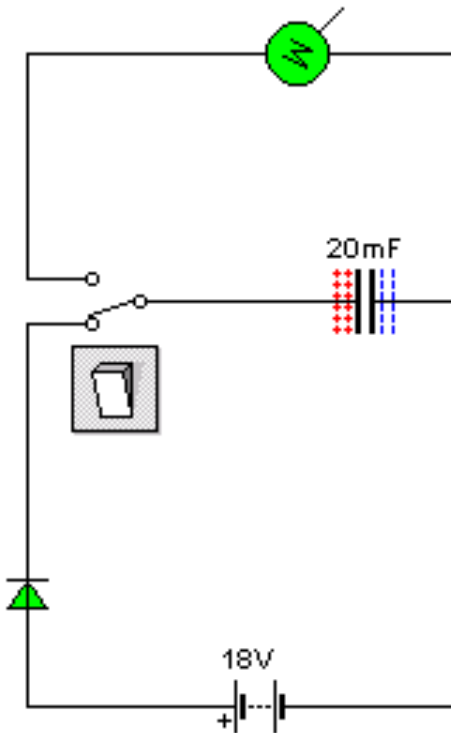


L'intensité fournie par la photopile, n'est pas suffisante pour faire tourner le moteur et enrouler le ressort.

On peut en conclure qu'une utilisation directe est à déconseiller. Surtout que l'on ne peut pas toujours attendre un éclairage optimal pendant l'utilisation de l'horloge.

Il nous faut reprendre le système avec condensateurs que nous avons testé précédemment.

## 2. Deuxième étape : avec les condensateurs et l'interrupteur manuel



Pour augmenter l'intensité fournie au moteur, on insère dans le circuit un accumulateur d'énergie : Le condensateur.

On utilise dans ce cas précis, deux condensateurs de 10.000  $\mu\text{F}$  chacun, ce qui représente une capacité deux fois supérieure (20 mF) à celle des condensateurs du modèle initial, et permettra donc sûrement de faire tourner le moteur.

Cependant, en déchargeant les condensateurs dans le moteur à vide, on s'aperçoit que l'angle de rotation de celui-ci est trop faible pour faire avancer l'engrenage de l'horloge d'un cran.

Il a donc été nécessaire de supprimer un engrenage et donc de réduire le coefficient de démultiplication des engrenages du moteur par trois.

D'autre part, il apparaît une nouvelle contrainte : à cause de l'interrupteur manuel, le système n'est pas autonome. Il faut donc chercher à remplacer ce composant.

### Mesures obtenues avec ce montage :

Après plusieurs essais, nous obtenons une rotation régulière de 7 dents d'engrenage pour une tension de 20 V pour le condensateur.

Nous allons pouvoir calculer les deux énergies intéressantes du montage :

Energie électrique stockée dans le condensateur :

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U_c^2 = 4,0 \text{ J.}$$

Energie mécanique stockée par le ressort :

Visiblement le cran qui retient le ressort a un avantage, il permet de traiter chaque avancée d'un cran séparément. Nous avons donc étudié notre ressort pour une rotation d'un cran.

Voilà le résumé de nos mesures :

- Un cran correspond à un angle de  $3^\circ$  soit  $5,2 \cdot 10^{-2}$  rad.
- Une dent de notre engrenage correspond à 2 crans dans l'horloge.
- Le couple nécessaire à la rotation d'un cran reste à peu près constant quel que soit l'état du ressort.  
Nous avons mesuré le couple avec le ressort détendu, après quelques tours mais jamais tendu au maximum (remonter un ressort tendu n'étant pas notre objectif).  
Le couple moyen pour un cran vaut donc :  $C = 8 \cdot 10^{-2}$  N.m.

- Une décharge des condensateurs amène régulièrement une rotation de notre engrenage de 7 dents.

Nous en déduisons que le coefficient  $k = C / \theta$  vaut :

$$k = 8.10^{-2} / 5,2.10^{-2} = 1,5 \text{ N.m.rad}^{-1}.$$

D'où le calcul de l'énergie mécanique stockée par le ressort  $E_R$  :

Pour 7 dents, donc 14 crans, on a  $\theta = 0,728 \text{ rad}$ .

Ce qui donne :  $E_R = \frac{1}{2}.k.\theta^2 = 0,40 \text{ J}$ .

Nous pouvons en déduire que le rendement de notre « remonteur de ressort » vaut :

$$r = E_R / E_C = 0,10 \text{ soit } 10\%.$$

Ce rendement est bien plus grand que ceux que nous avons obtenu dans notre première étude. Pour l'expliquer, nous voyons plusieurs raisons :

- Les condensateurs amènent une énergie plus « brutale ».

En effet, nous avons mesuré la tension du moteur et l'intensité qui le traverse pendant la décharge des condensateurs, et nous avons obtenus des valeurs très courtes (plusieurs ms) mais très élevée (8 ampères au début de la décharge !).

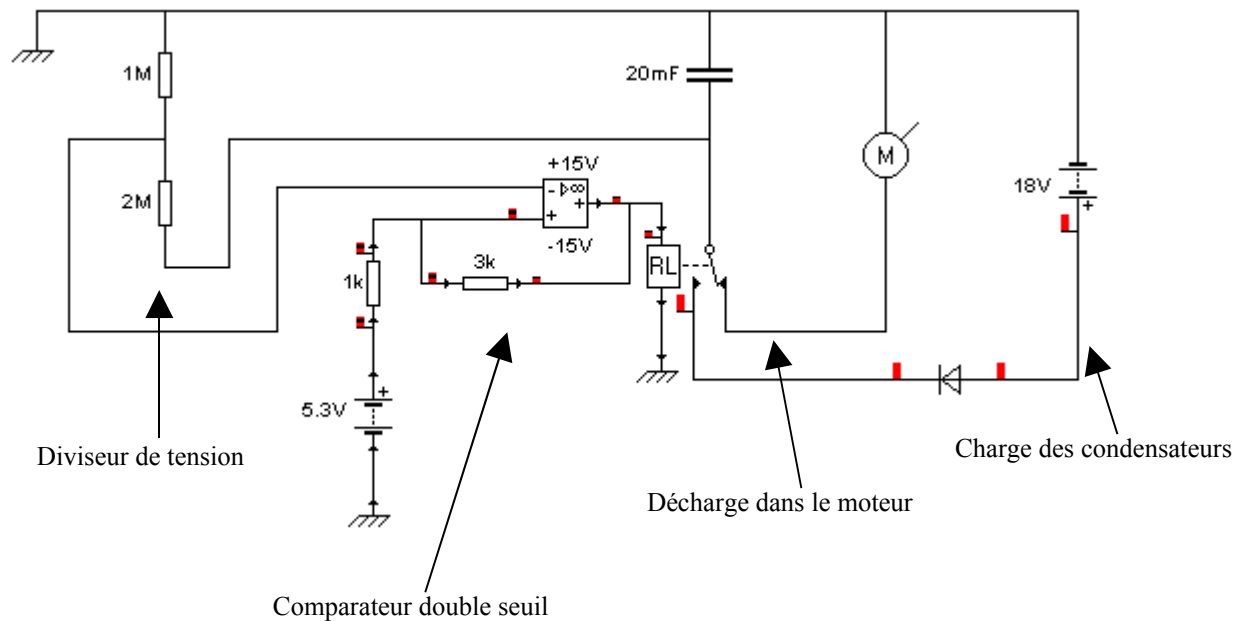
Ceci explique peut-être le fait que le ressort soit tendu plus efficacement.

- Les crans dans l'horloge ont l'avantage de retenir le ressort qui a tendance à « pousser » le moteur dans le sens inverse.

- Le ressort n'est pas le même qu'avant et les condensateurs ont été changés pour des valeurs plus grandes ...

**CONCLUSION** : ce montage fonctionne, notre moteur est capable de faire tourner le ressort moteur de l'horloge de plusieurs crans. Comme dit en début de ce montage, il a un gros inconvénient : il ne fonctionne pas tout seul !! Une « main » extérieure doit déclencher la décharge des condensateurs.

### 3. Troisième étape : avec un comparateur double seuil



Le montage avec interrupteur manuel n'est pas très pertinent dans notre objectif d'obtenir une horloge se remontant toute seule avec l'énergie solaire. Nous devons automatiser notre système. Pour cela, les condensateurs doivent pouvoir, après avoir atteint une certaine valeur, se décharger automatiquement et se recharger de la même manière quand les condensateurs sont déchargés.

Nous avons donc besoin d'un système avec une double comparaison de tension.

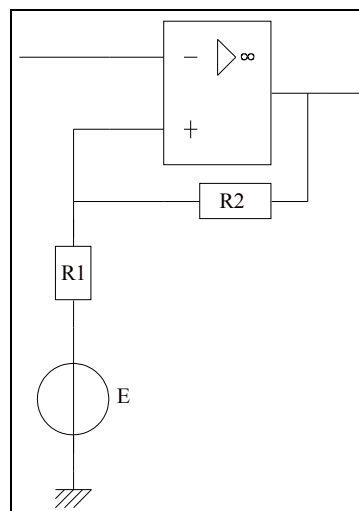
Nous avons trouvé sur Internet le montage de l'Amplificateur Opérationnel en comparateur double seuil (ou Trigger).

Nous avons décidé que les condensateurs se déchargeraient dès l'atteinte d'une tension de 18 V (valeur haute  $V_H$ ) et se rechargeraient à partir de 10 V (Valeur basse  $V_B$ ).

Problème, nous voyons que notre comparateur ne fonctionne qu'avec des valeurs de  $V_H$  et de  $V_B$  symétrique (l'une négative, l'autre positive).

Heureusement, la solution se trouve facilement mais nous devons compliquer notre montage et nos formules de calcul.

Le comparateur de base :



Les formules données sont :

$$V_H = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times E + \frac{R_1}{R_1 + R_2} \times V_{SAT}$$

$$V_B = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times E - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \times V_{SAT}$$

En fait, nous remarquons que les deux valeurs sont symétriques ( $\pm \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \times V_{SAT}\right)$ ) autour d'une valeur moyenne,  $\frac{R_2}{R_1 + R_2} \times E$ .

Dans notre choix, nous avons donc une valeur moyenne de 14 V + ou - 4 V.

Remarque : La valeur de  $V_{SAT}$  est normalement proche de la tension d'alimentation de l'AO (15 V) mais avec notre montage, nous avons observé que les valeurs sont plutôt proches de 9 V.

Formule reliant  $R_1$  et  $R_2$  :

$$\text{On a } \frac{R_1}{R_1 + R_2} \times V_{SAT} = 4 \text{ soit } R_2 = (5/4) \cdot R_1.$$

Formule donnant la valeur de E :  $\frac{R_2}{R_1 + R_2} \times E = 14$  soit  $E = (9/5) \times 14 = 25 \text{ V} \dots$

Apparemment cette valeur va peut-être nous poser un problème. Elle dépasse la tension d'alimentation de l'AO.

Pour ne pas prendre de risque, nous décidons de tester la tension des condensateurs sur une partie seulement de celle-ci.

C'est pourquoi nous avons installé un pont diviseur de tension nous permettant de ne récolter qu'un tiers de la tension totale (voir le montage).

Ce pont fabriqué avec des résistances de valeurs élevées nous permet aussi de ne pas décharger nos condensateurs dans le montage comparateur. En effet, lors de nos tests, nous avons remarqué que les condensateurs se déchargent dans le circuit ou dans le pont si les résistances sont de valeurs trop faibles.

En pratique, les résistances élevées assurent une intensité très faibles dans tous le comparateur.

On a donc maintenant  $V_H = 6 \text{ V}$  et  $V_B = 3,3 \text{ V}$  soit une valeur moyenne de  $4,6 \text{ V} \pm 1,4 \text{ V}$ .

Formule reliant  $R_1$  et  $R_2$  :

$$\text{On a } \frac{R_1}{R_1 + R_2} \times V_{SAT} = 1,4 \text{ soit } R_2 \approx 5 \times R_1.$$

Formule donnant la valeur de E :  $\frac{R_2}{R_1 + R_2} \times E = 4,6$  soit  $E = (6/5) \times 4,6 = 5,5 \text{ V}$ .

Nous choisirons donc les valeurs :  $E = 5,5 \text{ V}$   
 $R_2 = 1000 \Omega$   
 $R_1 = 200 \Omega$ .

Le choix des résistances n'a pas été si évident que ça.  
Certains couples de valeurs provoquent un mauvais fonctionnement du comparateur !  
Après de multiples essais (avec des boîtes de résistances), le couple  $200 \Omega / 1000 \Omega$  s'est avéré le meilleur.

Pour résumer, lorsque les condensateurs sont chargés à  $18 \text{ V}$ , ils se déchargent automatiquement dans le moteur grâce à la bascule du relais branché en sortie du comparateur. Puis ils recommencent à se charger à partir de  $10 \text{ V}$ , de nouveau grâce à la bascule du relais, cette fois-ci du côté "Cellule solaire".

Notre système est alors bien autonome.  
Cependant l'utilisation du comparateur nécessite deux générateurs branchés sur le secteur. Son usage est alors en totale contradiction avec le but de notre projet qui ne doit normalement pas avoir d'autre source d'énergie que l'énergie solaire !

Il faut donc trouver un moyen de supprimer ces générateurs.

#### **4. Quatrième étape : avec une commande automatique**

D'après des professeurs d'électrotechnique, il est possible d'obtenir un comparateur double seuil grâce à deux transistors couplés.

A l'écriture de ce mémoire, nous sommes encore en train de tester ce circuit et nous ne pouvons pas présenter encore de résultat.



# SOURCES

<http://fr.wikipedia.org/>

<http://fr.wikibook.org/>

*pour les articles sur les moteurs, les ressorts, l'énergie ...*

Cellules solaires, les bases de l'énergie photovoltaïque

3<sup>ème</sup> édition par A. LABOURET

Théorie d'horlogerie

de Charles-André REYMONDIN

Livre de physique de terminale S, édition Bréal

# REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier tout particulièrement :

M. Massou, qui nous a suivi et apporté une aide précieuse ; M. Dabeesing, que nous avons beaucoup sollicité pour ces travaux ; M. Tresse ; M. Thouzeau, qui nous a bien renseigné sur le plan des engrenages et du ressort plat d'horlogerie ; le généreux horloger qui nous a donné deux ressorts moteurs d'horloge mécanique ; M. Mouffak et M. Deparis, superviseurs des TPE de notre classe, qui nous ont bien encadré durant ces quelques mois, ainsi que tous les professeurs et personnes extérieures qui nous ont permis d'une manière ou d'une autre de concrétiser notre projet.