

# 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

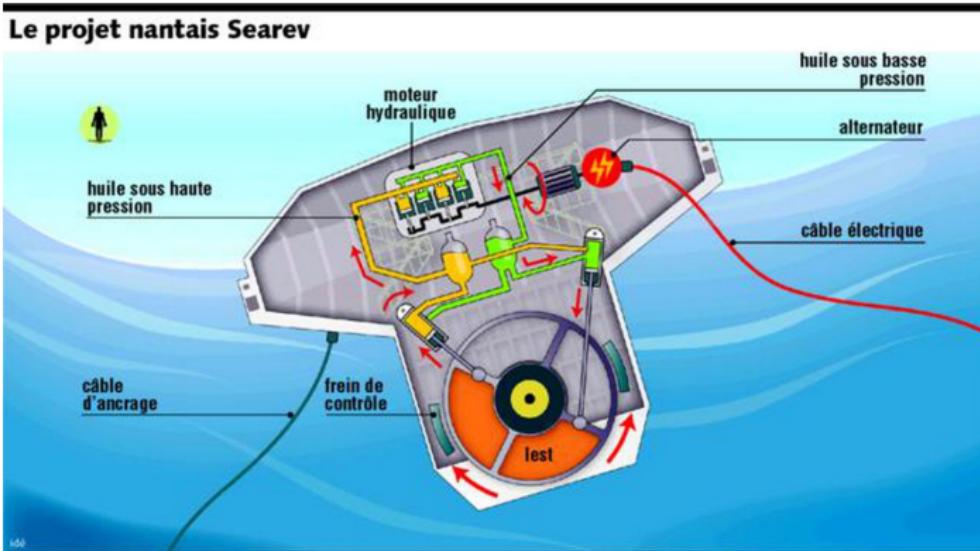


Figure – 1.3

## 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. Déduire de la modélisation la puissance électrique (théorique) générée par le Searev

# Schématisation

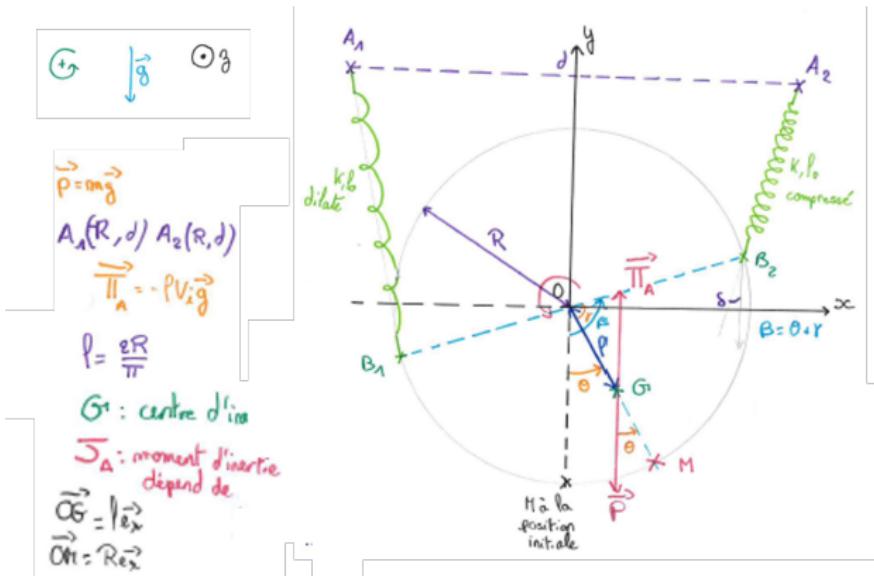


Figure – 2.1

## 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  $\theta$ ,  $\dot{\theta}$ ,  $\ddot{\theta}$  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  $\omega_v$   
 => Plus d'inconnues

Figure – 3.1

# Tracé de la solution

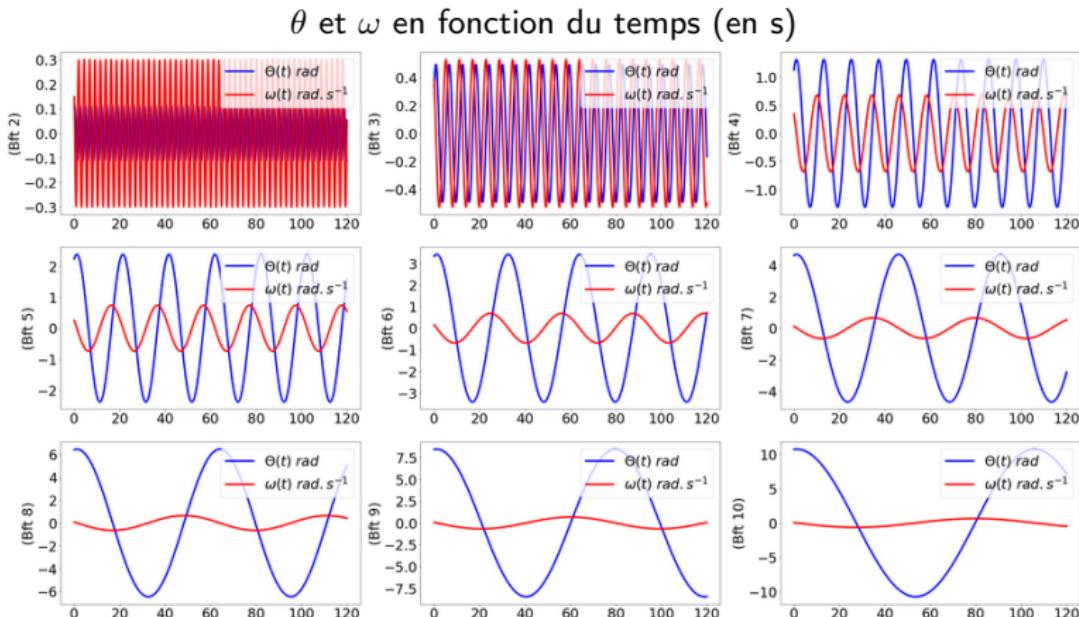


Figure – 3.3

# Puissance générée par la Searev en kW

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

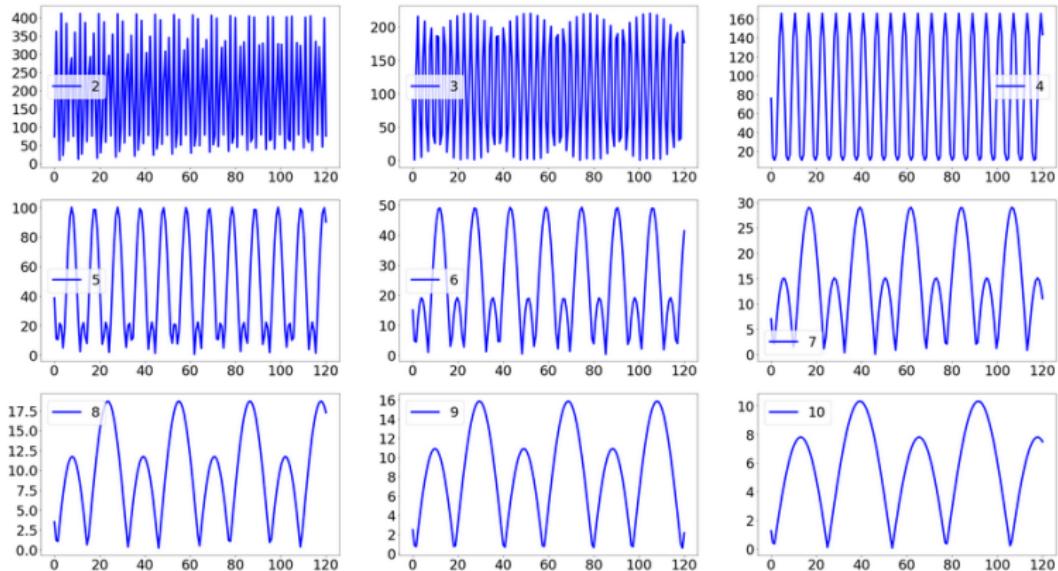


Figure – 3.4

## 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

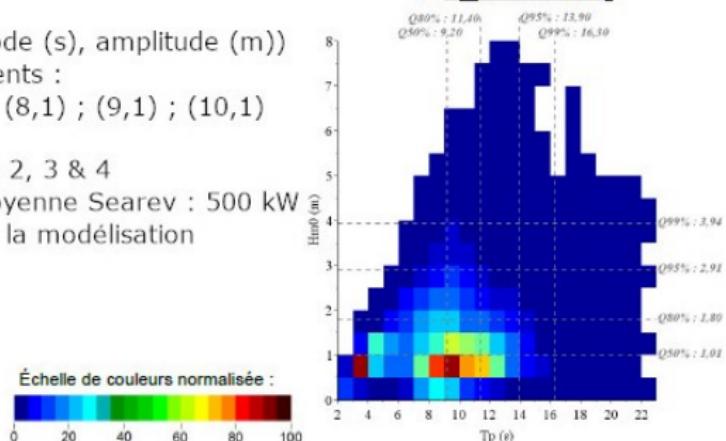


Figure – 3.5

# Prototype n°1

Prototype n°1

Pb: conversation mvt  
translation / rotation

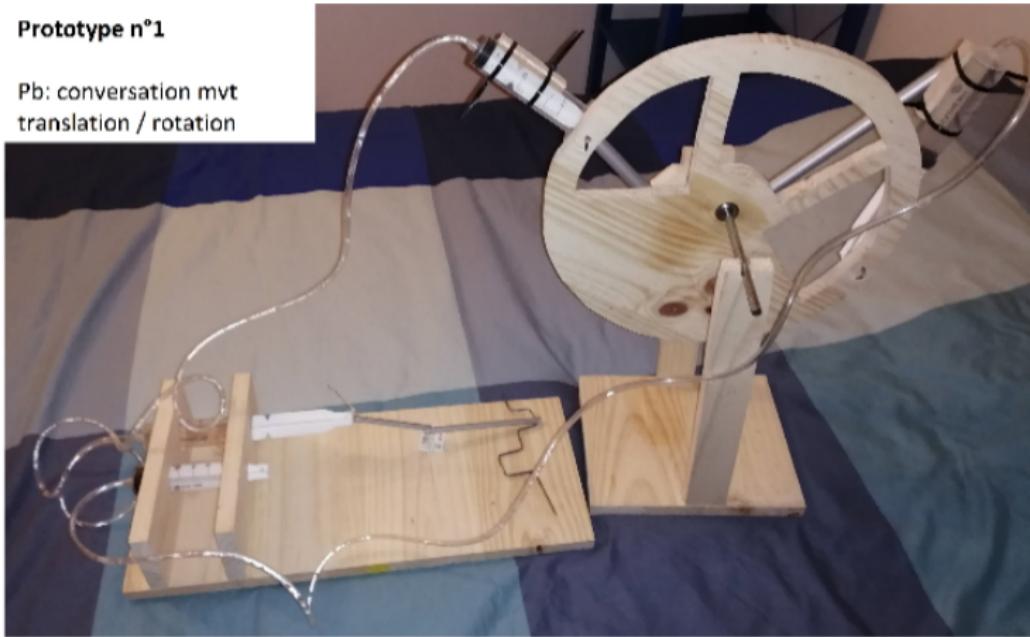
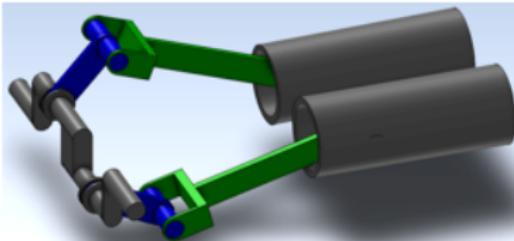
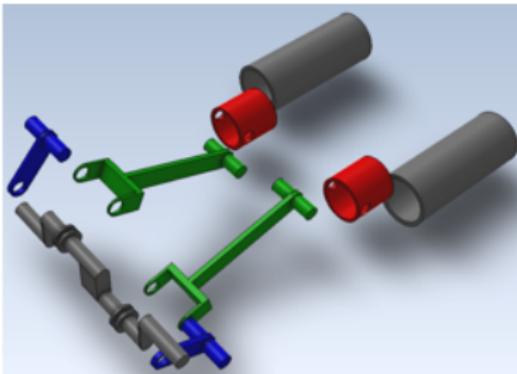


Figure – 4.1

## Prototype n°1



Fait sur SolidWorks

Figure – 4.2

## Prototype n°2



Figure – 4.3

## Comment effectuer les mesures ?

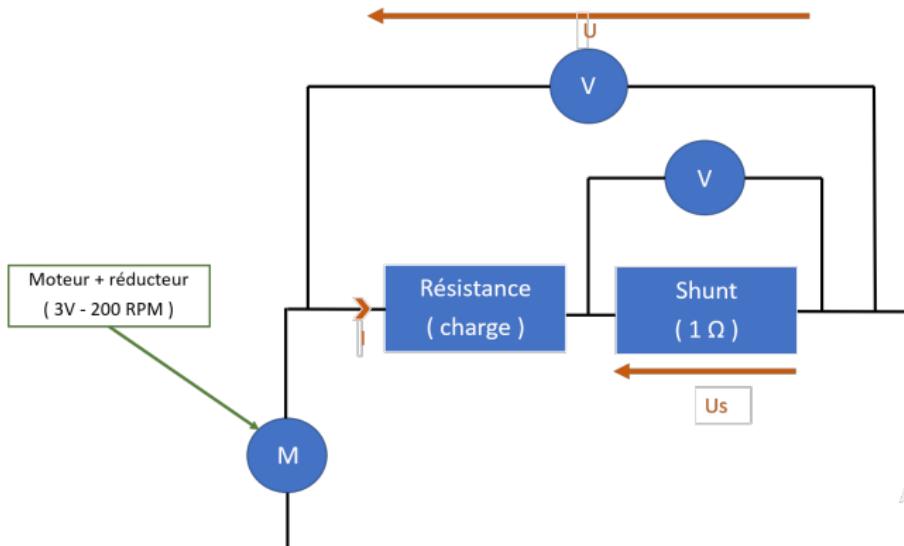


Schéma des branchements pour les mesures expérimentales

Figure – 4.4

# Mesures expérimentales

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

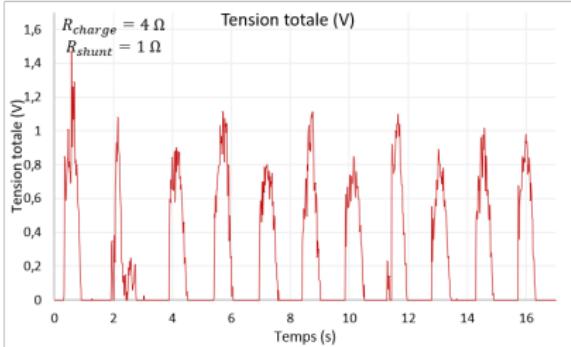
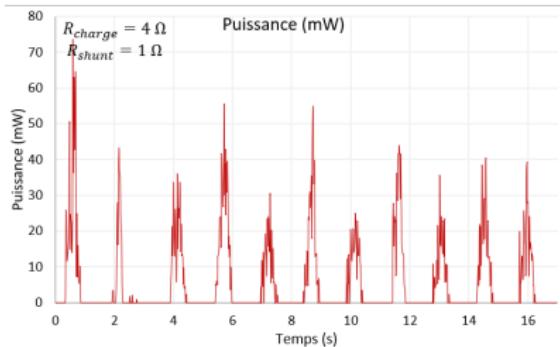


Figure – 4.5

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](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 :  $V_v = \frac{g}{\omega_v}$

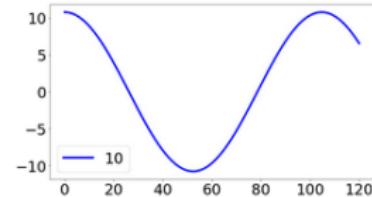
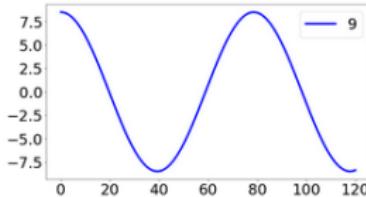
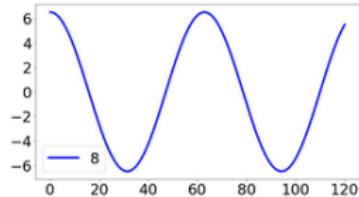
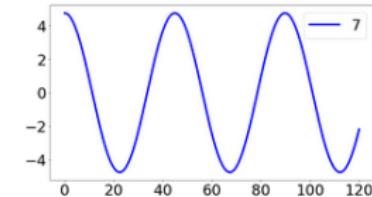
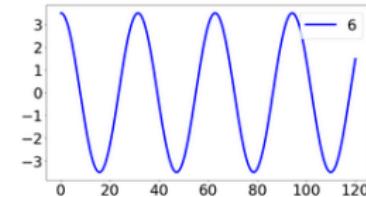
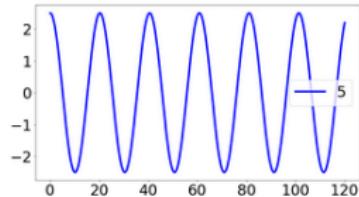
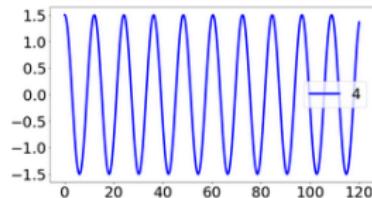
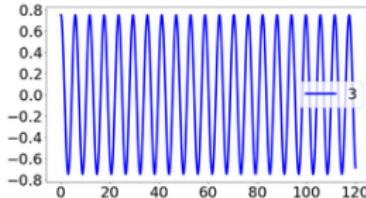
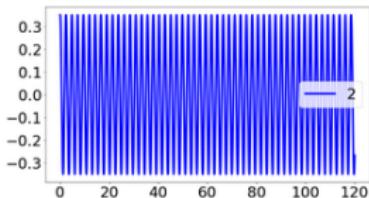
[https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89chelle\\_de\\_Beaufort](https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89chelle_de_Beaufort)

[http://wikhydro.developpement-durable.gouv.fr/index.php/Houle\\_a\\_l%C3%A9atoire](http://wikhydro.developpement-durable.gouv.fr/index.php/Houle_a_l%C3%A9atoire)

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

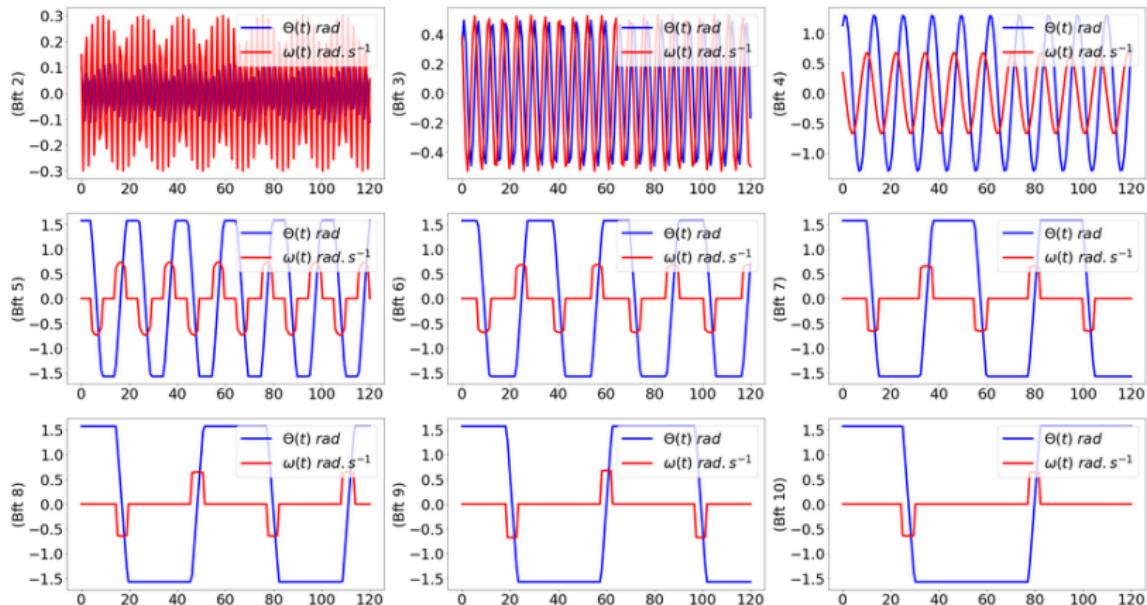
## Annexe 1 - Légendes des figures

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



## Annexe 1 - Légendes des figures

**Figure 3.3** -  $\theta$  et  $\omega$  en fonction du temps. ( $\theta$  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

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

TMD =>  $C = J_{\Delta}\ddot{\theta}$  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 :  $\vec{OM} = R\vec{e}_r$ ;  $\vec{OG} = \ell\vec{e}_r$ ;  $\vec{v_G} = \ell\dot{\theta}\vec{e}_\theta$ ;  
 $\vec{a_G} = \ell\ddot{\theta}\vec{e}_\theta - \ell\dot{\theta}^2\vec{e}_r$ ;  $\ell = \frac{2R}{\pi}$ ;  $A_1(-a, d)$ ;  $B_1(-R \cos \theta, R \sin \theta)$ ;  
 $A_2(+a, d)$ ;  $B_2(R \cos \theta, -R \sin \theta)$ ;  
 $x_1 = \|A_1B_1\| = \sqrt{R^2 - 2aR \cos \theta + a^2 - 2dR \sin \theta + d^2}$ ;  
 $x_2 = \|A_2B_2\| = \sqrt{R^2 - 2aR \cos \theta + a^2 + 2dR \sin \theta + d^2}$ ;

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 :  $\vec{p} = mg\vec{e}_r = mg(\cos \theta \vec{e}_r - \sin \theta \vec{e}_\theta)$  en G ; force de frottement :  $\vec{F}_f = -\alpha \ell \dot{\theta} \vec{e}_\theta$  en G ; force de rappel élastique :  $\vec{F}_{el_1}$  et  $\vec{F}_{el_2}$
- Energies :  $E_c = \frac{1}{2} J_\Delta \dot{\theta}^2$

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

$$E_{P_{el1}} = \frac{1}{2} k(x_1 - \ell_0)^2$$

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

$$E_{P_{el2}} = \frac{1}{2} k(x_2 - \ell_0)^2$$

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

## Annexe 2 - Mise en équation et résolution

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

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

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

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

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

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) :

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

```

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  $u = \frac{\omega}{\omega_0}$  :

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

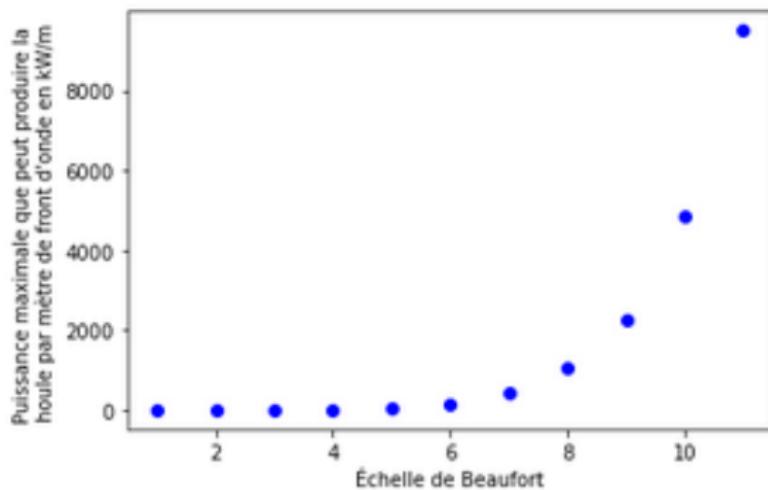
Nous pouvons aussi écrire  $\theta(t)$  sous la forme  $A' \cos(\omega t + \varphi)$  en posant :

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

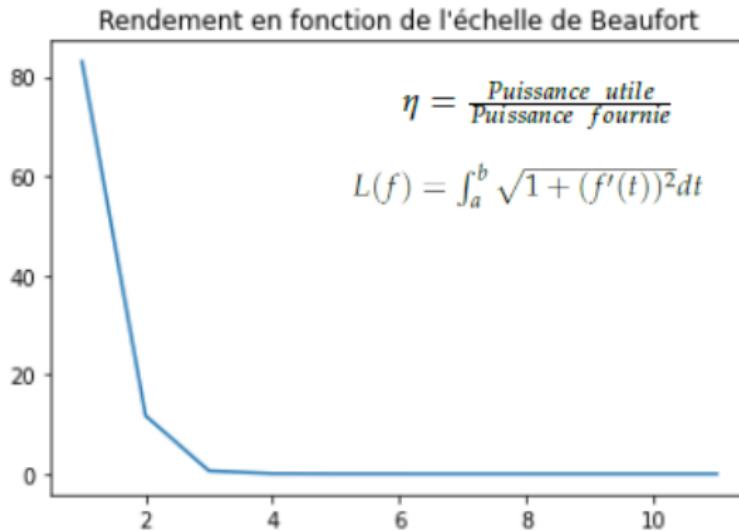
## Annexe 3 - Puissance transportée par mètre de front d'onde

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

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

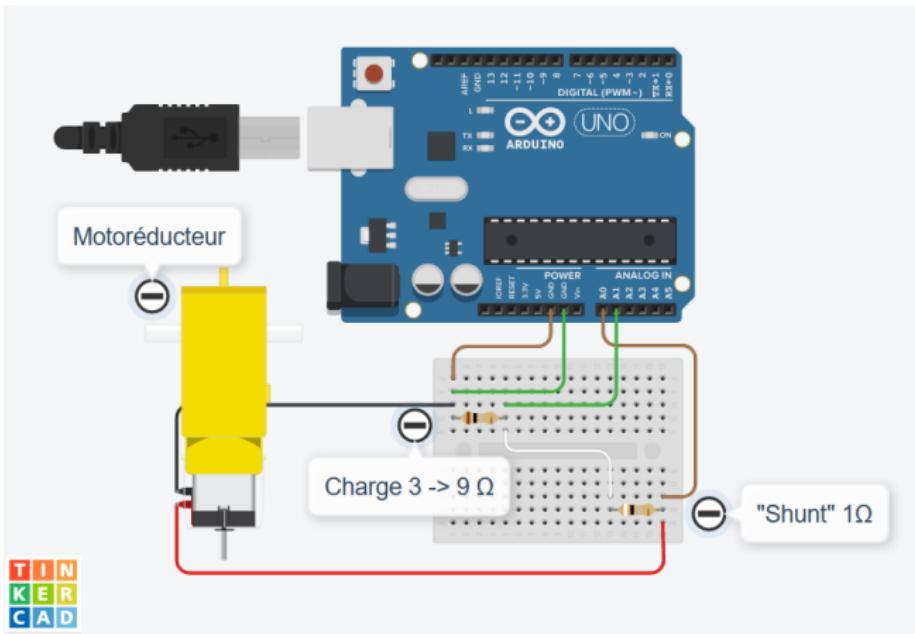


## Annexe 3 - Rendement



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 data1, 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;
    }

    // data1 et 2 lisent les valeurs de sensor1 et 2
    data1 = analogRead(sensor1);
    data2 = analogRead(sensor2);

    Serial.print(MS*0.001); // MS en milliseconde => conversion en seconde
    Serial.print(",");
    //data1 et 2 entre 0 et 1023.0 tq 0 ~ 0V et 1023.0 ~ 5V
    Serial.print(data1*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

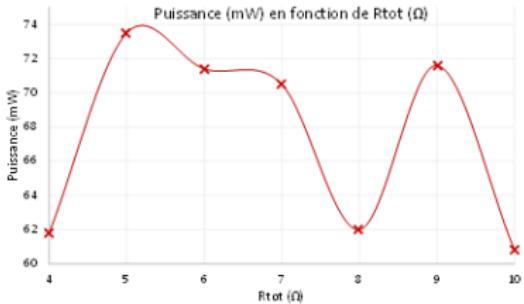
01| # Module utile
02|
03| import serial
04|
05| # Préparatifs
06|
07| arduino_port = "COM3" # port USB
08| baud = 9600 # nombre d'informations transmis par seconde
09| fileName = "C:/Users/nilsm/Documents/CPGE/PSIET/TIPE/Mesures_prototype/Données en
txt/R4 S1.txt" # emplacement et nom du fichier .txt 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| # Collection des données
25|
26| while line <= sample:
27|     if print_labels:
28|         if line == 0:
29|             print("Printing Column Headers") # Affiche les en-têtes des colonnes
30|         else:
31|             print("Line " + str(line) + ": writing...")
32|     getData = str(ser.readline()) # collecte les valeurs
33|     Data = getData[2:-5] # nouveau tableau sans les caractères inutiles
34|     print(Data) # affiche les valeurs collectées
35|
36| # Ecriture sur le .txt
37|
38| file = open(fileName, "a") # ouvre le fichier .txt
39|
40| file.write(Data + "\n") # écrit les valeurs \n pour retour à la ligne
41| line += 1 # on incrémente de 1 la ligne
42|
43|
44| print("Data collection complete!")
45|
46| file.close() # fermeture du .txt
```

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

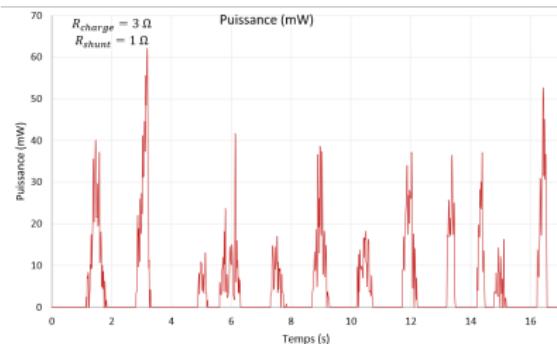
## Annexe 4 - Mesures expérimentales : courbes

R <sub>total</sub>	R <sub>charge</sub>	R <sub>shunt</sub>	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

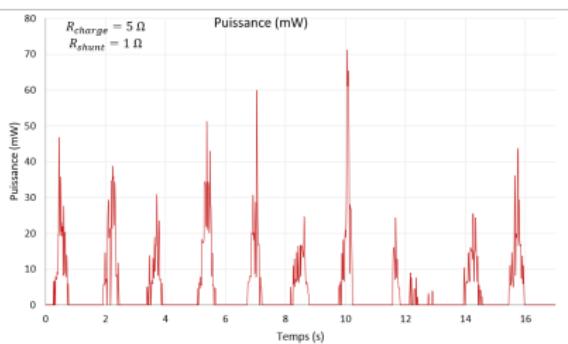


## Annexe 4 - Mesures expérimentales : courbes

Puissance (mW) en fonction du temps (s)



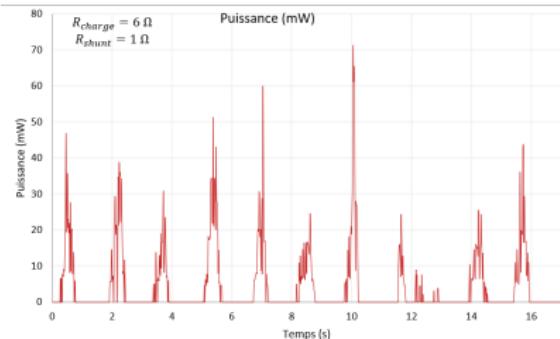
$$R_{charge} = 3\Omega$$
$$R_{shunt} = 1\Omega$$



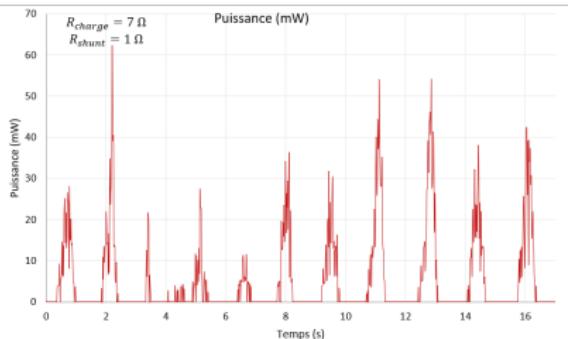
$$R_{charge} = 5\Omega$$
$$R_{shunt} = 1\Omega$$

## Annexe 4 - Mesures expérimentales : courbes

Puissance (mW) en fonction du temps (s)



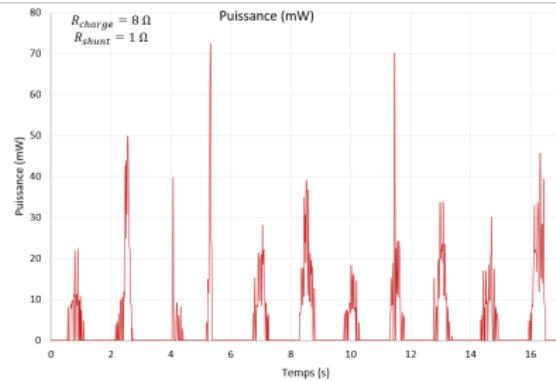
$$R_{charge} = 6\Omega$$
$$R_{shunt} = 1\Omega$$



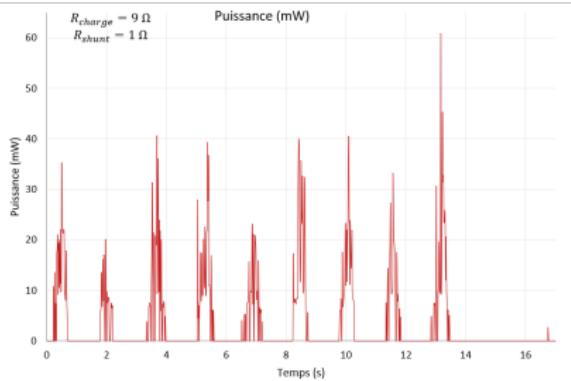
$$R_{charge} = 7\Omega$$
$$R_{shunt} = 1\Omega$$

## Annexe 4 - Mesures expérimentales : courbes

Puissance (mW) en fonction du temps (s)



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



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