

Modélisation d'un système d'exploitation des énergies houlomotrices (Searev)

Nils MALMBERG n°196

TIPE

Année 2020-2021

Sommaire

- 1 Introduction
- 2 Mise en équations
- 3 Simulations informatiques
- 4 Prototypes et résultats expérimentaux
- 5 Conclusion
- 6 Annexes

Présentation générale du Searev

Système Électrique Autonome de Récupération de l'Energie des Vagues



Figure – 1.1



Figure – 1.2

Présentation générale du Searev

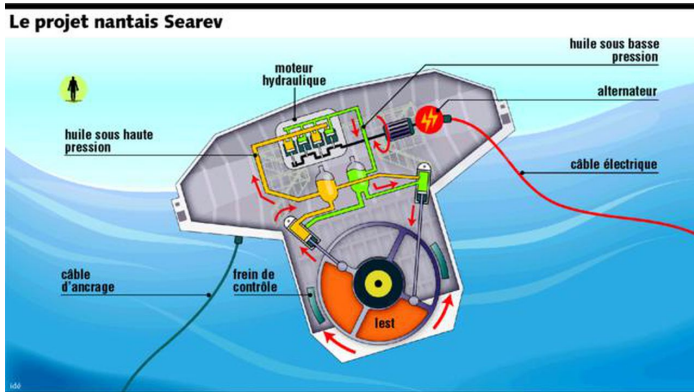


Figure – 1.3

Motivations et ancrage au thème

- Problèmes énergétiques
→ actualité
- Projet français
- Intérêt pour le maritime
- Environnement et Énergie
- Énergie renouvelable
- Conversion : énergie houle
→ énergie électrique

Problématique

Peut-on quantifier de manière simple la puissance générée par le Searev et en faire un prototype afin d'en observer le comportement ?

Objectifs

1. Faire un prototype instrumenté du Searev
2. Mesurer la puissance récupérée par ce prototype
3. Faire une modélisation numérique du Searev grâce à une mise en équation
4. Dédire de la modélisation la puissance électrique (théorique) générée par le Searev

Schématisation

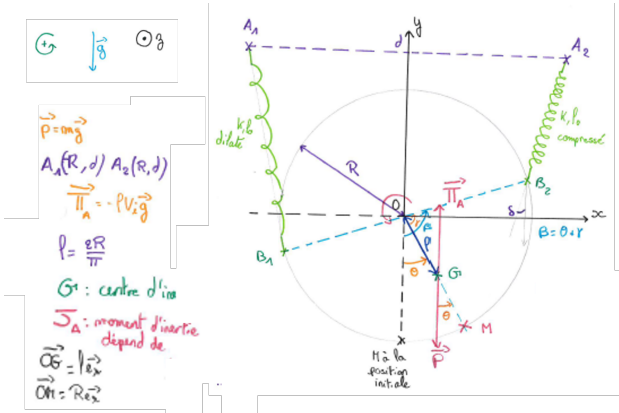


Figure – 2.1

Mise en équation

Utilisation du théorème de la puissance mécanique :

$$\frac{dE_m}{dt} = \mathcal{P} \left(\sum \vec{F}_{NC} \right)$$

$$\Leftrightarrow \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} J_{\Delta} \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} k (x_1 - \ell_0)^2 + \frac{1}{2} k (x_2 - \ell_0)^2 - mg\ell \cos \theta \right) = \mathcal{P} \left(-\alpha \ell \dot{\theta} \right)$$

En posant :

$$\omega_0^2 = \frac{1}{J_{\Delta}} \left(mg + 2k \frac{(X' - \ell_0)}{X'} \left[aR - \frac{d^2 R^2}{X'^2} + \frac{d^2 R^2}{X'(X' - \ell_0)} \right] \right) \text{ et } Q = \frac{J_{\Delta}}{\ell^2 \alpha} \omega_0$$

On a donc :

$$\ddot{\theta} + \frac{\omega_0}{Q} \dot{\theta} + \omega_0^2 \theta = \omega_0^2 h(t) \quad (*)$$

Résolution

- On modélise la houle par : $h(t) = A_v \cos(\omega_v t)$ (Figure - 3.2)
- Forme de la solution : $\theta(t) = A \cos(\omega t) + B \sin(\omega t)$
- on injecte θ , $\dot{\theta}$, $\ddot{\theta}$ dans (*)
- On en déduit les constantes

Posons $u = \frac{\omega_v}{\omega_0}$:

$$\begin{cases} A &= A_v \frac{1-u^2}{(1-u^2)^2 + \left(\frac{u}{Q}\right)^2} \\ B &= A_v \frac{u/Q}{(1-u^2)^2 + \left(\frac{u}{Q}\right)^2} \end{cases}$$

Modélisation simple de la houle - échelle de Beaufort

| Force | Terme | Vitesse du vent V en km/h | Amplitude des vagues S_{max} en m |
|-------|-------------------|------------------------------|--|
| 0 | Calme | < 1 | 0 |
| 1 | Très légère brise | 1 - 5 | 0 - 0,5 |
| 2 | Légère brise | 6 - 11 | 0,2 - 0,5 |
| 3 | Petite brise | 12 - 19 | 0,5 - 1 |
| 4 | Jolie brise | 20 - 28 | 1 - 2 |
| 5 | Bonne brise | 29 - 38 | 2 - 3 |
| 6 | Vent frais | 39 - 49 | 3 - 4 |
| 7 | Grand frais | 50 - 61 | 4 - 5,5 |
| 8 | Coup de vent | 62 - 74 | 5,5 - 7,5 |
| 9 | Fort coup de vent | 75 - 88 | 7 - 10 |
| 10 | Tempête | 89 - 102 | 9 - 12,5 |
| 11 | Violente tempête | 103 - 117 | 11,5 - 16 |
| 12 | Ouragan | >118 | >14 |

$$S_{max} = 11,25 \left(\frac{2\pi\omega_v V}{g} \right)^{-2,5}$$

On en déduit la pulsation ω_v
 => Plus d'inconnues

Figure – 3.1

Tracé de la solution

θ et ω en fonction du temps (en s)

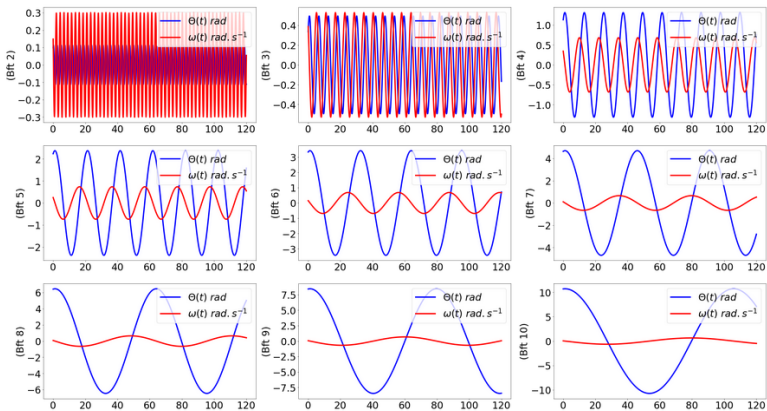


Figure – 3.3

Puissance générée par la Searev en kW

Puissance produite en kW en fonction du temps (en s)

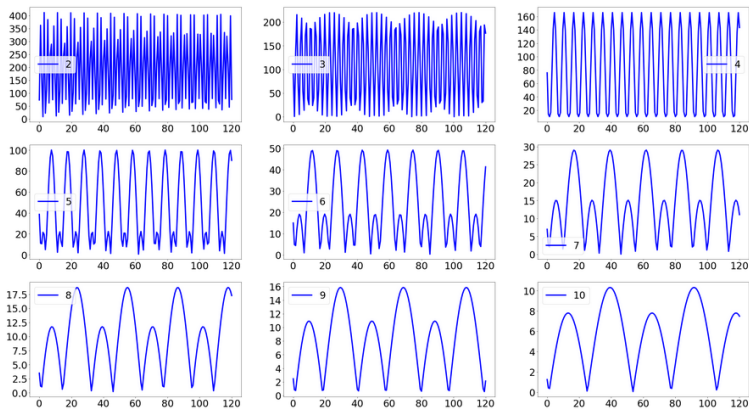


Figure – 3.4

Comparaison avec le "vrai" Searev



CANDHIS : 04403 – Plateau du Four

► H_{m0} fonction de T_p

Couples (période (s), amplitude (m))
 les plus fréquents :
 (3,1) ; (4,1) ; (8,1) ; (9,1) ; (10,1)

=> Beaufort : 2, 3 & 4

Production moyenne Searev : 500 kW

=> Proche de la modélisation

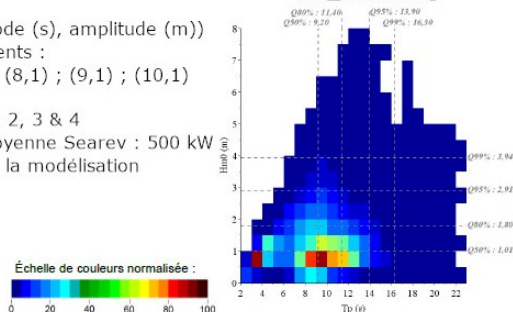


Figure – 3.5

Prototype n°1

Prototype n°1

Pb: conversion mvt
translation / rotation

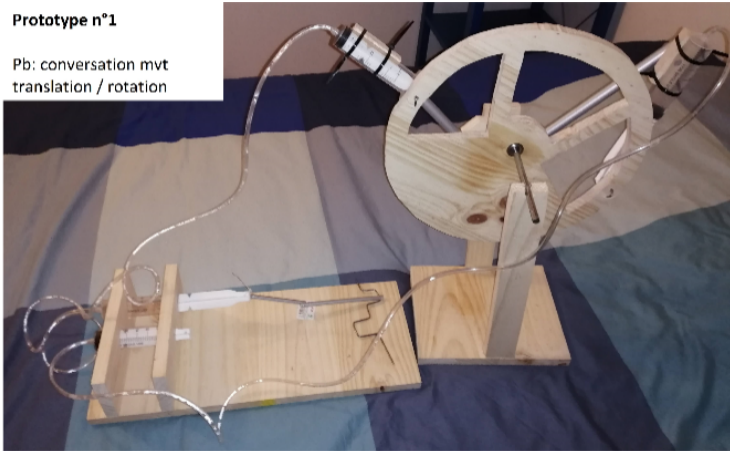
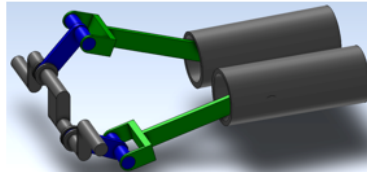
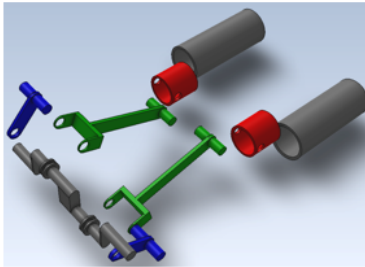


Figure – 4.1

Prototype n°1



Fait sur SolidWorks

Figure – 4.2

Prototype n°2



Figure – 4.3

Comment effectuer les mesures ?

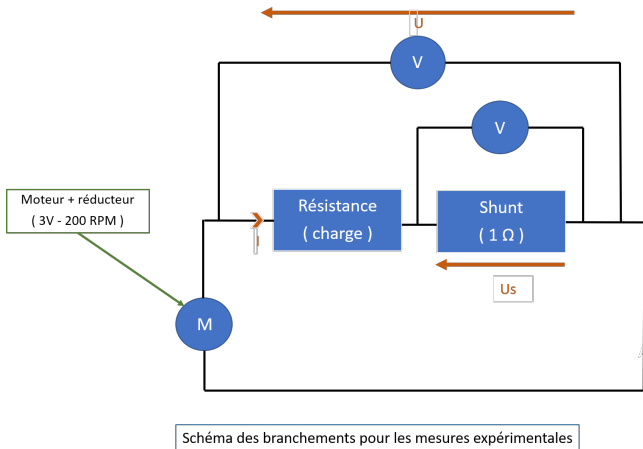


Figure – 4.4

Mesures expérimentales

| P max | U | I |
|---------|--------|--------|
| 73,5 mW | 1,47 V | 0,05 A |

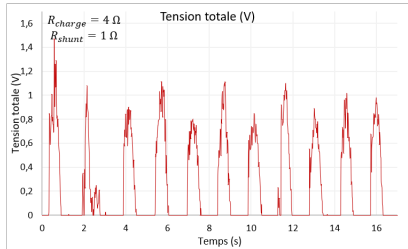
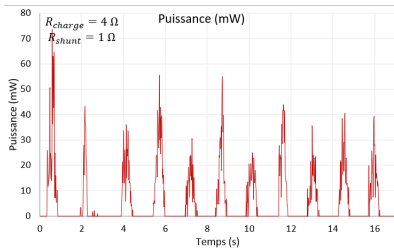


Figure – 4.5

Annexe 4 : autres mesures

Conclusions et améliorations possibles

Conclusions

- Production max : 400 kW
"vrai" Searev : 500 kW
- Conversion maximale pour des houles faibles
- Prototype fonctionnel (60-70 mW)
- (Rendement annexe 3)

Améliorations

- Modélisation :
accumulateurs haute pression...
- Houle : sinusoïdale ?
plan ? unidirectionnelle ?
- Matériel plus proche du
"vrai" Searev. Précisions
mesures

Questions

Merci

Annexe 1 - Légendes des figures

Figure 1.1 - Le Searev au SIREME : Salon International des Energies Renouvelables et de la Maîtrise de l'Energie

http://s183249133.onlinehome.fr/site-eiffel_2011/eiffel-2008/2008-11_18-au-20_salon-sireme_ge.html

Figure 1.2 - Alain Clément, chef du projet Searev à l'École Centrale de Nantes

<https://www.meretmarine.com/fr/content/une-plateforme-dessais-en-mer-pour-la-production-delectricite-p>

Figure 1.3 - Le mécanisme

<https://www.lesechos.fr/2008/10/lenergie-marine-testee-grandeur-nature-499557>

Annexe 1 - Légendes des figures

Figure 2.1 - Schématisation simplifiée du système. C'est la modélisation retenue.

Figure 3.1 - Vitesse houle : $V_v = \frac{g}{\omega_v}$

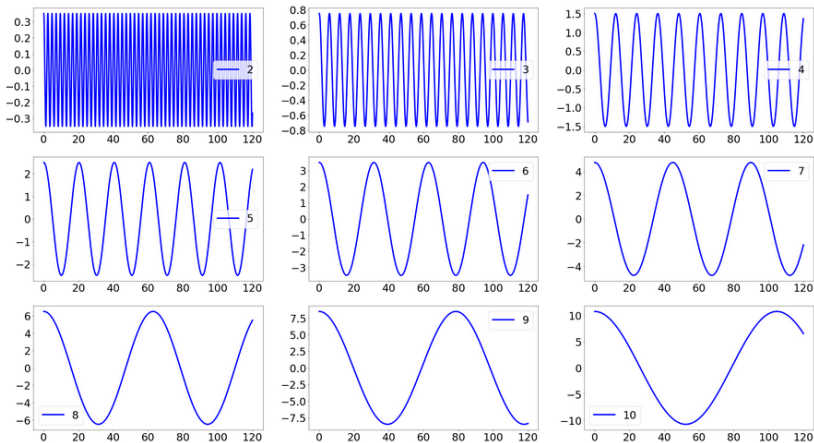
https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89chelle_de_Beaufort

http://wikhydro.developpement-durable.gouv.fr/index.php/Houle_al%C3%A9atoire

Figure 3.2 - Courbe Python d'un point matériel en fonction du temps pour des échelles de Beaufort différentes.

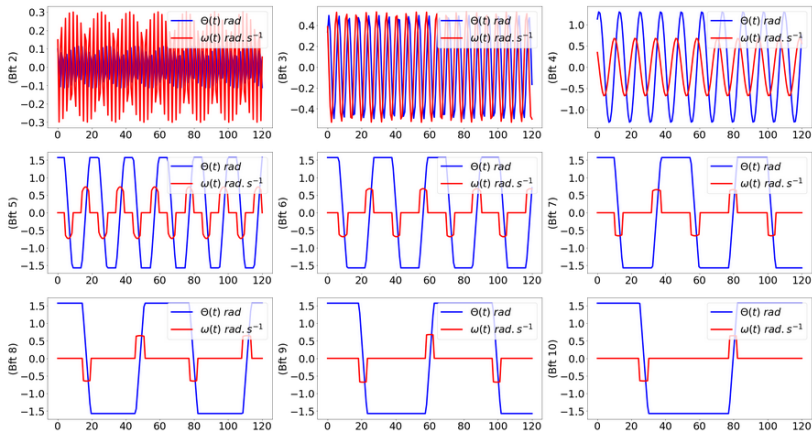
Annexe 1 - Légendes des figures

Position d'un point matériel sur la vague (en m) en fonction du temps (en s)



Annexe 1 - Légendes des figures

Figure 3.3 - θ et ω en fonction du temps. (θ restreint entre $[-\frac{\pi}{2}; +\frac{\pi}{2}]$)



Annexe 1 - Légendes des figures

Figure 3.4 - Courbe Python de la puissance générée par le Searev

en kW. Pour cela : PFD :
$$\left\{ \begin{matrix} \vec{F}_{ext \rightarrow S} \\ C\vec{Z} \end{matrix} \right\}_{O \in \Delta} = \left\{ \begin{matrix} m\vec{\Gamma}_{G \in S/R_g} \\ J_{\Delta} \ddot{\theta} \vec{Z} \end{matrix} \right\}_{O \in \Delta}$$

TMD $\Rightarrow C = J_{\Delta} \ddot{\theta}$ et donc $P = C\dot{\theta} = J_{\Delta} \dot{\theta} \ddot{\theta}$ (comoment torseurs cinématique et actions mécaniques) et

$$\ddot{\theta} = \omega_0^2 A_v \cos(\omega_v t) - \frac{\omega_0}{Q} \dot{\theta} - \omega_0^2 \theta$$

Figure 3.5 -Centre d'Archivage National de Données de Houle In Situ / Centre d'Etudes sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement

<http://candhis.cetmef.developpement-durable.gouv.fr/campagne/?idcampagne=7647966b7343c29048673252e490f736>

Annexe 1 - Légendes des figures

Figure 4.1 - Prototype 1 : ne fonctionne pas car difficile de régler le système bielle-manivelle. Tout doit être parfaitement aligner.

Figure 4.2 - Système que je voulais mettre en place.

Figure 4.3 - Prototype 2 : roue libre et chaîne.

Figure 4.4 - Matériel : câbles, breadboard, Arduino et Pyzo, résistances, galvanomètre et un ordinateur avec le logiciel Arduino. Le shunt permet de mesurer plus précisément I (A) grâce à la loi d'Ohm.

Figure 4.5 - Puissance et tension pour $R_{charge} = 4$ et $R_{shunt} = 1$.

Annexe 2 - Mise en équation et résolution

- Système : roue, solide indéformable, reliée à des ressorts 1 et 2
- Référentiel : supposé galiléen
- Quelques paramètres : $\vec{OM} = R\vec{e}_r$; $\vec{OG} = \ell\vec{e}_r$; $\vec{v}_G = \ell\dot{\theta}\vec{e}_\theta$;
 $\vec{a}_G = \ell\ddot{\theta}\vec{e}_\theta - \ell\dot{\theta}^2\vec{e}_r$; $\ell = \frac{2R}{\pi}$; $A_1(-a, d)$; $B_1(-R\cos\theta, R\sin\theta)$;
 $A_2(+a, d)$; $B_2(R\cos\theta, -R\sin\theta)$;
 $x_1 = \|\vec{A_1B_1}\| = \sqrt{R^2 - 2aR\cos\theta + a^2 - 2dR\sin\theta + d^2}$;
 $x_2 = \|\vec{A_2B_2}\| = \sqrt{R^2 - 2aR\cos\theta + a^2 + 2dR\sin\theta + d^2}$;

Posons : $X = R^2 + a^2 + d^2$ et $X'^2 = X - 2aR$

Ainsi,

$$x_1 \underset{\theta \rightarrow 0}{=} X' \left(1 + \frac{-2dR\theta + aR\theta^2}{2X'^2} - \frac{d^2R^2\theta^2}{2X'^4} \right) + o(\theta^2)$$

$$x_2 \underset{\theta \rightarrow 0}{=} X' \left(1 + \frac{2dR\theta + aR\theta^2}{2X'^2} - \frac{d^2R^2\theta^2}{2X'^4} \right) + o(\theta^2)$$

Annexe 2 - Mise en équation et résolution

- Forces : le poids : $\vec{p} = m\vec{g} = mg(\cos\theta\vec{e}_r - \sin\theta\vec{e}_\theta)$ en G ; force de frottement : $\vec{F}_f = -\alpha\ell\dot{\theta}\vec{e}_\theta$ en G ; force de rappel élastique : \vec{F}_{el1} et \vec{F}_{el2}

- Energies : $E_c = \frac{1}{2}J_\Delta\dot{\theta}^2$

$$E_{pp} = -mg\ell\cos\theta \underset{\theta \rightarrow 0}{=} -mg\ell\left(1 - \frac{\theta^2}{2}\right) + o(\theta^2)$$

$$E_{pel1} = \frac{1}{2}k(x_1 - \ell_0)^2$$

$$\underset{\theta \rightarrow 0}{=} \frac{1}{2}k(X' - \ell_0)^2 \left(1 + \frac{1}{X'(X' - \ell_0)} \left[-2dR\theta + aR\theta^2 - \frac{d^2R^2\theta^2}{X'^2} + \frac{d^2R^2\theta^2}{X'(X' - \ell_0)}\right]\right) + o(\theta^2)$$

$$E_{pel2} = \frac{1}{2}k(x_2 - \ell_0)^2$$

$$\underset{\theta \rightarrow 0}{=} \frac{1}{2}k(X' - \ell_0)^2 \left(1 + \frac{1}{X'(X' - \ell_0)} \left[2dR\theta + aR\theta^2 - \frac{d^2R^2\theta^2}{X'^2} + \frac{d^2R^2\theta^2}{X'(X' - \ell_0)}\right]\right) + o(\theta^2)$$

Annexe 2 - Mise en équation et résolution

$$\frac{dE_m}{dt} = \mathcal{P} \left(\sum \vec{F}_{NC} \right) \Leftrightarrow \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} J_{\Delta} \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} k(x_1 - \ell_0)^2 + \frac{1}{2} k(x_2 - \ell_0)^2 - mg\ell \cos \theta \right) = \mathcal{P} \left(-\alpha \ell \dot{\theta} \right)$$

$$\text{Or } \mathcal{P} \left(-\alpha \ell \dot{\theta} \right) = \mathcal{M}_{\Delta}(\vec{F}_f) \dot{\theta} = - \left\| \vec{F}_f \right\| \ell \dot{\theta} = -\ell^2 \alpha \dot{\theta}^2$$

($J_{\Delta} = \sum_i m_i r_i^2$, avec r_i la distance du point d'indice i jusqu'à l'axe de rotation Δ)

$$\Leftrightarrow J_{\Delta} \dot{\theta} \ddot{\theta} + mg\theta \dot{\theta} + k \frac{(X' - \ell_0)}{2X'} \left(4aR\theta \dot{\theta} - \frac{4d^2 R^2 \theta \dot{\theta}}{X'^2} + \frac{4d^2 R^2 \theta \dot{\theta}}{X'(X' - \ell_0)} \right) = -\ell^2 \alpha \dot{\theta}^2$$

$$\Leftrightarrow \ddot{\theta} + \frac{\ell^2 \alpha}{J_{\Delta}} \dot{\theta} + \frac{1}{J_{\Delta}} \left(mg + 2k \frac{(X' - \ell_0)}{X'} \left[aR - \frac{d^2 R^2}{X'^2} + \frac{d^2 R^2}{X'(X' - \ell_0)} \right] \right) \theta = 0 \quad (3)$$

En posant :

$$\omega_0^2 = \frac{1}{J_{\Delta}} \left(mg + 2k \frac{(X' - \ell_0)}{X'} \left[aR - \frac{d^2 R^2}{X'^2} + \frac{d^2 R^2}{X'(X' - \ell_0)} \right] \right) \quad \text{et} \quad Q = \frac{J_{\Delta}}{\ell^2 \alpha} \omega_0$$

On a donc :

$$(3) \Leftrightarrow \ddot{\theta} + \frac{\omega_0}{Q} \dot{\theta} + \omega_0^2 \theta = 0 \quad (*)$$

Annexe 2 - Mise en équation et résolution

La houle, de la forme $h(t) = A_v \cos(\omega_v t)$, force l'oscillation.

On a donc une équation différentielle du second ordre à coefficients constants (et second membre sinusoïdal) :

$$\ddot{\theta} + \frac{\omega_0}{Q} \dot{\theta} + \omega_0^2 \theta = \omega_0^2 h(t)$$

```
alpha = 4*(10**6) # coefficient de frottement
m = 272*(10**3) # masse en kg
g = 9.81 # accélération de pesanteur en m.s**-2
k = 1000 # constante de raideur de la seringue en N.m**-1
a = 10 # distance entre ... en m
R = 9 # rayon de la roue en m
d = 7 # distance entre ... en m
l = 1.35 # distance entre Delta et le centre d'inertie en m
Jdelta = m*(l**2) # somme(masses à différents points * distance entre ce point et le centre d'inertie**2) en kg.m**2
Xprime = np.sqrt(R**2 + a**2 + d**2 - 2*a*R) # en m
l0 = 3.23 # longueur à vide des ressorts en m
```

On a : $Q = 0.219$ et $\omega_0 = 3.183 \text{ rad.s}^{-1}$

$\theta(t) = A \cos(\omega t) + B \sin(\omega t)$ car $t > \tau$ $\dot{\theta}(t) = -A\omega \sin(\omega t) + B\omega \cos(\omega t)$

$\ddot{\theta}(t) = -A\omega^2 \cos(\omega t) - B\omega^2 \sin(\omega t)$ Ainsi

$$\cos(\omega t) \left(A(\omega_0^2 - \omega^2) + B \frac{\omega \omega_0}{Q} \right) + \sin(\omega t) \left(B(\omega_0^2 - \omega^2) - A \frac{\omega \omega_0}{Q} \right) = \omega_0^2 A_v \cos(\omega_v t)$$

Annexe 2 - Mise en équation et résolution

En supposant que $\omega = \omega_v$

$$\begin{cases} A(\omega_0^2 - \omega^2) + B\frac{\omega\omega_0}{Q} &= \omega_0^2 A_v \\ B(\omega_0^2 - \omega^2) - A\frac{\omega\omega_0}{Q} &= 0 \end{cases}$$

Ainsi en posant $u = \frac{\omega}{\omega_0}$:

$$\begin{cases} A &= A_v \frac{1-u^2}{(1-u^2)^2 + \left(\frac{u}{Q}\right)^2} \\ B &= A_v \frac{u/Q}{(1-u^2)^2 + \left(\frac{u}{Q}\right)^2} \end{cases}$$

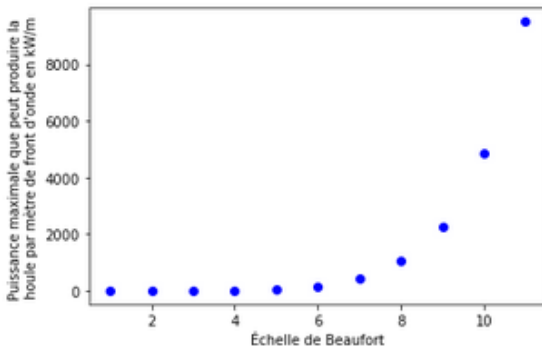
Nous pouvons aussi écrire $\theta(t)$ sous la forme $A' \cos(\omega t + \varphi)$ en posant :

$$\begin{cases} A' &= \sqrt{A^2 + B^2} &= \frac{A_v}{\sqrt{(1-u^2)^2 + \left(\frac{u}{Q}\right)^2}} \\ \tan(\varphi) &= -\frac{B}{A} &= \frac{u}{Q(u^2-1)} \end{cases}$$

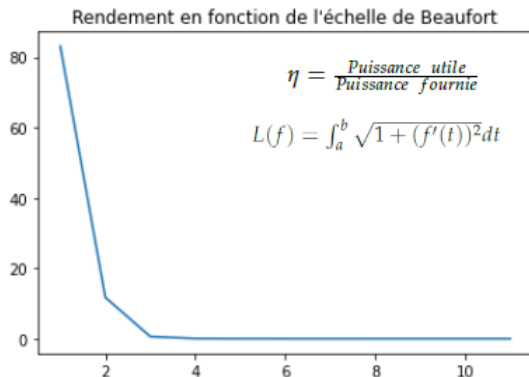
Annexe 3 - Puissance transportée par mètre de front d'onde

$$P \approx \frac{1}{2} \times \frac{\rho g^2}{32\pi} TH_{1/3}^2$$

Formule : PDF : Design Methodology for a SEAREV Wave Energy Converter

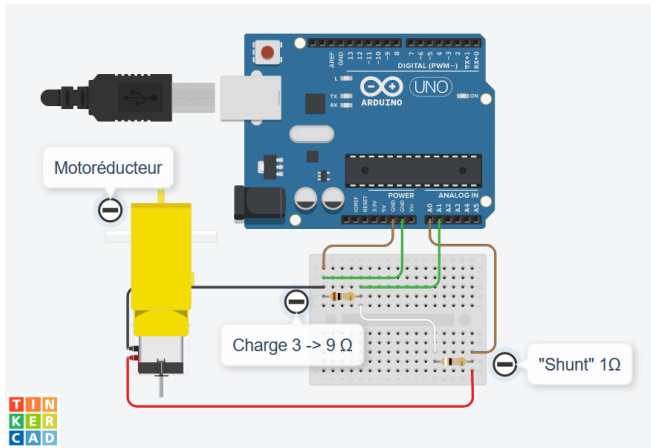


Annexe 3 - Rendement



Problème : rendements > 1

Annexe 4 - Mesures expérimentales



Fait sur : <https://www.tinkercad.com/>

Annexe 4 - Mesures expérimentales : Arduino

```
// initialisation des variables stockant les données des ports A0 et A1 + le temps

int sensor1 = A0;
int sensor2 = A1;
float MS;

// on donne une légende aux variables

String datalabel1 = "Tension1(V)";
String datalabel2 = "Tension2(V)";
String datalabel3 = "Temps(s)";
bool label = true; //

int datal, data2;

int freq = 1000; // enregistre les valeurs toutes les millisecondes

void setup(){
  Serial.begin(9600);
  pinMode(sensor1, INPUT);
  pinMode(sensor2, INPUT);
}

void loop(){

  MS = millis();

  // en dessous affiche les en-têtes des colonnes du moniteur série
  while(label){
    Serial.print(datalabel3);
    Serial.print(",");
    Serial.print(datalabel1);
    Serial.print(",");
    Serial.print(datalabel2);
    Serial.println();
    label = false;
  }

  // datal et 2 lisent les valeurs de sensor1 et 2
  datal = analogRead(sensor1);
  data2 = analogRead(sensor2);

  Serial.print(MS*0.001); // MS en milliseconde => conversion en seconde
  Serial.print(",");
  //datal et 2 entre 0 et 1023.0 tq 0 ~ 0V et 1023.0 ~ 5V
  Serial.print(datal*5.0 / 1023.0);
  Serial.print(",");
  Serial.println(data2*5.0 / 1023.0);

}
```

Inspiré de : <https://www.learnrobotics.org/blog/arduino-data-logger-csv/>

Annexe 4 - Mesures expérimentales : Python

Code python mesures.py

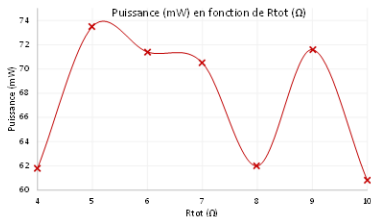
```
01| # Module utile
02|
03| import serial
04|
05| # Préparatifs
06|
07| arduino_port = "COM3" # port USB
08| baud = 9600 # nombre d'informations transmis par seconde
09| fileName = "C:/Users/nilsm/Documents/CPGE/PSIET/TIPE/Mesures_prototype/Données en
txt/R4 S1.txt" # emplacement et nom du fichier .txt à créer
10| sample = 1000 # nombre de mesures à prendre
11| print_labels = False
12|
13| # Connection à l'arduino
14|
15| ser = serial.Serial(arduino_port, baud)
16| print("Connected to Arduino port:" + arduino_port)
17|
18| # Création du fichier .txt
19|
20| file = open(fileName, "a")
21| print("Created file")
22|
23| line = 0 # On initialise le numéro de la ligne
24|
```

```
24|
25| # Collection des données
26|
27| while line <= sample:
28|     if print_labels:
29|         if line == 0:
30|             print("Printing Column Headers") # Affiche les en-têtes des colonnes
31|         else:
32|             print("Line " + str(line) + ": writing...")
33|         getData = str(ser.readline()) # collecte les valeurs
34|         Data = getData[2:]:-5] # nouveau tableau sans les caractères inutiles
35|         print(Data) # affiche les valeurs collectées
36|
37| # Ecriture sur le .txt
38|
39| file = open(fileName, "a") # ouvre le fichier .txt
40|
41| file.write(Data + "\n") # écrit les valeurs \n pour retour à la ligne
42| line += 1 # on incrémente de 1 la ligne
43|
44| print("Data collection complete!")
45|
46| file.close() # fermeture du .txt
```

Inspiré de : <https://www.learnrobotics.org/blog/arduino-data-logger-csv/>

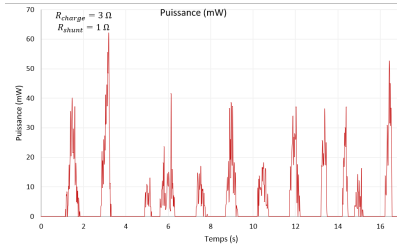
Annexe 4 - Mesures expérimentales : courbes

| Rtotal | Rcharge | Rshunt | U (V) | I (A) | P (mW) |
|--------|---------|--------|-------|-------|--------|
| 4 | 3 | 1 | 1,03 | 0,06 | 61,8 |
| 5 | 4 | 1 | 1,47 | 0,05 | 73,5 |
| 6 | 5 | 1 | 1,19 | 0,06 | 71,4 |
| 7 | 6 | 1 | 1,41 | 0,05 | 70,5 |
| 8 | 7 | 1 | 1,24 | 0,05 | 62 |
| 9 | 8 | 1 | 1,79 | 0,04 | 71,6 |
| 10 | 9 | 1 | 1,52 | 0,04 | 60,8 |

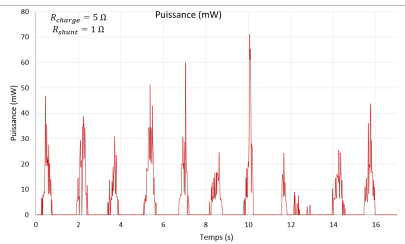


Annexe 4 - Mesures expérimentales : courbes

Puissance (mW) en fonction du temps (s)



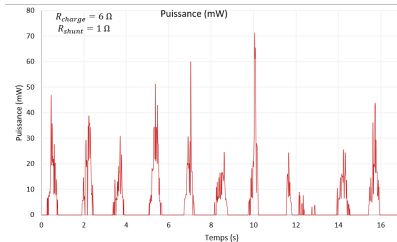
$$R_{charge} = 3\ \Omega$$
$$R_{shunt} = 1\ \Omega$$



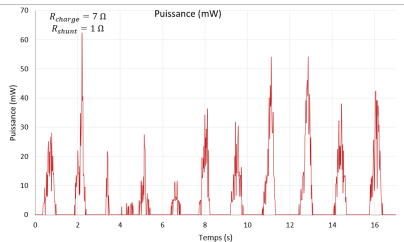
$$R_{charge} = 5\ \Omega$$
$$R_{shunt} = 1\ \Omega$$

Annexe 4 - Mesures expérimentales : courbes

Puissance (mW) en fonction du temps (s)



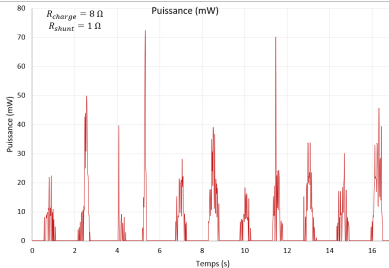
$$R_{charge} = 6\ \Omega$$
$$R_{shunt} = 1\ \Omega$$



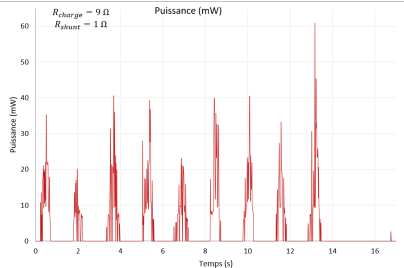
$$R_{charge} = 7\ \Omega$$
$$R_{shunt} = 1\ \Omega$$

Annexe 4 - Mesures expérimentales : courbes

Puissance (mW) en fonction du temps (s)



$$R_{charge} = 8 \Omega$$
$$R_{shunt} = 1 \Omega$$



$$R_{charge} = 9 \Omega$$
$$R_{shunt} = 1 \Omega$$