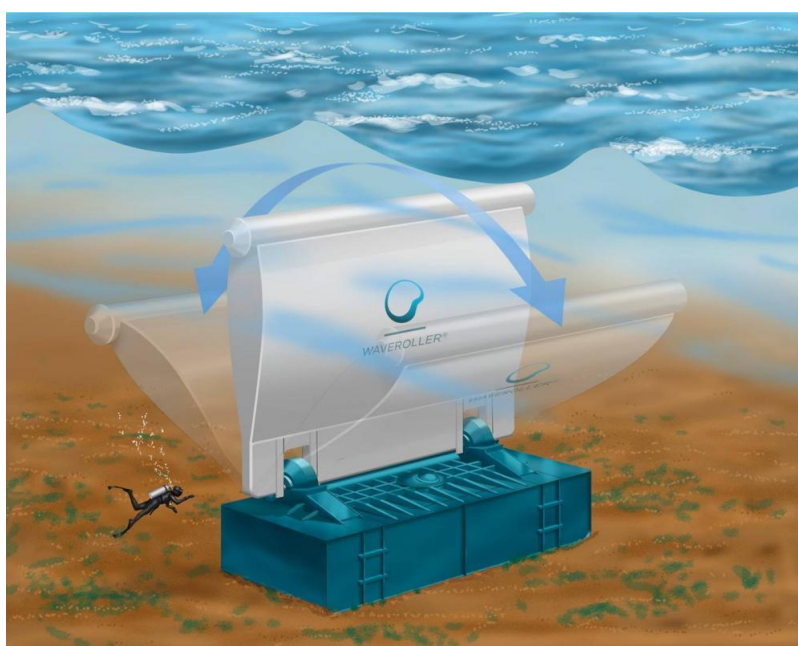

Transition énergétique : l'énergie des vagues

Etude expérimentale d'un dispositif houlomoteur



Auteurs :

Malo CHEFSON

Tristan LADRECH

Arnaud DANGALY

Clément DELAHAYE

Corentin MIQUEL

Encadrant :

O. THUAL

ENSEEIH T - 2^{ème} Année MFEE

Mai 2019

Sommaire

1 Révision Bibliographique	3
1.1 Informations générales et systèmes déjà existants	3
1.2 Fonctionnement des OWSCs	4
2 Méthodologie et dispositif expérimentale	5
3 Projet à Initiative Personnelle	8
3.1 Poster synthétisant le travail	8
3.2 Traitement de l'image	10
4 Résultats de l'étude complémentaire	21
5 Conclusion	25

Introduction

La civilisation humaine est actuellement confrontée à l'un de ses plus grands défis. Alors que la demande mondiale d'énergie augmente de façon exponentielle, les moyens d'énergie traditionnels se sont révélés incapables de répondre à cette demande de manière propre et efficace.

Les perspectives d'avenir sont donc alarmantes. Selon l'ONU (2018) le changement climatique constitue un risque majeur pour le maintien de la vie humaine sur Terre, la combustion de combustibles fossiles en étant la principale cause. (1)

Il est donc clair que, pour l'avenir, nous aurons besoin de nouvelles solutions énergétiques qui n'émettent pas de gaz à effet de serre. Dans cette optique, de nombreux pays ont investi dans de nouvelles technologies ou moyens de production d'énergie renouvelable, en plus d'avoir amélioré les énergies éolienne, solaire et hydraulique déjà existante. L'énergie houlomotrice étant l'une de ces nouvelles technologies prometteuses, elle fait l'objet d'investissements de plus en plus importants en raison de sa densité énergétique élevée, qui est considérée comme la plus élevée parmi les énergies renouvelables (2). Pour la France seulement, ce potentiel énergétique peut atteindre 28 GW (2)

Compte tenue le potentiel des côtes française en matière d'énergie houlomotrice, nous avons souhaité élaborer un dispositif houlomoteur optimisé pour les conditions des côtes française. Nous avons ainsi étudié sa géométrie ainsi que l'impacte de la fréquence des vagues. Pour ce faire, nous avons utilisé une approche technico-théorique combinée à une série de tests expérimentaux réalisés au sein du laboratoire de mécanique des fluides de l'ENSEEIHT.

Ce rapport s'articule autour de 2 projet distinct : Un premier projet à initiative personnelle réalisé en autonomie. Et une étude complémentaire menée dans le but de lever le voile sur certains points complexes qui n'avaient pas pu être étudiés faute de temps. Le rapport est organisé de la manière suivante : dans la section 1, nous présenterons l'étude bibliographique préliminaire à notre travail. Dans la section 2 nous présenterons l'élaboration et l'étude du dispositif houlomoteur réalisé dans le cadre d'un premier travail à initiative personnelle. Dans la section 3 nous définirons le protocole ainsi que les expériences réalisées lors d'une étude complémentaire. La sections 4 présentent les résultats et conclusions du travail complémentaire.

1 Révision Bibliographique

1.1 Informations générales et systèmes déjà existants

L'idée de produire de l'énergie par les vagues est ancienne. Le premier brevet en ce sens est daté de 1799 par Girard et fils en France (2). Depuis, on a pu observer l'émergence de nombreux autres concepts et configurations visant à accroître l'efficacité et à réduire les coûts d'exploitation. Certains d'entre eux ont même été testés en haute mer comme (3), (4), (5) ou encore (2). Cependant, ces technologies ne sont jamais devenues populaires en raison des coûts et de la difficulté de leur mise en œuvre.

Cette source d'énergie ne retrouvera une grande attention que lors de la grande crise pétrolière de 1973, lorsque différents pays européens commenceront à considérer cette technologie comme une source d'énergie alternative viable et introduiront des programmes de recherche dans ce domaine.

Grâce à ces initiatives, de grands progrès ont été réalisés au cours des dernières décennies. Actuellement, le potentiel théorique de l'énergie des océans est estimé à 29 500 TWh/an (6), dont 10 ou 20% pourraient être exploités, ce qui correspondrait presque à l'ensemble des consommations en Europe et aux Etats-Unis (7). Une légère augmentation de l'efficacité de ce système aurait un impact significatif.

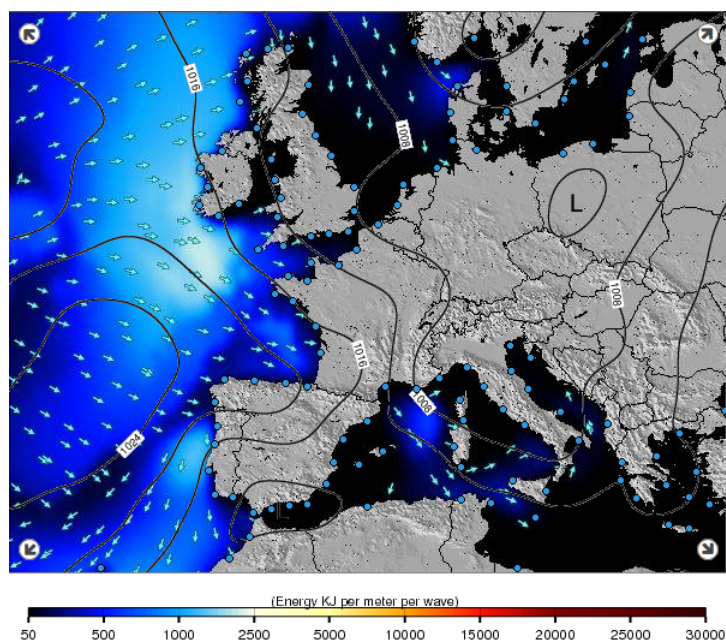


FIGURE 1 – Énergie de la houle sur les côtes française.
Source : Surfforecast (2019)

La France, par exemple, est bien exposée à la houle de l'atlantique comme le montre la figure

ci-dessus. Le potentiel de cette source d'énergie est estimé à 7% de la production électrique française. Il est important de nuancer ce chiffre, car cela représente le cas où toute la houle arrivant sur les côtes françaises seraient exploitée.

Les principales technologies développées sont réparties en 6 grandes familles. 1. Absorbeur de point, 2. Atténuateur, 3. Convertisseur de choc à ondes oscillantes, 4. Colonne d'eau oscillante, 5. Dispositif de débordement, 6. Différentiel de pression submergé. Dans le cadre de ce travail, nous nous concentrerons sur les points suivants convertisseur de surtension à ondes oscillantes (OWSC).

1.2 Fonctionnement des OWSCs

Les OWSCs sont des systèmes de plaques avec un seul degré de mouvement, généralement alignés orthogonalement avec la direction de propagation de l'onde, de sorte que l'énergie est générée par la résistance au mouvement induit par l'onde sous la structure. Nous pouvons voir une représentation schématisée de ce système dans la figure. 2.

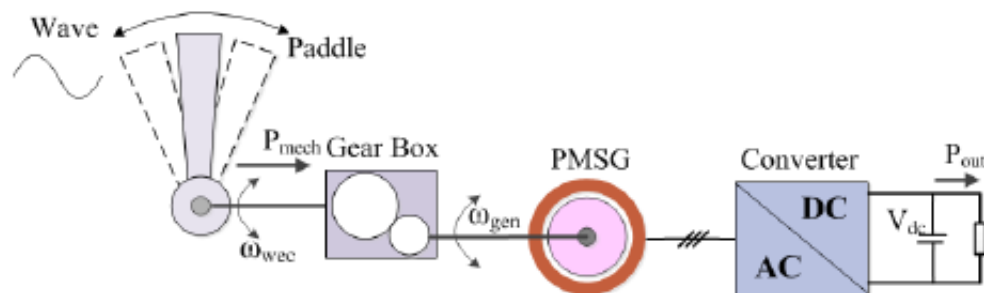


FIGURE 2 – Système de conversion d'énergie d'onde pour un convertisseur oscillant de surtension d'onde

Source : Uppalapati, Bird, Jia et Garner (2012)

Des études récentes basées sur des modèles d'écoulements potentiels ont montré que dans cette configuration de houlomoteur, la fréquence domine par rapport aux autres facteurs, de sorte que l'hydrodynamique du système peut être représentée par la force des vagues en fonction de la fréquence. Ainsi, la force est donnée par la formule 1 :

$$F = [k - ((I - I_a)\omega^2 + j(B + \Lambda)\omega)]X \quad (1)$$

Où F représente la force complexe de l'onde, k est la constante de raideur hydrodynamique, I est l'inertie des OWSC, I_a est l'inertie ajoutée due à l'eau, B est le coefficient d'amortissement hydrodynamique, Λ coefficient d'amortissement correspondant à la prise de puissance, ω est la fréquence de l'onde, X est l'amplitude complexe du système OWSC et pour finir, j est le nombre imaginaire, $j = \sqrt{-1}$

La puissance acquise, P , peut être calculée en utilisant l'équation 2.

$$P = \frac{1}{2} A \omega^2 |X|^2 \quad (2)$$

Si nous supposons que le mouvement de la planche est illimité et définissons la fréquence propre de la planche comme, ω_n , où $\omega_n^2 = k/(I + I_a)$ la puissance maximale acquise peut être exprimée par la formule :

$$P = \frac{1}{4} \frac{|F|^2}{B + \sqrt{B^2 + (I + I_a)^2 (\omega_n^2 - \omega^2)^2}} \quad (3)$$

Grâce à cette formule, nous pouvons observer que la puissance est influencée par quatre paramètres. Par la relation de Haskind, on a que le coefficient d'amortissement est lié à la force de la vague et à l'hydrodynamique, donc seulement trois de ces paramètres sont indépendants. Selon l'article de Whittaker et Folley (2012), la puissance augmente à mesure que la force des vagues augmente et que la fréquence s'approche de la fréquence naturelle du houlomoteur (8). Comme nous ne contrôlons pas la force de l'onde, nous ne pouvons que configurer le système afin de tirer le meilleur parti de la fréquence de résonance et de la force imposée.

Comme ce système d'optimisation est complexe et que la structure du houlomoteur à taille réelle coûte cher, il est intéressant de tester ces géométries à petite échelle avant la fabrication.

2 Méthodologie et dispositif expérimentale

En raison de l'importante diversification de la matrice énergétique et de la pertinence du thème pour la société. Nous avons décidé de mener une expérience mêlant théorie et expérimentation pour étudier les différents paramètres permettant d'optimiser un système houlomoteur.

Nous avons pour cela réalisé, au sein de l'ENSEEIH et en partenariat avec l'IMFT, une maquette permettant d'analyser les paramètres d'un système houlomoteur (Figure 3).

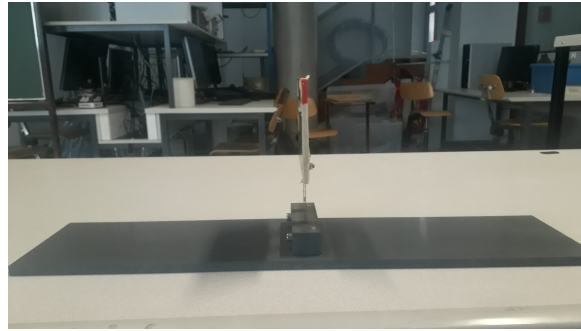


FIGURE 3 – Maquette du dispositif utilisé pour les expérimentations

À cet effet, nous avons à notre disposition, le canal expérimental dans les locaux du laboratoire de mécanique des fluides de l'ENSEEIH. Nous avons associé également un système de batteur capable de produire de petites ondes mécaniques à fréquences variables de 0.8 à 1,4 Hz contrôlé par un générateur analogique. Le schéma de génération des vagues peut être visible dans la Figure 4



FIGURE 4 – Configuration expérimentale du problème : Générateur de vagues

Une fois que le système de génération d'ondes installé et la plage de fréquences est défini, nous avons confectionné trois plaques rectangulaires en PVC, qui ressemblent à celles que l'on trouve dans la littérature. Les dimensions sont indiquées sur la figure. 5

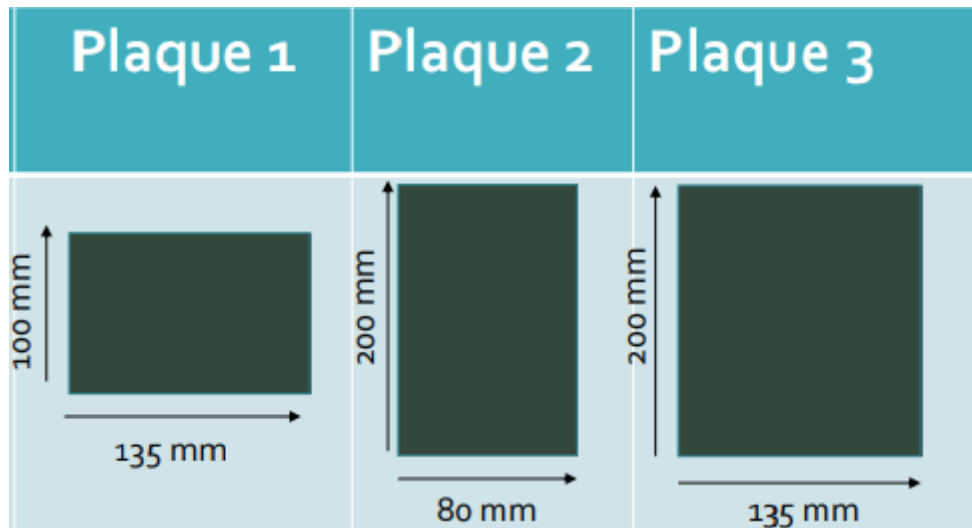


FIGURE 5 – Paramètres des plaques étudiées

Comme dans un houlomoteur traditionnel, nous fabriquons aussi un support fixe relié à la plaque par deux tiges métalliques, en l'occurrence deux lames de scie, qui assurent en même temps l'intégrité structurelle et permettent l'oscillation nécessaire à la production d'énergie. La figure 6 montre la configuration adoptée dans l'expérience.

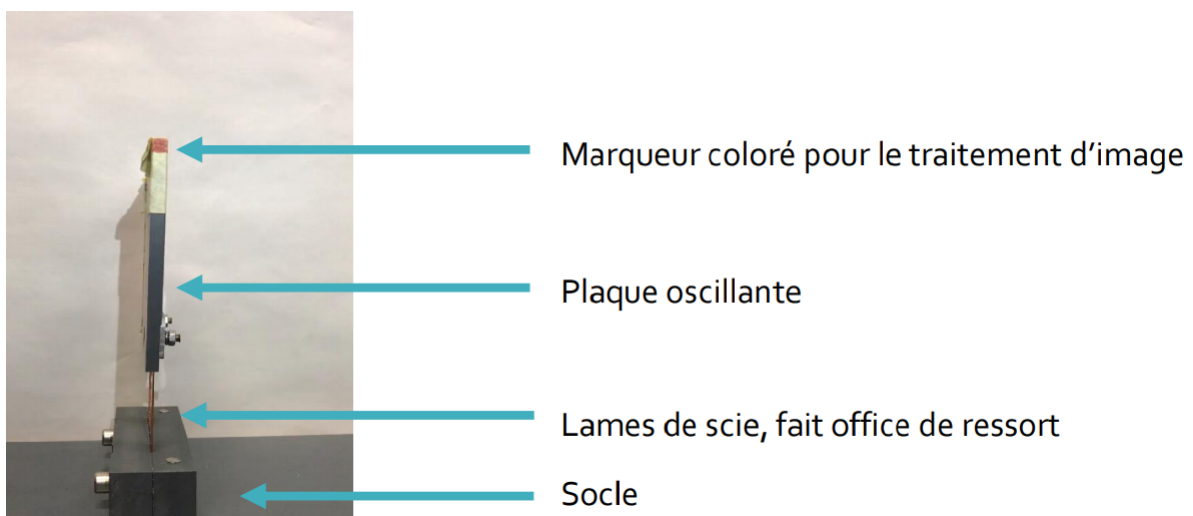


FIGURE 6 – Configuration des supports

Une fois tous les éléments définis, nous réalisons les expériences pour les trois plaques en faisant varier la fréquence des ondes dans les paramètres prédéfinis pour chacune des plaques. Une analyse vidéo puis un traitement image sous Matlab nous permet d'analyser les oscillations des plaques sous l'énergie des vagues. (Figure 10).

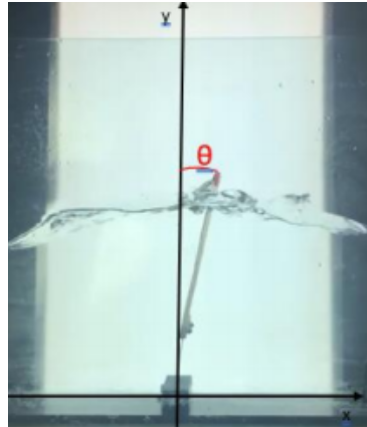


FIGURE 7 – Configuration des supports

L'idée de notre étude complémentaire est de réaliser également deux autres expériences sans vagues. L'objectif est de mettre en évidence les réponses impulsionnelles du dispositif pour chacune des plaques. Pour cela, nous avons réalisé une expérience à vide dans l'air et dans l'eau.

3 Projet à Initiative Personnelle

Pendant 6 mois, nous avons mené un travail en totale autonomie. Nous avons eu cette idée de construire un dispositif houlomoteur et d'en étudier les caractéristiques afin de l'adapter au mieux au milieu marin français.

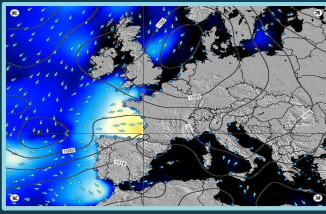
3.1 Poster synthétisant le travail

Fort de notre étude préliminaire, nous avons donc construit le houlomoteur avant de l'étudier et de le perfectionner. L'ensemble du travail devait être présenté sous forme de poster synthétique. Vous retrouverez dedans quelques éléments de l'étude préliminaire, mais également notre diagramme de GANT expliquant notre organisation, le travail théorique ainsi que les expériences menées et leurs résultats :

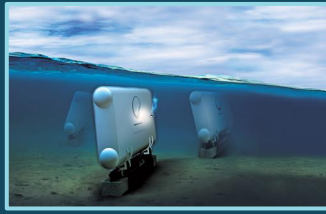
Transition énergétique : l'énergie des vagues

Etude expérimentale d'un dispositif houlomoteur

Contexte & Motivation

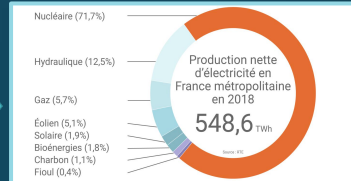


Intensité de la houle sur les côtes de l'Europe occidentale



Représentation d'une Centrale houlomotrice

Potentiel houlomoteur Français important



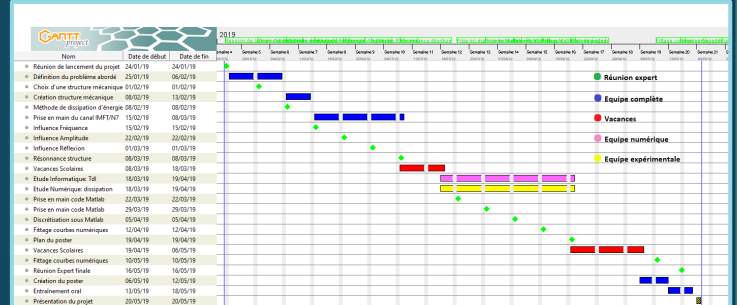
Répartition de la production d'électricité en France

Potentiel Houlomoteur Français estimé :
 • 7% de la production annuelle
 • 44 TWh /an

Objectif & Planning de travail

Objectif : Comprendre comment optimiser un dispositif houlomoteur.

- Recueillir les possibilités techniques.
- Comprendre la physique des ondes de houle.
- Imaginer un dispositif expérimental.
- Déterminer par l'expérience les paramètres décisifs de la dissipation et de la récupération d'énergie d'un batteur houlomoteur.
- Conclure sur l'optimisation d'un houlomoteur par le choix de ses paramètres.



Présentation détaillée de l'organisation de notre travail durant le projet.

Protocole expérimental

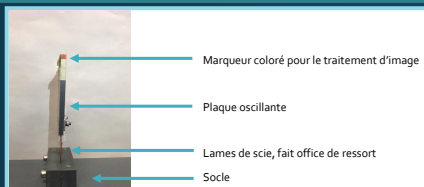


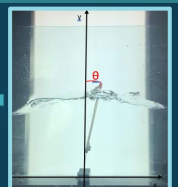
Schéma du batteur oscillant expérimental



Batteur à houle + canal N7

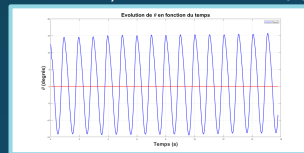
Fréquence des vagues (Hz)	Plaque 1	Plaque 2	Plaque 3
De 0,8 à 1,7	200 mm 135 mm	200 mm 80 mm	200 mm 135 mm

Paramètres expérimentaux que l'on fait varier



Dispositif filmé

Tracé de $\theta(t)$ par traitement d'image



Réponse impulsionnelle du solide sans vagues dans l'air et dans l'eau :

$$J \ddot{\theta} + a \dot{\theta} + c \theta = 0$$

J : Moment d'inertie du solide
 c : Raideur de l'oscillateur
 a : facteur d'amortissement interne (lame de scie)



Test dans l'air : Détermination de a

$$(J + J_a) \ddot{\theta} + (a + a_a) \dot{\theta} + (c + c_a) \theta = 0$$

J_a : Moment d'inertie ajouté du solide
 c_a : Raideur ajoutée de l'oscillateur
 a_a : facteur d'amortissement interne ajouté (lame de scie)

Test dans l'eau : Détermination de a_a , m_a , c_a

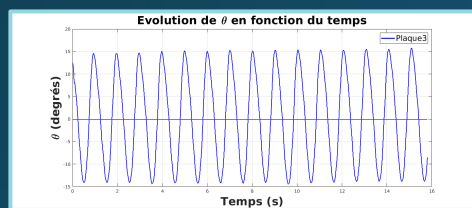
Dynamique du solide avec vagues dans l'eau :

Paramètres imposés :
 • F : fréquence des vagues
 • A : Amplitude des vagues



Test avec vagues dans le canal : Détermination de $\theta(t)$

Résultats



Mouvement de la plaque permettant de déduire l'amortissement

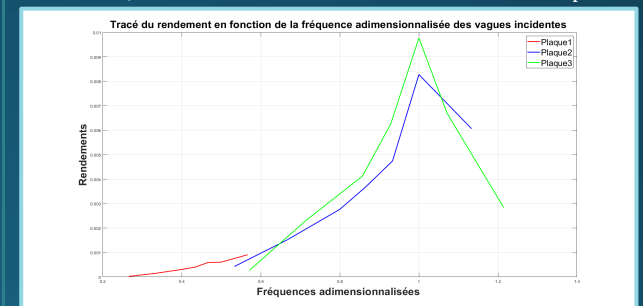
Fréquence Naturelle à vide : $f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c}{J}}$ (Hz)
 Facteur d'amortissement : $\xi = \frac{a}{2J}$

Plaque	Fréquence Naturelle à vide (Hz)	Facteur d'amortissement
Plaque 1	11,9	0,0023
Plaque 2	7,9	0,0061
Plaque 3	6,2	0,0026

Tableau comparatif des différents paramètres de chaque plaque

Puissance/vague : $P = 500 \times A^2 \times T \times l$
 Puissance dissipée : $D = 0.5 \times a \times \int \dot{\theta}^2(t) dt$

Rendement : $r = \frac{D}{P}$



Conclusion

- Existence d'un pic de rendement** à une fréquence unique pour chaque plaque (le pic de la plaque 1 n'est pas visible sur la plage de fréquences étudiées). Nous pouvons alors déduire que le houlomoteur sera plus efficace s'il est soumis à des vagues de fréquence égale à la fréquence naturelle du batteur dans l'eau.
- Différence de maximum des rendements** : Effets de bord dus au confinement des plaques avec le bord du canal pour les plaques 2 et 3.

Application concrète

En réalité, la fréquence de la houle est très variable. Pour s'adapter à cette fréquence, il faut faire varier la fréquence naturelle du batteur oscillant sans modifier ses dimensions. On modifie alors sa raideur et son amortissement. Par exemple, la société *Aquamarine Power* développe un système de dimensions fixes 12*26 mètres, adapté aux conditions réelles.

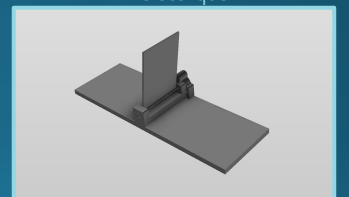
Fréquence (Hz)	Rendement max
Plaque 1: 1,7	0,01
Plaque 2: 1,5	0,083
Plaque 3: 1,4	/

Résultats importants



Dispositif Oyster développé par Aquamarine Power

Suite potentielle du projet : expériences avec dispositif électrique.



Dispositif houlomoteur en rotation avec réducteur et alternateur.

Objectif : Comprendre comment dimensionner un houlomoteur capable de s'adapter à des fréquences différentes.

3.2 Traitement de l'image

Afin d'étudier le mouvement de nos plaques, nous avons dû réaliser un travail conséquent sur le traitement de l'image. N'ayant aucun cours dessus, nous nous sommes tourné vers internet afin de développer nos propres codes. Nous avons abouti à deux codes différents. Un premier détectant les éléments en fonction de leur Teinte/Saturation/Lumière (HSV en anglais) et un deuxième tiré d'un code de reconnaissance faciale que nous avons adapté pour reconnaître le bout de la plaque de notre houlomoteur. Ces deux codes étaient complémentaires et nous ont permis d'étudier le houlomoteurs dans différents types de situations. Le premier est plus approximatif mais permet de détecter la plaque à de grandes fréquences d'oscillation lorsque le bout de la plaque est "étalé/flou". De plus le programme issu de la reconnaissance faciale avait des difficultés lorsque la surface libre était au niveau du bout de la plaque. Nous avons ainsi développé les codes matlab suivants :

Listing 1 – Code HSV Detector

```
%Initiating Matlab Programm
clc;
close all;
imtool close all;
clear;
workspace;
format long g;
format compact;
fontSize = 20;

% Specify input video file name.
folder = pwd;
baseFileName = 'cut2.mp4';
fullFileName = fullfile(folder, baseFileName);

% Check if the video file actually exists in the current folder
or on the search path.
if ~exist(fullFileName, 'file')
    % File doesn't exist -- didn't find it there. Check the
    search path for it.
    fullFileNameOnSearchPath = baseFileName; % No path this
    time.
```

```
        if ~exist(fullFileNameOnSearchPath, 'file')
            % Still didn't find it. Alert user.
            errorMessage = sprintf('Error: %s does not exist
                                in the search path folders.', fullFileName);
            uiwait(warndlg(errorMessage));
            return;
        end
    end

% Instantiate a video reader object for this video and setup
% useful paramters.
videoObject = VideoReader(fullFileName);
numberOfFrames = videoObject.NumberOfFrame;
a=VideoReader('cut2.mp4');
b=read(a,2);
imwrite(b, 'frame1.png');

% Set HSV parameters to detect the red dot on the waving plate.
hThresholds = [0.8, 1];
sThresholds = [0.2, 0.5];
vThresholds = [100, 300];
X=[];
Y=[];

%Set the size of the plate and the origin to calculate the
% angle at each step
figure(1)
imshow('frame1.png');
title('frame pour identifier le bout de la plaque'); %top of the
    plate
[xh,yh] = getpts;
close(1);

figure(4)
imshow('frame1.png');
title('frame pour identifier le bas de la plaque');%bottom of
    the plate
```

```
[xb,yb] = getpts;
close(4);

norme_plaque = sqrt((xh-xb)*(xh-xb)+(yh-yb)*(yh-yb));
longueur_plaque = 0.1 ; %en m tre

coef_conversion = norme_plaque/longueur_plaque ;

figure(2)
imshow('frame1.png');
title('frame pour identifier origine');%origin of the plate
[x0,y0] = getpts;
originRegion = [x0,y0,10];
close(2);

objectImage0 = insertShape(b, 'Circle',originRegion, 'Color', '
    yellow');
figure(2)
imshow(objectImage0);
title('Yellow circle shows origin');

% Read one frame at a time, and find specified color.
for k = 1 : numberOfFrames
    % Read one frame
    thisFrame=read(videoObject,k);
    hImage=subplot(3, 4, 1);
    % Display it.
    imshow(thisFrame);
    axis on;
    caption = sprintf('Original RGB image, frame #%d Of %d',
        k, numberOfFrames);
    title(caption, 'FontSize', fontSize);
    drawnow;

    hsv = rgb2hsv(double(thisFrame));
    hue=hsv(:, :, 1);
```

```
sat=hsv(:,:,2);
val=hsv(:,:,3);

subplot(3, 4, 2);
imshow(hue, []);
impixelinfo();
axis on;
title('Hue', 'FontSize', fontSize);
subplot(3, 4, 3);
imshow(sat, []);
axis on;
title('Saturation', 'FontSize', fontSize);
subplot(3, 4, 4);
imshow(val, []);
axis on;
title('Value', 'FontSize', fontSize);
if k == 1
    % Enlarge figure to full screen.
    set(gcf, 'Units', 'Normalized', 'OuterPosition',
        [0 0 1 1]);
    % Give a name to the title bar.
    set(gcf, 'Name', 'Demo by ImageAnalyst', '
        NumberTitle', 'Off')
    hCheckbox = uicontrol('Style','checkbox',...
        'Units', 'Normalized',...
        'String', 'Finish Now',...
        'Value',0,'Position', [.2 .96 .4 .05],
        ...
        'FontSize', 14);
end

% Compute histograms for H, S, and V channels
% Let's compute and display the histogram.
[pixelCount, grayLevels] = imhist(hue);
subplot(3, 4, 6);
bar(grayLevels, pixelCount);
grid on;
title('Histogram of hue image', 'FontSize', fontSize);
xlim([0 grayLevels(end)]); % Scale x axis manually.
% Let's compute and display the histogram.
```

```
[pixelCount, grayLevels] = imhist(sat);
subplot(3, 4, 7);
bar(grayLevels, pixelCount);
grid on;
title('Histogram of sat image', 'FontSize', fontSize);
xlim([0 grayLevels(end)]); % Scale x axis manually.
% Let's compute and display the Value histogram.
[pixelCount, grayLevels] = imhist(uint8(val));
subplot(3, 4, 8);
bar(grayLevels, pixelCount);
grid on;
title('Histogram of val image', 'FontSize', fontSize);
xlim([0 grayLevels(end)]); % Scale x axis manually.

binaryH = hue >= hThresholds(1) & hue <= hThresholds(2);
binaryS = sat >= sThresholds(1) & sat <= sThresholds(2);
binaryV = val >= vThresholds(1) & val <= vThresholds(2);
subplot(3, 4, 10);
imshow(binaryH, []);
axis on;
title('Hue Mask', 'FontSize', fontSize);
subplot(3, 4, 11);
imshow(binaryS, []);
axis on;
title('Saturation Mask', 'FontSize', fontSize);
subplot(3, 4, 12);
imshow(binaryV, []);
axis on;
title('Value Mask', 'FontSize', fontSize);

% Overall color mask is the AND of all the masks.
coloredMask = binaryH & binaryS & binaryV;
% Filter out small blobs.
coloredMask = bwareaopen(coloredMask, 500);
% Fill holes
coloredMask = imfill(coloredMask, 'holes');
subplot(3, 4, 9);
imshow(coloredMask, []);
axis on;
title('Colored Blob Mask', 'FontSize', fontSize);
```

```

drawnow;

[labeledImage, numberOfRegions] = bwlabel(coloredMask);
if numberOfRegions >= 0
    stats = regionprops(labeledImage, 'BoundingBox',
        'Centroid');
    % Delete old texts and rectangles
    if exist('hRect', 'var')
        delete(hRect);
    end
    if exist('hText', 'var')
        delete(hText);
    end

    % Display the original image again.
    subplot(3, 4, 5); % Switch to original image.
    hImage=subplot(3, 4, 5);
    imshow(thisFrame);
    axis on;
    hold on;
    caption = sprintf('%d blobs found in frame # %d 0
        f %d', numberOfRegions, k, numberOfFrames);
    title(caption, 'FontSize', fontSize);
    drawnow;

    %This is a loop to bound the colored objects in
    a rectangular box.
    for r = 1 : numberOfRegions
        % Find location for this blob.
        thisBB = stats(r).BoundingBox;
        thisCentroid = stats(r).Centroid;
        hRect(r) = rectangle('Position', thisBB,
            'EdgeColor', 'r', 'LineWidth', 2);
        hSpot = plot(thisCentroid(1),
            thisCentroid(2), 'y+', 'MarkerSize',
            10, 'LineWidth', 2);
        hText(r) = text(thisBB(1), thisBB(2)-20,
            strcat('X: ', num2str(round(
                thisCentroid(1))), ' Y: ', num2str
                (round(thisCentroid(2)))));
    end
end

```

```

        X=[X ;round(thisCentroid(1))];
        Y=[Y ;round(thisCentroid(2))];
        %Z=atan(num2str(round(thisCentroid(1)))/num2str(
            round(thisCentroid(2))))
            set(hText(r), 'FontName', 'Arial', '
                FontWeight', 'bold', 'FontSize', 12,
                'Color', 'yellow');

            end
            hold off
            drawnow;

        end

        % See if they want to bail out
        if get(hCheckbox, 'Value')
            % Finish now checkbox is checked.
            msgbox('Done with demo. ');
            return;

        end

    end

    msgbox('Done with demo. ');

    fid = fopen('Suivi_points', 'wt');
    fprintf(fid,'%6s %6s %6s %6s %6s \n','tframe','time','x','y','
        theta');
    i=1;
    time = [];
    thetap = [];

    for i = 1: numberOfFrames
        x = (X(i)-x0)/coef_conversion ;
        y = (Y(i)-y0)/coef_conversion ;

        theta = (atan(x/y))*(360/(2*pi)) ;

        t=(i-1)*(1/30);
        A=[i;t;x;y;theta];
        time = [time A(2)];
        thetap = [thetap A(5)];
    end

```

```
if i~=1
    time2=[time2 A(2)];
    theta_derive =( thetap(i)-thetap(i-1) ) / ( time (i)-
        time(i-1) );
    theta_carre = theta_derive^2;
    theta_derivep=[theta_derivep theta_derive];
    somme_theta_carre = somme_theta_carre + theta_carre;
end

fprintf(fid,'%6.6f %6.6f %6.6f %6.6f %6.6f \n',A);
i=i+1;

end

figure

plot(time,thetap)
title('thetha(t)')
xlabel('temps')
ylabel('theta (degr s)')
grid on

figure
plot(time2,theta_derivep)
title('Trac de la d r i v e de \theta en fonction du temps')
xlabel('temps (s)')
ylabel('d r i v e de \theta ( /s)')
grid on

fclose(fid);
```

Listing 2 – Facial Recognition Adapted

```
clear all;
close all;

videoFileReader = vision.VideoFileReader('TEST2.avi');
videoPlayer = vision.VideoPlayer('Position',[100,100,680,520]);
objectFrame = videoFileReader();

a=VideoReader('TEST2.avi');
b=read(a,1);
imwrite(b,'frame1.png');

figure(1)
imshow('frame1.png');
title('frame pour identifier le bout de la plaque');
[xh,yh] = getpts;
close(1);

figure(4)
imshow('frame1.png');
title('frame pour identifier le bas de la plaque');
[xb,yb] = getpts;
close(4);

norme_plaque = sqrt((xh-xb)*(xh-xb)+(yh-yb)*(yh-yb));
longueur_plaque = 0.2 ; %en m t r e

coef_conversion = norme_plaque/longueur_plaque ;

figure(2)
imshow('frame1.png');
title('frame pour identifier origine');
[x0,y0] = getpts;
originRegion = [x0,y0,10];
close(2);

objectImage0 = insertShape(objectFrame,'Circle',originRegion,'
    Color','yellow');
```

```
figure(2)
imshow(objectImage0);
title('Yellow circle shows origin');
%close(2);

figure(3)
imshow('frame1.png');
title('frame pour identifier le point    traquer');
[xc,yc] = getpts;
objectRegion = [xc,yc,15,15];
close(3);

objectImage = insertShape(objectFrame,'Rectangle',objectRegion,'
    Color','red');
figure(3);
imshow(objectImage);
title('Red box shows object region');
%close(3);

points = detectMinEigenFeatures(rgb2gray(objectFrame),'ROI',
    objectRegion);

pointImage = insertMarker(objectFrame,points.Location,'+', 'Color
    ','red');
figure;
imshow(pointImage);
title('Detected interest points');

tracker = vision.PointTracker('MaxBidirectionalError',20);

initialize(tracker,points.Location,objectFrame);
fid = fopen('Suivi_points', 'wt');
fprintf(fid,'%6s %6s %6s %6s %6s \n','tframe','time','x','y','
    theta');
i=1;
time = [];
thetap = [];

while ~isDone(videoFileReader)
    frame = videoFileReader();
```

```
[points,validity] = tracker(frame);

out = insertMarker(frame,points(validity, :),'+');
videoPlayer(out);

x1 = points(1,1);
y1 = points(1,2);
x = (x1-x0)/coef_conversion ;
y = (y1-y0)/coef_conversion ;

theta = (atan(x/y))*(360/(2*pi)) ;

t=(i-1)*(1/60);
A=[i;t;x;y;theta];
time = [time A(2)];
thetap = [thetap A(5)];
fprintf(fid, '%6.6f %6.6f %6.6f %6.6f %6.6f \n',A);
i=i+1;

end

figure

plot(time,thetap)
title('thetha(t)')
xlabel('temps')
ylabel('theta (degr s)')
grid on

fclose(fid);
```

4 Résultats de l'étude complémentaire

Comme mentionnés précédemment, les résultats qui sont présentés ici correspondent à l'étude du dispositif sans vagues dans l'eau. Nous n'avons pas pu réaliser cette expérience sur le temps imparti du projet d'initiative personnelle. Nous avons décidé de s'y consacrer sur cette étude.

À l'air libre, le système est régi par l'équation suivante :

$$J\ddot{\theta} + a\dot{\theta} + c\theta = 0$$

avec J : Moment d'inertie du solide, a : facteur d'amortissement interne et c : raideur de l'oscillateur. Dans l'eau, nous devons considérer un terme de raideur ajoutée et un facteur d'amortissement ajouté. Le moment d'inertie ne change pas par définition. L'équation devient alors :

$$J\ddot{\theta} + (a + a_a)\dot{\theta} + (c + c_a)\theta = 0$$

Nous avons donc filmé la réponse impulsionnelle de nos plaques et nous avons traité ces dernières avec nos programmes Matlab. Nous avons donc obtenu les courbes suivantes :

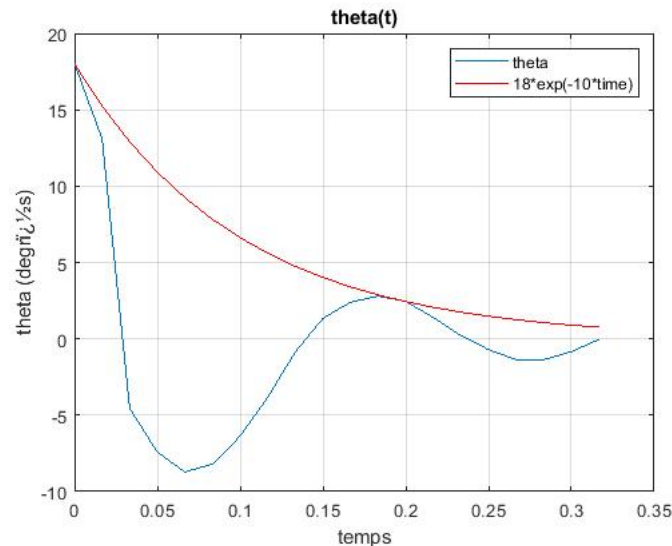


FIGURE 8 – Résultat de la plaque 1

On voit que la plaque 1 a une fréquence propre d'environ 5 Hz dans l'eau. Dans l'air, cette fréquence était de 11,9 Hz. Ce résultat est plutôt intuitif puisque l'eau va, grâce à la traînée, freiner la plaque dans son mouvement et l'empêcher d'atteindre une vitesse aussi élevée que dans l'air. Avec le coefficient de l'exponentielle et la fréquence à vide dans l'eau, on peut ainsi en déduire les coefficients de masse ajoutée.

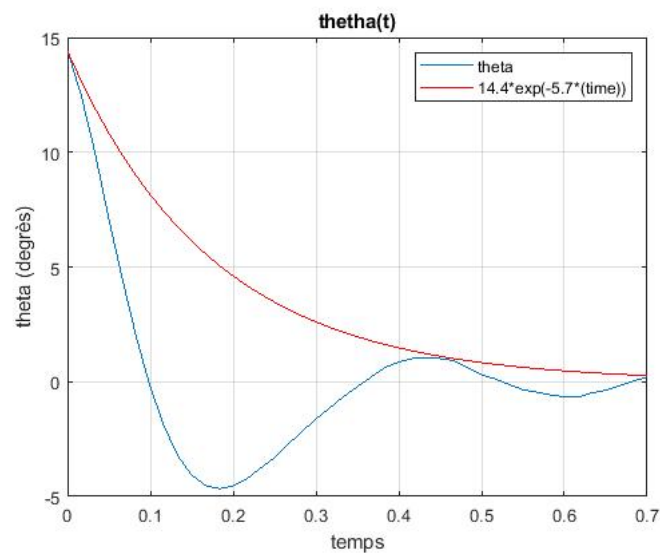


FIGURE 9 – Résultat de la plaque 2

On voit que la plaque 2 a une fréquence propre d'environ 2.3 Hz dans l'eau. Dans l'air, cette fréquence était de 7,9 Hz.

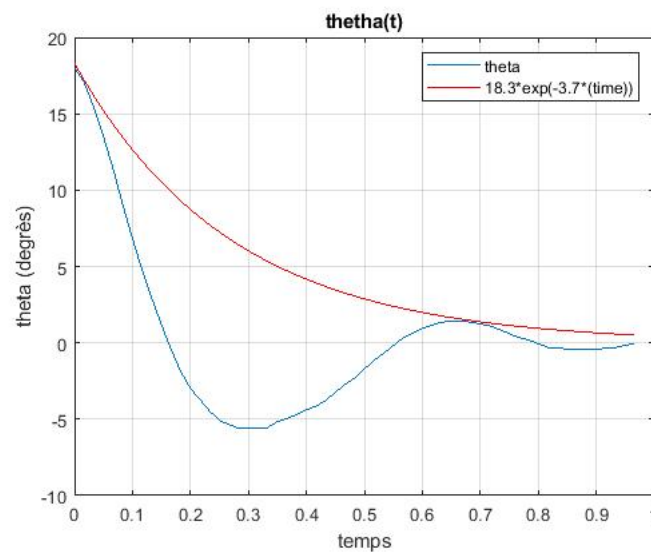


FIGURE 10 – Résultat de la plaque 3

On voit que la plaque 3 a une fréquence propre d'environ 1.5 Hz dans l'eau. Dans l'air, cette fréquence était de 6,2 Hz.

Avant d'aller plus loin dans le développement des calculs, on peut d'ores et déjà remarquer que nous pensions que nos plaques avaient un meilleur rendement lorsque les vagues avaient la même fréquence que leur fréquence propre. Or, ceci s'avère faux pour au moins une plaque, la plaque 2, qui a une fréquence propre de 2,3 Hz dans l'eau et qui avait un meilleur rendement

pour une fréquence de 1,5 Hz. La plaque 3 avait un meilleur rendement pour une fréquence de 1,7 Hz avec une fréquence propre de 1,5 Hz, ce qui semble cohérent à l'erreur de mesure près. Concernant la plaque 1, le batteur à houle ne pouvait atteindre des fréquences de vagues de plus de 2 Hz, donc la plaque n'a pas pu être testée dans les bonnes conditions.

On va maintenant pouvoir calculer les différents coefficients de masse ajoutée. En effet, on a les formules suivantes :

$$f_o^2 = \frac{c + c_a}{J}$$

$$\xi = \frac{a + a_a}{2J}$$

Nous connaissons déjà les fréquences propres par simple lecture graphique. Ensuite, nous avons déterminé l'enveloppe exponentielle de notre réponse indicielle. Cette exponentielle est de la forme :

$$Ke^{-w_0 \xi * t} = Ke^{-2\pi f_0 \xi * t} = Ke^{-\alpha * t}$$

Ainsi, on en déduit que :

$$c_a = Jf_o^2 - c$$

$$a_a = 2J \frac{\alpha}{2\pi f_0} - a$$

Des calculs du projet, nous avons :

$$J_1 = 0.0017 \quad J_2 = 0.0039 \quad J_3 = 0.0063$$

Nous obtenons alors les résultats suivant :

TABLE 1 – Coefficients expérimentaux par plaque

	Plaque 1	Plaque 2	Plaque 3
c	0.240	0.243	0.242
c_a	-0.198	-0.223	-0.228
$c+c_a$	0.042	0.02	0.014
a	0.000009	0.000016	0.000097
a_a	0.00107	0.00306	0.00485
$a+a_a$	0.001079	0.003076	0.004947

Nous remarquons que la raideur ajoutée de l'oscillateur est négative, mais que $(c + c_a)$ reste positif. De plus, $(c + c_a)$ est maintenant très faible en comparaison des valeurs de c à vide dans l'air. Le facteur d'amortissement a était auparavant très négligeable étant donné que la

plaque n'était ralentie que par les faibles frottements avec l'air et les interactions internes aux lames de scies. Maintenant que le dispositif est plongé dans l'eau, le facteur d'amortissement $(a + a_a)$ est maintenant plus important. On remarque d'ailleurs que $a_a \gg a$, ce qui implique que les frottements entre la plaque et l'eau sont maintenant bien plus importants que les frottements internes des lames de scie.

Conséquences :

Les raideurs des 3 plaques étaient auparavant quasiment égales. Dans l'eau, elles sont bien plus faibles (de l'ordre de 10^{-2} fois moins importantes) et sont divisées par 2 d'une plaque à l'autre en partant de la plus petite (plaque 1) jusqu'à la plus grande (plaque 3). Ce résultat n'est pas intuitif car il est difficile d'imaginer que l'eau puisse avoir de tels effets sur la raideur. On se doute donc qu'il y a une relation liant ce coefficient à la surface en contact avec l'eau, mais la déterminer précisément demanderait un travail plus approfondi et une plus grande précision dans le traitement de l'image. L'amortissement est encore plus impacté puisqu'il est multiplié par au moins 10^2 dans tous les cas. Ce résultat est plus intuitif que le précédent. Il découle de l'intervention de la traînée, mais ce simple phénomène ne peut pas tout expliquer. En effet, la traînée est proportionnelle à la surface, mais dans notre cas on ne remarque aucune proportionnalité directe entre la surface et a_a . On peut expliquer ça par le caractère oscillatoire du mouvement de la plaque, qui implique très sûrement des recirculations, et donc un écoulement chaotique autour de la plaque. La traînée ne peut donc pas être déterminé simplement.

5 Conclusion

En conclusion, cette étude était l'opportunité pour nous de compléter notre projet d'initiative personnelle que nous avons réellement pris plaisir à réaliser.

Ce projet nous avait permis de mettre en évidence la façon dont optimiser un système houlomoteur. Dans cette nouvelle étude, nous nous sommes surtout intéressés aux propriétés de notre dispositif dans l'eau sans vagues. De cette façon, nous avons pu trouver les fréquences propres dans l'eau de chacune des plaques et ainsi définir la fréquence de vague la plus appropriée pour récupérer le maximum d'énergie en fonction des dimensions de la plaque utilisée. Les expériences du projet d'initiative personnelle nous ont donné des résultats légèrement contradictoires puisque les fréquences les plus appropriées ne correspondaient pas forcément aux fréquences propres des plaques dans l'eau. On se doute fortement que le problème vient des effets de bords, mais surtout du batteur à houle qui faisait des vagues imparfaites.

Comme nous avons pu le voir à travers notre projet initial, dans un cas réel, la fréquence des vagues changent au cours du temps. Il est donc impossible de faire varier les dimensions des plaques pour s'adapter aux conditions de vagues. En réalité, ce sont les coefficients internes d'amortissement qui sont modifiés pour pouvoir s'adapter au mieux à la houle présente. Pour passer du modèle à la réalité, il faudrait réaliser une structure à taille réelle et expérimenter les conditions sur le terrain. En effet, nous avons remarqué que le milieu et le caractère unique de chaque houle agissaient fortement sur la réaction du système.

Références

- [1] ONU, “Mudanças climáticas são ‘ameaça existencial’ para a humanidade, diz onu,” 2018.
- [2] A. Clément, P. McCullen, A. Falcão, A. Fiorentino, F. Gardner, K. Hammarlund, G. Lemonis, T. Lewis, K. Nielsen, S. Petroncini, M.-T. Pontes, P. Schild, B.-O. Sjöström, H. C. Sørensen, and T. Thorpe, “Wave energy in europe : current status and perspectives,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 6, no. 5, pp. 405 – 431, 2002.
- [3] A. Palme, “Wave motion turbine,” 1920.
- [4] Y. Masuda, “Study of wave activated generator and future view as an island power source,” in *2nd International Ocean Development Conference*, (Tokyo), 1972.
- [5] K. Scott, “Electricity from the wave,” in *Sea Frontiers*, 1965.
- [6] IRENA, “Wave energy : Technology brief,” 2014.
- [7] CIA, “The world factbook,” 2019.
- [8] T. Whittaker and M. Folley, “Nearshore oscillating wave surge converters and the development of oyster,” *Philosophical Transactions of the Royal Society*, pp. 345 – 364, 2012.