

République Algérienne Démocratique et Populaire Ministère de
l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A. Mira – BEJAIA



Faculté de Technologie
Département de Génie Électrique

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master en
Electromécanique

Option

Electromécanique

Préparé par :

Mr DEROUICHE Farid

Mr KESSOURI Hasni

Thème

*Etude et Réalisation d'un Système de
Conversion d'Energie des Vagues*

Proposé et dirigé par :

Mr AOUZELLAG Djamal

Mr TAZERART Farid

Promotion 2021/2022

Remerciements

Nous remercions tout d'abord ALLAH le tout puissant qui nous a fourni l'aide et la confiance pour réaliser ce travail.

Nos remerciements à nos promoteurs Mr AOUZELLAG Djamel et Mr TAZERART Farid pour leur aide et leurs conseils avisés et leurs remarques qui nous ont permis de présenter notre travail dans sa meilleure forme.

Nous remercions également tous les enseignants qui ont contribué à notre formation durant notre cursus universitaire.

Nos remerciements s'adressent aussi aux membres de jury qui ont accepté de juger ce modeste travail.

Nous remercions toute l'équipe mécanique de hall technologie, et surtout Mr HAMOUDI Yanis. Ainsi que l'équipe du bloc haute tension et de l'laboratoire d'électronique de puissance.

Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce projet.

hasni & farid

Dédicace

À celle qui attendu avec patience les fruits de sa bonne éducation et de ses dévouements

A ma chère mère

À celui qui s'est changé la nuit en jour pour m'assurer les bonnes conditions

A mon cher père

À mon petit frère Chawki

À ma sœur Hanane, son mari Halim, et leur petit ange Mohamed Racim

À mes grand-mères que je considère comme une deuxième mère

À mes oncles et tantes sans exception

À tous mes amis proches, en particulier mon binôme Farid

À la mémoire de mon cher grand-père récemment décédé

Je dédie ce modeste travail

Hasni

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

*À mes très chers parents, qui m'ont aidé durant mes études la profonde
gratitude, leurs consécutions et leurs sacrifices.*

À mes frères et sœurs

À mon prof Abdallah Hadji

À mon binôme Hasni

À toute ma famille et mes amis: Mohamed, Mazigh, Bourhane

Farid

Nomenclature

Chapitre I

SDE	Système de distribution d'énergie électrique
OWC	Oscillating water columns
$EMACOP$	Energies Marines, Côtières et Portuaires

Chapitre II

$MSAP$	Machine Synchrone à Aimants Permanents
$PD3$	Pont tous diode triphasé
f. e. m	Force Electromotrice
AP	Aimants permanents
P	Nombre de paires de pôles
$(a \ b \ c)$	Axe lié au enroulement triphasé
$(dq0)$	Axes de référentiel de Park
$v_a v_b v_c$	Tensions statoriques
$i_a \ i_b \ i_c$	Courants statoriques
$\varphi_{abc} :$	Flux statoriques
$\varphi_a \ \varphi_b \ \varphi_c$	Flux totaux d'enroulement statorique
φ_{AP}	Flux des aimants permanents
$\varphi_{APa} \ \varphi_{APb} \ \varphi_{APc}$	Flux des aimants permanents dans l'enroulement statorique
θ	Position électrique de rotor
Ω_r	Vitesse mécanique de rotor
m	Inductance mutuelle maximale au stator
ω_s	Vitesse électrique de rotor
$v_d \ v_q$	Tensions dans le référentiel (dq)
$\varphi_d \ \varphi_q$	Flux dans le référentiel (dq0)
I_{dq}	Courants dans le référentiel (dq0)
$i_d \ i_q$	Courants dans le référentiel (dq)
$L_d \ L_q$	Inductances mutuelles cycliques directe, quadrature
R_s	Résistance d'une phase statorique
L_{aa}, L_{bb}, L_{cc}	Inductances propres des phases statoriques
m_{ab}, m_{ba}, m_{ac}	Inductances mutuelles entre phases statoriques
C_{em}	Couple électromagnétique
J	Inertie totale des parties tournantes

C_r	Couple résistant
f	Coefficient de frottement visqueux
$[P(\theta)], [P(\theta)]^{-1}$	Matrices de passage directe et inverse
R	Charge résistive
L	Inductance de filtre
C	Capacité de filtre
I_c	Courant capacitif
I_{red}	Courant à la sortie de redresseur
V_{DC}	Tension continu à la sortie de filtre LC
V_{eff}	Tension efficace
V_{red}	Tension à sortie de redresseur
$F(p)$	Fonctionne de transfert
V_{max}	Tension redresser maximal
V_{min}	Tension redresser minimal
V_{redMoy}	Tension moyen à sortie de redresseur

Chapitre III

L	Langueur de tige m
	Masse de tige
M	Masse de charge
P	Force poids de charge
l	Distance entre l'axe de rotation et la droite d'action
F_R	Force résistante
l_R	Distance entre l'axe de rotation et la droite d'action résistante
l_M	Distance entre l'axe de rotation et la droite d'action motrice
F_M	Force motrice
M_F	Moment de force
δ	Avantage mécanique
$3D$	Vue de trois dimentions
$2D$	Vue de deux dimentions

Chapitre IV

r_1	Rapport de multiplication des engrenages
r_2	Rapport de multiplication des poulies
Z_p	Nombres dents de pignon
Z_e	Nombres dents de roue
d_1	Diamètre de la poulie menée
d_2	Diamètre de la poulie menante

Liste des figures

Liste des figures du chapitre I

<i>Figure. I.1</i> Différentes zone de mouvement d'eau.....	04
<i>Figure. I.2</i> Caractéristiques de la houle.....	04
<i>Figure. I.3</i> Principe de conversion de l'énergie houlomotrice.....	04
<i>Figure. I.4</i> Les 4 familles des systèmes houlomoteurs bords à quai.....	06
<i>Figure. I.5</i> Dispositifs à franchissement : exemples de projets.....	07
<i>Figure. I.6</i> Dispositif de type batteur inversé devant une digue verticale.....	08
<i>Figure. I.7</i> Dispositifs de type batteur inversé	08
<i>Figure. I.8</i> Dispositifs oscillants flottants.....	09
<i>Figure. I.9</i> Dispositifs oscillants flottants	10
<i>Figure. I.10</i> Colonne d'eau oscillante.....	10
<i>Figure. I.11</i> Caractéristiques principales OWC	11
<i>Figure. I.12</i> OWC intégrées à une structure portuaire	11

Liste des figures du chapitre II

<i>Figure. II.1</i> Représentation de la chaine de production.....	13
<i>Figure. II.2</i> Représentation de la MSAP dans le repère abc.....	15
<i>Figure. II.3</i> Représentation de la transformation	18
<i>Figure. II.4</i> Schéma bloc d'une MSAP.....	20
<i>Figure. II.5</i> Redresseur triphasé à diode.....	20
<i>Figure. II.6</i> Représentations du filtre LC.....	21
<i>Figure. II.7</i> Blocs de simulation power système.....	24
<i>Figure. II.8</i> Courbes de simulation de l'énergie.....	27

Liste des figures du chapitre III

<i>Figure. III.1</i> Dispositifs oscillants flottants.....	28
<i>Figure. III.2</i> Tige maintenue par un moteur.....	29
<i>Figure. II.3</i> Forces appliquées sur le bas manipulateur.....	29
<i>Figure. III.4</i> Vue 3D de la chaine mécanique.....	30
<i>Figure. III.5</i> Vue 3D de la MSAP multipolaire	31
<i>Figure. III.6</i> Vue 3D du rotor de la MSAP.....	31
<i>Figure. III.7</i> Vue 3D du stator.....	32
<i>Figure. III.8</i> Présentation du rotor en format mise en plan.....	33
<i>Figure. III.9</i> Présentation du stator en format mise en plan.....	34
<i>Figure. III.10</i> Vue 3D du différentiel.....	35
<i>Figure. III.11</i> Présentation du différentiel en format mise en plan.....	36
<i>Figure. III.12</i> Vue 3D de modèle d'engrenage.....	37
<i>Figure. III.13</i> Vue 3D de l'ensemble arbre machine, accouplement et supports.....	37

<i>Figure. III.14</i> Présentation du l'ensemble en format mise en plan.....	38
<i>Figure. III.15</i> Vue 3D du flotteur.....	39
<i>Figure. III.16</i> Présentation du flotteur format mise en plan.....	40

Liste des figures du chapitre IV

<i>Figure. IV.1</i> Vue du différentiel réalisé	43
<i>Figure. IV.2</i> Vue de l'ensemble arbre machine, accouplement, poulie réalisé.....	44
<i>Figure. IV.3</i> Vue du support de fixation de stator réalisé	45
<i>Figure. IV.4</i> Vue du système de multiplicateur de vitesse	45
<i>Figure. IV.5</i> Vue du flotteur de multiplicateur de vitesse	46
<i>Figure. IV.6</i> Vue de l'accouplement des bras manipulateur au différentiel.....	47
<i>Figure. IV.7</i> Vue de l'accouplement de l'extrémité des bras manipulateur au flotteur....	47
<i>Figure. IV.8</i> Vue des bras manipulateur réalisé.....	48
<i>Figure. IV.9</i> Vue de bras limiteur de mouvement	48
<i>Figure. IV.10</i> Vue la machine utilisée.....	49
<i>Figure. IV.11</i> Redresseur pd3 utilisé.....	50
<i>Figure. IV.12</i> Vue de prototype	50
<i>Figure. IV.13</i> Port de pêche de Bejaia.....	51
<i>Figure. IV.14</i> Eclairage en faveur des pêcheurs.....	51
<i>Figure. IV.15</i> Station de recharge des batteries.....	51
<i>Figure. IV.16</i> Système hybride.....	52

Liste des tableaux

<i>Tableau. I.1</i> Extrait de la table de prévision les hauteurs du vague à Bejaia.....	05
<i>Tableau. I.2</i> Installations des systèmes houlomoteurs bords à quai dans le monde.....	06
<i>Tableau II.1</i> Différents mode fonctionnement de la machine.....	23
<i>Tableau II.2</i> Schémas de simulation des profile de couple.....	25
<i>Tableau II.3</i> Schémas de simulation de la vitesse de rotor de chaque mode	26

Sommaire

Introduction générale	01
-----------------------------	----

CHAPITRE I : État de l'art sur les systèmes de conversion d'énergies des vagues

I.1 Introduction.....	03
I.2 Energie houlomotrice.....	03
I.3 Structure générale d'un système de conversion d'énergie de vague.....	04
I.4 Prévission des vagues à Bejaia.....	05
I.5 Systèmes houlomoteur bord à quai	05
I.5.1 Différents systèmes de récupération de l'énergie de la houle bord à quai.....	05
I.5.2 Prototypes de réalisation.....	06
I.5.3 Différents concepts.....	07
I.6 Avantages et inconvénients d'énergie des vagues.....	12
I.7 Conclusion.....	13

CHAPITRE II : Modélisation et simulation des différentes parties de la chaîne de production

II.1 Introduction.....	13
II.2 Présentation de chaîne de production à base des vagues	13
II.3 Modélisations de la MSAP	13
II.3.1 Hypothèses simplificatrices.....	14
II.3.2 Mise en équations de la MSAP dans le repère réel (abc).....	15
II.3.3 Transformation dans le repère (abc) vers le repère (dq).....	17
II.3.4 Schéma bloc de la MSAP.....	19
II.4 Modélisation de redresseur.....	20
II.5 Modélisation du filtre.....	21
II.6 Simulation de la chaîne de conversion.....	22
II.6.1 Simulation choix de couple	22
II.6.2 Blocs des simulations des différents modes.....	23
II.6.3 Résultats de simulation	25
II.7 Conclusion.....	27

CHAPITRE III : Conception des différentes parties mécanique de la chaîne de production

III.1 Introduction.....	28
III.2 Cahier des charges.....	28
III.2.1 Problématique	29
III.2.2 Approche	29
III.3 Calculs du moment de force nécessaire pour le bras manipulateur.....	29
III.4 Logiciel SolidWorks version 2016.....	30
III.5 Composant de la chaîne de production.....	30
III.5.1 Présentation de la chaîne de production	30
III.5.2 Présentation et mesures des entités de la machine électrique utilisée.....	31
III.5.3 Présentation et mesures des entités de différentiel.....	35
III.5.4 Présentation et mesures des entités de l'ensemble.....	37

III.5.5 Présentation et mesures des entités de flotteur.....	39
III.6 Conclusion.....	41

CHAPITRE IV : Réalisation d'un banc d'essai pratique

IV.1 Introduction.....	42
IV.2 Réalisation.....	42
IV.2.1 Différentiel.....	42
IV.2.2 Réalisation de l'ensemble arbre machine, accouplement et poulie.....	44
IV.2.3 Support de fixation du stator.....	45
IV.2.4. Multiplicateur de vitesse.....	45
IV.2.5 Flotteur.....	46
IV.2.6 bras manipulateur.....	47
IV.2.7 Bras limiteur de mouvement.....	48
IV.3 Partie électrique.....	49
IV.3.1 génératrice.....	49
IV.3.2 Redresseur PD3 (à diode).....	49
IV.4 Construction de prototype.....	50
IV.5 Domaines d'applications de notre mécanisme.....	51
IV.6 Conclusion.....	52
Conclusion générale.....	53
Bibliographie.....	54

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

L'énergie hydraulique est l'énergie générée par le mouvement de l'eau. La production de l'électricité à partir de la force de l'eau est une technique très ancienne et il existe différents types d'installations hydrauliques : les centrales marémotrices qui utilisent le mouvement des marées pour faire tourner des turbines, les centrales hydroélectriques qui utilisent l'énergie des cours d'eau, les hydroliennes qui se servent de l'énergie des courants marins, et l'énergie houlomotrice qui utilise l'énergie des vagues [1].

Récupérer l'énergie de la houle est une idée ancienne. Le premier brevet relatif à cette idée provient des frères Girard et date de 1799. Plus récemment, la crise pétrolière de 1973, a relancé cette idée et les premiers systèmes réalistes destinés à récupérer cette énergie sont nés. L'intérêt et d'exploiter une ressource forte renouvelable qui celle des énergies des houles possèdent des rendements théoriques supérieurs à l'éolien [2].

De nombreuses idées ont déjà été mises en cadre de recherche et beaucoup de travaux d'études et d'essais ont déjà été réalisés dans l'espoir de domestiquer l'énergie des vagues pour cela plusieurs systèmes récupérateurs de l'énergie des vagues sont en cours d'étude et de développement.

C'est dans ce contexte que nous avons fixé notre objectif c'est celui de proposer un nouveau prototype qui permet de récupérer d'énergie de la houle, ensuite réaliser ce prototype et finalement nous montrons un banc d'essai.

Pour une meilleure présentation de notre travail, ce mémoire sera organisé en quatre chapitres :

Le premier chapitre sera consacré à l'état de l'art sur les systèmes de conversion d'énergies des vagues, nous délivrerons la confusion entre une vague et une houle ainsi que leurs spécifiques énergétiques et une prévision des vagues à Bejaia. Aussi nous présenterons la composition d'un système de transformation de l'énergie des vagues et les diverses représentations houlomoteurs, enfin nous finirons ce chapitre par certains privilèges et désagréments d'énergie houlomotrice.

Le deuxième chapitre sera dédié à la modélisation des différents éléments constituant de la chaîne de conversion, qui comprend deux sources d'énergie de natures différentes (holomoteur bord à quai), la machine synchrone à aimants permanents et les éléments d'électronique de puissance.

Le troisième chapitre, sera offert à la conception assistée par ordinateur des différents éléments mécaniques de la chaîne de production (flotteur, différentiel, poulie arbre machine, accouplement, support et la MSAP) sous le logiciel SOLIDWORKS.

En ce qui concerne le quatrième chapitre, on entamera la réalisation pratique d'un banc d'essai, il s'agit d'un prototype original de conversion suivi des essais de validation de modèle proposé dans le deuxième chapitre.

Enfin, on terminera par une conclusion générale et quelques perspectives.

CHAPITRE I

État de l'art sur les
systèmes de conversion
d'énergies des vagues

I.1 Introduction

Les vagues sont considérées comme l'une des sources d'énergie renouvelables les plus prometteuses. Elles représentent une formidable ressource vaste et fiable et plus puissante que le vent lui-même, vu la densité de l'eau par rapport à l'air.

Ce chapitre a pour objectif de présenter : en premier lieu nous allons expliquer la différence entre une vague et une houle ainsi que leurs caractéristiques énergétiques. En deuxième lieu nous allons présenter la structure générale d'un système de conversion de l'énergie des vagues et les différents concepts houlomotrices qui pourraient être envisagés seront abordés, enfin nous terminerons par quelques avantages et inconvénients d'énergie houlomotrice.

I.2 Energie houlomotrice

L'énergie houlomotrice (ou énergie des vagues) désigne la production d'énergie électrique à partir de la houle, c'est-à-dire à partir des vagues successives nées de l'effet du vent à la surface de la mer et parfois propagées sur de très longues distances.

➤ Vagues et Houle

La surface de la mer est animée de mouvements d'amplitude variable. Parmi ces mouvements, nous distinguons les vagues et la houle. La houle est un déplacement vertical de la surface de la masse d'eau qui résulte en un transfert d'énergie de vent à l'eau de la surface, cette oscillation est sinusoïdale régulière qui se propage dans la direction du vent. L'énergie du vent est transformée en énergies potentielle du fait du déplacement de l'eau autour de niveau moyen de la surface libre et également en énergie cinétique des particules d'eau qui vont suivre un mouvement orbital [3], comme illustrer sur la figure I.1.

La houle se caractérise par : comme le montre la figure I.2 [4].

- La longueur d'onde ;
- L'amplitude ;
- La période et la vitesse ;
- La hauteur des vagues dépend des facteurs et principalement de la force du vent ;
- La durée et de l'étendue sur laquelle le vent souffle.

La formation des vagues dépend [5] :

- de la vitesse du vent ;
- du temps pendant lequel il souffle ;
- de la distance sur laquelle il souffle.

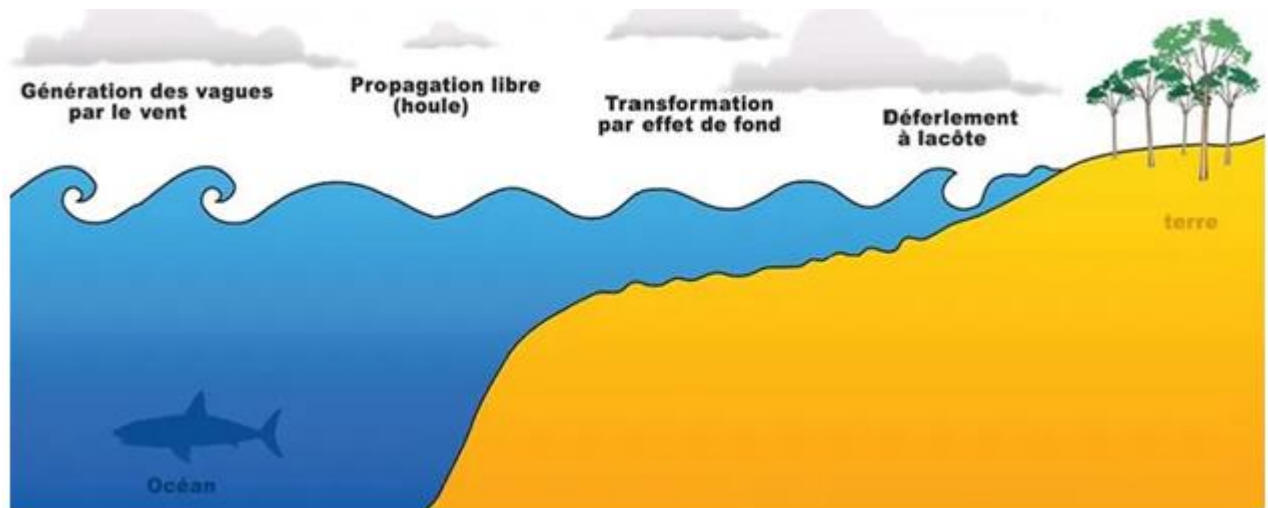


Figure I.1 Différentes zone de mouvement d'eau

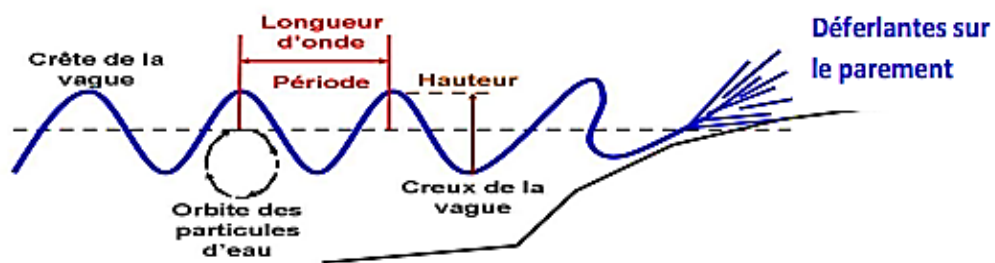


Figure I.2 Caractéristiques de la houle

I.3. Structure générale d'un système de conversion d'énergie de vague

L'énergie contenue dans le mouvement des vagues est capturée par de nombreux dispositifs de capture d'énergie de vague, comme l'énergie mécanique en surface (ondulations) ou sous l'eau (translations ou mouvements orbitaux), la capture des variations de pression au passage des vagues (variations de hauteur d'eau) ou encore la capture physique d'une masse d'eau (via un réservoir). L'énergie de mouvement d'eau est transformée en énergie mécanique de rotation. Puis, le couple présent sur l'arbre alimente un générateur électrique, qui se charge ensuite de fournir une énergie électrique via son bobinage statorique.

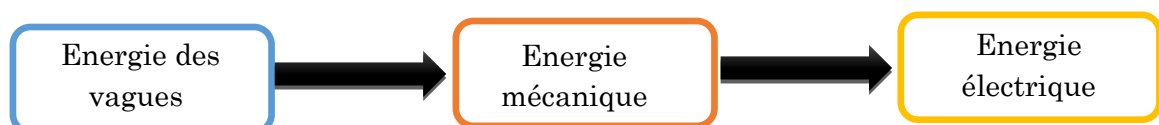


Figure I.3 Principe de conversion de l'énergie houlomotrice

I.4 Prédiction des vagues à Bejaia

Certains sites proposent des tableaux de prévisions maritimes, généralement destinés aux pêcheurs et aux Sociétés Nationales de Transport Maritime de Passagers, qui regroupent l'évolution de la mer pendant un certain temps (une semaine ou un mois), pour certains lieux dans le monde. Ainsi, le tableau de prévisions à 10 jours (3h), wilaya de bejaia en Algérie, peut être consulté sur [6]. On constate donc que le maximum mesuré est atteint le 1,7 m et le minimum est de 0,4 m. Un extrait des 3 jours du tableau donné sur Tableau I.1.

Tableau I.1 Extrait de la table de prévision à 3 jours pour les hauteurs du vague à Bejaia

	Sam				Dim				Lun			
	7h	13h	19h	22h	1h	4h	16h	22h	7h	13h	19h	22h
Moyenne De vent (Km/h)	22	21	12	13	12	9	4	8	6	8	4	4
Rafales (km/h)	40	35	16	15	12	10	7	7	6	8	5	5
Hauteur des vagues (m)	1.6	1.7	1.7	1.6	1.4	1.2	0.9	0.7	0.7	0.6	0.5	0.4
Période (s)	9	8	8	8	8	7	7	7	6	6	6	6

I.5 Systèmes houlomoteur bord à quai

Un système houlomoteur transforme l'énergie des vagues en énergie mécanique qui est elle-même convertie en énergie électrique. On distingue trois zones en mer pour installer un système : le large, la côte, « à quai ». Un système « à quai » apparaît différent des autres car il peut être considéré comme une activité « terrestre ». Comme les éoliennes terrestres (en comparaison des éoliennes offshore), les systèmes houlomoteurs « bord à quai » sont des systèmes plus faciles à installer et à maintenir que houlomoteur au large. Ils seront sans doute aussi rentables mais les puissances produites seront plus faibles [7].

I.5.1 Différents systèmes de récupération de l'énergie de la houle bord à quai

Il existe de nombreuses technologies pour récupérer l'énergie des vagues. Elles sont généralement classées en quatre familles (colonne d'eau oscillante, système à franchissements, batteurs oscillants, flotteurs). Leurs déclinaisons « bord à quai » sont présentées ci-dessous. L'énergie des vagues est globalement plus faible « bord à quai » car les zones sont moins profondes [7].

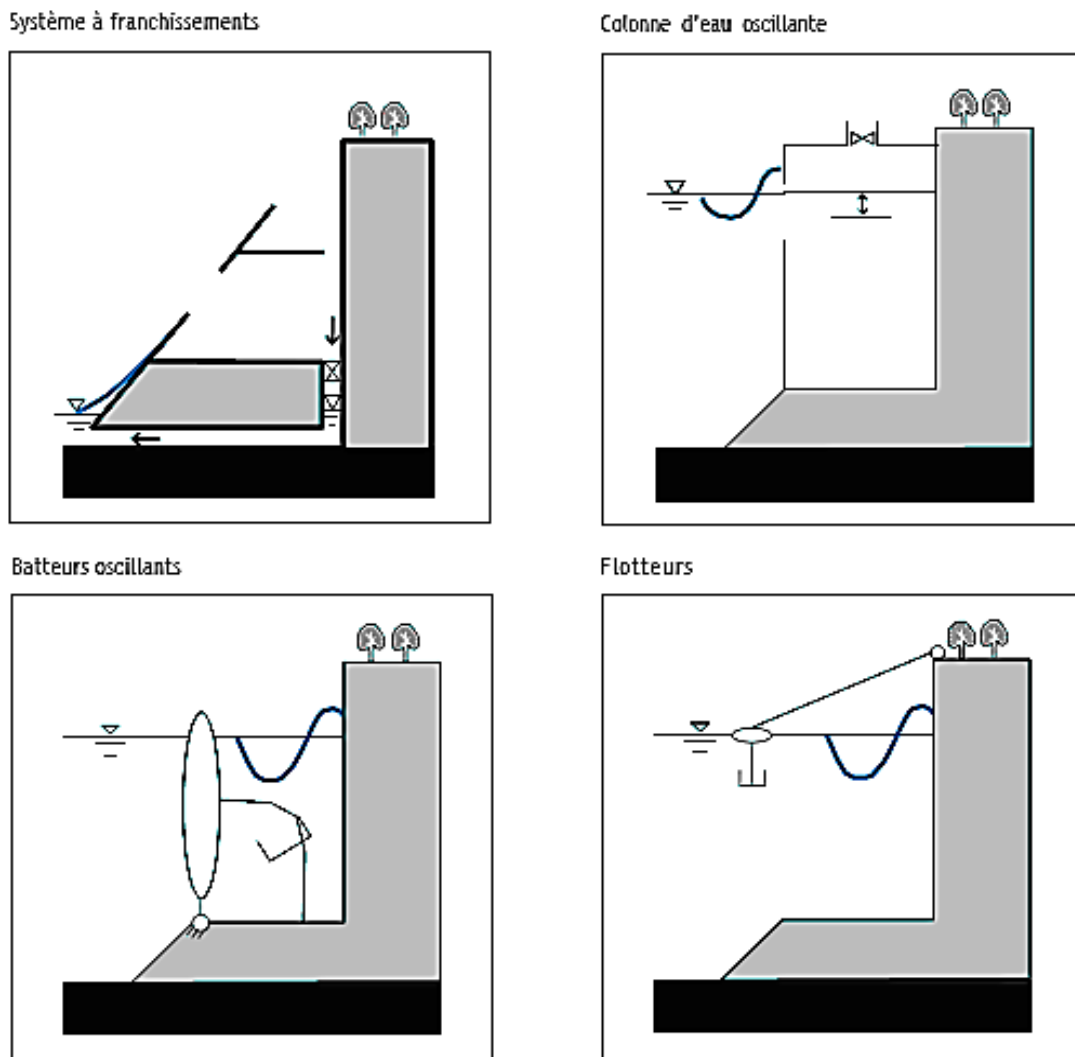


Figure I.4 Les 4 familles des systèmes houlomoteurs bords à quai

I.5.2 Prototypes de réalisation

Les réalisations dans le monde sont principalement des colonnes d'eau oscillante ou des flotteurs. Il faut noter que les premières réalisations, Pico et Limpet notamment, sont désormais arrêtées. Malgré tout, le tableau ci-dessous montre que l'intérêt est grandissant même si les puissances affichées restent encore modestes [7].

Tableau I.2. Installations des systèmes houlomoteurs bords à quai dans le monde

Projet	Pays	Localisation	Mise en fonction	Puissance Max	Classe	Toujours en opération
Pico	PT	Açores	1992	400kW	OWC	Non
Limpet	UK	Islay	2000	500kW	OWC	Non
Wavestar	DK	Hanstholm	2009	600kW	PA	Oui
Mutriku	SP	Mutriku	2011	300kW	OWC	Oui
Pecem	BR	Pecem	2012	50kW	PA	Oui
EcoWavePower	UK	Gibraltar	2016	100kW	PA	Oui

I.5.3 Différents concepts

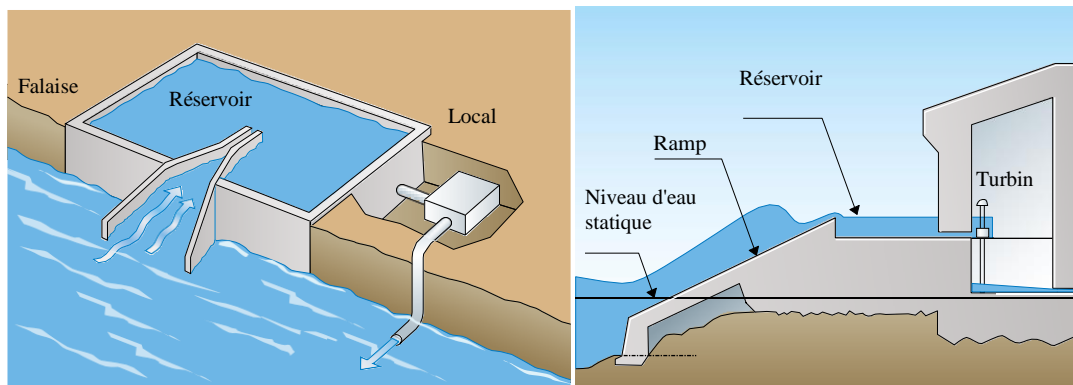
I.5.3.a Dispositifs à franchissement

Le système à franchissement consiste à capturer dans un réservoir les volumes d'eau de vagues lorsque celles-ci déferlent et franchissent par effet de « Run-up » le parement amont d'une digue présentant une plage inclinée face aux vagues incidentes. Les volumes d'eau stockés dans le réservoir représentent une énergie potentielle, ils sont ensuite turbinés par une turbine basse chute (faible charge) couplée à un générateur électrique [7].

➤ Prototypes de réalisation

Les projets les plus significatifs de dispositifs à franchissement sont mentionnés ci-après, et illustrés en figure I.5.

- Le dispositif Tapchan (350kW) a été installé sur une île norvégienne en 1985, comme le montre les schémas de la figure I.5, ce dispositif est équipé d'un collecteur. Ce prototype a été détruit par une très violente tempête en 1991.
- Le prototype de système à déferlement OBREC (Overtopping Break water For Energy Conversion) [8] est installé dans le port de Naples depuis janvier 2016, avec une puissance installée de 2,5 kW.



Tapchan prototype

OBREC Prototype

Figure I.5 Dispositifs à franchissement : exemples de projets [7]

I.5.3.b Dispositifs de type « batteur inversé »

Pour récupérer l'énergie des vagues, Falnes et Budal (1978) ont insisté sur le fait qu'un bon amortisseur de vagues devrait pouvoir être un bon générateur de vagues si utilisé à l'inverse, c'est ce concept qui a motivé les études des dispositifs de type « batteur inversé ». Les batteurs inversés fonctionnent comme un amortisseur de l'énergie des vagues en récupérant l'énergie de cavement/tangage du mouvement d'un piston ou

d'un volet (figure I.6). Ce mouvement est ensuite converti en énergie électrique avec un système de PTO hydraulique ou électrique [7].

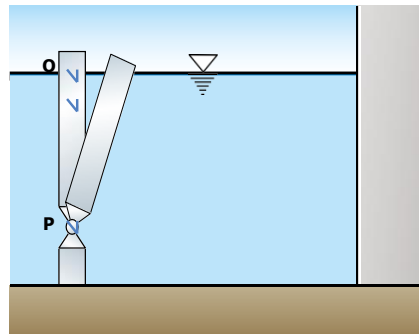
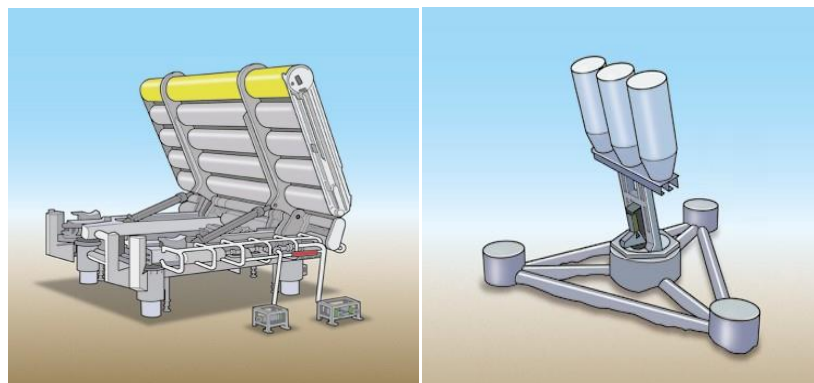


Figure I.6 Dispositif de type batteur inversé devant une digue verticale

➤ Prototypes de projets

Le système OYSTER a été développé par le Queen's University Belfast (université britannique) pour récupérer l'énergie des vagues dans des profondeurs de 10 à 15 m. Le premier prototype, l'Oyster 1 (315 kW), a été installé sur la côte de l'Écosse, en novembre 2009 à la suite de séries de tests en laboratoire. Depuis cette première installation, une autre série de tests a été effectuée pour améliorer l'efficacité de l'Oyster 1 pour produire l'Oyster 2 [9].

- Le dispositif bioWAVE a été créé par la société BioPower systems en Australie. La forme du dispositif est inspirée de la biologie, avec une forme inspirée d'une plante avec plusieurs ailes (figure I.7). Le BioWave a été créé pour un fonctionnement optimal pour une profondeur de 35 à 45 m, et il est censé avoir une haute efficacité. Il existe plusieurs sites potentiels pour des projets d'installation des dispositifs bioWAVE, et le premier projet de démonstration de 250 kW a été installé fin 2015 en Australie [7].



Oyster

Bio Wave

Figure I.7 Dispositifs de type batteur inversé [10]

I.5.3.c Dispositifs de type flotteur oscillant

Dans le cadre d'une installation combinée avec une digue, des dispositifs houlomoteurs de type bouées pilonnant ou flotteurs fonctionnant en tangage peuvent être envisagés, comme le montre le schéma de principe ci-dessous (figure I.8).

Le mouvement du flotteur peut être utilisé pour actionner une pompe et mettre sous pression un fluide hydraulique pour faire tourner un moteur hydraulique entraînant lui-même un alternateur. Il peut également être envisagé d'utiliser directement le déplacement du flotteur pour entraîner un alternateur [7].

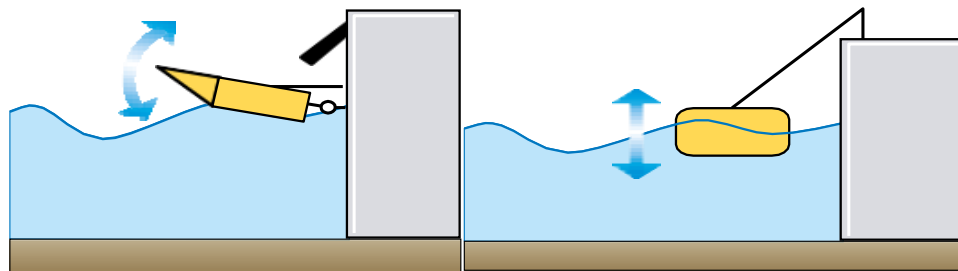
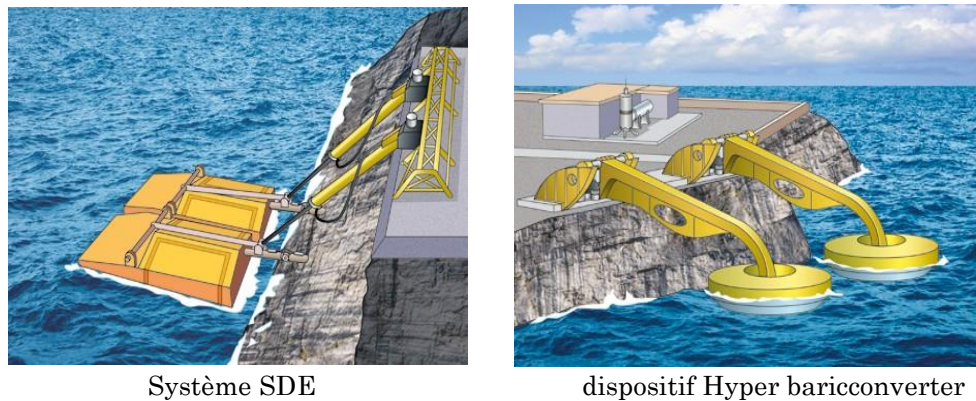


Figure I.8. Dispositifs oscillants flottants

➤ Prototypes de réalisation

- Le système SDE (figure I.9) développé par la société israélienne SDE Ltd est constitué de deux plateaux flottants, lesquels se soulèvent à l'arrivée d'une vague et s'abaissent lorsque l'eau se retire. Ce dispositif utilise l'énergie cinétique et potentielle des vagues pour générer de la pression hydraulique qui est ensuite transformée en électricité. Un système de 40 kW fonctionne en Israël, et un groupe de trois unités a été installé à Gibraltar en 2016 [7].
- Le système « hyper bariconverter » dont un prototype a été installé dans le port de Pecem au Brésil. Ce système est constitué de plusieurs unités pilonnant, le mouvement de pilonnement des corps flottants actionne des pompes qui permettent de faire circuler l'eau d'un circuit fermé jusqu'à un accumulateur hydropneumatique relié à une chambre hyperbare préalablement pressurisée. Le flux pressurisé sortant de l'accumulateur actionne une turbine reliée à un générateur électrique [7].



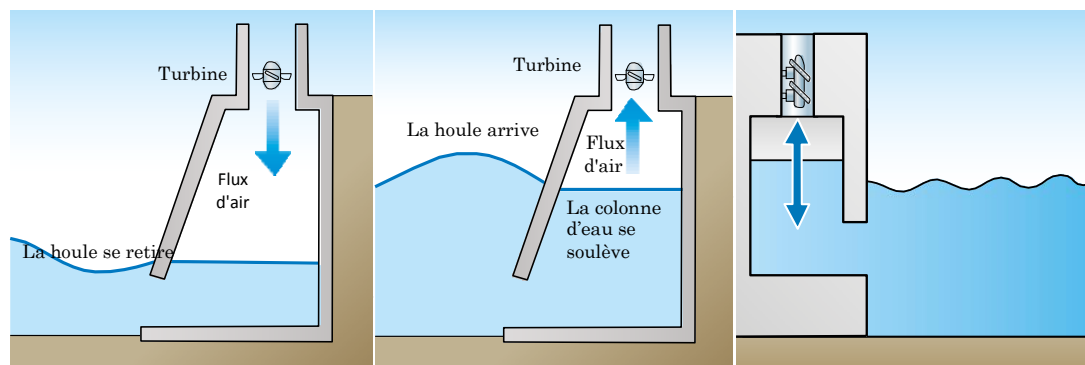
Système SDE

dispositif Hyper baricconverter

Figure I.9 Dispositifs oscillants flottants [11]

I.5.3.d Dispositifs de type colonne d'eau oscillante (OWC)

Les dispositifs de type OWC (Oscillating Water Columns) comptent parmi les dispositifs les plus étudiés, notamment du fait de la simplicité de cette technologie [7].

**Figure I.10** Colonne d'eau oscillante

Les OWC sont des technologies soit fixes soit flottantes et l'on s'intéressera dans le cadre du projet EMACOP, uniquement aux OWC fixes, isolées ou intégrées à une digue. Une OWC comprend une cavité remplie d'eau de mer, ouverte au fond et communiquant avec l'extérieur. Les mouvements oscillants de la surface libre interne engendrés par les vagues incidentes créent un flux d'air à travers une turbine qui pilote un générateur électrique.

➤ OWC fixes, isolées

Les OWC de LIMPET et Pico sont équipées de turbines de type WELLS. Les principales caractéristiques de ces deux OWC, ainsi que les données de performances énergétiques issues de l'étude du Carbon Trust (2005) sont présentées en figure I.11.

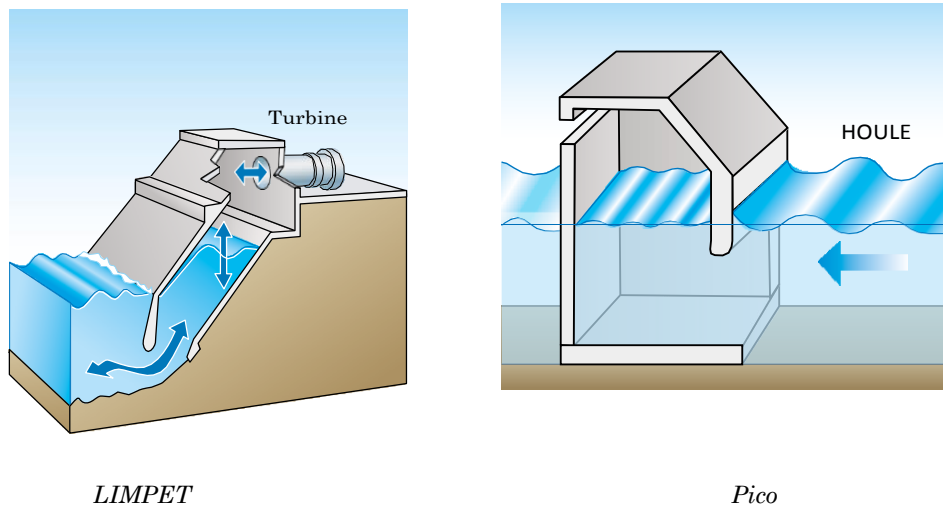


Figure I.11 Caractéristiques principales OWC [12]

➤ **OWC intégrées à une structure de type digue**

Parmi les projets d'OWC fixes, on peut citer quelques projets d'OWC intégrées à des digues [13] :

- L'OWC installée dans le port de Sakata au Japon, en 1990. Le projet d'OWC à 5 chambres a été construit mais, après une période de test, 3 chambres seulement ont été utilisées pour la production d'énergie.
- Plus récemment, une OWC intégrée à une digue a été construite à Mutriku, dans le Pays Basque espagnol. Elle comprend 16 chambres et est équipée de 16 turbines WELLS de 18,5 kW [14];
- Un autre type d'OWC intégré à une digue a été proposé par Boccotti (2007), avec une section d'OWC. Une OWC de ce type est actuellement en cours de construction dans le port de Civitavecchia en Italie, avec 17 caissons et 136 OWC. Ce type de conception permettrait d'obtenir de meilleurs rendements que les OWC conventionnelles.

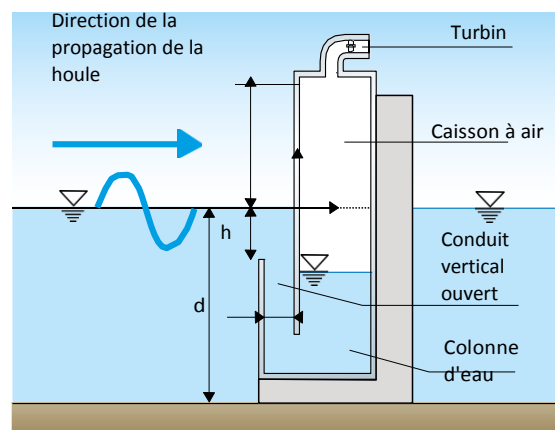


Figure I.12 OWC intégrées à une structure portuaire [15]

I.6 Avantages et inconvénients d'énergie des vagues

➤ Avantages :

- **respectueuse de l'environnement** : l'énergie des vagues n'émet pas de gaz à effet de serre lorsqu'elle est générée, contrairement aux combustibles fossiles;
- **Source d'énergie renouvelable** : Comme toutes les sources d'énergie alternatives, l'énergie des vagues est renouvelable;
- **Source d'énergie fiable**: Les vagues sont à peine interrompues et presque toujours en mouvement. Cela fait de la production d'électricité à partir de l'énergie des vagues une source d'énergie plus fiable que l'énergie éolienne, car le vent ne souffle pas constamment. Cependant, la quantité d'énergie transportée par les vagues varie chaque année et d'une saison à l'autre;
- **Potentiel énergétique énorme**: La quantité d'énergie cinétique exercée dans une vague est énorme;
- **Moins de dépendance aux combustibles fossiles**: La dépendance aux combustibles fossiles peut être réduite si l'énergie des vagues est extraite jusqu'à son maximum. Cela contribuera à réduire la pollution de l'air et fournira également des emplois verts à des millions de personnes.

➤ Inconvénients :

- **Effets environnementaux**: Étant donné que l'énergie des vagues est encore en développement, principalement dans le cadre de la recherche, il n'existe aucune mesure des impacts environnementaux des centrales électriques à grande échelle sur le rivage. L'implantation de plantes directement sur la plage pourrait être nuisibles car elles seraient inesthétiques et pourraient causer des dommages à la vie marine et aux écosystèmes environnants. Les zones de pêche locales pourraient également être affectées, ou les plantes pourraient provoquer davantage de corrosion côtière;
- **Très cher**: L'énergie houlomotrice est une technologie énergétique aux premiers stades de développement. Actuellement, les prix de l'énergie des vagues sont généralement très élevés car ils sont en phase de recherche de développement, mais les prix peuvent baisser à l'avenir;
- **Coûts de maintenance élevés**: La maintenance de ces centrales est estimée très coûteuse car elles seront immergées dans de l'eau salée en mouvement constant.
- Le mouvement constant peut conduire à plus de rupture. Les centrales houlomotrices auront très probablement besoin d'un entretien régulier et coûteux.

I.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la différence entre une houle et une vague et caractéristiques énergétiques. Nous avons couvert une structure générale d'un système de conversion de l'énergie des vagues nous avons terminé avec quelques avantages et inconvénients de l'énergie des vagues. Il a été démontré que pour capter cette énergie, il existait des dizaines de prototypes actuellement utilisés ou en développement où on a présenté succinctement les différents concepts houlomoteurs qui pourraient être envisagés pour une installation en zone côtière ou portuaire dans le cadre d'un couplage avec un ouvrage porteur de type digue. Le chapitre suivant sera consacré à la modélisation des différentes parties de la chaîne de production

CHAPITRE II

Modélisation et simulation
des différentes parties de la
chaîne de production

II.1 Introduction

La modélisation de la chaîne de conversion d'énergie des vagues consiste à donner une représentation de l'ensemble de ses éléments.

Dans ce chapitre, une modélisation des différents constituants de la chaîne de conversion d'énergie des vagues basée sur une machine synchrone à aimants permanents (MSAP) sera détaillée.

L'environnement MATLAB/Simulink/Simpower a retenu notre intérêt de part, la richesse de ses outils de développement et de vérification. L'approche de modélisation et de simulation adoptée est réalisée sous cet environnement en exploitant les différents outils existants.

II.2 Présentation de chaîne de production à base des vagues

La chaîne de production comporte deux parties mécanique et électrique la partie électrique contient une MSAP, un redresseur AC/DC tout diode, charge résistive R , la partie mécanique compose de trois éléments principaux, flotteur, différentiel et le multiplicateur de vitesse

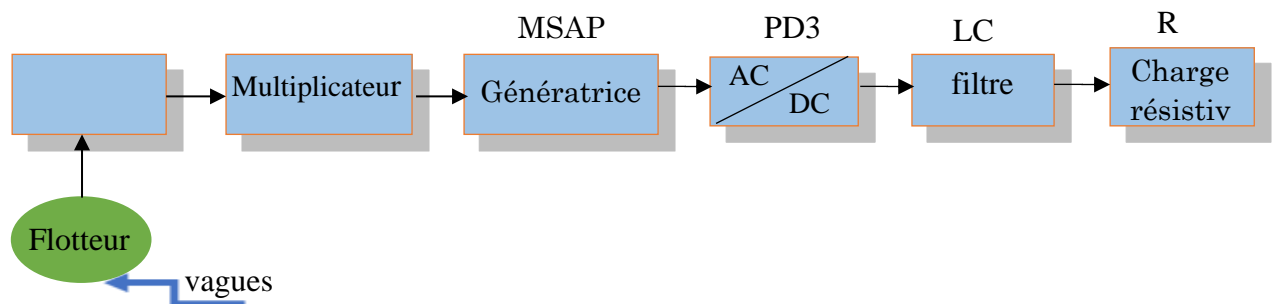


Figure II.1 Représentation de la chaîne de production

II.3 Modélisations de la MSAP

Avec l'avènement des matériaux à aimants permanents de haute énergie et les progrès réalisés dans le domaine de l'électronique de puissance, les machines synchrones à aimants permanents (MSAP) ont connu ces dernières années un grand essor. Elles ont été adoptées dans de nombreuses applications de hautes performances telles que la robotique, l'aérospatiale, les outils électriques, la production des sources d'énergie renouvelables, les divers équipements médicaux, les véhicules électriques etc. Pour toutes ces applications, les MSAP sont parfois préférables aux autres machines traditionnelles. A titre d'illustration, quelques avantages et inconvénients des MSAP [16], sont cités ci-dessous:

➤ **Avantages**

On citera quelques avantages principaux comme :

- Moins de pertes de cuivre (absence d'enroulement au rotor), d'où le rendement de la machine est amélioré;
- Une faible inertie et un couple massique élevé ;
- L'absence des balais-collecteur et des balais-bagues simplifie la construction et l'entretien ;
- Fonctionnement à très haute vitesse.

➤ **Inconvénients**

- Cout élevé à cause des aimants à terres rares ;
- Impossibilité de régler l'excitation ;
- Pour atteindre des vitesses élevées, il est nécessaire d'augmenter le courant statorique pour démagnétiser la machine. Ceci entraînera inévitablement une augmentation des pertes statoriques par effet Joule les pertes par courant de Foucault et les pertes par hystérésis.

II.3.1 Hypothèses simplificatrices

L'étude de tout système électrique nécessite une modélisation. Ce qui nous permet d'étudier le comportement de ce système face aux différentes sollicitations et comprendre ainsi les mécanismes régissant son fonctionnement. La modélisation de la MSAP fait l'objet de nombreuses études en moyenne et grande puissances. La mise sous forme d'un modèle mathématique d'une MSAP facilite largement son étude. Les phénomènes physiques inhérents au fonctionnement du système peuvent être partiellement ou totalement pris en compte dans un modèle. Ils découlent plusieurs niveaux de modélisation liés aux hypothèses simplificatrices associées. Plus le nombre des hypothèses est grand, plus le modèle nous permet à une étude et une exploitation plus aisée même si l'on affecte la précision du modèle.

Ces simplifications proviennent des propriétés des machines à courants alternatifs. Pour cela, on suppose que [17] :

- Le circuit magnétique de la machine est non saturé ;
- Répartition sinusoïdale de la f.e.m ;
- l'effet de la température sur les résistances est négligé ;
- L'hystérésis et les courants de Foucault sont négligés;

- L'effet de peau qui augmente les résistances et réduit les inductances est négligé ;
- L'effet d'encoche est négligé.

II.3.2 Mise en équations de la MSAP dans le repère réel (abc)

La MSAP comporte, au stator, un enroulement triphasé représenté par les trois axes (a, b, c) déphasés, l'un par rapport à l'autre, de 120° électrique et au rotor des aimants permanents assurant son excitation.

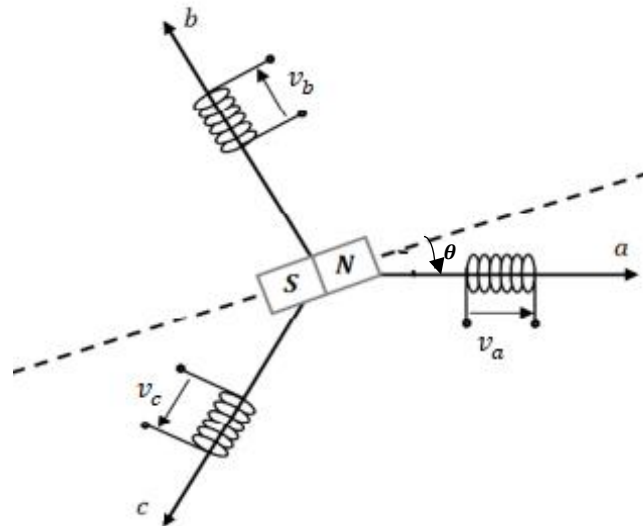


Figure II.2 Représentation de la MSAP dans le repère abc

Dans le cadre des hypothèses simplificatrices et pour une machine équilibrée les équations de la machine s'écrivent comme suit :

II.3.2.a Équations Électriques

Les équations électriques par phase de la machine s'écrivent comme suit:

$$\begin{cases} v_a = R_s i_a + \frac{d\varphi_a}{dt} \\ v_b = R_s i_b + \frac{d\varphi_b}{dt} \\ v_c = R_s i_c + \frac{d\varphi_c}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

Avec: v_a, v_b, v_c : Tensions appliquées aux trois phases statoriques ; i_a, i_b, i_c : Courants statoriques ; $\varphi_a, \varphi_b, \varphi_c$: Flux totaux d'enroulement statorique ; R_s : Résistance d'une phase statorique.

Le système d'équations (II.1) s'écrit sous la forme matricielle :

$$[v_{a,b,c}] = [R_s][i_{abc}] + \frac{d}{dt}[\varphi_{abc}] \quad (\text{II.2})$$

II.3.2.b Équations magnétiques

Les relations entre flux et courants s'écrivent comme suit :

$$\begin{cases} \varphi_a = L_{aa}i_a + m_{ab}i_b + m_{ac}i_c + \varphi_{APa} \\ \varphi_b = m_{ba}i_a + L_{bb}i_b + m_{bc}i_c + \varphi_{APb} \\ \varphi_c = m_{ca}i_a + m_{cb}i_b + L_{cc}i_c + \varphi_{APc} \end{cases} \quad (\text{II.3})$$

Sous la forme matricielle, on a :

$$[\varphi_{abc}] = [L_s][i_{abc}] + [\varphi_{APabc}] \quad (\text{II.4})$$

Avec :

$$L_s = \begin{bmatrix} L_{aa} & m_{ab} & m_{ac} \\ m_{ba} & L_{bb} & m_{bc} \\ m_{ca} & m_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix}$$

Les flux dû aux aimants permanents avec la position du rotor:

$$\begin{cases} \varphi_{APa} = \varphi_{AP} \cos(\theta) \\ \varphi_{APb} = \varphi_{AP} \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \varphi_{APc} = \varphi_{AP} \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (\text{II.5})$$

Sous la forme matricielle, on a :

$$\varphi_{APabc} = \varphi_{AP} \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (\text{II.6})$$

En désignant par : $[L_s]$: Matrice d'inductance du stator variable avec la position du rotor ;

$[\varphi_{APabc}]$: Matrice du flux dû aux aimants permanents ; L_{aa} , L_{bb} et L_{cc} Inductances propres des phases statoriques ; m : Inductance maximale mutuelle entre les phases statoriques.

θ : est la position électrique de rotor définit par : $\theta(t) = \int_0^t p\Omega_r dt$ et $\omega_s = p\Omega_r$ et Ω_r, ω_s :

Vitesses de rotor mécanique et électrique ; P : Nombre de pairs de pôles

II.3.2.c Équation mécanique

L'étude des caractéristiques de la MSAP fait introduire de la variation non seulement des paramètres électriques (tension, courant, flux) mais aussi des paramètres mécaniques (couple, vitesse). L'équation fondamentale de la mécanique est :

$$J \frac{d}{dt} \Omega_r = C_{em} - C_r - f\Omega_r \quad (\text{II.7})$$

Avec : C_{em} : Couple électromagnétique délivré par la machine ; J : Inertie totale des parties tournantes ; C_r : Couple résistant appliqué sur l'arbre de la machine ; f : Coefficient de frottement visqueux.

II.3.2.d Équation du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique s'exprime de la manière suivante :

$$C_{em} = p[i_{abc}]^t \left\{ \frac{1}{2} \frac{[L_s]}{d\theta} [i_{abc}] + \frac{d[\varphi_{APabc}]}{d\theta} \right\} \quad (\text{II.8})$$

II.3.3 Transformation dans le repère (abc) vers le repère (dq)

Les équations obtenues dans le repère (a, b, c) sont non –linéaires et couplées. Elles sont en fonctions de la position du rotor θ . Ceci fait apparaître des difficultés pour la résolution du système. Pour simplifier ce problème, la plupart des travaux dans la littérature font appel à l'utilisation de la transformation de Park. Cette transformation, appliquée aux variables réelles (tension, courant, flux), permet d'obtenir des variables fictives appelées les composantes d-q ou de Park, ce changement de repère rend les équations dynamiques de la machine plus simples ce qui facilite leur étude et leur analyse [18].

II.3.3.a Principe de transformation (dq)

La transformation de Concordia suivit par la rotation de Park est un outil mathématique qui consiste à transformer le système triphasé en système diphasé tournant. Ce passage mathématique transforme les trois bobines statoriques fixes déphasées de $2\pi/3$ en deux bobines fictives équivalentes déphasées de $\pi/2$ et situées sur le rotor. L'aimant se situe sur l'axe d [17].

Les variables et les paramètres sont alors représentés dans un référentiel à deux axes: l'axe direct (d) et l'axe en quadrature arrière (q) perpendiculaires. L'angle θ entre les deux repères est appelé angle de Park. La figure (II.3) montre le principe de la transformation.

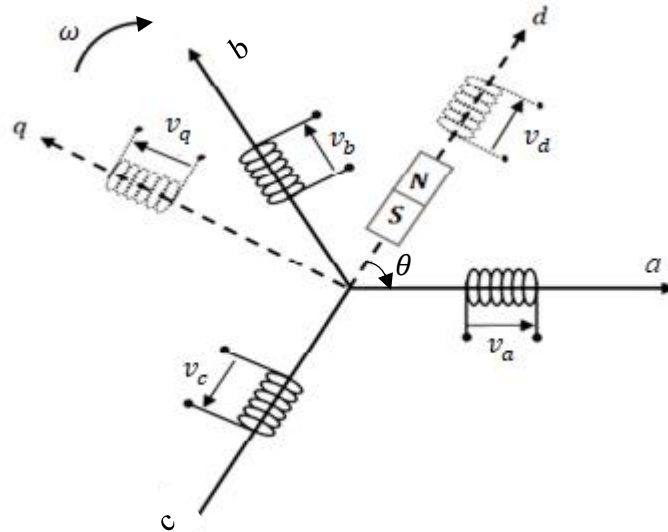


Figure II.3 Représentation de la transformation

La transformation de Park modifié est définie par :

Transformation de Park directe :

$$[X_{dq0}] = [P(\theta)][X_{abc}]$$

Sachant que $[P(\theta)]$ est la matrice de passage direct, qui est donnée par :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

Transformation de Park inverse:

$$[X_{abc}] = [P(\theta)]^{-1}[X_{dq0}]$$

Sachant que $[P(\theta)]^{-1}$ est la matrice de passage inverse.

II.3.3.b Equations de la tension et du flux dans le repère dq

Après la transformation dans le repère dq les équations de la tension et du flux se sont données, respectivement :

$$\begin{cases} v_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - L_q \omega_s i_q \\ v_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + L_d \omega_s i_d + \omega_s \sqrt{\frac{3}{2}} \varphi_{AP} \end{cases} \quad (\text{II.9})$$

Les équations peuvent maintenant être écrites sous la forme Cauchy d'un système d'équations différentielles :

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = \frac{1}{L_d}(v_d - R_s i_d + \omega_s L_q i_q) \\ \frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L_q}\left(v_q - R_s i_q - \omega_s L_d i_d - \omega_s \sqrt{\frac{3}{2}} \varphi_{AP}\right) \end{cases} \quad (\text{II.10})$$

Les équations de flux axes directe et en quadrature sont

$$\begin{cases} \varphi_d = L_d I_d + \varphi_{AP} \\ \varphi_q = L_q I_q \end{cases} \quad (\text{II.11})$$

II.3.3.c Équation mécanique dans le référentiel (dq)

L'équation de mouvement reste toujours la même que celle dans le repère (abc) finalement l'expression du couple développé par la machine s'écrit :

$$\frac{d\Omega_r}{dt} = \frac{1}{J} \left[P \left([(L_d - L_q) i_d i_q] + \sqrt{\frac{3}{2}} \varphi_{AP} i_q \right) - C_r - f \Omega_r \right] \quad (\text{II.12})$$

D'où

$$C_{em} = P \left(\underbrace{[(L_d - L_q) i_d i_q]}_{\text{Couple reluctant}} + \underbrace{\sqrt{\frac{3}{2}} \varphi_{AP} i_q}_{\text{Couple des AP}} \right)$$

II.3.4 Schéma bloc de la MSAP

D'après les équations (II.9) et (II.10) et en négligeant la composante homopolaire, on obtient le schéma bloc d'une MSAP, donnée dans la figure II.4.

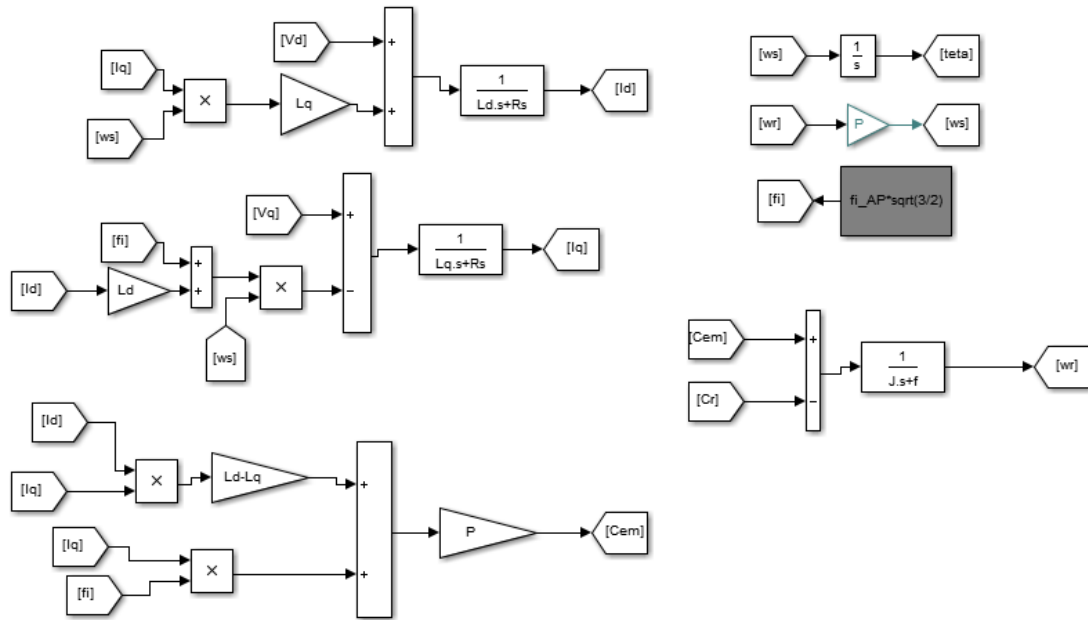


Figure II.4 Schéma bloc d'une MSAP

II.4 Modélisation de redresseur

Le schéma de principe d'un redresseur triphasé à double alternance à diode en pont de GRAETZ est illustré sur la figure II.5.

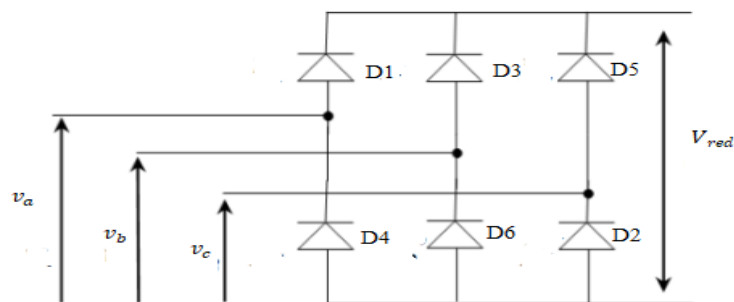


Figure II.5 Redresseur triphasé à diode

Les tensions v_a, v_b et v_c sont des tensions entre phases et neutre (tensions simples) de valeur efficace V_{eff} .

Les fonctions Max et Min assurent que parmi les diodes D1, D3 et D5, celle qui a la tension sur son anode la plus positive conduit et parmi les diodes D2, D4 et D6, celle qui a la tension sur sa cathode la plus négative conduit.

Supposons que nous avons le système triphasé suivant:

$$\begin{cases} v_a = V_{eff}\sqrt{2} \sin(\omega t) \\ v_b = V_{eff}\sqrt{2} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ v_c = V_{eff}\sqrt{2} \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (II.13)$$

La tension redressée repend aux équations suivantes pendant une période :

- $D_{1,3,5}$ passante si $v_{abc} = V_{max}(t)$
- $D_{2,6,4}$ passante si $v_{abc} = V_{min}(t)$

Ou V_{red} est définie comme suit :

$$V_{red} = Max(v_{abc}) - Min(v_{abc}) \quad (II.14)$$

La valeur moyenne de la tension redressée est donnée par :

$$V_{red Moy} = \left(\frac{3\sqrt{3}}{\pi}\right)V_{max} \quad (II.15)$$

II.5 Modélisation du filtre

La tension de sortie du redresseur présente des ondulations importantes, pour les minimiser, il est nécessaire d'insérer un filtre entre le pont redresseur et la charge. Le filtre est constitué d'une inductance (L) montée en série avec un condensateur parallèle (C) comme illustré sur la figure II.6 [19].

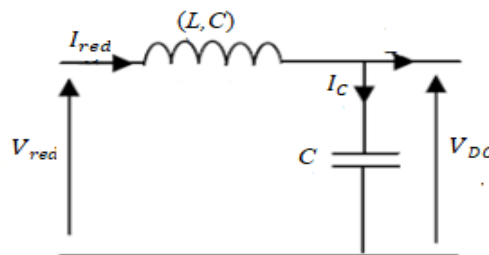


Figure II.6 Représentations du filtre LC

Les équations de filtre se sont données comme suit :

$$\frac{dI_{red}}{dt} = \frac{1}{L}(V_{red} - V_{DC} - RI_{red}) \quad (II.16)$$

$$\frac{dV_{DC}}{dt} = \frac{1}{C}I_c = \frac{1}{C}(I_{red} - I) \quad (II.17)$$

Où : R : Résistance interne de l'inductance L .

La fonction de transfert du filtre est donnée par la relation suivante :

$$F(p) = \frac{V_{DC}(p)}{V_{red}(p)} = \frac{1}{(LCp^2 + RC + 1)} \quad (\text{II.18})$$

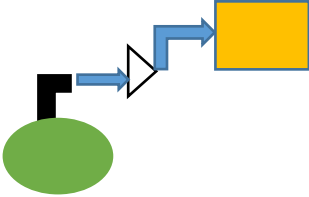
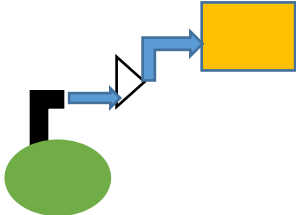
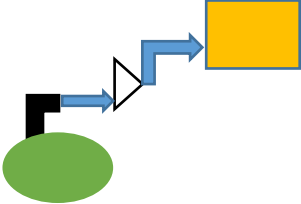
Sa pulsation est définie par la relation suivante :

$$\omega(p) = \sqrt{\frac{2}{LC} - \left(\frac{R}{L}\right)^2} \quad (\text{II.19})$$

II.6 Simulation de la chaîne de conversion

II.6.1 Simulation choix de couple : On distingue trois modes de fonctionnement afin de démontrer et de choisir la bonne manière de faire tourner notre machine pour avoir un meilleur fonctionnement (voir le tableau II.3)

Tableau II.1 Différents mode fonctionnement de la machine

II.6.2 Blocs des simulations des différents

Le schéma bloc de simulation de chaque est donné sur la figure suivante.

Mode de fonctionnent	Zoom
a.	
b.	
c.	

Figure II.7 Blocs de simulation power system

II.6.3 Résultats de simulation

Les tableaux II.2 et II.3 et la figure II. 8 représente les résultats de simulation des déférents blocs présentés sur la figure II.7.

Tableau II. 2 Schémas de simulation des profile de couple

Mode de fonctionnent	Zoom
a.	
b.	
c.	

II.7 Conclusion

Dans ce chapitre, une modélisation des différents constituants de la chaîne de conversion d'énergie des vagues basée sur une MSAP est faite.

Ensuite on a montré pour quelle la machine utilisée fournie l'énergie optimal.

Le chapitre suivant sera consacré à la conception et à la présentation de la chaîne mécanique

CHAPITRE III

Conception des différentes
parties mécaniques de la
chaîne de production

III.1 Introduction

Les systèmes récupérateurs de l'énergie des vagues sont en cours d'étude et de développement c'est pourquoi nous avons proposé et réalisé un prototype nouveau qui permet de récupérer d'énergies de la houle.

Ce chapitre est consacré à la présentation de la démarche que nous suivrons pour la conception par simulation d'un mécanisme de transmission de mouvement depuis la puissance des vagues. Nous présenterons des plans à trois dimensions à l'aide du logiciel SOLIDWORKS, et ceci après avoir mené l'étude de son modèle cinématique.

La conception des différentes parties mécaniques de la chaîne de production d'énergie électrique à partir des vagues consiste à donner une représentation et les mesures des différentes entités de l'ensemble de ses éléments, basée sur le logiciel de conception SolidWorks.

Dans ce chapitre, une présentation et les mesures de différentes entités des différents constituants de la chaîne mécanique de conversion d'énergie des vagues basées sur une machine synchrone à aimants permanents multipolaires sera détaillée.

III.2 Cahier des charges

Les mouvements du bras manipulateur seront exécutés par des oscillations du flotteur. Le flotteur suit les mouvements ascendant et descendant de la houle et transmet son énergie par l'intermédiaire d'un mécanisme de la figure III.1.

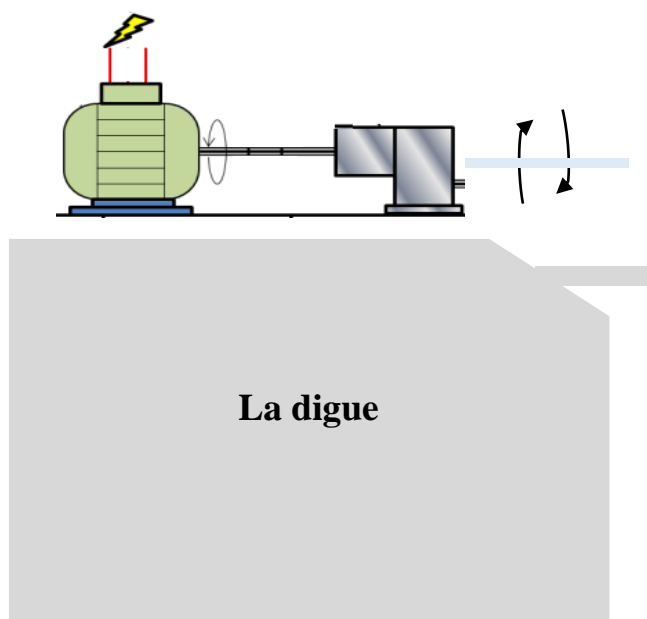


Figure III.1 Dispositifs oscillants flottants

III.2.1 Problématique

Cette partie est consacrée au dimensionnement des éléments d'immobilisation des organes sur l'arbre à savoir le mécanisme de transmission, les arbres et les supports.

III.2.2 Approche

Par soucis de simplicité et d'efficacité nous avons adopté le raisonnement suivant : Considérons une tige de masse « m » de longueur « L », portant sur l'une de ses extrémités une charge de masse « M », l'ensemble peut être entraîné dans un mouvement de rotation par l'arbre d'un moteur fixé à l'autre extrémité. Pour maintenir la tige de la machine en parallèle au sol (équilibre), le moteur sera fixé sur un support[20].

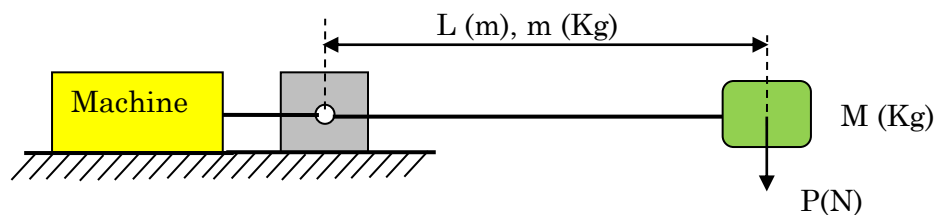


Figure III.2 Tige maintenue par un moteur

III.3 Calculs du moment de force nécessaire pour le bras manipulateur

Les forces ne suffisent pas pour expliquer les mouvements. Pour la rotation : on doit aussi tenir compte de la distance entre l'axe de rotation et la droite d'action de la force " Bras de levier " l = la distance qu'on mesure entre l'axe de rotation et la droite d'action d'une force, mesurer perpendiculairement à cette droite d'action la figure III.3 explique le phénomène d'action des forces [21]



Figure III.3 Forces appliquées sur le bras manipulateur

Le moment de force M_F est donné par l'équation III.1 :

$$\sum M_F = F_M \times l_M - F_R \times l_R = 0 \quad (\text{III.1})$$

$$F_M \times l_M = F_R \times l_R \quad (\text{III.2})$$

$$F_M = \frac{F_R \times l_R}{l_M} \quad \text{tel que} \quad \delta = \frac{l_R}{l_M} \quad (\text{III.3})$$

Avec : M_F : Moment de force ; F_M : Force motrice ; F_R : Force résistante ; l_M : Distance entre l'axe de rotation et la droite d'action de la force motrice ; l_R : Distance entre l'axe de rotation et la droite d'action de la force résistante ; δ : Avantage mécanique.

III.4 Logiciel SolidWorks version 2016

Le logiciel SOLIDWORKS est un modéleur volumique permettant de créer des pièces complexes en 3 dimensions. Ces pièces peuvent être ensuite utilisées pour créer des mises en plan en 2D et des assemblages de plusieurs pièces entre elles [22] .

III.5 Composant de la chaîne de production

III.5.1 Présentation de la chaîne de production

L'ensemble de la chaîne a pour le but d'avoir un mouvement rotationnel afin de tourner la machine qui va nous produire en retour d'électricité, l'ensemble de la chaîne est présenté dans la figure III.4.

III.5.2 Présentation et mesures des entités de la machine électrique utilisée

La machine synchrone utilisée est une machine électrique tournante « direct drive » dans laquelle le rotor est à l'extérieur. La vue en 3D de la machine est illustrée sur la figure III.5.

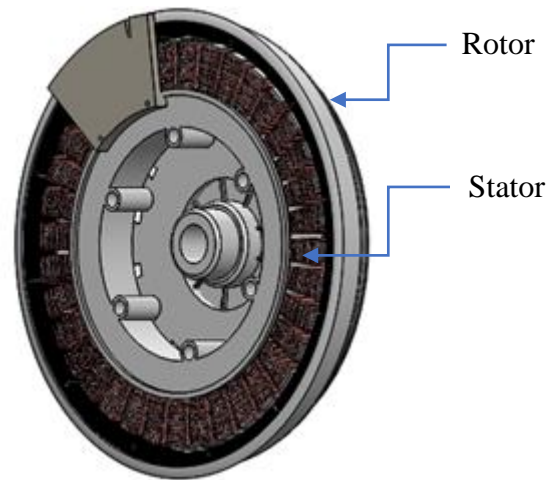


Figure III.5 Vue 3D de la MSAP multipolaire

III.5.2.a Présentation du rotor

Le rotor est fabriqué avec l'acier entouré de 12 aimants de type ferrites qui sont des composés d'oxyde de Fer, de Baryum et de Strontium. Ces aimants possèdent des performances modestes mais imposées dans de très nombreuses applications en raison de leur faible prix de revient rigidité magnétique élevée permettant de les utiliser dans les machines. La figure III.6 représente sa vue en 3D réalisé sur SolidWorks.

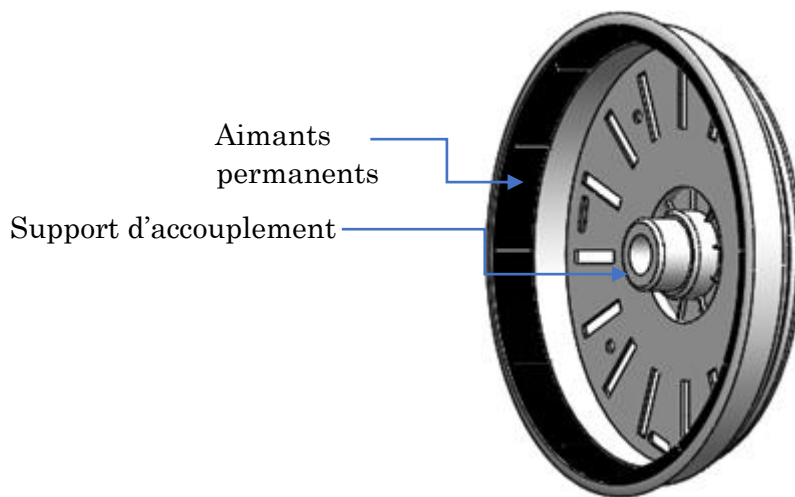


Figure III.6 Vue 3D du rotor de la MSAP

III.5.2.b Présentation du stator

Le stator est le siège du courant d'induit par la variation de flux rotorique. Il est constitué d'une partie active qui porte le bobinage d'induit du type concentré. Le circuit magnétique parcouru par le flux est réalisée avec des tôles de 0,35 à 0,50 mm

d'épaisseur pour minimiser les pertes par courants de Foucault, ces tôles possèdent un certain pourcentage de silicium (1 à 4 %). La vue de 3D de stator de la MSAP est illustrée sur la figure III.7.

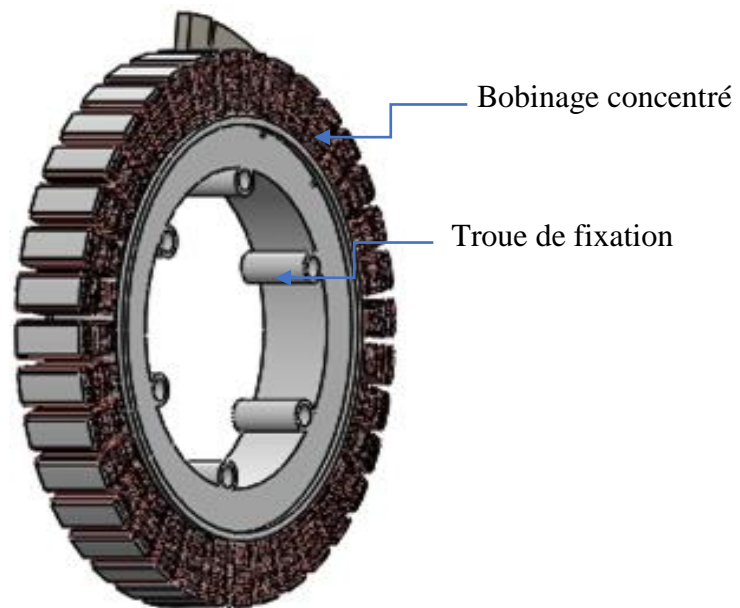


Figure III.7 Vue 3D du stator

➤ **Présentation du rotor format mise en plan**

Le plan ci-dessous représente la mise en plan 2D SOLIDWORKS générée à partir d'un modèle 3D du rotor de la machine.

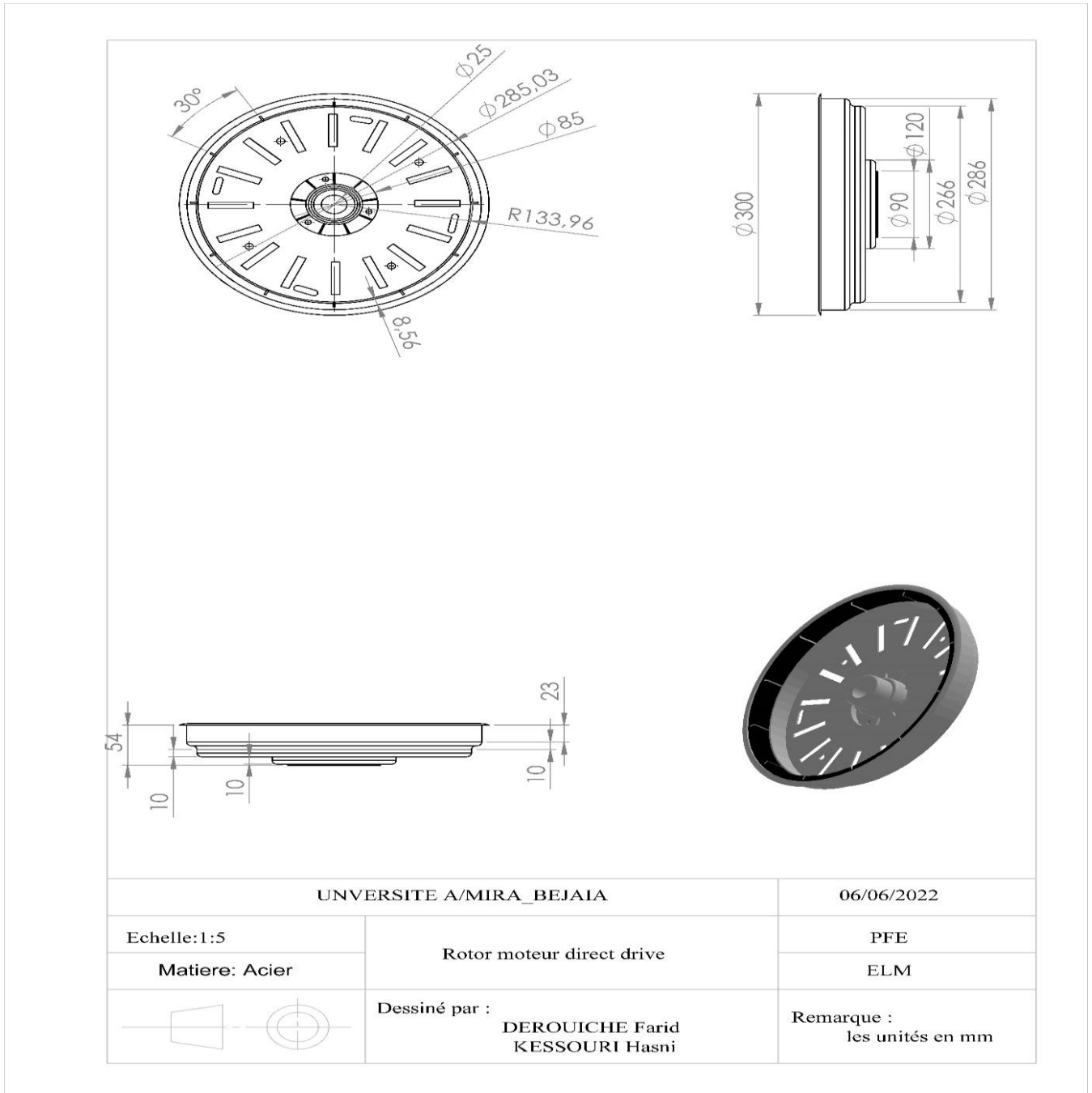


Figure III.8 Présentation du rotor en format mise en plan

➤ **Présentation du stator format mise en plan**

Le plan ci-dessous représente la mise en plan 2D SOLIDWORKS généré à partir d'un modèle 3D du stator de la machine.

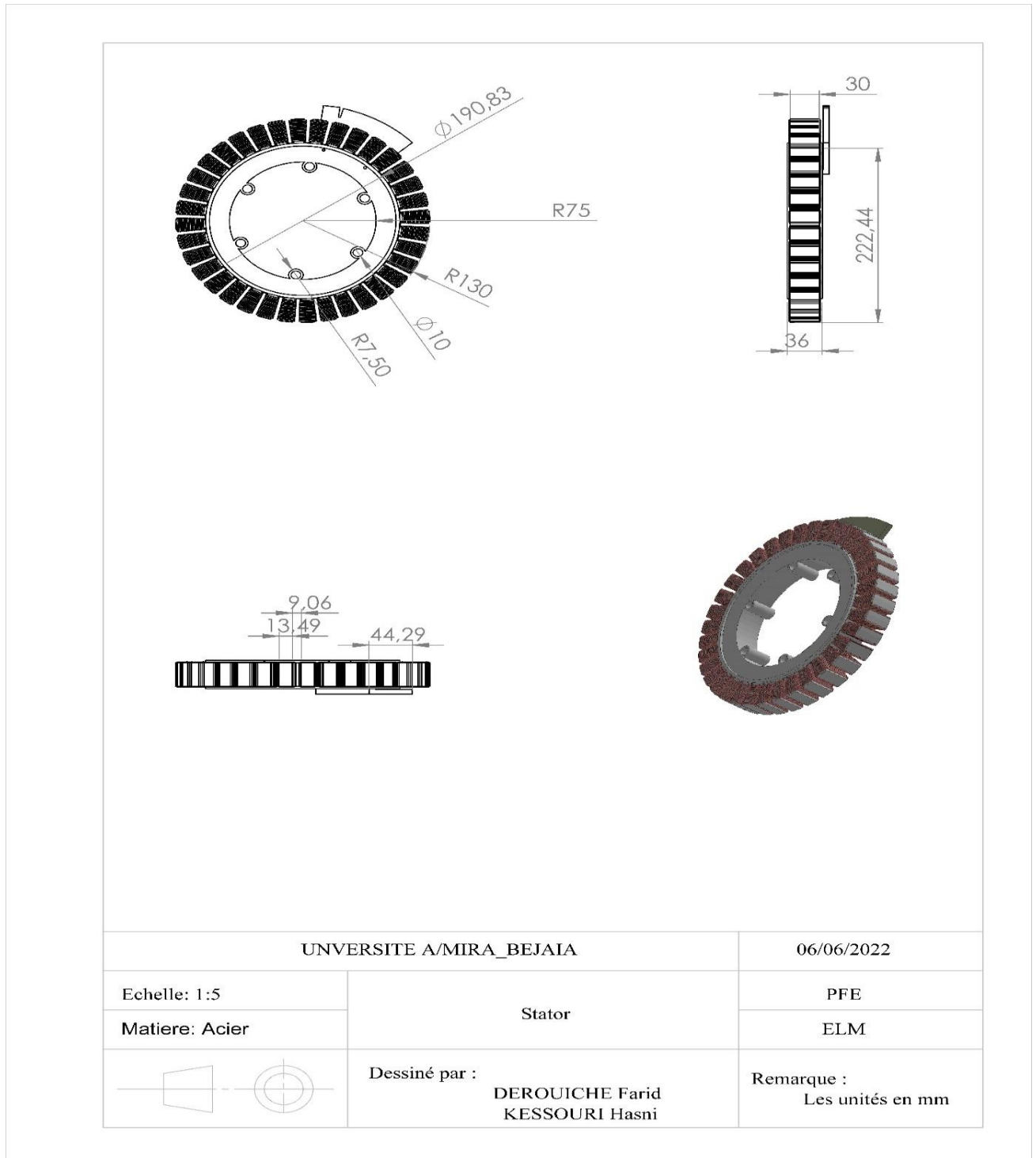


Figure III.9 Présentation du stator en format mise en plan

III.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes pièces de la chaîne mécanique de production d'énergie électrique et aussi la machine utilisée. La modélisation géométrique tridimensionnelle est réalisée à l'aide du logiciel SOLIDWORKS. Elle est suivie par une mise en plan bidimensionnel des différentes pièces constituant le mécanisme de transmission de puissance. L'option de mise en plan nous a permis de donner d'une façon bien claire les différentes mesures de chaque pièce.

Le chapitre suivant sera consacré à la réalisation pratique du mécanisme de transmission de la chaîne cinématique.

CHAPITRE IV

Réalisation d'un banc
d'essai pratique

IV.1 Introduction

Le projet vise en premier lieu une réalisation concrète, liée à la pratique de l'ingénieur. Le sujet a été choisi dans le domaine du développement des énergies renouvelables, ayant pour mission la contraction d'un houlomoteurs, avec la contrainte supplémentaire d'utiliser un maximum de matériaux spécifiques.

Dans ce chapitre, nous présenterons toutes les parties réalisées dans notre projet et nous montrerons aussi comment les assembler. Finalement, nous ferons des tests afin d'apercevoir son fonctionnement.

IV.2 Réalisation

Nous avons opté pour la réalisation de notre prototype des matériaux qui sont en majorité en aluminium et en acier en raison de leurs disponibilités et leurs caractéristiques.

.

IV.3 Partie électrique

IV.3.1 génératrice

La génératrice utilisée est une machine synchrone à aimants permanents multipolaire direct drive Samsung (figure IV.10) Modèle DON800 DC 310 V 0.6 HP 2.1 A 1400 RPM d'une machine à laver dernière génération

IV.3.2 Redresseur PD3 (à diode)

Le redresseur utilisé se présente comme le montre la figure suivante :

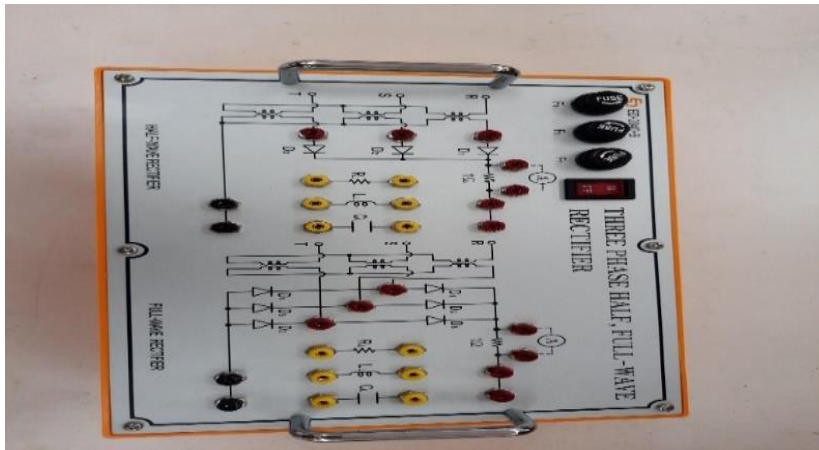


Figure IV.11 Redresseur pd3 utilisé [23]

IV .4 Construction de prototype

IV.5 Domaines d'applications de notre mécanisme



Figure IV.13 Port de pêche de Bejaia sans éclairage ni source d'énergie pour les pêcheurs

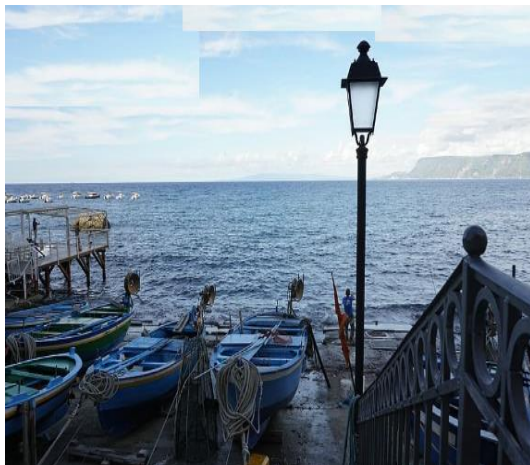


Figure IV.14 Eclairage en faveur des pêcheurs Figure IV.15 Station de recharge des batteries

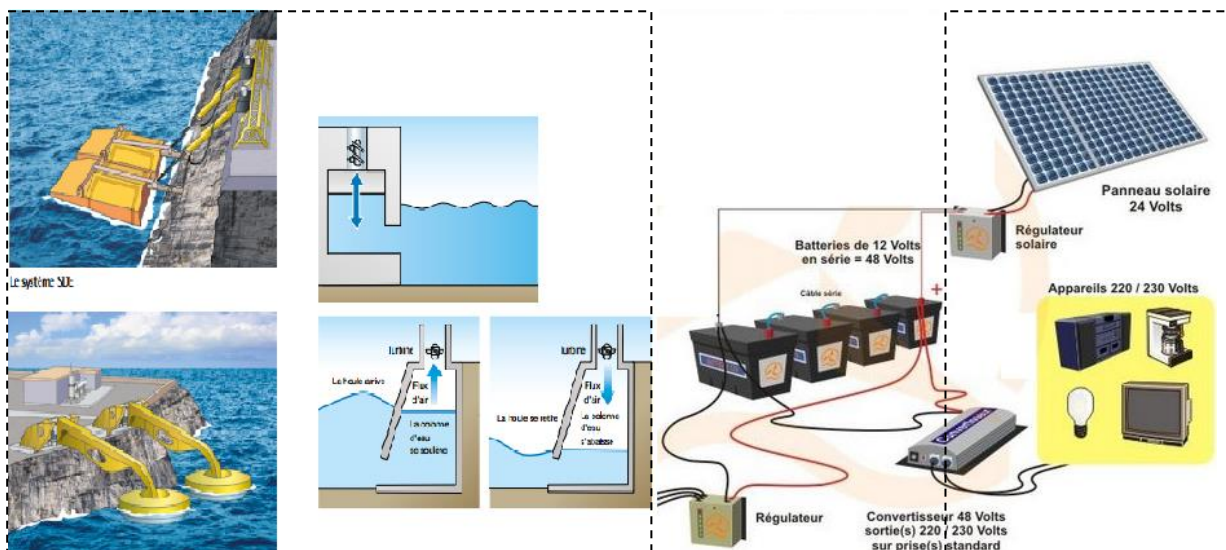


Figure IV.15 Système hybride permettant de la recharge des batteries en cas de très faibles amplitudes des vagues

IV.6 Conclusion

Durant ce chapitre, nous avons réalisé une structure mécanique conformément à un modèle conçu dans le chapitre trois, cette structure possède plusieurs degrés de liberté.

Nous avons contribué à l'aboutissement et la réalisation d'un prototype d'houlomoteur original suite à plusieurs étapes, nous avons passé par plusieurs procédés d'usinage (fraisage, tournage, perçage, soudage) assurés par des machines présente au HALL de technologie de l'université de Béjaia , aussi au Hall tension de génie électrique. Finalement, le montage a été fait au laboratoire d'électronique de puissance.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Les travaux que nous avons menés dans le cadre de ce projet de fin de cycle, constituent une contribution au domaine de production de l'énergie électrique en exploitant l'énergie des vagues. Il a pour objectif l'étude, la réalisation d'un système de conversion d'énergie des vagues.

Dans le premier chapitre après avoir décrit les différents architectes des convertisseurs d'énergie houlomotrice bord à quai et donné leurs concepts généraux, nous avons proposé pour réaliser un original prototype qui permet de récupérer d'énergies de la houle.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation des différents composants de la chaîne du système de conversion d'énergie des vagues.

Le troisième chapitre a abordé une description et une présentation générale de la partie mécanique de la chaîne de production d'énergie électrique et les différents composants de la chaîne tout en utilisant logiciel de conception SOLIDWORKS.

Le quatrième chapitre a abordé les étapes suivies pour la réalisation pratique de ce système de production d'énergie des vagues Afin de le mettre sous différents tests pratiques.

Perspectives

Dans le prolongement direct de ce travail plusieurs études sont à envisager :

Dans notre travail, nous nous sommes limités à la simulation et nous avons entamé la réalisation pratique. Il serait utile de la compléter par une étude opérationnelle qui sera faite sur un système réel. Pour évaluer la fiabilité, la disponibilité et le temps de production global d'un système industriel d'énergie renouvelable.

Références bibliographie

- [1] : H. EL KADI « Fiabilité des systèmes énergétiques multi-source » Thèse de doctorat. Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 2019.
- [2] : J. AUBRY, A. BABARIT, H. BEN AHMED, B. MULTON « La récupération de l'énergie de la houle, partie 2 : systèmes de récupération et aspects électriques» La revue 3 E.I, société de l'électricité, de l'électronique et des technologies de l'information, 2009.
- [3] : F. Floc'h cours « Notions sur les vagues en zone côtière » https://www.youtube.com/watch?v=0Z_d8EsQcMc&t=10s Institut Universitaire Européen de la Mer, 2022
- [4] : S. PAILLAT « le moment de force ». Projet de physique p6 stpi/p6– 46, institut nationale des sciences appliquée-rouan France, 2021.
- [5] : Cours sur « Houle, vague et mer de vent » <https://www.nageur sauveur.com/article/houle vague>, 2006.
- [6] : Site de Prévision des conditions pour les 8 prochains jours à Bejaia <https://fr.wisuki.com/forecast/8228/bejaia>, 2022.
- [7] : Cerema « Systèmes houlomoteurs bords à quai » guide de conception en phase avant-projet. Cerema. Collection : connaissances. Isbn : 978-2-37180-427-2, 2020
- [8] : P. CONTESTABILE., V FERRANTE, D. DILAURO., D. VICINANZA. «Prototype overtopping breakwater for wave energy conversion at port of Naples » Proceeding of isope conference, Rhodes, Greece, June 26th, July 1st, 2016.
- [9]: A. HENRY, T. WHITTAKER «Advances in the design of the oyster wave energy converter» rina marine & offshore renewable energy LONDON, UK, 2010.
- [10]: T. WHITTAKER., M. FOLLEY «Nearshore oscillating wave surge converters and the development of oyster», phil. trans. R. Soc. A. 370, 345-364, 2012.
- [11]: S. ESTEFEN., B .GARCIA-ROSA «Wave energy hyperbaric converter: small scale models prototype and control strategies», proceedings of omae, 2012.
- [12]: C. TRUST. Energy, Arup. «Oscillating water column wave energy converter evaluation report. »The Carbon Trust, Marine Energy Challenge 1-196, 2005.

- [13]: A.F.O FALCAO, J.C.C HENRIQUES, Oscillating water column wave energy converters and air turbines: a review, renewable energy 85, 2016.
- [14]: Y TORRE-ENCIS. "Mutriku wave power plant: From conception to reality." European Federation of Regional Energy and Environment Agencies (FEDARENE) [Online], 2009.
- [15]: MALARA, GIOVANNI, and F. ARENA. "Analytical modelling of an U-Oscillating Water Column and performance in random waves." Renewable Energy 60 116-126, 2013.
- [16] : D. AOUZLLAGE « cours construction de machines électriques», université de Bejaia, 2019
- [17] : M.T. LATRECHE « commande floue de la machine synchrone à aimant permanent (MSAP) utilisée dans un système éolien », Magister en électrotechnique, université de Sétif, 2012.
- [18] : S. SAMIR « Modélisation d'une centrale hybride photovoltaïque-éolien » mémoire de magister de l'université de Sétif, 2011.
- [19] : N BENAKLI, I RAMDHAN « étude d'un système éolien basé sur la machine synchrone à aimant permanent double étoile » master deux énergies renouvelable, université de Bejaia, 2021
- [20] : M. ALTREMAN cours de physique « les leviers »
https://www.youtube.com/watch?v=0z_d8esqcmc, clip dia, 2015.
- [21] : M.ALTREMAN Cours de physique « Le moment de force »
https://www.youtube.com/watch?v=0z_d8esqcm, Clip dia, 2015.
- [22] : BTS AMCR « présentation du logiciel SolidWorks » lycée Bel Air, février 2019
- [23]: ed-2040 power electronics trainer experimental manual ver .2.3e (50 Hz), 2018

ANNEXE

Paramètres de la MSAP utilisée pour la simulation

- Nombre de paires de pôles : $p = 24$
- Tension nominale : $U_n = 310 V$
- Courant nominal : $I_n = 2.1 A$
- $R_s = 5.28 \Omega$
- $L_s = 0.0199 mH$
- $f = 0.0003035 N.m.s/rad$
- $\varphi_{AP} = 0.1022 wb$
- $J = 0.01112 Kg.m^2$

Résumé

Les travaux de recherche présentés dans ce mémoire traitent des systèmes de conversion d'énergie houlomoteurs mettant en œuvre une machine synchrone à aimants permanents. Initialement, une comparaison entre les différents modes de fonctionnement de systèmes réalisée. Puis la réalisation de différentes pièces de prototype sue SolidWorks et finalement une réalisation pratique est faite.

Abstract

The research work presented in this dissertation deals with wave energy conversion systems using a permanent magnet synchronous machine. Initially, a comparison between the different operating modes of systems carried out. Then the realization of different parts of prototype sue SolidWorks and finally a practical realization is made.