

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE MINISTÈRE DE
L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET

FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUEES DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Génie Electrique

Spécialité : Réseaux Electrique

THÈME

ETUDE ET SIMULATION D'UNE CONVERSION D'ENERGIE HOULOMOTRICE

Préparé par :

BELGHOUL ZOHRA

MEDJAHED AHMED

Devant le Jury :

Nom et prénoms	Grade	Qualité
M.KOULALI	MCB	Président
K.BELHACEL	MAA	Examinateur
M.BEDOUI	MCB	Examinateur
A.BERKANI	MCA	Encadreur
Y.BEKAOUAL	MAA	Co Encadreur

PROMOTION 2022/2023

REMERCIEMENTS

EN PREMIER LIEU, NOUS REMERCIONS ALLAH QUI NOUS A PROCURÉ CE SUCCÈS,
NOUS A DONNÉ LA FOI, LE COURAGE ET LA PATIENCE DE PARVENIR À RÉALISER
CE MODESTE TRAVAIL.

NOUS TENONS À REMERCIER NOS CHERS PARENTS ET FAMILLES, ET BIEN AVANT
TOUT TROUVÉNT ICI L'EXPRESSION DE NOS REMERCIEMENTS LES PLUS PROFONDS
EN RECONNAISSANCE DE LEURS SACRIFICES, AIDES, SOUTIEN ET
ENCOURAGEMENT AFIN DE NOUS ASSURER CETTE FORMATION DANS LES
MEILLEURES CONDITIONS.

NOUS TENONS À REMERCIER VIVEMENT NOTRE ENCADREUR MADAME
"Y. BEKAOUAL", POUR SES CONSEILS PRÉCIEUX ET POUR TOUTES LES COMMODITÉS
ET AISANCES QU'ELLE NOUS A APPORTÉES DURANT L'ÉTUDE ET LA RÉALISATION
DE CE MÉMOIRE.

ET SURTOUT DE NOUS AVOIR ACCORDÉ SA CONFIANCE.

NOUS VOUDRIONS D'UNE PART REMERCIER « M. BERKANI » POUR SA PATIENCE, SA
DISPONIBILITÉ ET SURTOUT SES JUDICIEUX CONSEILS, QUI ONT CONTRIBUÉ À
ALIMENTER NOS RÉFLEXIONS.

NOS REMERCIEMENTS LES PLUS VIFS S'ADRESSENT À : MONSIEUR LE PRÉSIDENT
ET LES MEMBRES DE JURÝ QUI NOUS ONT HONORÉ PAR LEURS PRÉSENCES ET
D'AVOIR ACCEPTÉ D'EXAMINER ET D'ÉVALUER NOTRE TRAVAIL.

ET ENFIN, SANS OMETTRE BIEN SÛR DE REMERCIER PROFONDÉMENT TOUS CEUX
QUI ONT CONTRIBUÉ DE PRÈS OU DE LOIN À LA RÉALISATION DU PRÉSENT
TRAVAIL.



Dédicace

Je dédie cet humble et modeste travail à ma très chère famille

« KHELIL et BELGHOUL »

À vous chère père à vous chère mère pour tous les soutiens et sacrifices,
Aux personnes qui ont été toujours à mes côtés et pousser vers l'avant et
emmener à la réussite.

À mes chères sœurs À MON FRERE KHALIL

À mon amie ABDELILLAH

À tous la promo réseau électrique 2023 et spécialement Chikh « RIAD ».

BELGHOUL ZOHRA



Dédicace

Je remercie Allah de m'avoir donné la force pour finir mon cursus
universitaire.

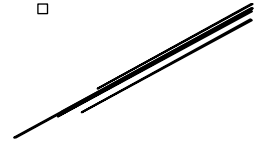
A mes chers parents, pour tous les soutiens et sacrifices

Mes frères, Mes sœurs toute ma grande famille (Medjahed).

Tous mes ami(e)s.

A « chikh RIAD » Sahbi.

MEDJAHED AHMED



SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I	
Etat de l'Art	
I.1 INTRODUCTION	5
I.2 LES RESSOURCES ENERGETIQUES	5
I.3 SYSTEME ENERGETIQUE OCEANIQUE	5
I.3.1 Principe d'exploitation	7
I.3.2 Différentes catégories	8
I.4 ENERGIE MAREMOTRICE (ENERGIE DES MAREE)	9
I.4.1 Définition et fonctionnement	9
I.4.2 Principe de fonctionnement d'une usine marémotrice	9
I.5 ENERGIE HOULOMOTRICE (OU ENERGIE DES VAGUES)	13
I.5.1 Définition	13
I.5.2 Caractéristiques et fonctionnement	14
I.5.3 Les dispositifs de conversion d'énergie houlomotrice	15
A. Les systèmes à corps oscillants ou mus par la houle	16
B. Les systèmes à franchissement ou à rampe de déferlement	19
C. Les systèmes à colonne d'eau oscillante	21
I.6 CHAINE DE CONVERSION MARINE	22
I.6.1 Conversion primaire	23
I.6.2 Conversion secondaire	23
I.6.3 Conversion tertiaire	24
I.7 TYPOLOGIE DES TURBINES	24
I.7.1 Turbines à réaction	24
I.7.2 Turbines à action	25
I.8 LES GENERATEUREURS ELECTRIQUES UTILISENT	26
I.8.1 Générateurs à induction à cage d'écureuil (SCIG)	26
I.8.2 Générateurs à induction à double alimentation (DFIG)	27

I.8.3 Générateur synchrone à aimant permanent (PMSG)	28
I.9 SYSTEME DE TRANSMISSION D'ENERGIES	29
I.9.1 Transmission HVAC	29
I.9.2 Transmission HVDC	29
I.10 CONCLUSION	30

CHAPITRE II

Modélisation de la chaîne de conversion d'énergie

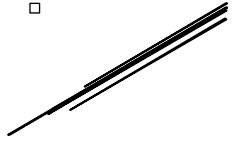
II.1 INTRODUCTION	32
II.2 MODELISATION DE LA TURBINE	32
II.3 MODELISATION DU GENERATEUR SYNCHRONE A AIMANTS PERMANENTS (PMSG)	35
II.3.1 Equations électriques	37
II.3.2 Équations mécaniques	39
II.3.3 Modèle de la machine synchrone à aimant permanent dans le repère de Park	40
II.3.4 Équations électriques dans le repère de Park (d, q)	41
II.3.5 Équations de flux	42
II.3.6 Schéma équivalent de la MSAP en régime transitoire	43
II.4 MODELISATION DE CONVERTISSEUR BACK TO BACK	44
II.4.1 Modélisation de l'onduleur MLI	46
II.5 MODELISATION DE LA CONNEXION DE CONVERTISSEUR	47
II.5.1 Modélisation du bus continue	48
II.5.2 Modélisation du filtre passif	48
II.6 MEODEMLISATION DU RESEAUX ELECTRIQUE	49
II.7 CONCLUSION	50

CHAPITRE III

Etude et simulation de la chaîne de conversion à base d'un PMSG

III.1 INTRODUCTION	53
III.2 PITCHE CONTROLE	53
III.3 SYSTEME DE CONTROLE DE LA CHAINE GLOBALE	54
III.4 SYSTEME DE CONTROLE DE GENERATEURE	56

III.5 SYSTEME DE CONTROLE DE CONVERTISSEURE	60
III.5.1 Système contrôle convertisseur coté génératrice (CCG)	60
III.5.1.1 Système de contrôle du convertisseur latéral PMSG	60
III.5.2 Système contrôle convertisseur coté réseaux (CCR)	61
III.6 RESULTAT ET INTERPRETATION	63
III.7 CONCLUSION	71
CONCLUSION GENERALE	74
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	76



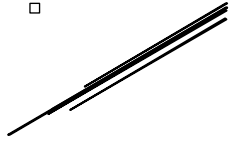
LISTE DES FIGURES

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I

Etat de l'art

Figure I.1 : Sources et répartition quantitative annuelle des ressources énergétiques	6
Figure I.2 : Source de la production mondiale de l'électricité	7
Figure I.3 : Principes du système énergétique océanique	8
Figure I.4 : Formes des systèmes énergétiques océaniques	9
Figure I.5 : Marée basse et marée haute	11
Figure I.6 : Les différentes caractéristiques de la houle	14
Figure I.7 : Le convertisseur Pelamis	16
Figure I.8 : Principe de Pelamis	17
Figure I.9 : Principe du système SEAREV	17
Figure I.10 : Le convertisseur SEAREV	18
Figure I.11 : Principe du système AWS	19
Figure I.12 : Le convertisseur TAPCHAN	20
Figure I.13 : Photographie du dispositif à échelle réduite	21
Figure I.14 : Le système Wave Dragon	21
Figure I.15 : Le système à colonne d'eau oscillante	22
Figure 1.16 : Principe Différentes étapes d'une chaîne de conversion de puissance pour un WEC	23
Figure I.17 : Turbine Francis	24
Figure I.18 : Turbin Kaplan	25
Figure I.19 : Turbine Pelton	25
Figure I.20 : Turbin Crossflow	26

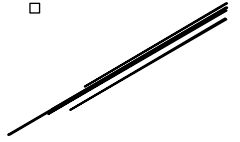


LISTE DES FIGURES

CHAPITRE II

Modélisation de la chaîne de conversion d'énergie

Figure II.1 : Système d'énergie marine	34
Figure II.2 : structure de OWC	34
Figure II.3 : a) Structure à rotor interne b) Structure a rotor externe	35
Figure II.4 : Schéma équivalent d'un système éolien basé sur la machine synchrone à aimants permanents	35
Figure II.5 : Représentation de la MSAP dans le repère de Park	40
Figure II.6 : Circuit équivalent de la MSAP dans le repère de d et q	43
Figure II.7 : Schéma simplifié du montage back-to-back	44
Figure II.8 : Schéma de principe de l'onduleur à MLI	47
Figure II.9 : Structure générale de la chaîne de conversion de l'énergie	48
Figure II.10 : Schéma électrique du bus continue	48



LISTE DES FIGURES

CHAPITRE III

Etude et simulation d'une chaîne de conversion base sur un PMSG

Figure III.1 : Dépendance de C_p sur λ et β pour la turbine	54
Figure III.2 : Système de contrôle de la chaîne globale	55
Figure III.3 : Schéma de principe de la commande du convertisseur côté générateur	56
Figure III.4 : Structure de contrôle d'un générateur à base d'un onduleur de tension contrôlé en mode Vf	56
Figure III.5 : Structure de contrôle d'un générateur programmable à base d'un onduleur de tension contrôlé en mode PQ	57
Figure III.6 : Structure de contrôle d'un générateur non programmable à base d'un onduleur de tension contrôlé en mode PQ	58
Figure III.7 : Structure générale de contrôle d'un générateur à base d'un onduleur de puissance contrôlé en tension	59
Figure III.8 : Schéma fonctionnel du système de contrôle du convertisseur côté générateur	61
Figure III.9 : Schéma fonctionnel du système de contrôle du convertisseur côté réseau	62
Figure III.10 : Modèle de simulation de système étudié	63
Figure III.11 : La partie signal d'onde du modèle Simulink (Wave & pitch)	64
Figure III.12 : Profile variable d'écoulement de la mer	64
Figure III.13 : Pitch contrôle (Variation des pales « β »)	65
Figure III.14 : Couple mécanique développée par la turbine (T_m)	65
Figure III.15 : La vitesse du générateur (ω) en fonction du temps	66
Figure III.16 : Couple électromagnétique (T_e)	66
Figure III.17 : La variation du courant du générateur côté stator (I_s -abc) en fonction du temps	67
Figure III.18 : Tension côté machine PMSG	67
Figure III.19 : Courant de la machine PMSG	68

LISTE DES FIGURES

Figure III.20 : La tension triphasé du réseau	68
Figure III.21 : Le courant triphasé du réseau	69
Figure III.22 : La tension du bus	69
Figure III.23 : Le courant du bus	70
Figure III.24 : Evaluation de la puissance active et réactive	70
Figure III.25 : La variations du la tension U_c en fonction du temps	71

LISTE DES ABREVIATION

- PMSG** - Permanent Magnet Synchronous Generator (générateur synchrone à aimants permanents)
- SCIG** - Squirrel Cage Induction Generator (générateur à induction à cage d'écureuil).
- DFIG** - Doubly Fed Induction Generator (générateur asynchrone à double alimentation).
- HVDC** - High-Voltage Direct Current (Haute Tension en Courant Alternatif).
- HVAC** - High-Voltage Alternating Current (Courant Continu Haute Tension).
- OWC** - Oscillating Water Column (Colonnes d'eau oscillantes).R



INTRODUCTION
GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

La production d'énergie renouvelable est devenue une préoccupation majeure à l'échelle mondiale, en raison des défis environnementaux et de la nécessité de réduire notre dépendance aux combustibles fossiles. Parmi les sources d'énergie renouvelable, l'énergie houlomotrice a suscité un intérêt croissant en raison de son potentiel considérable. Elle exploite l'énergie cinétique des vagues et des courants marins pour générer de l'électricité de manière durable.

Dans ce contexte, la conception et la simulation de chaînes de conversion houlomotrices jouent un rôle essentiel dans le développement de systèmes efficaces et économiquement viables. L'une des technologies clés utilisées dans ces chaînes de conversion est le générateur synchrone à aimants permanents (PMSG - Permanent Magnet Synchronous Generator), qui présente de nombreux avantages, tels qu'un rendement élevé, une maintenance réduite et une grande fiabilité.

Le présent mémoire se concentre sur l'étude et la simulation d'une chaîne de conversion houlomotrice utilisant un PMSG. L'objectif principal est d'évaluer les performances de ce système et d'analyser son comportement dans différentes conditions de fonctionnement. Pour ce faire, une approche multidisciplinaire est adoptée, en combinant des concepts de l'électrotechnique, de la mécanique des fluides et de l'automatique.

Cette hypothèse est divisée en plusieurs parties clés. Tout d'abord, une revue approfondie de la littérature est réalisée pour comprendre les principes fondamentaux de la conversion houlomotrice, les différentes technologies de génération d'énergie marine et les caractéristiques spécifiques du PMSG. Ensuite, une modélisation détaillée de la chaîne de conversion houlomotrice est présentée, qui est divisée en trois chapitres :

Le premier chapitre est consacré aux généralités sur les énergies renouvelables et océaniques, définition et fonctionnement des énergies marémotrices houlomotrices, une étude bibliographique sur la chaîne de conversion d'énergie avec un aperçu général sur les turbines et les générateurs.

Le deuxième chapitre présente la modélisation de la chaîne de conversion et les différents modèles d'équations mathématiques avec l'étude de connexion de PMSG avec le convertisseur et le réseau.

Introduction générale

Le troisième chapitre s'intéresse à faire la simulation dans le programme MATLAB simulink étude et simulation de la chaîne de conversion à base d'un PMSG et le contrôle des éléments de la chaîne. L'évaluation et l'analyse des résultats obtenus

La simulation du système est réalisée à l'aide d'outils logiciels avancés, tels que des logiciels de simulation électromagnétique (MATLAB). Les résultats obtenus sont ensuite analysés et interprétés pour évaluer les performances du système dans différentes conditions opérationnelles, telles que des variations de la hauteur des vagues, de la fréquence et de la vitesse du courant marin.

En conclusion, ce mémoire vise à fournir une analyse approfondie de la chaîne de conversion houlomotrice avec un PMSG, en mettant en évidence ses avantages et ses limites dans le contexte de la production d'énergie renouvelable. Les résultats obtenus contribueront à la compréhension et à l'optimisation de cette technologie prometteuse, ouvrant ainsi la voie à une utilisation plus répandue et efficace de l'énergie houlomotrice.

CHAPITRE I

ETAT DE L'ART

I.1 INTRODUCTION

Le chapitre 1 est consacré aux généralités sur les énergies renouvelables, en mettant l'accent sur les énergies marémotrice et houlomotrice. Nous explorerons le concept de conversion d'énergie, les différentes turbines utilisées dans ces systèmes, les générateurs associés, ainsi que les systèmes de transmission.

La conversion d'énergie est le processus par lequel une forme d'énergie est transformée en une autre forme plus utilisable ou plus facilement stockable. Dans le contexte des énergies renouvelables, la conversion d'énergie est cruciale pour exploiter efficacement les sources d'énergie naturelles propre et les convertir en électricité, qui est une forme d'énergie facilement distribuable et utilisable.

I.2 LES RESSOURCES ENERGETIQUES RENOUVLABLES :

Les ressources énergétiques renouvelables sont, à notre échelle de temps, celles qui sont dispensées continûment avec des cycles réguliers par la nature. Sur la terre, elles ont pour origine, par ordre d'importance quantitative, le rayonnement solaire, la chaleur du noyau terrestre qui migre vers la surface terrestre et les interactions gravitationnelles de la lune et du soleil avec les océans. L'humanité consomme annuellement, en ce début de troisième millénaire, très approximativement 12 Gtep d'énergie primaire ou 140.1012kWh (biomasse non commerciale comprise), soit une quantité correspondant à 1/8000me de l'énergie solaire qui arrive à la surface de la terre. La production d'électricité mondiale quant à elle représente environ 17.1012 kWh/an. [1]

Ce type d'énergie est considéré comme l'énergie de l'avenir. Les énergies renouvelables récupérables peuvent être classées en trois catégories :

- **Les énergies d'origine solaire :**

L'énergie reçue à la surface de Terre par rayonnement solaire au sol, la lumière du soleil captée à l'aide des panneaux photovoltaïques ou de centrales solaires thermiques permet la production d'électricité.

- L'énergie éolienne : le vent souffle beaucoup plus fort au large et surtout, plus régulièrement donc l'énergie cinétique du vent peut être transformée en énergie mécanique par des aérogénérateurs puis en électricité à l'aide d'une génératrice.

- La biomasse : des matériaux d'origine biologique peuvent être employés comme combustibles pour la production de chaleur, d'électricité ou de carburant.
- L'énergie hydraulique : Une grande partie des rayons solaire est captée par les océans et peut être exploitée, l'énergie de l'eau sous toutes ses formes possibles (potentielle et cinétique) peut être transformée en énergie mécanique puis en électricité.
- **La géothermie :**

Le noyau terrestre en fusion dégage une énergie annuelle d'environ 300.10^{12} kWh, la chaleur stockée dans le sol peut être utilisée pour la production d'électricité ou de chaleur.

- **Les interactions gravitationnelles Terre-Lune-Soleil :**

Les marées résultent des interactions Terre-Lune-Soleil. L'énergie annuelle dissipée dans les courants de marée représente environ 25.10^{12} kWh. Mais on imagine aujourd'hui placer des turbines sous-marines à la façon des éoliennes qui permettent d'accroître le potentiel tout en réduisant les contraintes environnementales. [1]

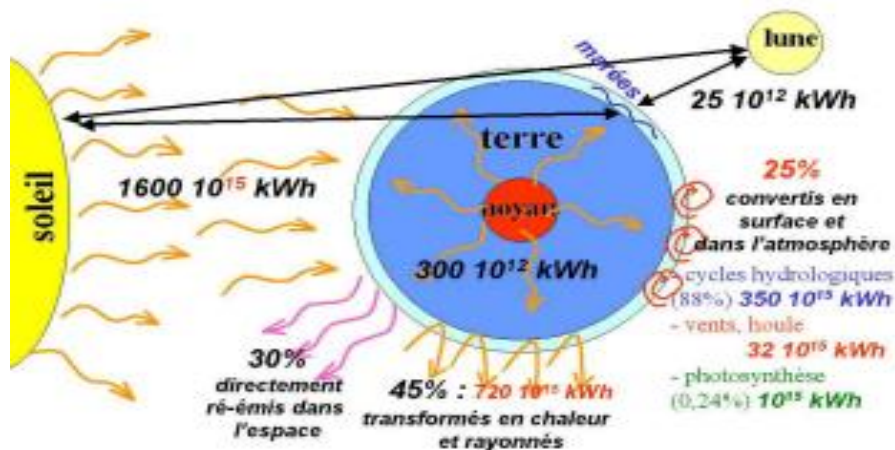


Figure I.1 : Sources et répartition quantitative annuelle des ressources énergétiques. [1]

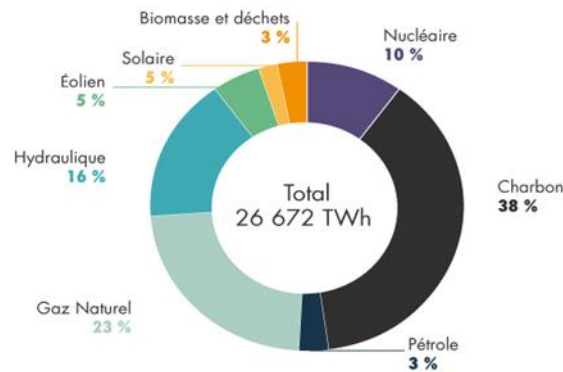


Figure I.2 : Source de la production mondiale de l'électricité.

I.3 SYSTEME ENERGETIQUE OCEANIQUE :

I.3.1 Principe d'exploitation :

En raison de l'industrialisation, le monde est arrivé au point où il a besoin de plus d'énergie que jamais, car la demande d'énergie augmente rapidement à l'échelle mondiale.

Mais non seulement le monde a besoin d'énergie, il a également besoin d'énergie provenant de carburants renouvelables et écologiquement acceptables qui ne causent pas de problèmes écologiques majeurs, tels que le réchauffement climatique et la pollution de l'air.

L'énergie océanique pourrait bien être l'une de ces nouvelles sources d'énergie renouvelables et devrait vraiment jouer un rôle plus important dans les années à venir. Les océans couvrent 70 % de la surface de la Terre et représentent une énorme quantité d'énergie sous forme de vagues, de marées, de courants marins et de ressources thermiques. Bien que l'énergie océanique soit encore à un stade de développement, les chercheurs cherchent des moyens de capter cette énergie et de la convertir en électricité. L'énergie océanique et l'énergie marine font référence à diverses formes d'énergie électrique renouvelable exploitée à partir de l'océan. Il existe deux principaux types d'énergie océanique : mécanique et thermique. Le principe de base du système énergétique océanique dépend de la rotation de la Terre et de l'attraction gravitationnelle de la Lune créant des forces mécaniques. La rotation de la Terre crée un vent qui forme des vagues à la surface de l'océan, tandis que l'attraction gravitationnelle de la Lune crée des marées et des courants côtiers. La figure I.3 montre le principe de base du système énergétique océanique, dans lequel la rotation de la Terre et l'orbite de la Lune sont les principales étapes de la génération d'énergie houlomotrice et marémotrice, respectivement.

L'énergie thermique est également dérivée du Soleil, qui chauffe la surface de l'océan tandis que les profondeurs restent plus froides. Dans le système énergétique océanique, cette

différence de température permet de capter l'énergie et de la convertir en énergie électrique, qui est une forme de système d'énergie renouvelable. La conversion de l'énergie thermique des océans (OTEC) nécessite une différence de température d'au moins 20 C.

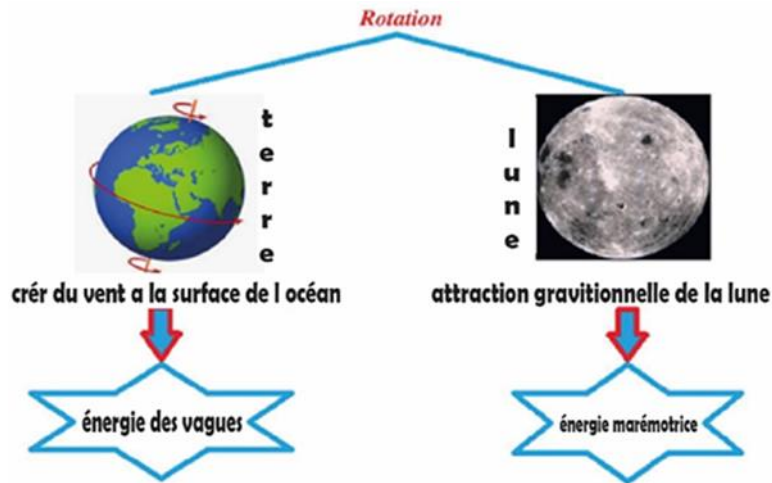


Figure I.3 : Principes du système énergétique océanique.[2]

Aux latitudes tropicales et subtropicales comprises entre 24 degrés nord et 24 degrés sud de l'équateur, l'eau océanique varie de 20 °C depuis la surface jusqu'à des profondeurs de 1 000 m. La puissance potentielle estimée de la ressource d'énergie thermique dans le monde est de 10 000 TWh/an.[2]

I.3.2 Différentes catégories :

Le système énergétique océanique fait référence à l'utilisation de l'énergie contenue dans les océans pour produire de l'électricité. Ce système d'énergie est la technologie la plus prometteuse pour les systèmes d'énergie renouvelable. Cette technologie est principalement générée par les niveaux d'eau de mer qui jouent un rôle important ainsi que par le changement de température entre les couches supérieures et inférieures de l'océan, les différents systèmes de conversion d'énergie exploitent l'énergie de l'eau de mer et la convertissent en systèmes d'énergie électrique. Il existe trois types de systèmes énergétiques océaniques.

1. Système d'énergie marémotrice : L'énergie marémotrice est une forme d'hydroélectricité qui convertit l'énergie obtenue à partir des marées. Cette technologie utilise les mouvements de l'eau causés par les marées pour générer de l'électricité à l'aide de turbines sous-marines. Alors que l'énergie marémotrice prendra de l'énergie supplémentaire du système, l'effet est négligeable et ne serait remarqué que sur des millions d'années.

2. Système d'énergie houlomotrice : L'énergie houlomotrice est en fait une forme concentrée d'énergie solaire générée par l'action du vent soufflant à la surface de l'eau de l'océan qui peut ensuite être utilisée comme source d'énergie renouvelable. Lorsque les rayons du soleil frappent l'atmosphère terrestre, ils la réchauffent cette technologie consiste à convertir l'énergie cinétique des vagues en électricité à l'aide de dispositifs flottants tels que les bouées, les serpentins et les balanciers.

3. Système d'énergie éolienne en mer : L'énergie éolienne en mer est l'utilisation de parcs éoliens construits dans des plans d'eau, généralement dans l'océan sur le plateau continental, pour récolter l'énergie éolienne afin de produire de l'électricité. Des vitesses de vent plus élevées sont disponibles en mer que sur terre, de sorte que la production d'électricité de l'énergie éolienne en mer est plus élevée par quantité de capacité installée. La figure 1.2 montre les différentes formes de système énergétique océanique en termes de marées, de vagues, de gradient thermique et de systèmes éoliens offshore.[2]

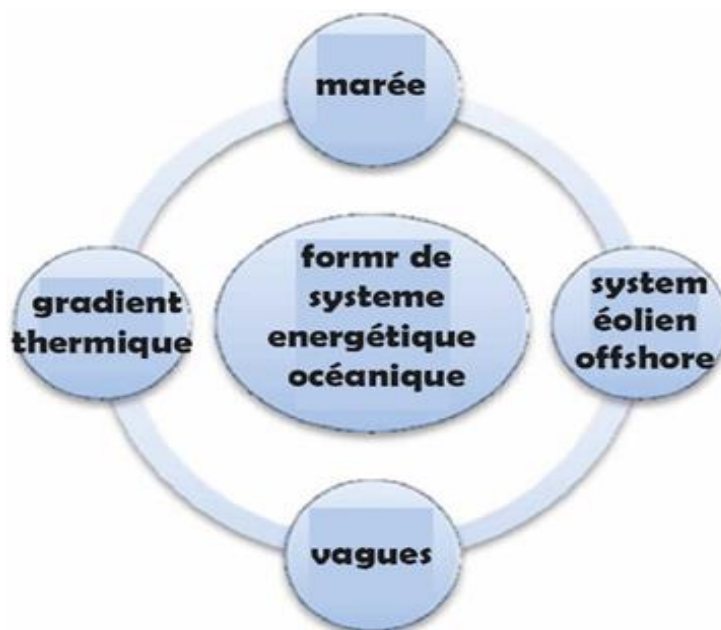


Figure I.4 : Formes des systèmes énergétiques océaniques.[2]

I.4 ÉNERGIE MAREMOTRICE (ENERGIES DES MAREE) :

I.4.1 Définition et fonctionnement :

La marée est le mouvement montant (flux ou flot) puis descendant (reflux ou jusant) des eaux des mers et des océans causé par l'effet conjugué des forces de gravitation de la Lune et du Soleil soumises aux ces attractions, les masses d'eau océaniques oscillent en résonance avec des

amplitudes relativement faibles. Ces ondes-marées se propagent dans les océans jusqu'aux mers littorales à faibles profondeurs où leur amplitude grandit.

Une onde-marée est le siège d'échanges d'énergies cinétique et potentielle, en revanche l'énergie potentielle correspondant à la surélévation du niveau de l'eau peut être transformée aisément en énergie mécanique. L'amplitude de la marée à un endroit précis est le résultat des positionnements relatifs du soleil et de la lune par rapport à la Terre ainsi que des caractéristiques locales de la côte et des fonds sous-marins. In fine l'énergie marémotrice est puisée sur l'énergie cinétique de rotation de la terre.

L'énergie marémotrice, est l'exploitation de l'énergie potentielle cinétique des marées. Elle est générée par la différence de hauteur d'eau entre les marées hautes et basses ce qui crée une force qui peut être utilisée pour faire tourner des turbines grâce au couple barrage-turbine et produire de l'électricité cette forme d'énergie renouvelable est considérée comme propre et durable. La centrale électrique de Kislaya d'une capacité de 250 MW en Russie et la centrale électrique de Rance en France sont les seuls exemples de ce type de centrale électrique.[3]

I.4.2 Principe de fonctionnement d'une usine marémotrice :

La planification de ce système est montrée dans la figure I.5 ci-dessous. Les marées de l'océan montent et descendent et l'eau peut être stockée pendant la période de montée et être déchargée pendant la période de descente. Un barrage est construit pour séparer le bassin de marée de la mer et une différence de niveau d'eau est obtenue entre le bassin et la mer.

- Pendant la période de marée haute, l'eau s'écoule de la mer vers le bassin de marée à travers la turbine hydraulique. La hauteur de la marée est supérieure à celle du bassin de marée. Ainsi, l'unité de turbine fonctionne et produit de l'électricité, car elle est directement couplée à un générateur.
- Pendant la période de basse mer, l'eau s'écoule du bassin de marée vers la mer, car le niveau d'eau dans le bassin est plus élevé que celui de la marée dans la mer. Pendant cette période également, l'eau qui s'écoule fait tourner la turbine et produit de l'électricité grâce au générateur.[4]

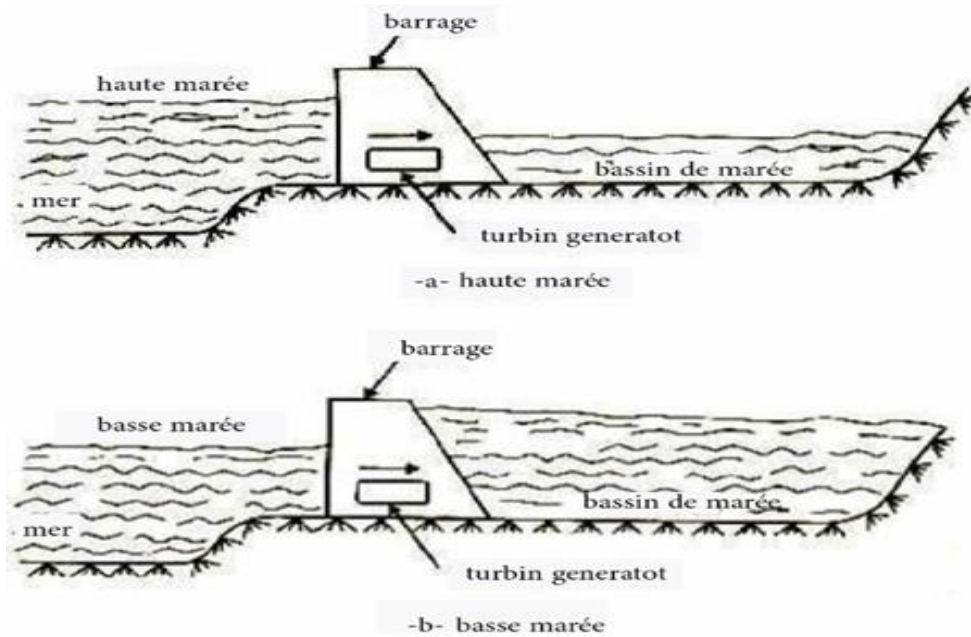


Figure I.5 : Marée basse et marée haute.[4]

Les conditions naturelles favorables à l'implantation de sites marémoteurs sont :

- Amplitude de la marée supérieure à 5 mètres, idéalement entre 10 et 15 mètres
- Une profondeur de 10 à 25 mètres sous les basses mers.
- La topographie de la côte, un substrat rocheux (ou sablo-graveleux) pour fixer les fondations de l'infrastructure. Il est courant de distinguer deux grands types d'infrastructures marémotrices : le simple bassin et le double bassin.[2]

Les centrales marémotrices sont généralement classées en fonction du nombre de bassins utilisés pour la production d'énergie. Elles sont ensuite subdivisées en système à sens unique ou à double sens en fonction du cycle de fonctionnement pour la production d'énergie. Cette classification est représentée à l'aide d'un diagramme linéaire comme indiqué ci-dessous.

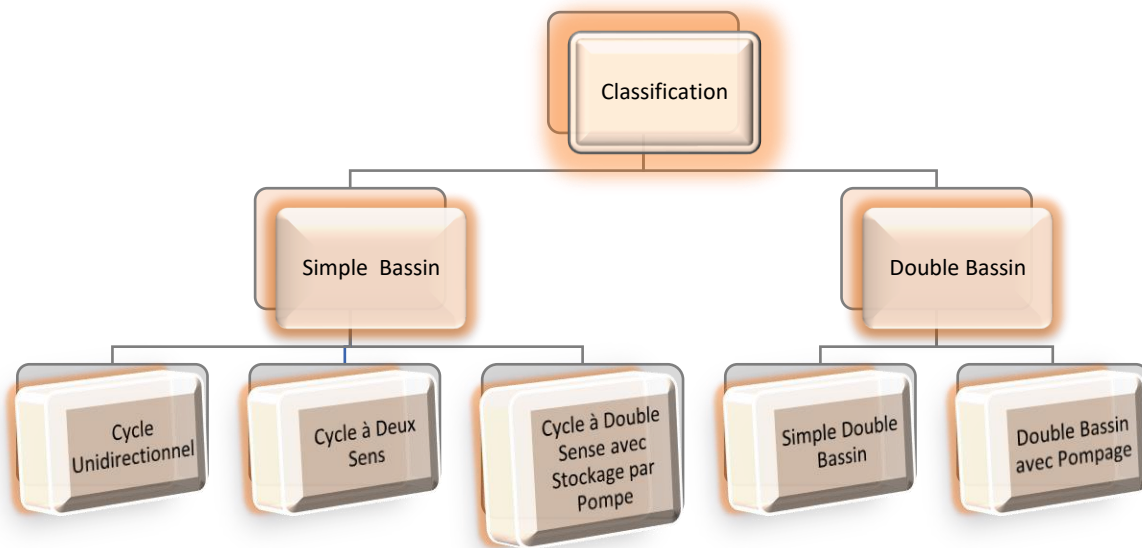


DIAGRAMME LINEAIRE DES TYPE DES BASSINS [4]

a. Type simple bassin : classificatoire

➤ **Bassin à un cycle unidirectionnel** : Cette forme il s'agit la plus simple de centrale marémotrice. Dans ce système, un bassin se remplit pendant la marée montante et pendant la marée descendante, l'eau s'écoule du bassin vers la mer en passant par la turbine et génère de l'énergie électrique. L'énergie est disponible pendant une courte période de marée descendante.

➤ **Cycle à deux sens d'un seul bassin** : Dans ce dispositif, la puissance est générée à la fois pendant la marée montante et la marée descendante. La production d'électricité est également intermittente, mais la période de production est plus longue par rapport au cycle unidirectionnel. Cependant, le pic obtenu est inférieur à celui du cycle unidirectionnel. La principale difficulté avec cette configuration est que la même turbine doit être utilisée comme moteur principal car les flux de reflux et de marée passent à travers la turbine dans des directions opposées. Une turbine à pas variable et un générateur à double rotation sont utilisés pour ce type.

➤ **Cycle à double sens d'un seul bassin avec stockage par pompe** : Dans ce système, de l'énergie est produite à la fois pendant les marées montantes et descendantes. Des machines complexes capables de produire de l'énergie et de pomper l'eau dans les deux sens

sont utilisées. Une partie de l'énergie produite est utilisée pour créer une différence de niveaux d'eau entre le bassin et la mer à n'importe quel moment de la marée, ce qui est réalisé en pompant de l'eau dans le bassin vers le haut ou vers le bas. La période de production d'énergie avec ce système est beaucoup plus longue que les deux autres décrits précédemment.

b. Type double bassin :

➤ **Simple double bassin :** Dans ce système, la turbine est installée entre les bassins, Un bassin est rempli de manière intermittente par la marée et l'autre est drainé de manière intermittente par l'effet de la marée descendante. Par conséquent, une petite capacité mais une alimentation électrique continue est disponible avec ce système. Les principaux inconvénients de ce système sont que 50% de l'énergie potentielle est sacrifiée pour introduire la variation des niveaux d'eau des deux bassins.

➤ **Double bassin avec pompage :** Dans ce cas, la puissance de pointe provenant de la centrale de base d'un système de transmission interconnecté est utilisée pour pomper l'eau vers le bassin supérieur. Un gain net d'énergie est possible avec un tel système si la hauteur de pompage est inférieure à la hauteur de génération de turbine de bassin à bassin.[4]

I.5 ÉNERGIE HOULOMOTRICE (OU ENERGIE DES VAGUES) :

I.5.1 Définition :

Une simple observation des vagues montre que la déformation de la surface de l'océan est de type ondulatoire.

L'énergie houlomotrice ou énergie des vagues désigne la production d'énergie électrique à partir de la houle, c'est-à-dire à partir de vagues successives nées de l'effet du vent à la surface de la mer et prennent la même direction que lui et parfois propagées sur de très longues distances. Une vague est une onde mécanique qui se propage entre deux fluides, en l'occurrence l'eau et l'air. Les ondes correspondent à des déformations périodiques de la surface de l'eau. En océanographie, les ondes de surface se matérialisent par une déformation de la surface de la mer, c'est-à-dire une déformation de l'interface entre l'atmosphère et l'océan. Mais, il ne s'agit pas d'onde simple mais d'une combinaison de plusieurs ondes. De plus, les trains de vagues, venant du large, se déforment à l'approche des côtes en subissant manifestement l'influence du sol. Il existe différents dispositifs pour exploiter cette énergie. De nombreux systèmes sont

actuellement à l'étude, certains sont déjà commercialisés mais aucun n'est arrivé au stade de la maturité industrielle. La figure I.6 décrit quelques caractéristiques de la houle.

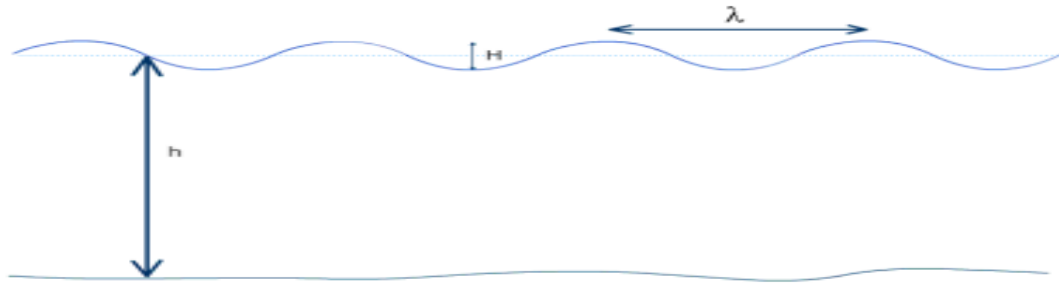


Figure I.6 : Les différentes caractéristiques de la houle.[5]

I.5.2 Caractéristiques et fonctionnement :

- Les paramètres ondulatoires de la houle sont :

H : Hauteur (dénivellation maximale entre une crête et un creux successif)

L/λ : Longueur d'onde (distance séparant deux crêtes successives)

T : La période (temps qui sépare le passage de deux crêtes successives en un point fixe)

a/η : Amplitude (égale à la moitié de la hauteur)

$g/\epsilon c$: Cambrure (rapport H/L)

c : Célérité (la vitesse moyenne de propagation des crêtes, i.e. L/T)

d/h : Profondeur (la profondeur au repos)

ϵH : Hauteur relative (rapport H/a)

$\epsilon \lambda$: Longueur d'onde relative (rapport L/a)

ϵU : Paramètre d'Ursell $\epsilon U = \epsilon c \cdot \epsilon \lambda$. [5]

- Le fonctionnement technique de l'énergie de la houle peut varier selon les différents types de dispositifs de conversion de l'énergie des vagues. Les dispositifs de conversion d'énergie houlomotrice fonctionnent en utilisant les mouvements de l'eau pour produire de l'électricité. Les systèmes de capture d'énergie varient d'un prototype à un autre : capture d'énergie mécanique en surface (ondulations) ou sous l'eau (translations ou

mouvements orbitaux), capture des variations de pression au passage des vagues (variations de hauteur d'eau) ou encore capture physique d'une masse d'eau (via une retenue). Les méthodes utilisées pour capturer cette énergie dépendent du type de système houlomoteur.

I.5.3 Les dispositifs de conversion d'énergie houlomotrice :

La classification est représentée à l'aide d'un diagramme linéaire comme indiqué ci-dessous :

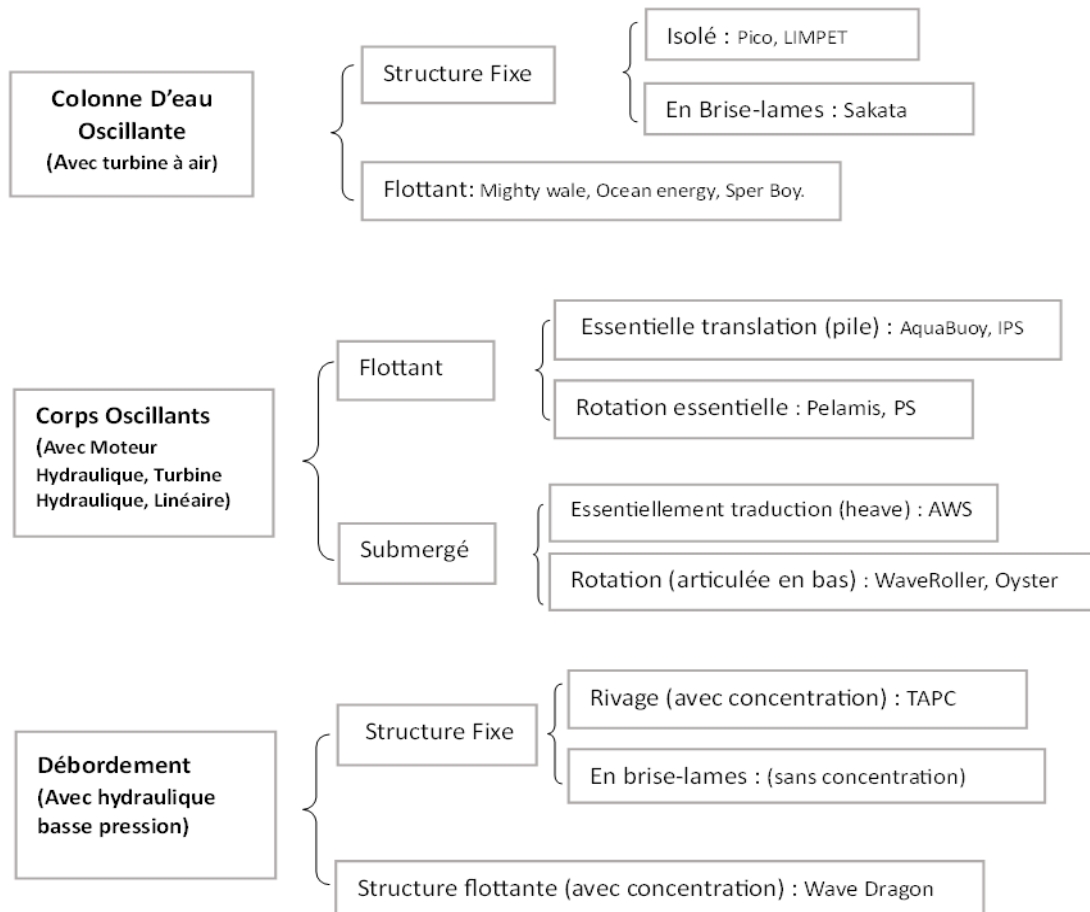


DIAGRAMME LINEAIRE DES DISPOSITIFS DE CONVERSION [6]

Il existe de nombreux concepts de génératrice houlomotrice. Ces concepts diffèrent principalement par la façon dont l'énergie de la houle est captée par le système, par leur positionnement par rapport à la côte, et par la profondeur d'eau dans laquelle les systèmes sont installés. Parmi les milliers de brevets déposés sur les récupérateurs d'énergie des vagues, seule une partie a fait l'objet de recherche et de développement. On décompte aujourd'hui une centaine de projets en phase de développement ou d'essai. Si les concepts de récupérateur sont très variés, il est toutefois possible de les regrouper en 3 grandes familles :

A. Les systèmes à corps oscillants ou mus par la houle (Oscillating Bodies ou Wave Activated Bodies) :

Dans ce cas-ci, le passage de la vague actionne des systèmes articulés dont le mouvement relatif, par rapport à une référence (fixe ou mobile), permet la conversion d'énergie. Ce type de technologie exploite soit le mouvement de la vague proprement parler, et nous aurons plutôt des systèmes flottants, soit la différence de pression qu'elle crée à son passage, auquel cas, les systèmes seront plutôt immergés.

- ❖ **Le Pelamis** : Le Pelamis, nommé ainsi en référence au monstre marin de la mythologie grecque, est un long serpent rouge frétilant dans les vagues. Le mouvement des vagues agit dans chaque articulation de la structure et est utilisé pour produire de l'électricité. Ce type de convertisseur est développé par la société écossaise Océan Power Delivery (OPD). Il a une longueur de 150m, un diamètre de 3,5m, un poids d'environ 700t et fourni une puissance de 750kW.

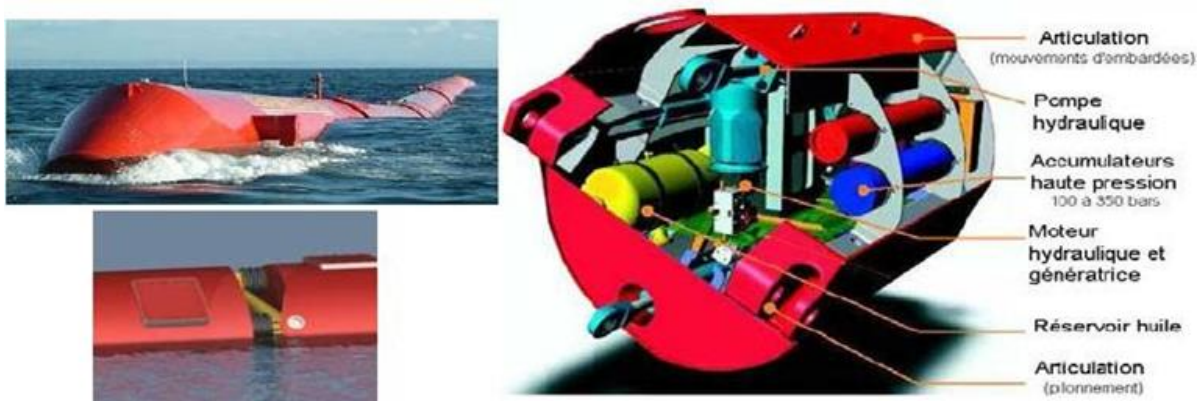


Figure I.7 : Le convertisseur Pelamis.[5]

C'est une structure semi-émergée, composée de quatre cylindres reliés par des articulations, positionnée dans la direction de propagation de la vague. Le mouvement des vagues agit dans chaque articulation sur un vérin hydraulique qui envoie de la fluide haute pression vers une turbine pour produire de l'électricité. L'énergie produite est envoyée, par l'intermédiaire d'un cordon ombilical, dans les fonds marins et ensuite acheminée à terre.

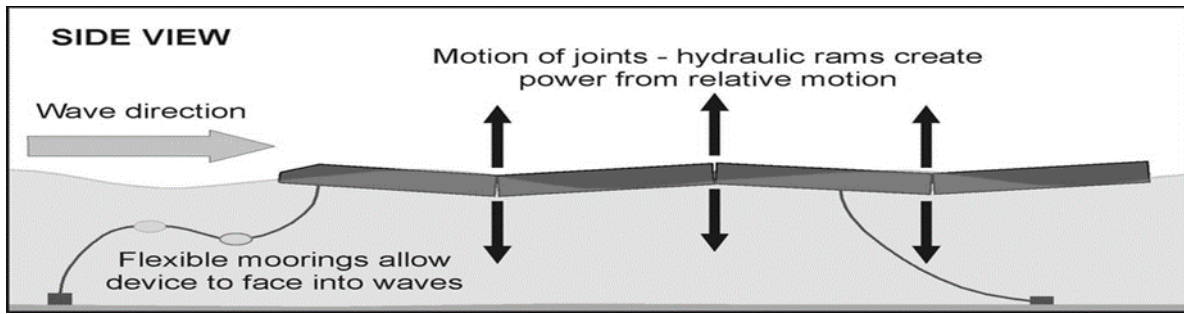


Figure I.8: Principe de Pelamis.[5]

Le « serpent des mers » (Pelamis) offre l'avantage de ne pas avoir de fondation, réduisant ainsi les frais de son installation. Il est tout simplement remorqué et amarré en mer. De plus, sa mobilité permet une maintenance aisée, maintenance faite après remorquage à terre. Mais son inconvénient réside en la complexité et les grandes dimensions de ses composants.

- ❖ **Le SEAREV :** Le système SEAREV (Système Électrique Autonome de Récupération de l'Énergie des Vagues) appartient à la dernière catégorie des systèmes présentés, à savoir les corps mus par la houle. Le concept du SEAREV a été développé par Alain Clément, ingénieur de recherche CNRS au laboratoire de mécanique des fluides (LMF) de l'école Centrales de Nantes. Le LMF est en charge du projet global et plus particulièrement de la partie hydrodynamique dont il est spécialiste. La partie contrôle est étudiée quant à elle à l'Ircyn de l'école Centrales de Nantes. Enfin la conversion électromécanique d'énergie est traitée par l'équipe du SATIE dans le cadre de cette thèse.

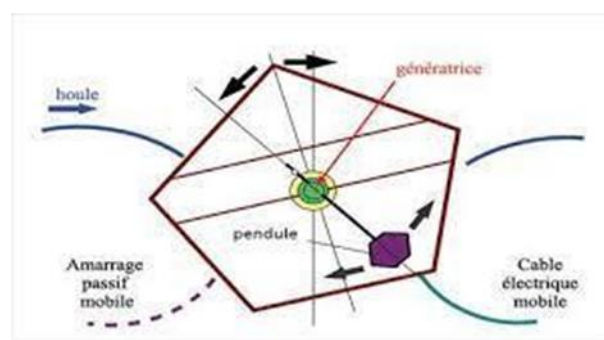


Figure I.9 : Principe du système SEAREV.[5]

Il est composé d'un corps flottant, complètement clos, dans lequel est suspendu un volant rotatif à masse excentrée. Sous l'action de la houle, le flotteur, comme la masse interne, développent des mouvements qui leur sont propres. Le mouvement relatif entre le flotteur et la masse mobile est alors mis à profit pour actionner le générateur électromécanique Figure I.10. Le volant

s'apparente à un pendule. Les équations du mouvement du flotteur sont également (en négligeant les mouvements de translation) celles du pendule simple. La dynamique du système complet est donc celle d'un double pendule, c'est à dire un système de deux oscillateurs mécaniques couplés, pourvu de deux pulsations de résonance. Nous récupérons l'énergie en freinant plus ou moins le mouvement du volant. L'absorption d'énergie est maximale en houle régulière aux résonances du système, et faible lorsque les pulsations de la houle et du système ne sont plus accordées. Il constitue en quelque sorte un amortisseur actif et récupératif. La conception d'un générateur adapté à la houle doit avant tout tenir compte de la nature des sollicitations, notamment de leur complexité. Le dimensionnement et l'optimisation d'un tel système nécessite la prise en compte du couplage relativement fort existant entre les phénomènes physiques : hydrodynamiques - mécaniques - électriques (contrôle).

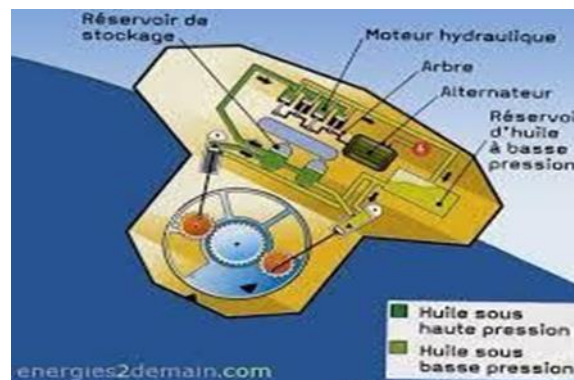


Figure I.10 : Le convertisseur SEAREV.[5]

- ❖ **Le système Archimède Wave Swing (AWS)** : L'appareillage du système Archimède Wave swing (AWS) est très simple et ne nécessite pas de technologie très avancée, en effet la seule difficulté vient de la taille et des proportions inhabituelles que doivent prendre les différents composants du système AWS. Le système se compose d'un cylindre hermétique en acier, fixé à un guide vertical lui-même accroché au fond marin. Le cylindre se compose d'un cylindre mobile supérieur ou « flotteur » compris entre 10 et 20m de diamètre, et d'un cylindre fixe inférieur. A l'intérieure du flotteur on trouve un système de générateur linéaire composé d'une bobine solidaire du cylindre fixe et d'une colonne d'aimants de polarités inverses solidaire du cylindre mobile.

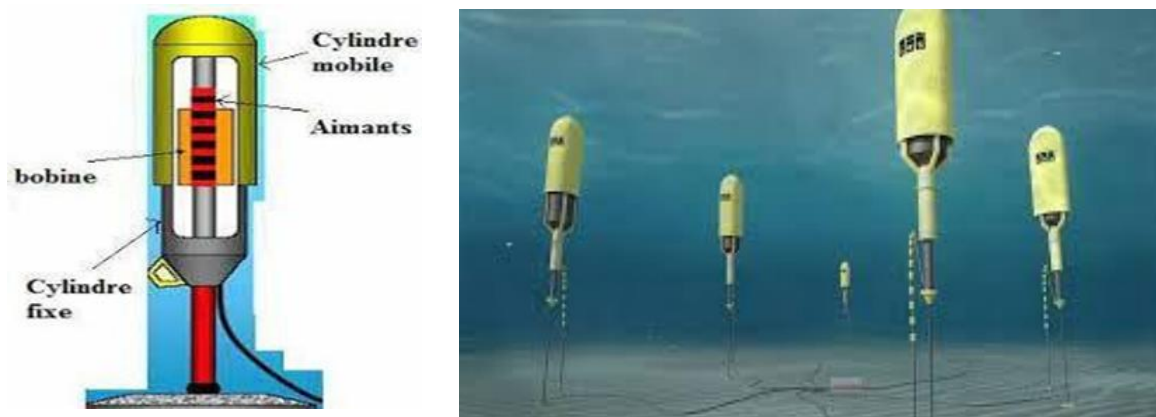


Figure I.11 : Principe du système AWS.[5]

Le principe de fonctionnement est relativement simple, comme son nom l'indique le système Archimède Wave swing s'appuie sur la poussée d'Archimède, en effet le flotteur est rempli de gaz, généralement de l'air, bien sûr moins dense que l'eau, ce qui implique que la poussée d'Archimède s'appliquant sur le gaz va pousser le flotteur vers le haut. A l'approche de la crête de la vague, la pression de l'eau sur le haut du cylindre augmente et la partie supérieure ou " flotteur " comprime le gaz dans le cylindre pour équilibrer la pression. Le mécanisme inverse se produit au passage du creux de la vague avec une expansion dans le cylindre. Le mouvement relatif entre le flotteur et la partie inférieure ou " silo " est converti en électricité à l'aide d'un système hydraulique et d'un groupe convertisseur. Ce groupe convertisseur composé de la bobine et de la colonne d'aimants va agir de la façon suivante : la colonne d'aimants de polarités différentes étant solidaire du flotteur va donc osciller de bas en haut en suivant la fréquence de la houle au contact de la bobine fixe. L'alternance des aimants polarisés nord ou sud dans la bobine induit un courant électrique récupéré par un réseau de câbles sous-marins.

B. Les systèmes à franchissement ou à rampe de déferlement (Overtopping Device) :

Les vagues sont capturées dans un réservoir dont la hauteur est supérieure au niveau moyen de la mer. Des rampes de déferlement peuvent être installées de façon à élever la vague au niveau du réservoir. Lorsque l'eau accumulée dans ce réservoir s'échappe, on récupère l'énergie potentielle stockée, par exemple, au moyen de turbines hydrauliques.

❖ TAPCHAN (Tapered Channel – canal convergent):

Les systèmes à canaux entonnoirs fonctionnent de manière très semblable à une centrale hydroélectrique, avec un barrage pour faire monter le niveau de l'eau et un réservoir pour la mettre en réserve. Le modèle TAPCHAN a été expérimenté en 1985 sur la côte

norvégienne, à Toftestallen avec une puissance de 350 kW. Dans ce cas (modèle TAPCHAN), l'eau vient de l'océan sous forme de vagues. Les vagues sont orientées vers un réservoir surélevé, sur le rivage, par un canal évasé dont l'ouverture la plus large s'ouvre sur l'océan. Sur ce type d'installation, on remarque que la forme du canal augmente la hauteur et l'énergie des vagues lorsque l'eau s'envoie dans le réservoir. L'eau stockée dans le réservoir possède une énergie potentielle. Cette énergie est transformée en énergie électrique lors du déversement de l'eau à travers les turbines de type basse chute (turbine Kaplan).

Le système Tapchan a l'avantage d'avoir peu de pièces mobiles et permet de produire de l'énergie sur demande. Mais son inconvénient majeur est l'encombrement que représente le réservoir.

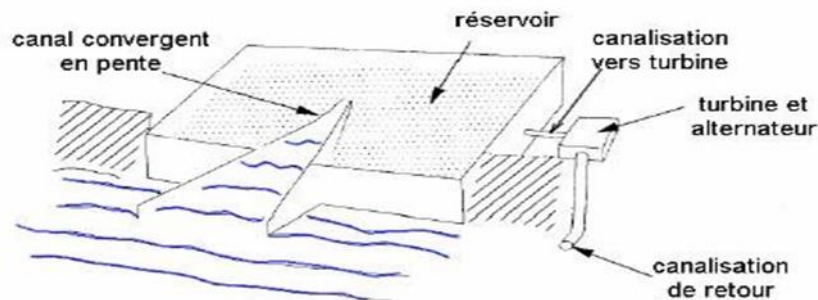


Figure I.12 : Le convertisseur TAPCHAN.[5]

- ❖ **Le Wave Dragon** : Ce système financé conjointement par le Danemark et l'Union européenne, est une machine qui a déjà été mise à l'épreuve. Le test a eu lieu en mer du Nord sur le site de Nissum Bredning. Il s'agit d'un énorme engin de 57 m de large (avec les bras) et de 237 tonnes munies d'un réservoir de 55 m³. Le test a débuté en mars 2003 et, au vu des résultats satisfaisants, le Wave Dragon a été connecté au réseau en mai 2003 et produit aujourd'hui de l'électricité. Pour ce faire, les machines sont installées proches des côtes pour être plus facilement reliées au réseau à l'aide de câbles sous-marins. La taille de ce prototype est quatre fois inférieure à celle du système complet.



Figure I.13 : Photographie du dispositif à échelle réduite.[5]

Les deux immenses bras fixes de forme parabolique font converger les vagues vers le centre de l'engin. L'eau qui monte sur le socle central est d'abord amenée dans un réservoir surélevé. Une trappe s'ouvre avec les vagues pour laisser passer l'eau qui actionne ensuite une turbine de type Kaplan en retombant dans la mer.

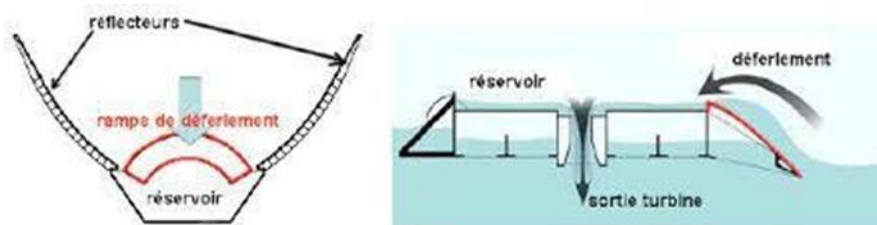


Figure I.14 : Le système Wave Dragon.[5]

Le Wave Dragon est un dispositif offshore, flottant et amarré. Il est lié au fond par un système d'ancrage. Il possède des chambres de lestage permettant d'ajuster sa ligne de flottaison en fonction de la houle incidente. Il est équipé de 16 turbines basse chute permettant d'évacuer l'eau du réservoir.

C. Les systèmes à colonne d'eau oscillante (Oscillating Water Column) :

Les systèmes à colonne d'eau oscillante (CEO) ou Oscillating Water Column (OWC), sont onshore ou peuvent être flottants. Ils sont constitués de figure I.15 :

- ✓ Une chambre ouverte à son extrémité inférieure sous le niveau de la mer et ouverte ou fermé selon les systèmes sur son extrémité supérieure.
- ✓ Une structure partiellement submergée, appelée chambre ou collecteur, ouverte sur la mer.
- ✓ Une turbine à air couplée à un générateur et situé dans l'orifice supérieur communiquant avec la chambre.

Lorsque les vagues entrent dans la chambre figure I.15.a la hauteur d'eau augmente entraînant par pression une augmentation de l'air présent dans la colonne. L'air sous pression est propulsé vers le haut de la colonne où se situe la turbine qui est alors mise en rotation par le flux. Lorsque la vague se retire figure I.15.b le flux d'air dans la colonne s'inverse à nouveau la turbine. Celle-ci est conçue pour tourner dans le même sens quelle que soit la : direction du flux d'air. La surface de l'eau se comporte donc comme un piston qui chasse et aspire alternativement de l'air dans un cylindre.[5]

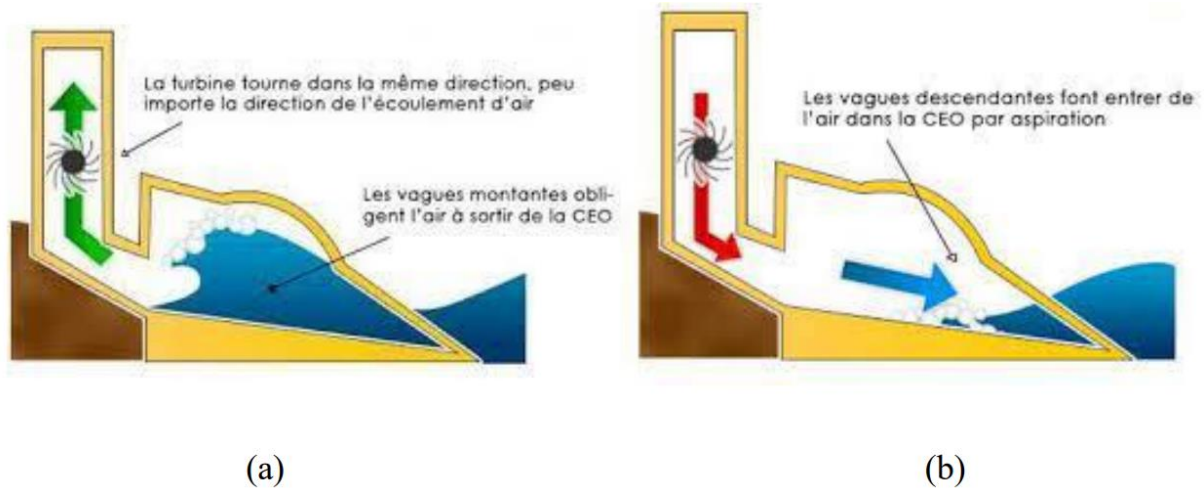


Figure I.15 : Le système à colonne d'eau oscillante.[5]

I.6 LA CHAÎNE DE CONVERSION MARINES :

Le processus de conversion d'énergie qui produit l'énergie électrique requise pour la connexion un WEC à un réseau électrique est appelé chaîne de conversion de puissance (PCC). La chaîne de conversion prend l'énergie mécanique comme source d'énergie et la convertit en l'énergie électrique sur un processus de transition énergétique. Le processus d'extraction, appelé PTO les systèmes suivent différentes étapes du mécanisme de conversion [2]. Ceux-ci pourraient être classés largement dans les sous-catégories suivantes :

Conversion primaire - Conversion secondaire - Conversion tertiaire.



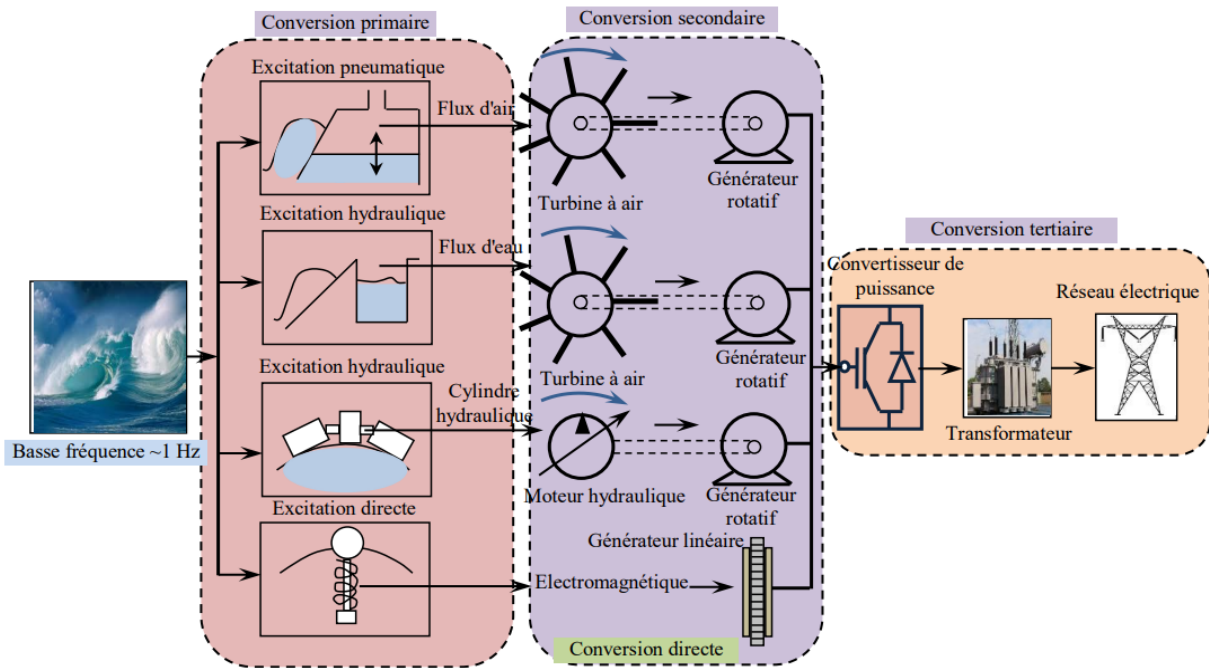


Figure 1.16 : Principe Différentes étapes d'une chaîne de conversion de puissance pour un WEC.[2]

Les étapes de conversion ainsi que quelques exemples ont été expliqués en détail ci-dessous et montre les différentes étapes de la chaîne de conversion de puissance avec quelques exemples.

I.6.1 Conversion primaire :

Le premier niveau d'extraction d'énergie se fait par l'oscillation induite par les vagues sur un corps flottant ou à l'intérieur d'une chambre d'une structure fixe. Les systèmes oscillants doivent être capables de stocker l'énergie extraite des vagues en vue d'une conversion ultérieure.

Cette étape consiste à convertir le mouvement ondulatoire à partir des structures ondulatoires physiques en énergie mécanique qui peut être linéaire ou rotative. Le mouvement de vague lente inhérent à un mouvement oscillatoire est converti en un mouvement rapide pour extraire le maximum énergie.

I.6.2 Conversion secondaire :

Le deuxième niveau de conversion de l'énergie stockée, de la conversion primaire à l'électricité. Ce niveau implique l'utilisation de systèmes d'entraînement et de contrôle, y compris des vannes commandables, des composants hydrauliques, pneumatiques et électroniques. La conversion secondaire est obtenue en convertissant l'énergie cinétique/potentielle en énergie rotationnelle à l'aide d'une turbine, ce qui entraîne la rotation d'un arbre.

I.6.3 Conversion tertiaire :

C'est le dernier niveau dans lequel la puissance de mouvement rotatif est transférée aux générateurs électriques qui convertissent la puissance récupérée en électricité, ou le mouvement rotatif est directement utilisé pour pomper le fluide, comme dans un système de désalinisation.[6]

I.7 TYPOLPGIE DES TURBINES :

I.7.1 Turbines à réaction :

Une turbine à réaction est une machine complètement immergée dans l'eau et mise en rotation par effet tourbillon au moyen d'une bêche, et des aubages directeurs fixes ou mobiles. Les aubages de la turbine sont profilés de manière à donner aux filets d'eau une direction parallèle à l'axe de rotation à la sortie de la turbine, il existe deux types de turbine à réaction :

- **Turbine Francis** : La turbine Francis est utilisée pour des faibles variations de débit (débits moyens entre 100 l. s⁻¹ et 6000l. s⁻¹), elle s'adapte bien aux chutes moyennes de 10 m à 100 m, elle a un bon rendement et une vitesse de rotation élevée (1000 tr/min).

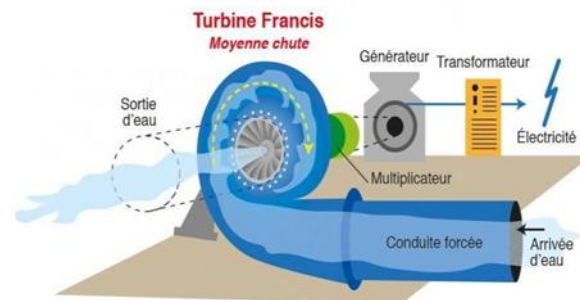


Figure I.17 : Turbine Francis.[5]

- **Turbine Kaplan** : Les turbines Kaplan (ou turbines hélice) sont les turbines les mieux adaptées pour les faibles chutes (environ 2 m) et des débits importants de l'ordre de 300 l à 15000 l. Elles conviennent bien pour des débits variables et leur rendement est bon (84-90% maximum). En dépit d'une vitesse de rotation faible ; les pâles sont orientables pour optimiser le coefficient de rendement de la turbine.

Kaplan Turbine:

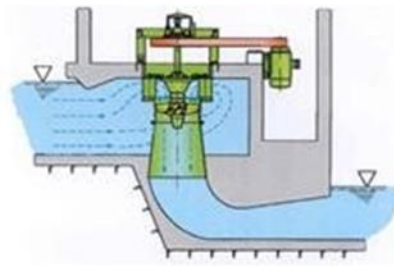


Figure I.18: Turbin Kaplan.[5]

I.7.2 Turbines à action :

La turbine à action est caractérisée par le fait que l'énergie à disposition de l'aubage est à pression constante (généralement la pression atmosphérique), la roue de la turbine tourne dans l'air, divisée en deux types :

- **Turbine Pelton** : La turbine Pelton est constituée par une roue à augets qui est mise en mouvement par un jet d'eau provenant d'un injecteur, les augets sont profilés pour obtenir un rendement maximum tout en permettant à l'eau de s'échapper sur les côtés de la roue. La vitesse nominale de la turbine varie de (500 tr/min) à (1500 tr/min), ce qui permet un couplage direct sans multiplicateur à la génératrice électrique.

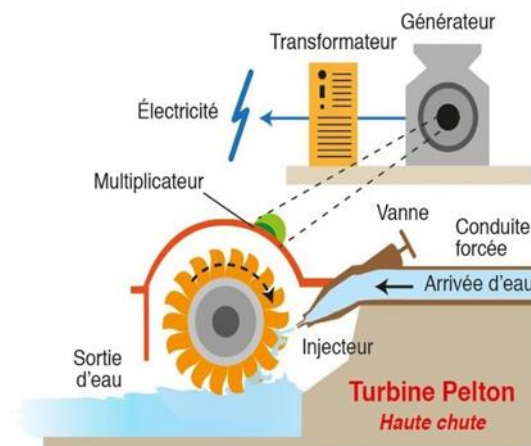


Figure I.19 : Turbine Pelton.[5]

- **Turbine Crossflow « Banki Mitchel »** : La turbine Crossflow, est une machine à action qui a une particularité que l'eau traverse deux fois la roue. De construction simple, elle est constituée de trois parties principales : un injecteur de section rectangulaire, une roue en

forme de tambour, dotée d'aubes cylindriques profilées, un bâti enveloppant la roue et sur lequel sont fixés les paliers de la turbine.

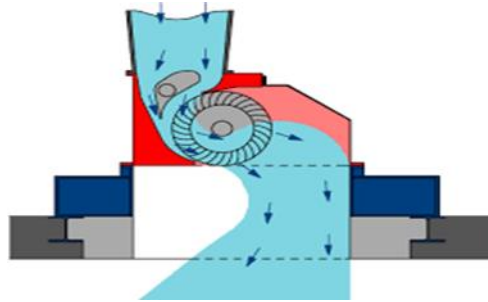


Figure I.20 : Turbin Crossflow.[5]

En général sa vitesse de rotation est faible, ce qui justifie l'emploi d'un multiplicateur pour la coupler à une génératrice.[5]

I.8 LES GENERATEURS ELECTRIQUES :

I.8.1. Générateurs à induction à cage d'écureuil (SCIG) :

Une machine à induction à cage d'écureuil est souvent utilisée comme moteur, mais elle peut être utilisée comme un générateur lorsqu'il est entraîné par un moteur principal à une vitesse supérieure à la vitesse synchrone.

Les machines à induction sont largement utilisées comme générateurs dans les applications d'énergie hydraulique en raison du coût unitaire et de la taille réduites, robustesse, manque de brosses, absence de source DC séparée, facilité de maintenance, d'autoprotection contre les surcharges sévères et les courts-circuits, etc. (Bansal 2005).

Un générateur à induction produit une puissance réelle mais il a besoin de puissance réactive pour établir l'excitation (le champ magnétique). Cela conduit à un faible facteur de puissance, souvent pénalisé par entreprises de services publics. La puissance réactive nécessaire à l'excitation peut être fournie par un condensateur banque, le réseau ou un convertisseur électronique de puissance à semi-conducteurs. La connexion d'un SCIG, en particulier un gros, à la grille provoque souvent un grand courant d'appel qui est 7 à 8 fois du courant nominal et un démarreur progressif sont souvent nécessaires. Le nombre de paires de pôles de SCIG utilisé dans les éoliennes commerciales à vitesse fixe est souvent égal à 2 ou 3, ce qui correspond à une vitesse synchrone de 1500 tr / min ou 1000 tr / min pour un système 50 Hz. En conséquence, un trois étapes la boîte de vitesses est souvent nécessaire dans la chaîne cinématique.

Les SCIG sont souvent appliqués dans les systèmes hydrauliques à vitesse fixe directement connectés au réseau à travers un transformateur, comme illustré à la Figure 1.43 (a). Avec cette topologie, les pales du rotor sont directement fixées au moyeu et réglés une seule fois lors du montage de la turbine. La puissance la limitation de la vitesse nominale du vent est obtenue en calant les pales du rotor.

Cette topologie est complètement passive et, par conséquent, cette topologie est appelée contrôle de décrochage passif ou contrôle de décrochage bref. Dans la plupart des cas, les condensateurs sont connectés en parallèle pour fournir le réactif puissance nécessaire à l'excitation.

Il y a des avantages évidents à utiliser les SCIG. Cependant, il existe également des inconvénients. La vitesse de fonctionnement n'est pas contrôlable et ne peut être modifiée que dans une plage très étroite car le circuit rotor n'est pas accessible, ce qui rend difficile l'extraction du maximum énergie éolienne disponible. La nécessité d'une boîte de vitesses à trois étages dans la chaîne cinématique considérablement augmente le poids de la nacelle, ainsi que les coûts d'investissement et de maintenance. De plus, c'est nécessaire pour obtenir le courant d'excitation du réseau, ce qui rend impossible la prise en charge la tension du réseau.[2]

1.8.2 Générateurs à induction à double alimentation (DFIG) :

Le fait que le circuit rotor d'un SCIG ne soit pas accessible peut être modifié si le circuit rotor est bobiné et rendu accessible via des bagues collectrices, ce qui offre la possibilité de contrôler le rotor circuit de sorte que la plage de vitesse de fonctionnement du générateur puisse être augmentée dans une manière. Le circuit du rotor est souvent connecté à des convertisseurs électroniques de puissance dos à dos, qui se compose d'un convertisseur côté rotor et d'un convertisseur côté réseau partageant le même bus CC, donc que la différence entre la vitesse mécanique du rotor et la vitesse électrique de la grille peut être compensée en injectant un courant à fréquence variable dans le circuit du rotor.

Par conséquent, le fonctionnement dans des conditions normales et défectueuses peut être régulé en contrôlant les convertisseurs.

Un DFIG peut être excité via les enroulements du rotor et n'a pas besoin d'être excité via le stator enroulements. Si nécessaire, la puissance réactive nécessaire à l'excitation des enroulements du stator peut être généré par le convertisseur côté réseau. En conséquence, une centrale éolienne équipée de DFIG peut facilement participer à la régulation de la tension du

réseau. Le stator fournit toujours une puissance réelle au réseau mais la puissance réelle dans le circuit du rotor peut circuler de manière bidirectionnelle, de la grille au rotor ou du rotor à la grille, selon les conditions de fonctionnement. Ignorant les pertes, la puissance gérée par le circuit du rotor est (Tazil et al.2010).[2]

I.8.3 Générateur synchrone à aimant permanent (PMSG) :

Les machines asynchrones présentent le défaut d'imposer la présence d'un multiplicateur de vitesse. Elles sont en effet bien adaptées à des vitesses de rotation relativement importantes et à un couple insuffisant pour un couplage mécanique direct sur les voilures éoliennes. Par contre, les machines synchrones sont connues pour offrir des couples très importants à dimensions géométriques convenables. Elles peuvent donc être utilisées en entraînement direct sur les turbines éoliennes. Les systèmes de ce type possèdent aussi leurs défauts. Les machines synchrones à rotor bobiné demandent un entretien régulier de système des bagues et balais. Le circuit d'excitation de l'inducteur demande la présence du réseau et une fourniture de la puissance réactive. Les sites isolés ne sont pas adaptés à ces génératrices qu'en présence d'une batterie de condensateurs ou d'une source de tension indépendante. Par contre, la possibilité de réglage de l'inducteur de ces machines offre un moyen supplémentaire d'ajustement du point de fonctionnement énergétique. Le couplage direct sur le réseau est proscrit, car il est beaucoup trop rigide. Une électronique de puissance s'impose pour toutes les applications utilisant ce type de machine qui sont donc à vitesse variable. Mais, contrairement aux génératrices MADA (Machines Asynchrones à Double Alimentation), la chaîne de conversion placée sur le stator doit être dimensionnée pour la totalité de la puissance du système de production. Le développement des matériaux magnétiques a permis la construction des machines synchrones à aimants permanents à des coûts qui deviennent compétitifs. Les machines de ce type sont à grand nombre de pôles et permettent de développer des couples mécaniques considérables. Il existe plusieurs concepts de machines synchrones à aimants permanents dédiées aux applications éoliennes, des machines de construction standard (aimantation radiale) aux génératrices discoïdes (champs axial), ou encore à rotor extérieur. Le couplage de ces machines avec l'électronique de puissance devient de plus en plus viable économiquement, ce qui en fait un concurrent sérieux des génératrices asynchrones à double alimentation. Les systèmes de ce type ont un taux de défaillance jugé faible grâce à la suppression de certaines sources de défauts:

- Suppression du multiplicateur de vitesse et du système de bagues et balais pour les génératrices à aimants.

- Les frais d'entretien sont alors minimisés ce qui est très intéressant dans les applications éoliennes, en particulier dans les sites difficilement accessibles (offshore par exemple).
- La présence obligatoire de l'électronique de puissance permet enfin une régulation simple de la vitesse de rotation et donc une optimisation énergétique efficace.[7]

Parmi les inconvénients de PMSG : problème de tenu en température des aimants permanents (250°C pour le samarium-cobalt), risque de démagnétisation irréversible des aimants par la réaction d'induit et difficulté de dé fluxage et complexité de son électronique de commande (nécessité d'un capteur de position).

Pour atteindre des vitesses élevées. Il est nécessaire d'augmenter le courant statorique afin de démagnétiser le courant statorique afin de démagnétiser la machine et l'impossibilité de régler l'excitation. [12]

I.9 SYSTEME DE TRANSMISSION D'ENERGIE :

Après une production d'énergie et une convention électronique de puissance, l'énergie doit être transmise au réseau, les systèmes de transmission électrique haute tension (HV) sont utilisés pour transporter de grandes quantités d'énergie électrique utilisent les différentes formes de courant sur une longue distance avec une perte de puissance minimale.

Bien que les systèmes de transmission ne tient pas compte du coût des WEC et n'est pas pris en compte dans les étapes initiales de développement de produits, il devient indispensable de les analyser ultérieurement.

Il existe deux principaux types de systèmes de transmission :

I.9.1 Transmission HVAC : est la transmission à courant alternatif haute tension, la forme la plus courante de transmission électrique, et elle utilise des tensions alternatives à haute fréquence pour transporter l'électricité sur les lignes de transmission. Cette dernière peut être efficace pour transporter de l'énergie sur des distances relativement courtes, généralement inférieures à 50 km. Les centrales marémotrices génèrent généralement de l'électricité à une tension de 11 kV à 33 kV, qui est ensuite transportée sur le réseau électrique local via des câbles HVAC.

I.9.2 Transmission HVDC : est la transmission à courant continu haute tension, en revanche, utilise des tensions continues pour transporter l'énergie sur les lignes de transmission. La transmission HVDC peut être efficace pour transporter de grandes quantités d'énergie sur de

longues distances, car elle peut minimiser les pertes de puissance en raison de sa capacité à transporter de grandes quantités d'énergie sur des lignes de transmission relativement minces. Cependant, la technologie HVDC est généralement plus coûteuse que la technologie HVAC et nécessite des équipements plus complexes pour convertir l'énergie en tension continue.

Les convertisseurs à commutation de ligne (LCC) sont un type de transmission HVDC qui utilise thyristors pour les actions de commutation. Ils facilitent le contrôle instantané de la puissance sur une longue transmission à distance. Les thyristors présentent un mécanisme de contrôle d'angle qui provoque le courant pour être déphasé avec la tension de ligne. L'autre type de transmission HVDC est le convertisseur de source de tension (VSC) qui utilise des dispositifs de commutation tels que l'IGBT (Transistor bipolaire à porte isolée) Cela permet un contrôle total de la puissance active et réactive des deux côtés de la ligne, offrant une plus grande flexibilité de contrôle de la puissance par rapport à la technique LCC. Les sous-stations du système VSC sont moins chères et plus petites et sont préférables aux sous-stations LCC.[14]

I.10 CONCLUSION

Le foyer de ce chapitre a permis de présenter les généralités des énergies marines, ses chaînes de conversion, son principe de fonctionnement, ainsi que les générateurs utilisés. Dans la première partie de ce chapitre, un historique a été donné concernant le principe et les types des systèmes énergétiques océaniques. Une brève introduction de la chaîne de conversion a également été envisagée. La deuxième partie s'est concentrée sur les types de générateurs utilisés dans la chaîne de conversion électrique et les systèmes de transmission.

CHAPITRE II

MODÉLISATION DE LA CHAÎNE DE CONVERSION D'ÉNERGIE

II.1 INTRODUCTION :

Dans cette partie on concentre sur la modélisation de la chaîne de conversion de l'énergie dans le contexte de l'énergie marine, et il est essentiel de comprendre en détail le fonctionnement des composants clés de la chaîne de conversion de cette énergie pour optimiser son efficacité et sa performance. Dans ce chapitre, nous aborderons la modélisation de la turbine, du générateur synchrone à aimants permanents (PMSG), du convertisseur back-to-back et du réseau électrique, en mettant l'accent sur leurs interactions et leurs caractéristiques spécifiques.

Nous commencerons par examiner la modélisation de la turbine, qui est un élément central de la chaîne de conversion, nous décrirons les principaux aspects tels que les caractéristiques hydrodynamiques les performances mécaniques et la réponse aux variations de la vitesse du flux d'eau, ensuite la modélisation PMSG ce type est couramment utilisé dans les installations d'énergie marine en raison de ses avantages, tels que son rendement élevé et sa compacité. Nous étudierons les équations fondamentales qui décrivent le comportement du PMSG et nous discuterons des techniques de modélisation appropriées

Enfin, nous examinerons la modélisation du réseau électrique dans le contexte de l'énergie marine.

II.2 MODELISATION DE LA TURBINE :

La production d'électricité à partir de l'eau en mouvement peut être réalisée soit en construisant un barrage de marée dans les zones à marée haute (énergie potentielle des marées), soit en extrayant de l'énergie à partir de l'eau libre en mouvement (énergie cinétique des marées). La quantité d'énergie qu'une turbine à courants de marée peut extraire de l'eau en mouvement dépend de sa conception. Des facteurs tels que le diamètre du rotor et la vitesse du courant de marée influencent cette quantité d'énergie. La puissance disponible dans les courants de marée est donnée par :

$$P_{avl} = 0.5\rho AV^3 \quad (\text{II.1})$$

Où, ρ est la densité de l'eau de mer = 1020, A est la surface des pales du rotor et V est la vitesse du courant d'eau. La puissance réelle peut être exploitée comme suit par P_{act} .

$$P_{act} = 0.5\rho C_p (\lambda, \beta) AV^3 \quad (\text{II.2})$$

Où, C_p est le coefficient de puissance qui est une fonction du rapport de vitesse de pointe (TSR) (λ) et de l'angle d'inclinaison des pales de la turbine (β), et il représente le pourcentage de puissance que la turbine peut extraire de l'écoulement d'eau à travers la turbine. Le rapport de vitesse de pointe peut être calculé à l'aide de l'équation suivante :

$$\lambda = \frac{R\omega_r}{V} \quad (II.3)$$

Où, R est le rayon de la pale du rotor et ω_r est la vitesse angulaire du rotor. Le coefficient de puissance C_p peut être déterminé à partir de l'équation suivante :

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \left(\frac{C_2}{\lambda_i} - C_3\beta - C_4 \right) e^{\frac{-C_5}{\lambda_i}} + C_6\lambda \quad (II.4)$$

$$\lambda_i = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (II.5)$$

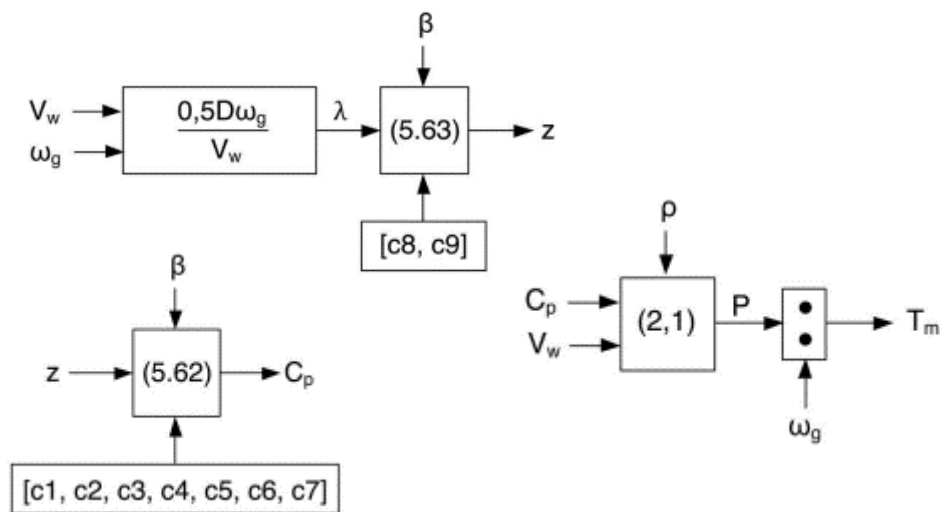


DIAGRAMME DU SCHEMA FONCTIONNEL DU MODELE TURBINE

Où, λ_i est la prochaine valeur de λ , C_p ne peut pas dépasser 0,593, ce qui signifie que la puissance extraite de l'eau est toujours inférieure à 59,3% (la limite de Betz). Cette limite reflète les différentes pertes aérodynamiques qui dépendent de la construction du rotor, telles que (le nombre et la forme des pales, le poids, la rigidité, etc.).

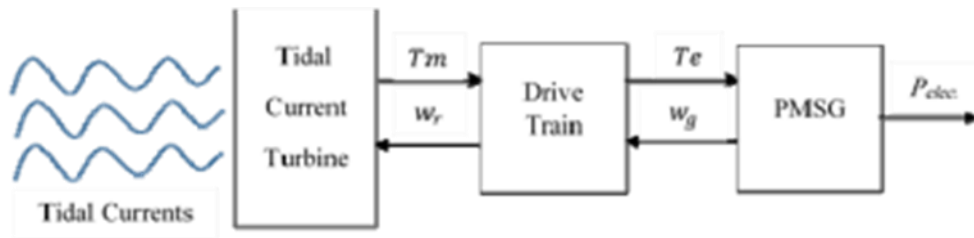


Figure II.1 : Système d'énergie marine. [9]

- Train de transmission : Le système de transmission est le lien qui permet de transférer le mouvement mécanique du rotor de la turbine vers le générateur. Il est généralement composé d'un arbre à basse vitesse, relié au moyeu de la turbine, d'un multiplicateur de vitesse et d'un arbre à grande vitesse qui entraîne le générateur électrique. La transmission à entraînement direct (c'est-à-dire lorsque le générateur et le rotor sont couplés sur le même arbre sans boîte de vitesses ni multiplicateur de vitesse) est utilisée dans le cas d'un générateur synchrone à plusieurs pôles.

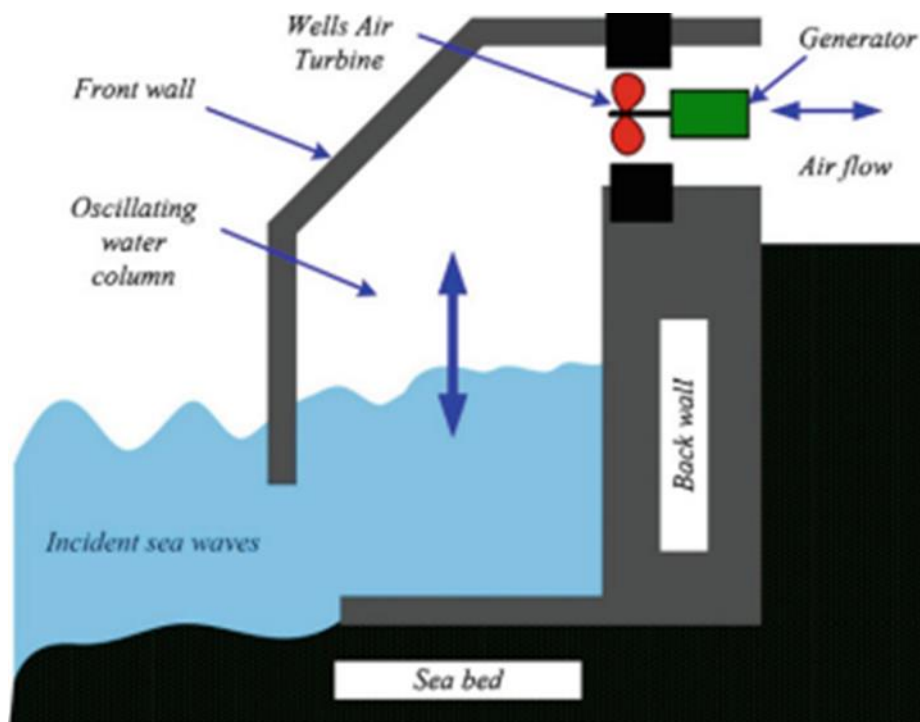


Figure II.2 : structure de OWC. [6]

La modélisation est réalisée en supposant que la transmission mécanique a une efficacité constante sur l'ensemble de la plage de vitesses ; l'effet des caractéristiques de construction (comme les vibrations, le type d'engrenage, la réaction de l'engrenage, etc.) sur ses

performances est considéré comme très faible et sera négligé. Le système de transmission peut être modélisé comme suit, en considérant le système comme un ensemble de masses discrètes.

$$j \frac{dw_g}{dt} = T_m - T_e - V_f w_g \quad (II.6)$$

$$T_m = \frac{P_{act}}{W_r} = \frac{0.5 \rho C_p (\lambda, \beta) AV^3}{W_r} \quad (II.7)$$

Où, j est la somme de l'inertie du rotor et du générateur, T_m est le couple mécanique de la turbine, T_e est le couple électromagnétique du générateur, V_f est le coefficient de frottement visqueux ou le rapport d'amortissement, w_g est la vitesse angulaire du générateur et w_r est la vitesse angulaire du rotor. Modèle mathématique est représenté dans Matlab / Simulink. [8]

II.3 MODELISATION DU GENERATEUR SYNCHROME A AIMANTS PERMANENTS (PMSG) :

Comme la sortie est un système triphasé Ac, la transformation Clarke / Park est utilisée pour deux raisons : de nombreuses propriétés des machines électriques peuvent être appliquées sans complexité dans les équations de tension et pour éviter tout conflit car le rotor en fonction de l'angle du stator ne peut pas être connu. [8]

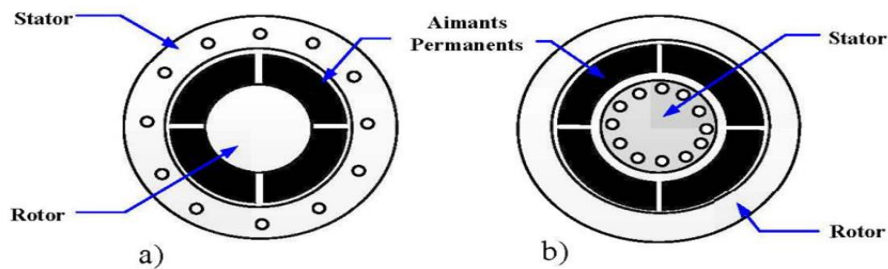


Figure II.3 : a) Structure à rotor interne b) Structure a rotor externe. [9]

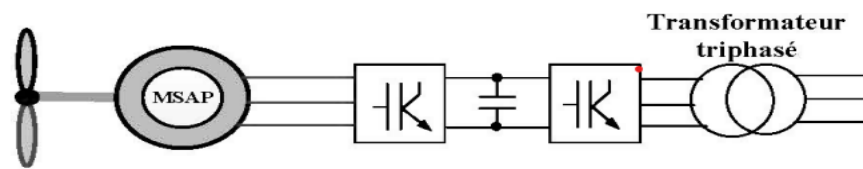


Figure II.4 : Schéma équivalent d'un système éolien basé sur la machine synchrone à aimants permanents. [9]

PMSG présente plusieurs avantages par rapport aux autres types de générateurs utilisés dans l'eau et les systèmes d'énergie éolienne ces avantages tels que sa structure simple :

- ✓ Sa capacité de fonctionnement à vitesse lente,
- ✓ Capacité d'auto excitation conduisant à un facteur de puissance élevé et à un fonctionnement à haut rendement.
- ✓ Avec une faible vitesse de fonctionnement PMSG, il n'y a pas besoin d'une boîte de vitesses qui souffre souvent de défauts et nécessite une maintenance régulière rendant le système peu fiable.[8]

Donc dans ce travail PMSG était préféré aux autres types de générateurs. Le modèle mathématique du PMSG selon la référence d_q synchrone la trame est donnée par :

$$V_d = -L_q I_q \omega_e + L_d \frac{dI_d}{dt} + RI_d \quad (\text{II.8})$$

$$V_q = L_d I_d \omega_e + L_q \frac{dI_q}{dt} + RI_q + \varphi_{pm} \omega_e \quad (\text{II.9})$$

$$\varphi_d = L_d I_d + \varphi_{pm}, \varphi_q = L_q I_q, \omega_e = P \omega_g \quad (\text{II.10})$$

Où, V_d, V_q are sont les tensions statoriques directes et en quadrature, respectivement, L_d, L_q are sont les inductances directes et en quadrature du stator, respectivement, I_d, I_q are sont les inductances directes et en quadrature les courants statoriques, respectivement, φ_d, φ_q are sont les flux statoriques directs et en quadrature, respectivement, φ_{pm} et est le flux de l'aimant permanent, ω_e, ω_g are sont l'électricité (rotor) et vitesse angulaire du générateur(stator), respectivement et P est le nombre de pôles.

Le couple électromagnétique peut être exprimé dans le même cadre comme suit :

$$T_e = \frac{3}{2} P \left[(L_q - L_d) I_d I_q + \varphi_{pm} I_q \right] \quad (\text{II.11})$$

Le PMSG est très populaire en génération variable applications. Beaucoup de ces applications sont basées sur des générateurs à entraînement direct qui utilisent des aimants permanents (PM) de terres rares. L'avantage des PM de terres rares est que le flux résiduel la densité est très

élevée, généralement $B = 1,4$ Tesla ou plus. Dans comparaison, le PM couramment utilisé dans le passé était l'aimant en ferrite, qui a une faible densité de flux, $B = 0,4$ Tesla ou inférieur.

Un aimant à haute densité de flux est très important car, pour à puissance et vitesse de rotation identiques, plus la densité de flux, plus le générateur sera petit et léger. C'est supposé que le générateur PM utilisé soit monté en surface. Le circuit équivalent d'un générateur PM est illustré à la figure 4. [9]

II.3.1 Equations électriques :

Les équations électriques régissant le fonctionnement de la MSAP dans le repère fixe lié au stator (a, b, c) de la machine s'écrivent sous la forme suivante :

$$[V_s] = [-R_s][i_s] + \frac{d}{dt}[\psi_s] \quad (\text{II.12})$$

Avec :

$$[V_s] = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}, [R_s] = \begin{bmatrix} -R_s & 0 & 0 \\ 0 & -R_s & 0 \\ 0 & 0 & -R_s \end{bmatrix}, [i_s] = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}, [\psi_s] = \begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.13})$$

$[V_s]$: Vecteur des tensions statoriques.

$[R_s]$: Matrice des résistances statoriques.

$[i_s]$: Vecteur des courants statoriques.

$[\psi_s]$: Vecteur des flux statoriques.

Les flux totalisés $[\psi_s]$ des phases statoriques s'écrivent dans le repère lié au stator sous la forme matricielle suivante :

$$[\psi_s] = [-L_{ss}][i_s] + [\psi_{sf}] \quad (\text{II.14})$$

Avec :

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_{sa} & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ba} & L_{sb} & M_{bc} \\ M_{ca} & M_{cb} & L_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.15})$$

Où :

L_{sa} , L_{sb} et L_{sc} : Des inductances propres aux phases (a, b et c) respectivement.

M_{ab} , M_{ac} , M_{ba} , M_{bc} , M_{ca} et M_{cb} : Des inductances mutuelles aux phases (a, b et c) respectivement.

$[\psi_{sf}] = [\psi_{af} \quad \psi_{bf} \quad \psi_{cf}]$: Représente le vecteur de projection du flux de l'aimant permanent sur les trois phases (a, b et c).

La matrice des inductances mutuelles entre les phases statoriques et les aimants permanents dépend de la position angulaire électrique θ_r du rotor.

$$L_{sf} = \hat{\psi}_{fd} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) \\ \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r - \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (\text{II.16})$$

D'après la Figure II.4, la forme matricielle des inductances statoriques en fonction de la position du rotor est donnée par la forme suivante :

$$L_{ss} = \begin{bmatrix} l_{is} + L_{0s} + L_{2s} \cos(2\theta_r) & -\frac{L_{0s}}{2} + L_{2s} \cos\left(2\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & -\frac{L_{0s}}{2} + L_{2s} \cos\left(2\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\frac{L_{0s}}{2} + L_{2s} \cos\left(2\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & l_{is} + L_{0s} + L_{2s} \cos(2\theta_r) & -\frac{L_{0s}}{2} + L_{2s} \cos(2\theta_r) \\ -\frac{L_{0s}}{2} + L_{2s} \cos\left(2\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & -\frac{L_{0s}}{2} - L_{2s} \cos(2\theta_r) & l_{is} + L_{0s} + L_{2s} \cos\left(2\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (\text{II.17})$$

l_{is} : Inductance de fuite.

L_{0s} : Terme constante de l'inductance propre d'une phase.

L_{2s} : Amplitude de première harmonique de l'inductance propre d'une phase.

θ_r : Position électrique du rotor.

$$\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} \quad (\text{II.18})$$

Pour l'étude du fonctionnement de la machine dans tous les régimes, nous allons utiliser le système d'équations électriques suivant :

$$[V_s] = [-R_s][i_s] + \frac{d\{[-L_{ss}][i_s]\}}{dt} + \frac{d\{[L_{sf}]\}}{dt} \quad (\text{II.19})$$

Il est possible d'aboutir à l'expression des tensions en fonction des courants, du flux et de la vitesse de rotation.

$$[V_s] = [-R_s][i_s] + [L_{ss}] \frac{d[i_s]}{dt} - \omega_r \frac{d[L_{ss}]}{d\theta_r} [i_s] + \omega_r \frac{d[\psi_{sf}]}{d\theta_r} \quad (\text{II.20})$$

II.3.2 Équations mécaniques :

Si on néglige le frottement sec, le couple électromécanique fourni est transmis à la charge et d'autre part, sert à l'accélération du rotor et à la compensation du frottement visqueux. Selon la loi de Newton, l'équation fondamentale de la mécanique est :

$$C_{em} - C_r = J \frac{d\Omega}{dt} + J\Omega \quad (\text{II.21}) \quad \text{Où,} \quad \omega_r = P\Omega_r \quad (\text{II.22})$$

P : Nombre de paires de pôles.

J : Le moment d'inertie total ramené sur l'arbre.

f : Le coefficient de frottement visqueux.

C_{em} : Couple électromagnétique délivré par la machine.

C_r : Couple résistant appliqué sur l'arbre de la machine.

D'une façon générale, le couple électromécanique délivré par la machine, obtenu à partir de la dérivée de l'énergie mécanique par rapport à la position électrique du rotor, est donné par l'expression suivante :

$$C_{em} = \frac{1}{2} P [i_s]^T \left[\frac{d[i_s]}{d\theta_r} \right] [i_s] \quad (\text{II.23})$$

En faisant apparaître les grandeurs statoriques et rotoriques dans l'équation (II.23), on aboutit à la formule du couple électromagnétique suivante :

$$C_{em} = \frac{1}{2} P \left[\frac{1}{2} [i_s]^T \frac{d[L_{ss}]}{d\theta_r} + [i_s]^T \frac{d[\psi_{sf}]}{d\theta_r} \right] \quad (\text{II.24})$$

Dans ce qui suit, nous allons développer l'expression du couple électromécanique dans le repère lié au rotor. À partir des équations précédentes, nous remarquons que l'étude du système est assez difficile vu le nombre d'équations différentielles à coefficient variables. Pour résoudre ce problème, nous allons utiliser des transformations mathématiques (repère de Park), qui permettent de décrire le comportement de la machine à l'aide d'équations différentielles à un coefficient constant. Ainsi, nous allons présenter la modélisation de la MSAP dans le repère lié au rotor puis au stator en utilisant la transformation de Park.

II.3.3 Modèle de la machine synchrone à aimant permanent dans le repère de Park :

Le modèle de la machine synchrone le plus utilisé est basé sur la théorie unifiée des machines électriques. Cette théorie est basée sur la transformation de Park et elle permet d'obtenir un système équivalent formé de deux enroulements orthogonaux qui sont situés dans le même plan que les enroulements a, b et c. Avec cette transformation, nous pouvons passer d'une représentation dans le repère triphasé (a, b, c) à une représentation dans le repère cartésien (d, q) comme le montre la Figure II.4.

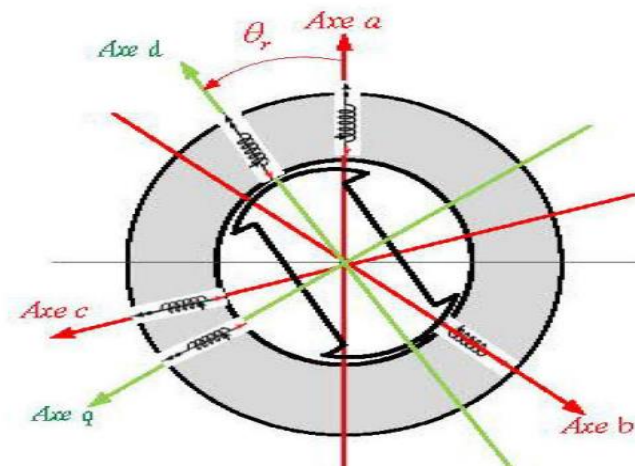


Figure II.5 : Représentation de la MSAP dans le repère de Park. [9]

Pour exprimer l'ensemble des relations de la machine dans ce repère, nous allons appliquer la transformation orthogonale au stator et au rotor, en nous basant sur les hypothèses simplificatrices. La transformation de Park utilisée, conserve l'expression de la puissance instantanée.

II.3.4 Équations électriques dans le repère de Park (d, q) :

Avec un système biphasé (d, q) par deux bobines décalées de $\frac{\pi}{2}$ dans l'espace, on peut créer un champ tournant identique à celui créé par un triphasé (a, b, c) déphasés de $\frac{2\pi}{3}$. Par la suite, nous utiliserons également des transformations orthogonales, dont l'inverse de la matrice de passage est égal à sa transposée.

$$P(\theta_r) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta_r) & -\sin\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{II.25})$$

L'inverse de la matrice $[P(\theta_r)]$ est calculé comme suit :

$$[P(\theta_r)]^{-1} = [P(\theta_r)]^T = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & -\sin(\theta_r) & \sqrt{\frac{2}{2}} \\ \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \sqrt{\frac{2}{2}} \\ \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \sqrt{\frac{2}{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.26})$$

Soit $[P(\theta_r)]$ la matrice de transformation de Park, cette transformation fait correspondre les vecteurs $[V_{dqo}]$, $[i_{dqo}]$ et $[\psi_{dqo}]$.

Le vecteur V_o représente la composante homopolaire et les vecteurs V_d et V_q représentent les vecteurs déphasés des tensions V_a , V_b et V_c .

Après transformation et simplification, le système d'équations des tensions dans le repère de Park est donné par :

$$\begin{cases} V_d = -R_s i_d + \left(\frac{d\psi_d}{dt} \right) - \omega_r \psi_q \\ V_q = -R_s i_q + \left(\frac{d\psi_q}{dt} \right) - \omega_r \psi_d \\ V_o = -R_s i_o + \left(\frac{d\psi_o}{dt} \right) \end{cases} \quad (\text{II.27})$$

Ce système représente le modèle électrique dynamique dans le référentiel de Park, dans notre cas, le système est équilibré, donc la troisième équation est nulle. Dans le système d, q tournant à la vitesse du rotor, les grandeurs électriques et magnétiques sont de type continu, ce qui rend sa commande similaire à la commande des machines à courant continu. Ce système sera utilisé dans la commande vectorielle de la MSAP.

II.3.5 Équations de flux :

De même, pour le flux, en appliquant l'équation (II.14) à gauche et à droite par la matrice de Park $[P(\theta_r)]$, nous obtenons :

$$\begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \end{bmatrix} = [P(\theta_r)] \begin{bmatrix} L_{sa} & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ba} & L_{sb} & M_{bc} \\ M_{ca} & M_{cb} & L_{sc} \end{bmatrix} \left([P(\theta_r)]^{-1} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \right) + [P(\theta_r)] i_f \begin{bmatrix} L_{af} \\ L_{bf} \\ L_{cf} \end{bmatrix} = [P(\theta_r)] \begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.28})$$

Les flux totalisés dans chaque phase s'expriment comme suit :

$$\begin{cases} \psi_d = -L_d i_d + \psi_f \\ \psi_q = -L_q i_q \end{cases} \quad (\text{II.29})$$

Où L_d et L_q sont respectivement les inductances directes et quadrature. Elles sont supposées indépendantes de la position θ_r , ψ_f valeur crête du flux généré par les aimants lorsque son axe longitudinal est aligné avec celui de l'un des enroulements statoriques. En remplaçant l'équation (II.29) dans l'équation (II.27), on obtient :

$$\begin{cases} V_d = -R_d i_d + \frac{d(-L_d i_d + \psi_f)}{dt} - P\omega_r (-L_q i_q) \\ V_q = -R_d i_q + \frac{d(-L_q i_q + \psi_f)}{dt} - P\omega_r (-L_d i_d + \psi_f) \end{cases} \quad (\text{II.30})$$

Après transformation et arrangement des équations en faisant les manipulations et les transformations nécessaires, on aboutit aux équations électriques de la MSAP exprimées dans le repère lié au rotor :

$$\begin{cases} V_d = -R_s i_d - L_d \left(\frac{di_d}{dt} \right) + P\omega_r L_q i_q \\ V_q = -R_s i_q - L_q \left(\frac{di_q}{dt} \right) - P\omega_r L_d i_d + P\omega_r \psi_f \end{cases} \quad (\text{II.31})$$

On peut aussi écrire l'équation (3.20) comme suite :

$$\begin{cases} V_d = -R_s i_d - L_d \left(\frac{di_d}{dt} \right) + e_q \\ V_q = -R_s i_q - L_q \left(\frac{di_q}{dt} \right) - e_d + E_{q0} \end{cases} \quad (\text{II.32})$$

Tel que :

$$e_q = P\omega_r L_q i_q, \quad e_d = P\omega_r L_d i_d, \quad E_{q0} = P\omega_r \psi_f \quad (\text{II.33})$$

II.3.6 Schéma équivalent de la MSAP en régime transitoire :

La figure II.5, montre le schéma équivalent en régime transitoire de la MSAP dans le repère de Park.

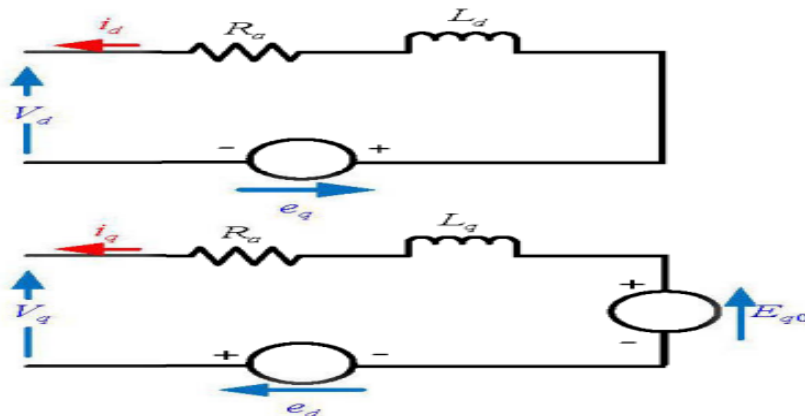


Figure II.6 : Circuit équivalent de la MSAP dans le repère de d et q. [9]

Traditionnellement, le circuit équivalent par phase de la machine synchrone à aimants permanents de la (figure II.4) est exploité pour l'analyse et la simulation numérique des entraînements de ce type de machine en régime transitoire.[9]

II.4 MODELISATION DE CONVERTISSEURS BACK to BACK :

Le convertisseur 1 fonctionnera en redresseur MLI, il jouera le rôle d'émulateur de la génératrice. Il sera commandé de façon à absorber du réseau triphasé un profil de puissance active $P_1(t)$ représentant celui du houlogénérateur, sachant qu'on ne recherche pas ici à étudier le contrôle optimal de la génératrice qui nécessiterait en pratique d'ajuster l'angle d'autopilotage en fonction du couple et de la vitesse. Ici, la puissance réactive Q_1 sera nulle. Le second pont, quand à lui, sera commandé de façon à réinjecter cette puissance (aux pertes près) au réseau tout en réglant la tension du bus DC (figure II.7) et éventuellement en réglant la puissance réactive Q_2 .

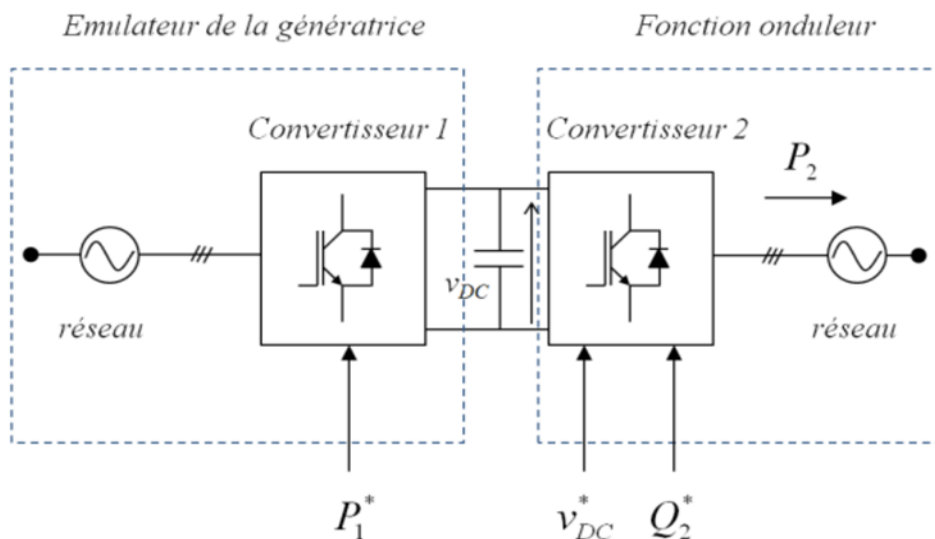


Figure II.7 : Schéma simplifié du montage back-to-back. [10]

Les deux convertisseurs sont supposés identiques, ainsi que les filtres d'entrée (filtres L-C). Nous allons montrer que malgré son comportement non linéaire, le redresseur actif peut se comporter comme une charge purement résistive absorbant un courant sinusoïdal et en phase avec la tension du réseau grâce à l'utilisation d'une stratégie de commande bien particulière. [10]

Le convertisseur fonctionnant en redresseur est contrôlé en courant tandis que celui qui fonctionne en onduleur est contrôlé en tension. Dans le cas d'un système triphasé parfait (II.34) les équations de fonctionnement d'un pont sont décrites dans (II.35).

$$\begin{cases} e_a = \sqrt{2}E \cos(\omega t) \\ e_b = \sqrt{2}E \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ e_c = \sqrt{2}E \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (\text{II.34})$$

$$\begin{pmatrix} \frac{di_a}{dt} \\ \frac{di_b}{dt} \\ \frac{di_c}{dt} \end{pmatrix} = -\frac{1}{L} \begin{pmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} + \frac{1}{L} \begin{pmatrix} u_a - e_a \\ u_b - e_b \\ u_c - e_c \end{pmatrix} \quad (\text{II.35})$$

Où R et L sont les éléments du filtre. Par ailleurs, E représente la valeur efficace de la tension simple et ω la pulsation du réseau telle que $\omega=2\pi f$ ($f=50\text{Hz}$). On notera par la suite $E_m = \sqrt{2}E$ la valeur maximale de la tension simple du réseau tel que :

En considérant que l'axe d est aligné avec le réseau (la composante e_d et en phase avec la tension v_a), l'équation (II.35) peut être écrite sous la forme suivante :

$$\begin{pmatrix} \frac{di_d}{dt} \\ \frac{di_q}{dt} \end{pmatrix} = \frac{1}{L} \begin{pmatrix} -R & \omega L \\ \omega L & -R \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} - \frac{1}{L} \begin{pmatrix} e_d \\ e_q \end{pmatrix} + \frac{1}{L} \begin{pmatrix} u_d \\ u_q \end{pmatrix} \quad (\text{II.36})$$

Avec i_d, i_q les composantes des courants i_a, i_b et i_c dans les axes d et q du repère tournant à $\omega t = \theta$, u_d, u_q les composantes des tensions u_a, u_b, u_c et e_d, e_q les composantes des tensions simples du réseau e_a, e_b et e_c dans le même repère.

Les expressions des composantes d et q des tensions en sortie de l'onduleur deviennent :

$$\begin{cases} u_d = Ri_d + L \frac{di_d}{dt} - L\omega i_q + e_d \\ u_q = Ri_q + L \frac{di_q}{dt} - L\omega i_d + e_q \end{cases} \quad (\text{II.37})$$

On peut remarquer dans l'expression de la composante directe de la tension en sortie de l'onduleur (u_d), la présence d'une composante en quadrature du courant (terme en i_q). Et de

même dans l'expression de la composante en quadrature (u_q), la présence d'une composante directe du courant (un terme en i_d), on dit qu'il existe un couplage entre les deux axes (relation II.37).[10]

II.4.1 Modélisation de l'onduleur MLI :

Le schéma de la figure II.8 donne le principe de l'onduleur de tension à MLI alimentant une PMSG :

- l'onduleur est alimenté par une source de tension E supposée parfaite ;
- il est constitué d'interrupteurs statiques (transistors IGBT) $T_1, 'T_1, T_2, 'T_2, T_3$ et $'T_3$ montés respectivement en tête bêche (antiparallèle) avec les diodes de récupération $D_1, 'D_1, D_2, 'D_2, D_3$ et $'D_3$. Ces diodes ont pour rôle de renvoyer les courants négatifs vers la source - le pilotage de l'onduleur se fait par des fonctions logiques. En effet, les tensions appliquées à la machine se déduisent de la tension d'entrée de l'onduleur E et des signaux logiques caractérisant l'état de chaque interrupteur ;
- les interrupteurs sont commandés de manière complémentaire, c'est-à-dire que si T_i est fermé alors $'T_i$ est ouvert.

On peut définir la variable logique C_i associée à l'interrupteur T_i d'où :

- Si $C_i(t) = 1$, alors T_i est passant et $'T_i$ est bloqué
- Si $C_i(t) = 0$, alors T_i est bloqué et $'T_i$ est passant Avec $i = a, b, c$. [13]

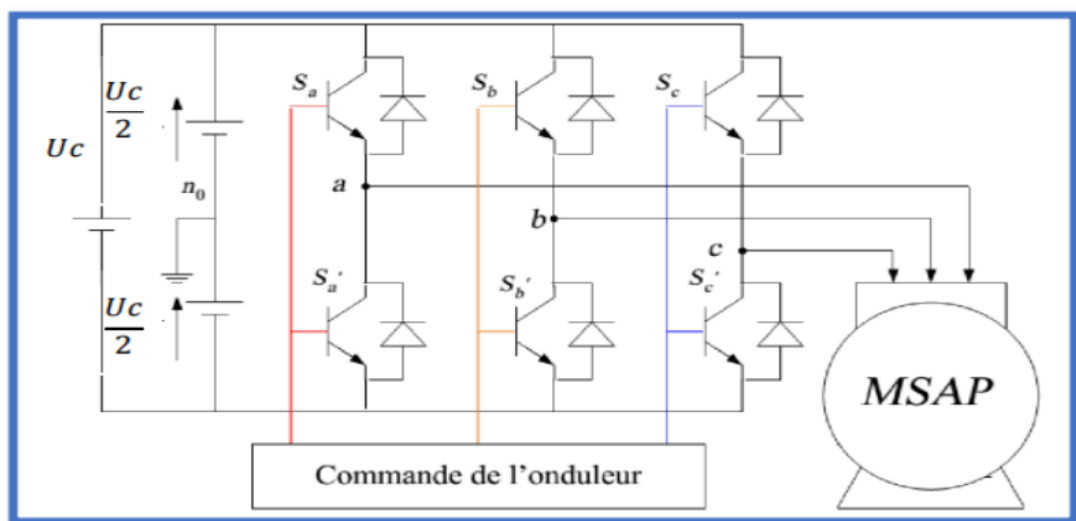


Figure II.8 : Schéma de principe de l'onduleur à MLI. [12]

➤ **Commande de l'onduleur** : L'onduleur est commandé par la technique basée sur le MLI (Modulateur de Largeur d'Impulsion) qui consiste à comparer des signaux :

- l'un triangulaire appelé porteuse, et l'autre sinusoïdal nommée référence. A leurs intersections, des ordres d'allumage ou d'extinction sont envoyés aux interrupteurs correspondants. L'équation des deux droites donnant la porteuse est définie par :

$$X_1(t) = -V_p + 2 \frac{V_p(t)}{T_p} \quad (\text{II.38}) \quad ; \quad X_2(t) = -V_p - 2 \frac{V_p(t)}{T_p} \quad (\text{II.39})$$

Avec : V_p l'amplitude de la porteuse ;

T_p La période de la porteuse, sachant que sa fréquence est $f_p = \frac{1}{T_p}$.

La référence est un signal sinusoïdal d'amplitude V_s et de fréquence f :

$$V_{ref}(t) = V_s \sin(2\pi ft) \quad \text{Sachant que sa pulsation est : } \omega = 2\pi f \text{ . [13]}$$

II.5 MODELISATION DE LA CONNEXION DE CONVERTISSEUR :

Le convertisseur de puissance est connecté au réseau électrique via un filtre R-L. Le bus DC (continue) est connecté au condensateur C à la tension v_{DC} . Le but de ce convertisseur est de maintenir une tension constante entre les bornes du bus CC et d'ajuster le facteur de puissance au point où il est connecté au réseau. [11]

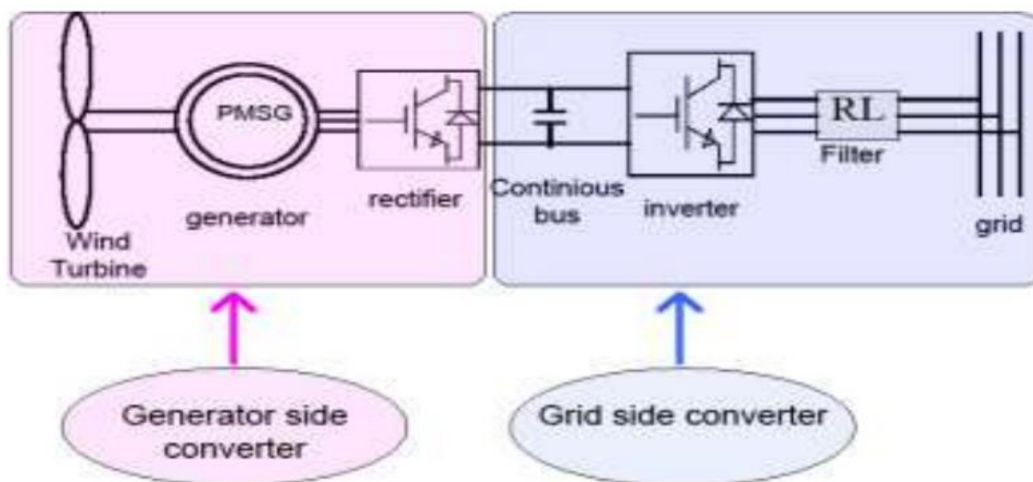


Figure II.9 : Structure générale de la chaîne de conversion de l'énergie. [11]

II.5.1 Modélisation du bus continues :

Le bus continu doit être réglé à tension constante et le condensateur a comme rôle le stockage de l'énergie obtenue et la limitation des ondulations de la tension continue.

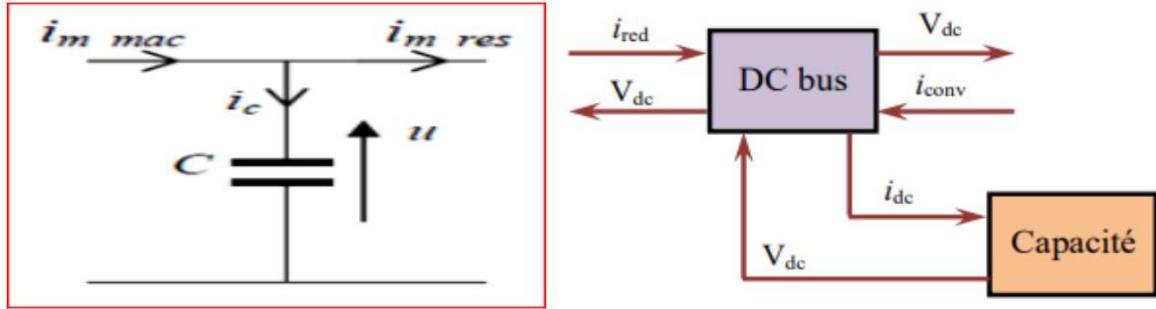


Figure II.10 : Schéma électrique et fonctionnelle du bus continue.[11]

On obtient la tension de du bus continu à partir de l'équation :
$$\frac{dv_{dc}}{dt} = \frac{1}{e} i_c \quad (\text{II.39})$$

Ou bien par cette équation :
$$v_{dc} = \int \frac{1}{c} i_c dt \quad (\text{II.40})$$

Le courant du condensateur provient du nœud où circulent les courants imac et ires, modulé par les convertisseurs :[11]
$$i_c = i_{mac} - i_{res} \quad (\text{II.41})$$

II.5.2 Modélisation du filtre passif :

Le courant transmis entre le convertisseur et le réseau est appliqué par une bobine qui forme un filtre passe-bas. La tension aux bornes du filtre est donnée par :

$$\begin{bmatrix} v_{m1} \\ v_{m2} \\ v_{m3} \end{bmatrix} = R_f \begin{bmatrix} i_{t1} \\ i_{t2} \\ i_{t3} \end{bmatrix} + L_f \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{t1} \\ i_{t2} \\ i_{t3} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{s1} \\ v_{s2} \\ v_{s3} \end{bmatrix} \quad (\text{II.42})$$

On applique la transformation de Park sur l'équation précédente on obtient :

$$\begin{cases} v_{md} = R_f i_{td} + L_f \frac{di_{td}}{dt} - \omega_s L_f i_{td} + v_{sd} \\ v_{mq} = R_f i_{tq} + L_f \frac{di_{tq}}{dt} - \omega_s L_f i_{td} + v_{sq} \end{cases} \quad (\text{II.43})$$

Avec :

v_{md}, v_{mq} les tensions modulées par le convertisseur dans le référentiel de Park.

v_{sd}, v_{sq} les tensions du réseau dans la référence de Park.

v_{md}, v_{mq} Les composantes directes et quadratiques des courants du filtre. [11]

II.6 MODELISATION DU RESEAUX ELECTRIQUE :

Modèle Le dynamique de la connexion au réseau dans le cadre de référence tournant de façon synchrone avec la tension du réseau est donnée comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{dg} = v_{id} - R_g i_{dg} - L_{dg} \frac{di_{gd}}{dt} + L_{qg} \omega_g i_{qg} \\ v_{qg} = v_{iq} - R_g i_{qg} - L_{qg} \frac{di_{gq}}{dt} + L_{dg} \omega_g i_{dg} \end{array} \right. \quad (\text{II.44})$$

Où : V_{dg}, V_{qg} sont les composants directs et en quadrature des tensions du réseau, V_{id}, V_{iq} sont les composants des tensions de l'onduleur, R_g, L_{dg}, L_{qg} sont respectivement la résistance, l'inductance directe et en quadrature du réseau, i_{dg}, i_{qg} sont les composants directs et en quadrature des courants du réseau respectivement, V_{dc} est la tension du circuit intermédiaire, i_{dc} est le courant de la ligne de transmission côté réseau et est le condensateur du circuit intermédiaire. [2]

Les équations de puissance dans le référentiel synchrone sont données par :

$$\left\{ \begin{array}{l} P_g = \frac{3}{2} (v_{dg} i_{dg} + v_{qg} i_{qg}) \\ Q_g = \frac{3}{2} (v_{dg} i_{qg} - v_{qg} i_{dg}) \end{array} \right. \quad (\text{II.45})$$

Après avoir orienté le cadre de référence le long de la tension du réseau, est égal à zéro en alignant l'axe d. Ensuite, la puissance active et réactive peut-être obtenue dans cette nouvelle référence à partir des équations suivantes. Ensuite, les puissances active et réactive peuvent être obtenues dans cette nouvelle référence à partir des équations suivantes [2] :

$$\begin{cases} P_g = \frac{3}{2} v_{dg} i_{dg} \\ Q_g = \frac{3}{2} v_{dg} i_{dg} \end{cases} \quad (\text{II.46})$$

II.7 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons exploré la modélisation de la chaîne de conversion de l'énergie, en mettant l'accent sur la modélisation de la turbine, du générateur synchrone à aimants permanents (PMSG), du convertisseur back-to-back et de la modélisation du réseau électrique.

La modélisation précise de la turbine est essentielle pour comprendre et évaluer son comportement mécanique et thermique, afin d'optimiser son efficacité énergétique.

La modélisation du générateur PMSG permet de capturer avec précision son comportement électrique, en utilisant les équations fondamentales et les paramètres appropriés.

La modélisation du convertisseur back-to-back est cruciale pour évaluer et optimiser l'efficacité de la conversion d'énergie entre le générateur PMSG et le réseau électrique.

La modélisation du réseau électrique permet d'évaluer l'impact de l'énergie marine sur le réseau existant et de développer des stratégies d'intégration efficaces.

En combinant ces modélisations, nous pouvons mieux comprendre les interactions entre les composants de la chaîne de conversion de l'énergie marine, optimiser leur fonctionnement et améliorer l'efficacité globale du système.

Ce chapitre fournit les bases nécessaires pour la compréhension et l'optimisation de la chaîne de conversion d'énergie, en préparant le terrain pour les chapitres suivants qui se concentreront sur le contrôle, l'optimisation et les performances des systèmes d'énergie.

CHAPITRE III

**ETUDE ET SIMULATION DE LA CHAÎNE
DE CONVERSION
À BASE D'UN PMSG**

III.1 INTRODUCTION :

Dans cette division de l'hypothèse concentre sur la simulation de la chaîne de conversion basée sur un générateur synchrone à aimants permanents (PMSG) dans le contexte de l'énergie marine. La simulation joue un rôle essentiel dans la compréhension et l'optimisation du fonctionnement de la chaîne de conversion, ainsi que dans le développement de stratégies de contrôle efficaces. Dans ce chapitre, nous aborderons la simulation de la chaîne globale de conversion, en mettant l'accent sur le contrôle du système et la modélisation du convertisseur. Nous présenterons également les résultats de la simulation à travers des graphiques et nous interpréterons ces résultats pour mieux comprendre les performances du système.

Nous commencerons par décrire le modèle de simulation du système de conversion basé sur le PMSG. Nous expliquerons les différentes équations et paramètres nécessaires pour représenter les interactions entre la turbine, le générateur PMSG et le convertisseur. Nous discuterons également des méthodes de simulation appropriées, telles que la simulation temps réel ou la simulation basée sur des outils de calculs numériques.

Nous présenterons ensuite les résultats de la simulation à travers des graphiques représentant les performances du système. Nous analyserons ces résultats en mettant en évidence les caractéristiques importantes telles que l'efficacité énergétique, la stabilité du système, la réponse dynamique aux variations de charge, etc. Nous interpréterons ces résultats pour évaluer l'efficacité du système de conversion basé sur le PMSG.

III.2 PITCH CONTROL :

Système d'orientation des pales : C'est un contrôle par variation de l'angle de calage des pales (pas des pales) autour de leur axe longitudinal en fonction de la vitesse des vagues et de la puissance active à extraire. En agissant par le Pitch control, le coefficient de puissance C_p ne varie plus en fonction de λ mais en fonction de la vitesse du vent à vitesse de rotation constante, ce qui va permettre de maintenir la puissance constante dans la zone 4 à sa valeur maximale. On peut noter que pour modifier l'angle de calage dans le Pitch Control dans un système de régulation automatique de vitesse de rotation on a besoin d'un régulateur électronique avec des masselottes centrifuges ou d'un régulateur électronique. [11]

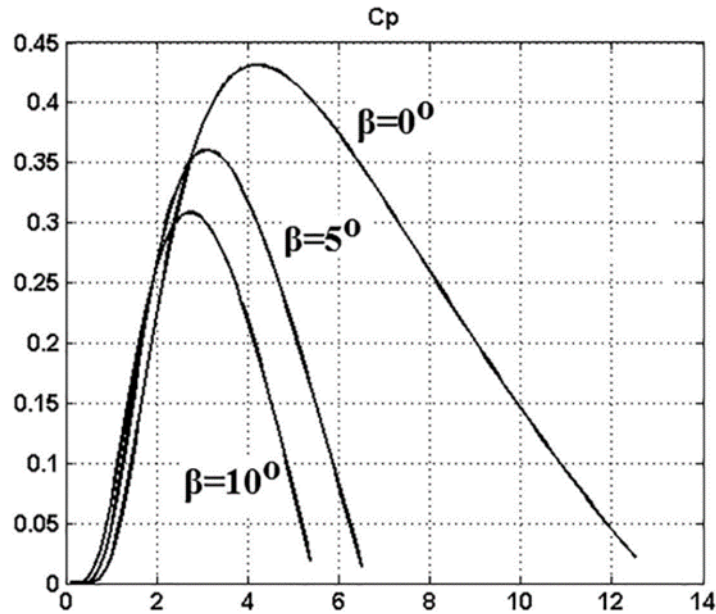


Figure III.1 : Dépendance de C_p sur λ et β pour la turbine. [14]

III.3 SYSTEME DE CONTROLE DE LA CHAINE GLOBALE :

Le contrôle de la chaîne globale vise à optimiser le fonctionnement de ces sous-systèmes en coordonnant leurs actions pour atteindre l'objectifs

Le générateur est connecté à un réseau alternatif via un convertisseur AC/DC/AC. Grâce à la commande de découplage du convertisseur, le générateur et le réseau sont complètement découplés. Par conséquent, les caractéristiques en régime permanent et transitoire du générateur dépendent principalement de la commande du système du convertisseur et de la stratégie de contrôle. Le système de contrôle comprend principalement le système de commande de la turbine houlomotrice et le système de commande du convertisseur, ce dernier se compose du système de commande du convertisseur côté générateur et côté réseau du système de commande de convertisseur. Le système de contrôle vise à :

- Contrôler la puissance active du générateur pour suivre le point de fonctionnement optimal de l'hydroélectrique ou limiter sa puissance de sortie à des débits d'eau élevés.
- Contrôler la puissance réactive échangée entre le HPP et le réseau.

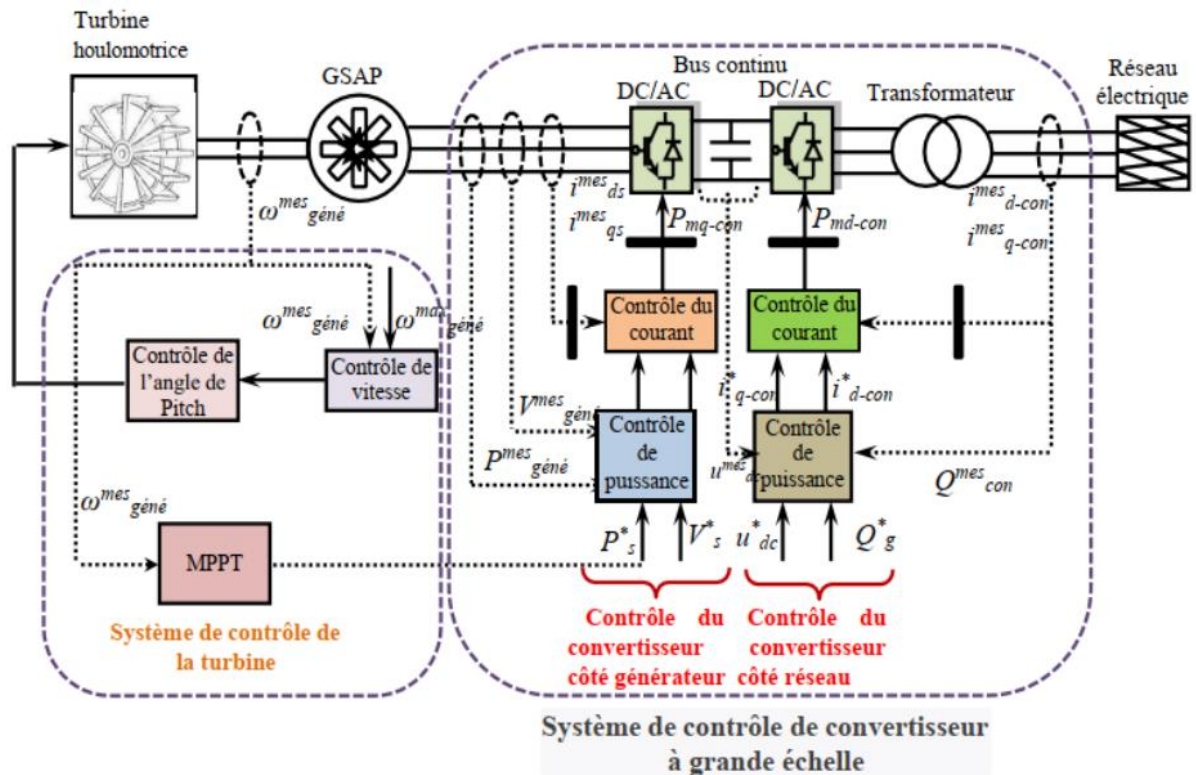


Figure III.2 : Système de contrôle de la chaîne globale. [12]

Le schéma fonctionnel du système de contrôle est illustré par la Figure III.1. Le système de contrôle comprend deux contrôleurs couplés : le contrôleur de vitesse et d'angle de tangage et le système MPPT. Le contrôleur d'angle de tangage fournit la valeur de référence de contrôle d'angle de tangage au système d'entraînement de tangage, et le système MPPT fournit la référence de puissance active au convertisseur côté générateur pour obtenir un suivi maximal du point de puissance [13]. Le système FSC contrôle le découplage de la puissance active et réactive, et comprend deux boucles de contrôle de découplage : le système de contrôle du convertisseur côté générateur et le système de contrôle du convertisseur côté réseau. Le convertisseur côté réseau fonctionne comme un onduleur et sa fonction est de convertir le courant continu en courant alternatif d'une fréquence fixe. Le convertisseur côté générateur est utilisé pour le redressement et peut comprendre des composants électroniques composants sans capacité d'arrêt, tels que des diodes, ou des composants avec arrêt telles que les IGBT et les thyristors de coupure de gâchette. Lorsque le convertisseur côté générateur a une capacité d'arrêt, le générateur sera contrôlé de manière optimale. [15]

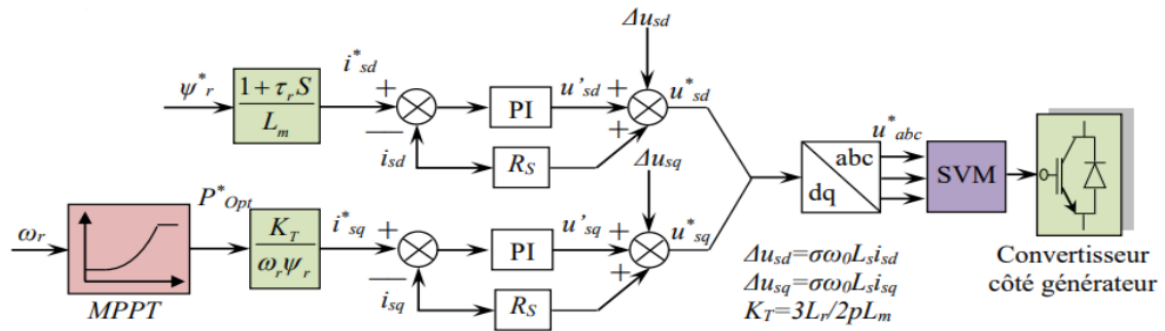


Figure III.3 : Schéma de principe de la commande du convertisseur côté générateur. [12]

III.4 SYSTEME DE CONTROLE DE GENERATEUR :

Les centrales houlomotrices sont exploitées généralement en deux modes de fonctionnement, le premier mode est appelé « mode PQ » (puissance active et réactive commandée), il est possible de gérer de la puissance réactive avec les génératrices pilotées par des convertisseurs d'électronique de puissance. Nous pouvons profiter de cette propriété pour fournir un service de réactif au réseau sur lequel se trouve connecté la centrale. Cependant la puissance réactive échangée avec le réseau n'est pas simplement la somme des puissances réactives de chacune. Le bilan de la puissance réactive du réseau interne des centrales introduit une différence significative. Par ailleurs, les échanges de puissance réactive de chacune des centrales avec le réseau vont modifier le plan de tension. Tandis que le second fonctionne en mode isolé, également appelé "mode Vf" (contrôle de tension et de fréquence). Pour implanter le contrôle en mode Vf sur un générateur basé sur un onduleur de tension, il est nécessaire d'utiliser une boucle de contrôle de tension, pour imposer ainsi la tension adéquate en amplitude, fréquence et phase (voir Figure III.3).[13]

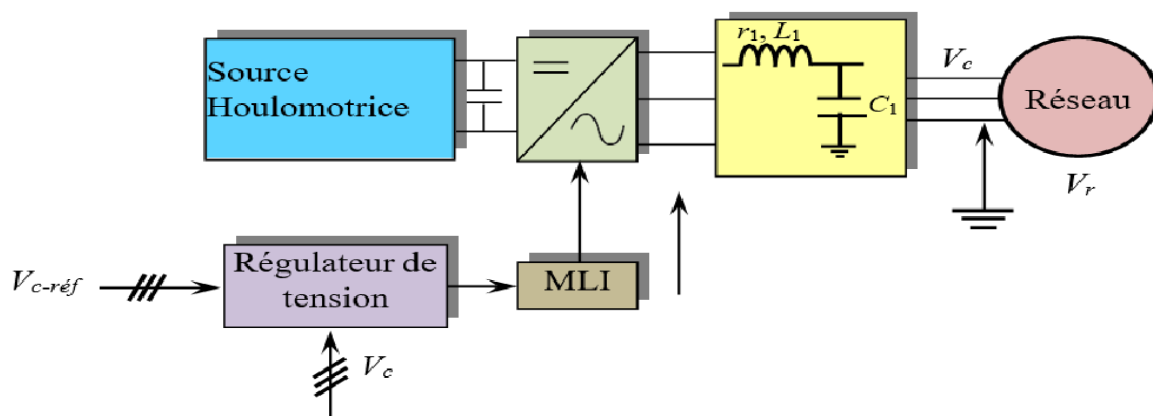


Figure III.4 : Structure de contrôle d'un générateur à base d'un onduleur de tension contrôlé en mode Vf.[13]

Pour implanter un contrôle de type PQ sur un générateur basé sur un onduleur de tension, on utilise une boucle de contrôle de courant et une boucle externe de puissance qui calcule les consignes de courant pour cette boucle interne. En fonction de la nature du générateur, deux structures de contrôle externe sont différenciées. Dans le cas d'un générateur programmable, on impose les consignes de puissance active et puissance réactive désirées et la boucle externe traduit directement ces consignes externes de puissance en consignes de courant (Figure III.3). La source primaire est responsable de répondre à cette demande de puissance de façon à maintenir constante la tension de bus.

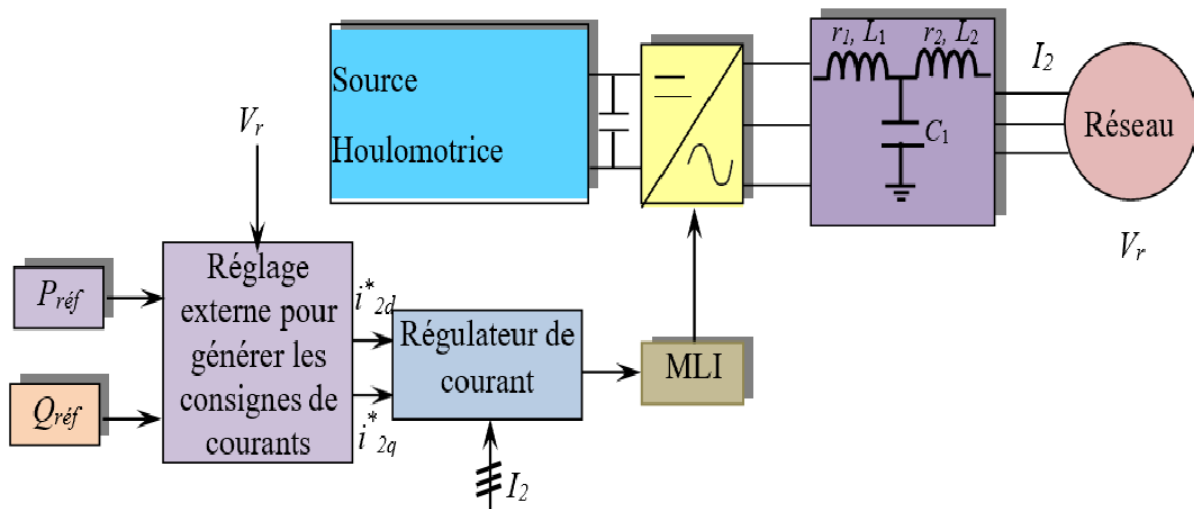


Figure III.5 : Structure de contrôle d'un générateur programmable à base d'un onduleur de tension contrôlé en mode *PQ*. [13]

Dans le cas d'un générateur non programmable, la consigne de puissance active vient d'un correcteur de tension dont l'objectif est de maintenir la tension du bus continu de l'onduleur à une référence donnée. Ainsi, l'onduleur évacue la totalité de la puissance active provenant de la source primaire. La consigne de puissance réactive est imposée de l'extérieur en tenant compte de la puissance apparente maximale du convertisseur (Figure III.5).

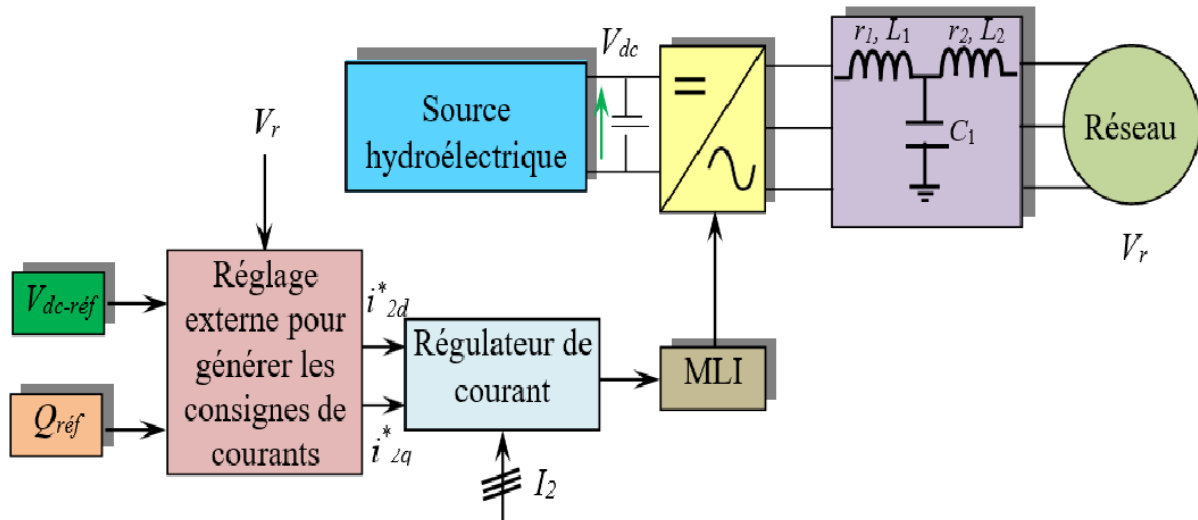


Figure III.6 : Structure de contrôle d'un générateur non programmable à base d'un onduleur de tension contrôlé en mode PQ . [13]

La Figure III.6 montre la structure générale de contrôle d'un générateur à base d'un onduleur de tension contrôlé avec des courbes de statisme. Comme on peut l'observer, il consiste à une boucle de contrôle direct qui calcule les consignes de tension à imposer à la sortie de l'onduleur à partir des mesures de puissance active et réactive injectées. En général, on introduit également une boucle de contrôle de tension interne avec un correcteur de tension. La boucle de contrôle direct est constituée d'une boucle de contrôle des puissances active et réactive. La boucle de contrôle de la puissance active calcule l'angle instantané (θ_v) de la tension de sortie de l'onduleur et la boucle de contrôle de la puissance réactive calcule son amplitude (E). Les références des tensions de phase seront donc [13] :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{ca}^* = E \sin(\theta_v) \\ V_{cb}^* = E \sin\left(\theta_v - \frac{2\pi}{3}\right) \\ V_{cc}^* = E \sin\left(\theta_v - \frac{4\pi}{3}\right) \end{array} \right. \quad (\text{III.1})$$

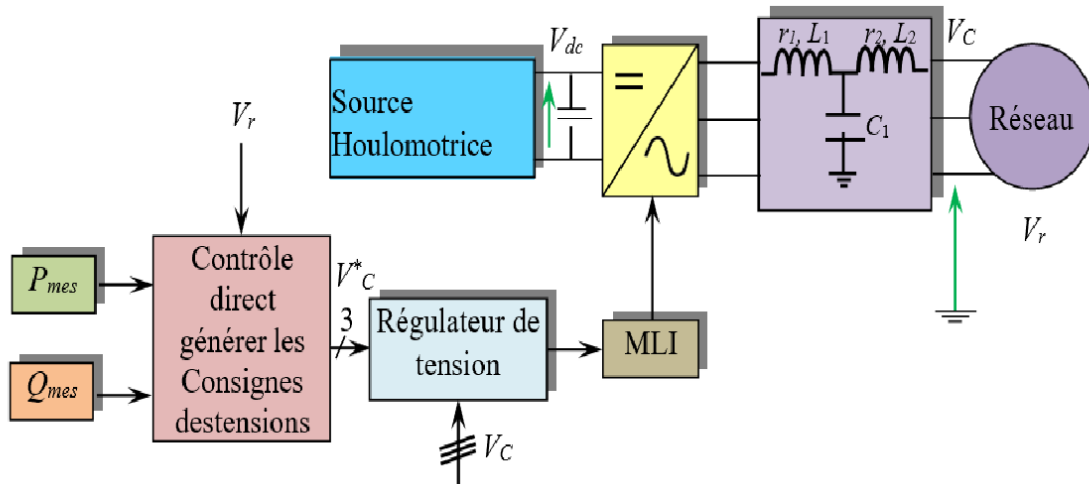


Figure III.7 : Structure générale de contrôle d'un générateur à base d'un onduleur de puissance contrôlé en tension.[13]

Le contrôle de la puissance active est basé sur l'équation suivante :

$$\omega = \omega_v - K_p (P - P_i) \quad (\text{III.2})$$

Cette équation met en rapport la fréquence de la tension générée par l'onduleur et la puissance active fournie par ce même onduleur. L'angle instantané (θ_v) de la tension de sortie de l'onduleur est défini comme :

$$\Delta\theta_v = \int \Delta\omega dt \quad (\text{III.3})$$

En conséquence :

$$\Delta\theta = K_p \varepsilon = -K_p (P_{mes} - P_i) \quad (\text{III.4})$$

Pour le cas général, la valeur maximale de la différence entre la puissance mesurée et la puissance de l'origine est la puissance nominale de l'onduleur :

$$\varepsilon = P_n \quad (\text{III.5})$$

Donc, K_p sera défini comme :

$$K_p = \frac{\Delta\omega}{P_n} = \frac{2\pi\Delta f}{P_n} \quad (\text{III.6})$$

Il faut souligner que le paramètre K_p ne pourra pas avoir une valeur illimitée, puisqu'elle devra maintenir une corrélation avec l'inductance de connexion de l'onduleur pour garantir la stabilité

du système. Avec une stratégie de suivi du réseau, l'onduleur fonctionne en injectant dans ce dernier la puissance disponible à la source principale car la tension du bus continu est constante. Pour les générateurs marémotrice, éoliennes ou les générateurs PV, cette puissance est fluctuante. Ce chapitre a donc pour objectif de déterminer la puissance réactive globale que peut fournir ou absorber une centrale houlomotrice tout en restant dans les limites de tension acceptable dans le parc. Dans un premier temps, nous allons présenter le mode de contrôle proposé pour une centrale houlomotrice basée sur une génératrice synchrone à aimants permanents. Ensuite, nous proposerons une autre stratégie pour élargir grandement la plage de réglage en puissance réactive. Ceci nous conduira à définir une méthodologie pour déterminer le diagramme PQ d'une centrale houlomotrice.

III.5 SYSTEME DE CONTROLE DE CONVERTISSEUR :

III.5.1 Système contrôle convertisseur côté génératrice (CCG) :

Le modèle de système de commande d'un convertisseur côté générateur est certainement lié au type du générateur connecté. Les systèmes de contrôle des convertisseurs côté générateur seront décrits pour le système PMSG largement utilisé.

III.5.1.1 Système de contrôle du convertisseur latéral PMSG : Pour le convertisseur côté générateur, trois différentes stratégies de commande peuvent être utilisées

- **Contrôle du couple maximal :** Sous le RRF, l'équation du couple électromagnétique du GSAP est le suivant :

$$T_{em} = \frac{3}{2} n \cdot I_m [\bar{\Psi}_s^* \bar{i}_s] = \frac{3}{2} n [\Psi_{sd} i_{sq} - \Psi_{sq} i_{sd}] = \frac{3}{2} n [(L_d - L_q) i_{sd} i_{sq} - \Psi_{PM} i_{sd}] = \frac{3}{2} n [\Psi_{PM} i_{sd}] \quad (III.7)$$

Comme indiqué en équation (III.7), le couple électromagnétique de la GSAP ne dépend que de la composante du courant du stator de l'axe q. Si le courant du stator n'est contrôlé que par le Composant de l'axe q, la GSAP fournira le couple électromagnétique maximal. Dans ce mode de contrôle, la puissance réactive du générateur n'est pas égale à 0 et la capacité nominale du convertisseur est augmentée. [13]

- **Contrôle du facteur de puissance unitaire :** Si la composante du courant statorique de l'axe d est ajustée la puissance réactive requise pour le générateur, le générateur pourra fonctionner à un facteur de puissance unitaire ($Q = 0$). Cette stratégie de contrôle peut réduire la capacité nominale du convertisseur. Cependant, la tension du

stator variera avec la vitesse du générateur, qui peut entraîner une surtension du convertisseur et une survitesse du rotor du générateur. Depuis le réactif la puissance du générateur n'est pas nécessairement liée à la puissance réactive échangée entre le générateur et le réseau, la stratégie de contrôle de la puissance réactive du générateur a peu d'importance.

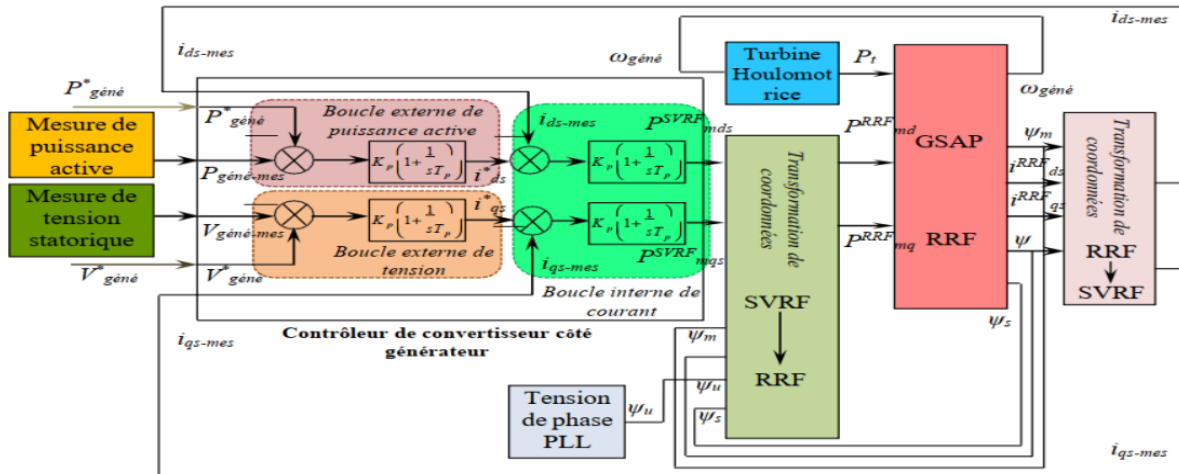


Figure III.8 : Schéma fonctionnel du système de contrôle du convertisseur côté générateur.[12]

- **Contrôle de tension constante du stator :** Pour éviter la surtension du convertisseur causée par une survitesse du générateur, une stratégie de contrôle devait être appliquée pour contrôler directement la tension du stator du générateur. L'objectif de contrôle est atteint au niveau du référentiel de tension du stator (SVRF), c'est-à-dire que la direction de l'axe d est considérée comme la direction vectorielle de la tension du stator. Dans ce cas, il n'y a pas de couplage entre la puissance active et la puissance réactive.[13]

III.5.2 Système contrôle convertisseur coté réseaux (CCR) :

Le contrôleur du convertisseur côté réseau comprend deux contrôleurs PI en cascade (un contrôleur de boucle externe et un contrôleur de boucle interne). La boucle externe lente est utilisée pour contrôler la tension continue du circuit intermédiaire et la puissance réactive du convertisseur (ou de la tension alternative côté réseau du convertisseur), et la boucle interne rapide garantit que le courant atteint la valeur de référence déterminée par la boucle externe. Les signaux de sortie du contrôleur du convertisseur côté réseau définit l'amplitude et l'angle de phase de la sortie tension sur le côté AC du convertisseur. Sous contrôle vectoriel orienté réseau, le courant du convertisseur est divisé en deux composantes de courant perpendiculaires

l'une à l'autre : le composant courant de l'axe d est le courant actif et le composant de l'axe q est le courant réactif. Le courant actif sur l'axe d est utilisé pour contrôler la tension continue du circuit intermédiaire, et le courant réactif sur l'axe q est utilisé pour contrôler la puissance réactive du convertisseur (ou de la tension alternative au convertisseur côté réseau). La modulation du convertisseur le facteur de sortie du contrôleur de boucle interne actuel du convertisseur côté réseau est dans le cadre de référence orienté tension du convertisseur côté réseau, et il doit être transformé en système de coordonnées de référence stationnaire triphasé par transformation de coordonnées pour le convertisseur côté réseau. [13]

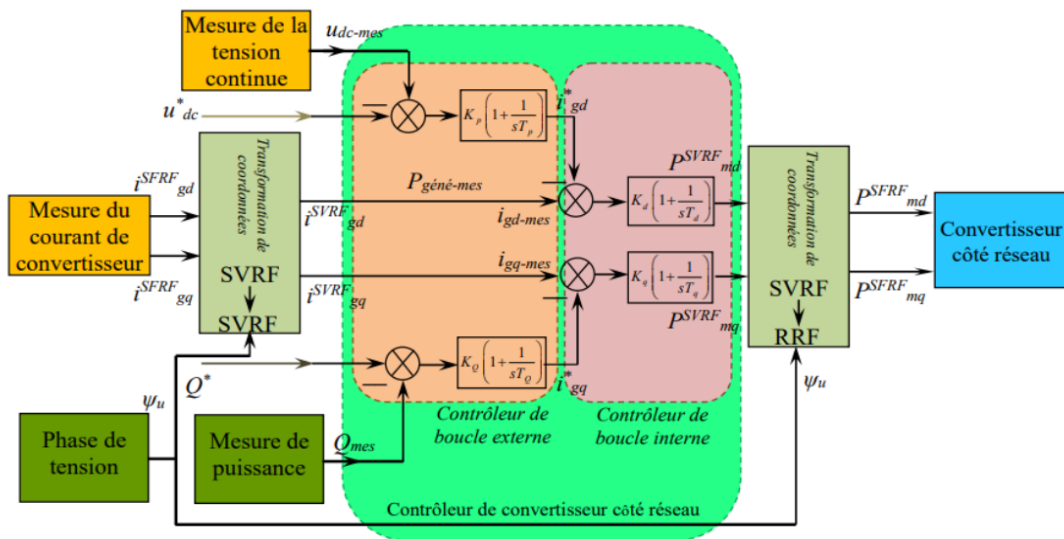


Figure III.9 : Schéma fonctionnel du système de contrôle du convertisseur côté réseau.

La figure III.8 montre le système de conversion et le contrôleur côté réseau, comprenant les éléments suivants :

- 1-Module de mesure de tension continue, qui mesure la tension continue du circuit intermédiaire
- 2-Module de mesure du courant du convertisseur, qui mesure le courant alternatif du convertisseur côté réseau ;
- 3-Boucle à verrouillage de phase de tension (PLL), qui mesure l'angle de phase de tension du convertisseur côté réseau et réalise une commande découplée du convertisseur côté réseau avec contrôle vectoriel orienté de la tension du réseau ;
- 4-Liaison de mesure de puissance pour mesurer la puissance réactive du convertisseur côté réseau ;

5-Module de transformation de coordonnées : car la tension et le courant côté réseau sont exprimé dans le système de coordonnées de référence stationnaire triphasé, et le convertisseur côté réseau est commandé selon le vecteur orienté tension du réseau à les coordonnées de référence de tension du réseau, les signaux d'entrée / sortie du côté du réseau le contrôleur de convertisseur doit être transformé.

III.7 RESULTAT DE SIMULATION ET INERPRETATION :

L'ensemble du périphérique et équations décrit au chapitre II a été simulé dans MATLAB/Simulink.

Des simulations de validation du schéma de contrôle global ont été effectuées sous MATLAB/Simulink, afin d'évaluer et de tester la technique de contrôle proposée pour un modèle complet de l'énergie houlomotrice basée sur une GSAP avec boucle de courant, puissance active et réactive et tension continue.

Par conséquent, il est nécessaire de régler les paramètres de sortie avec les limites admissibles. Il est proposé de mettre en œuvre un convertisseur AC-DC-AC qui est de type frontal actif pour améliorer la qualité de l'énergie du système afin qu'il puisse être connecté au réseau.

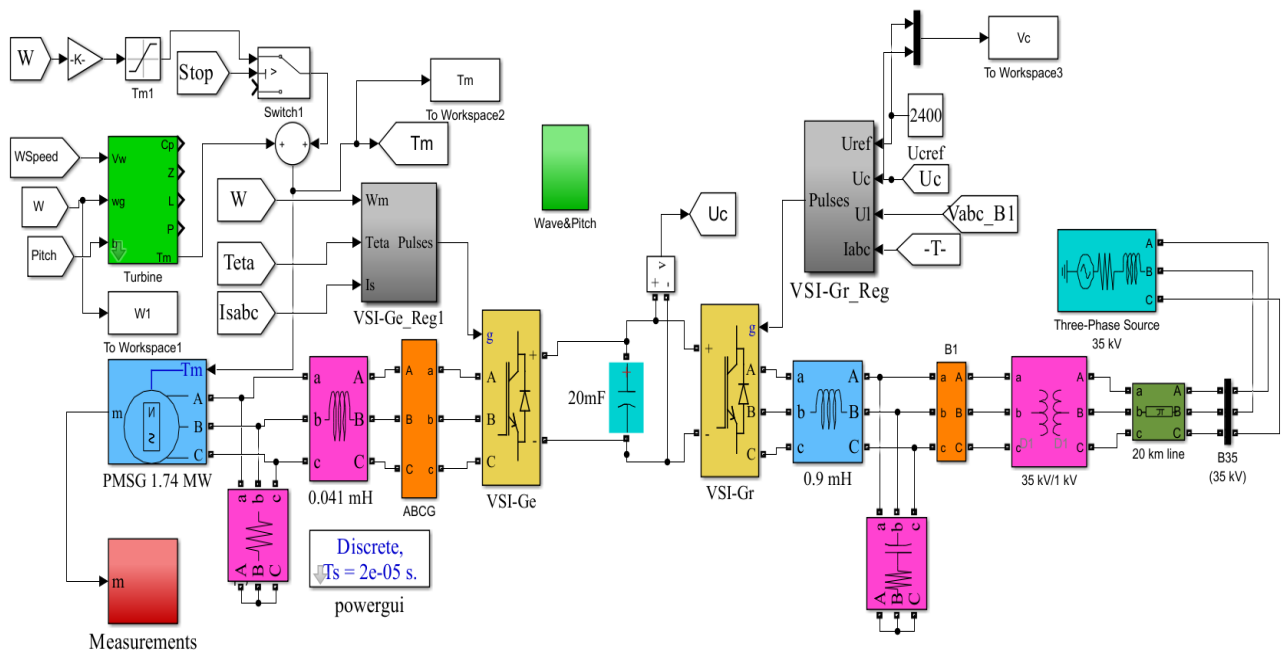


Figure III.10 : Modèle de simulation de système étudié.

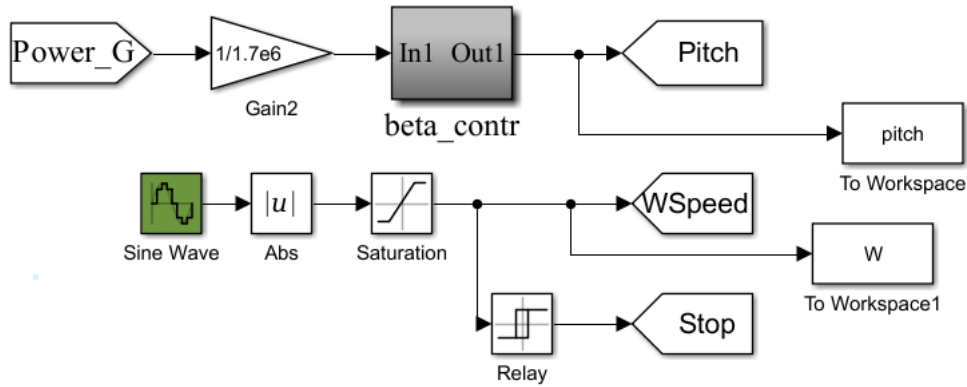


Figure III.11 : La partie signal d'onde du modèle Simulink. (Wave & pitch).

➤ **Résultat de la turbine :**

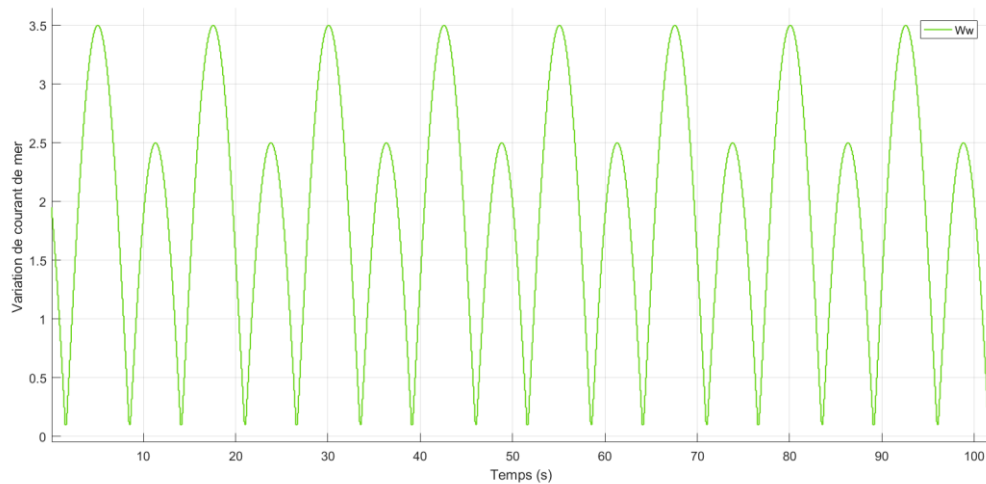


Figure III.12 : Profile variable d'écoulement de l'eau.

Dans la figure III.1 la variation de la vitesse des vagues, le graphique vous permettra de visualiser comment la vitesse des vagues évolue au fil du temps. Il peut y avoir des fluctuations périodiques ou des variations aléatoires, selon les conditions de l'environnement marin. Le graphe peut révéler des pics ou des baisses significatifs dans la vitesse des vagues à certains moments peuvent être le résultat de conditions de mer.

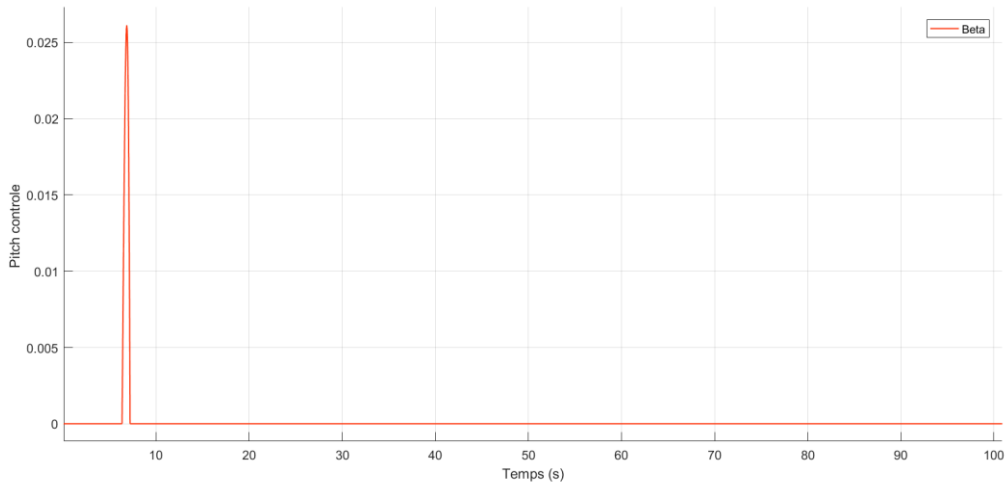


Figure III.13 : Pitch contrôle (Variation des pales « β »).

Le graphique III.12 montre comment l'angle d'inclinaison des pales de la turbine (pitch) varie au fil du temps. Le pitch control est utilisé pour optimiser la performance de la turbine en ajustant l'angle d'attaque des pales. Ce graphique peut vous aider à évaluer la stratégie de contrôle utilisée pour maximiser la production d'énergie en fonction des conditions des vagues.

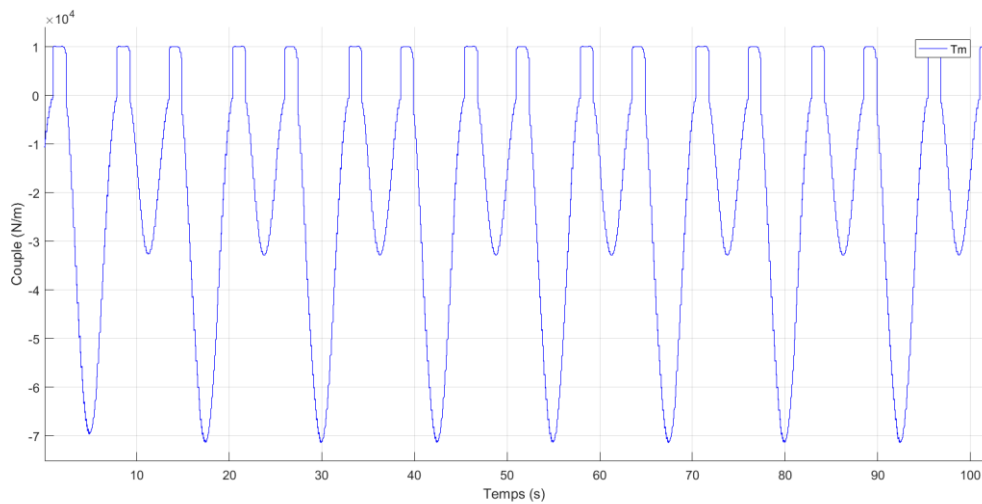
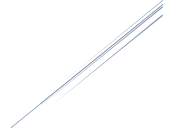


Figure III.14 : Couple mécanique développée par la turbine.

La figure III.13 le couple est une mesure de la force de rotation de la turbine et dépend de la vitesse des vagues le graphe on peut vous aider à évaluer l'efficacité de la turbine pour convertir l'énergie des vagues en énergie mécanique.



➤ **Résultat du générateur :**

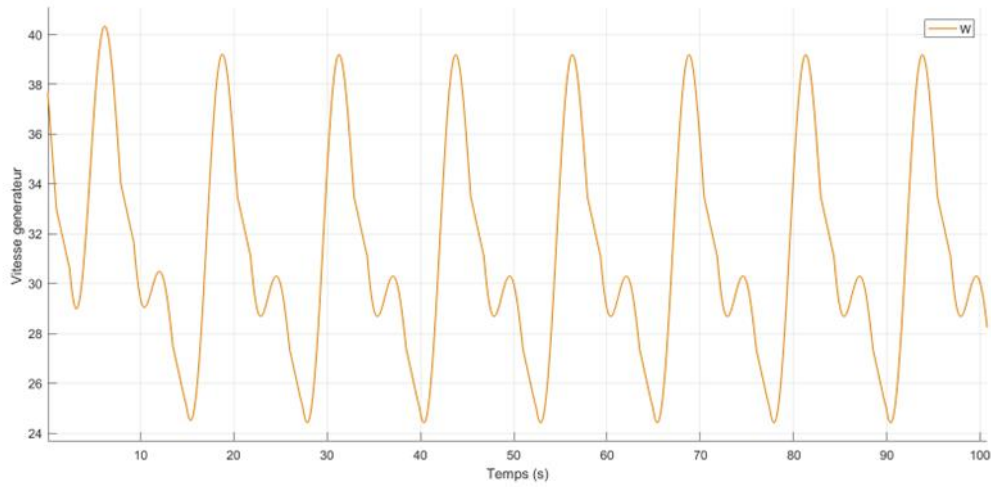


Figure III.15 : La vitesse du générateur (W) en fonction du temps.

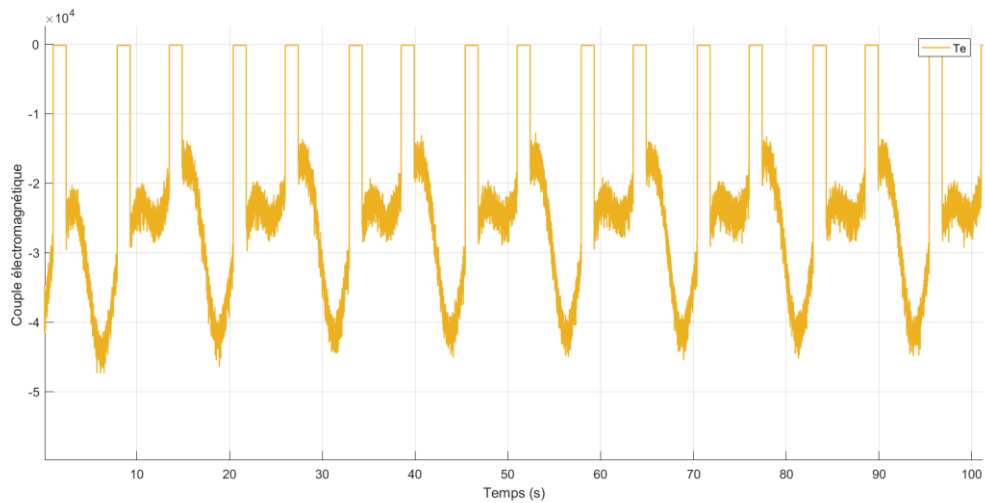


Figure III.16 : Couple électromagnétique (Te).

La figure III.15 représente la force de rotation générée par le générateur en réponse à l'interaction entre les aimants permanents et le champ magnétique du stator, on peut voir comment le couple varie au fil du temps et permet d'évaluer l'efficacité et la capacité du générateur à produire un couple optimal en fonction des conditions des vagues.

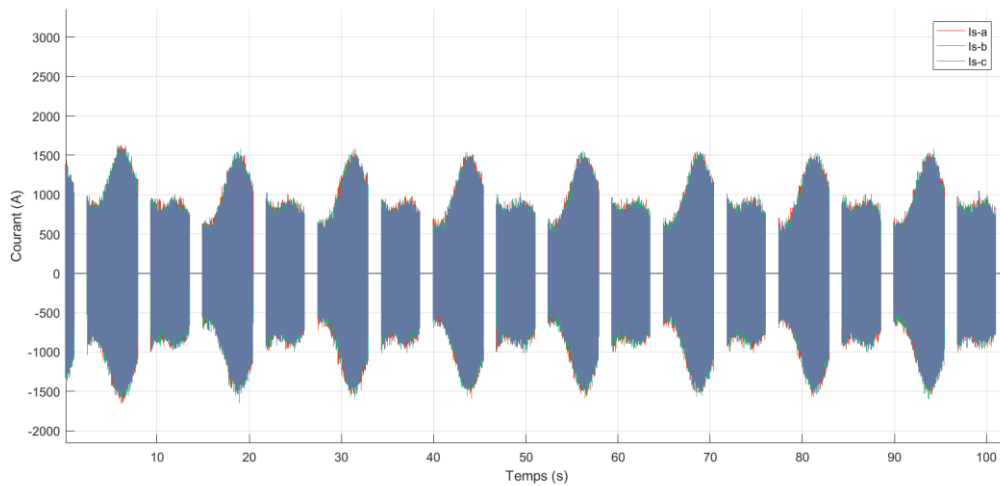


Figure III.17 : La variation du courant du générateur côté stator (I_{s_abc}) en fonction du temps.

Cette Figure nous permet de visualiser comment le courant varie dans les différentes phases (abc) au fil du temps. Cela peut aider à évaluer les performances électriques du générateur, notamment la stabilité et la qualité du courant généré.

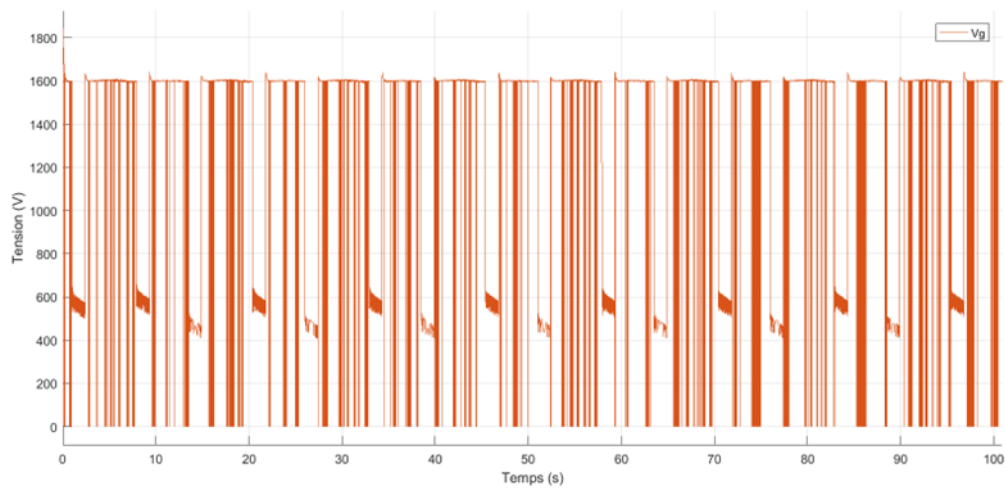


Figure III.18 : Tension côté machine PMSG.

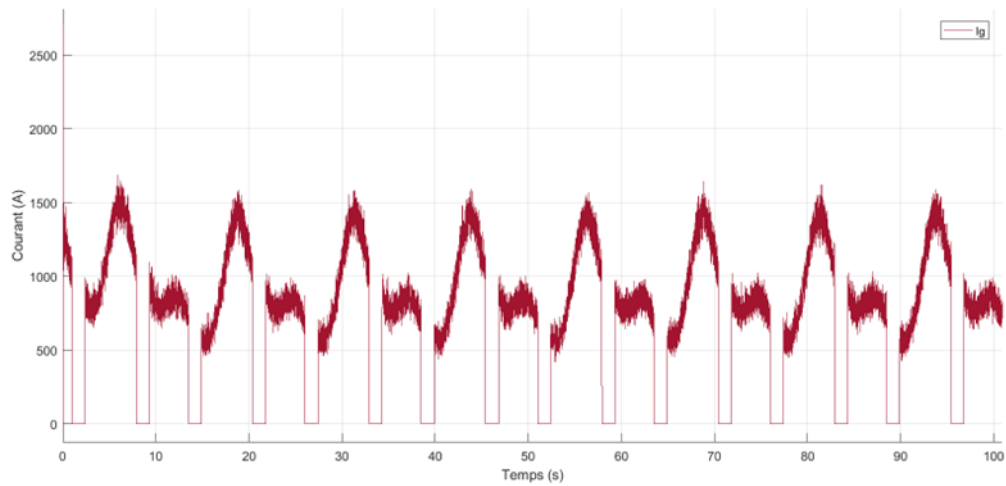


Figure III.19 : Courant de la machine PMSG.

La figure III.17-18 est la variation de la tension et le courant du générateur PMSG en fonction du temps.

➤ **Résultat du réseau**

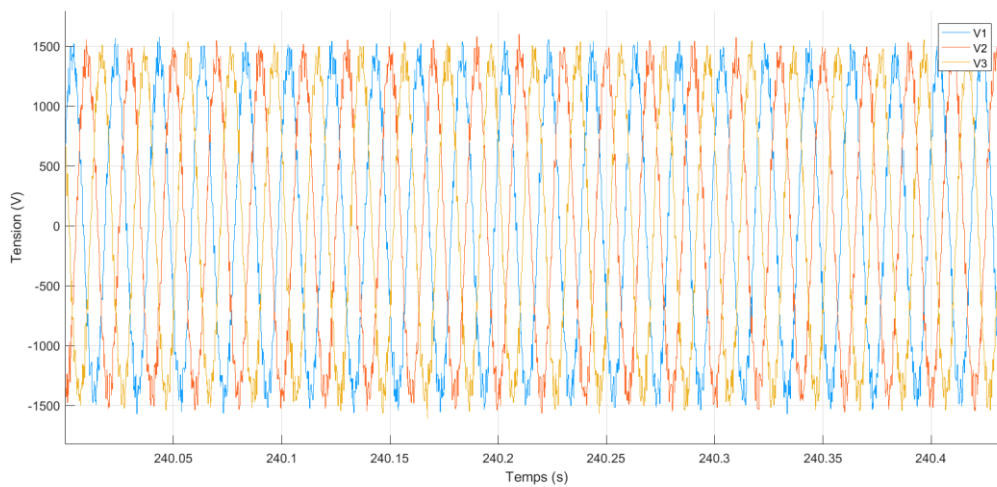


Figure III.20 : La tension triphasé du réseau.

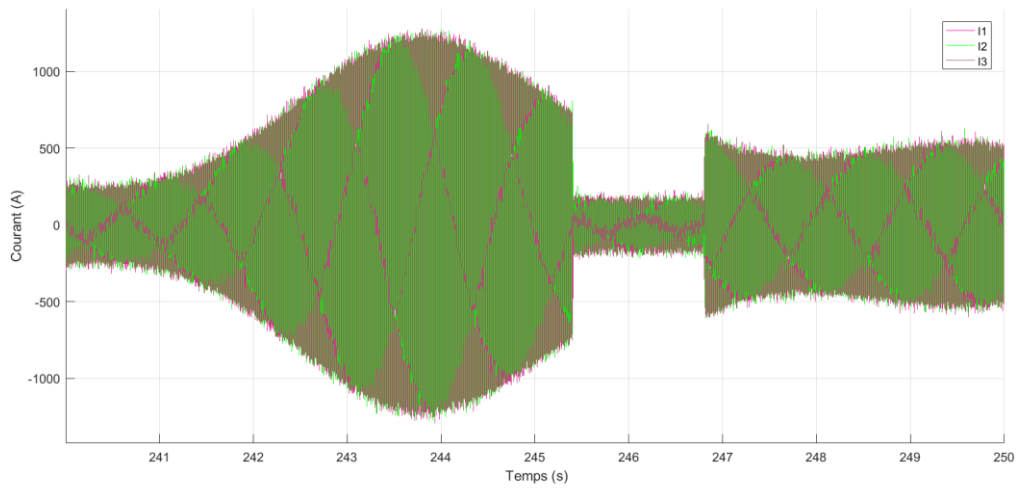


Figure III.21 : Le courant triphasé du réseau.

La figure III.19-20 indiquons que les tensions et les courant sont importantes pour fournir de l'énergie aux appareils triphasés et équilibrer la charge sur le réseau. L'analyse de la tension, courant triphasée peut nous aider à identifier des déséquilibres de tension, des chutes de tension ou des perturbations dans le réseau.

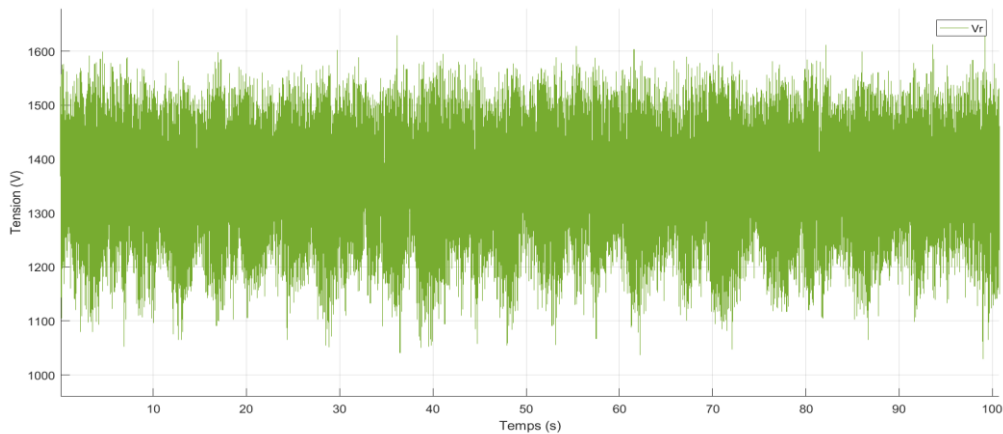


Figure III.22 : La tension du bus.

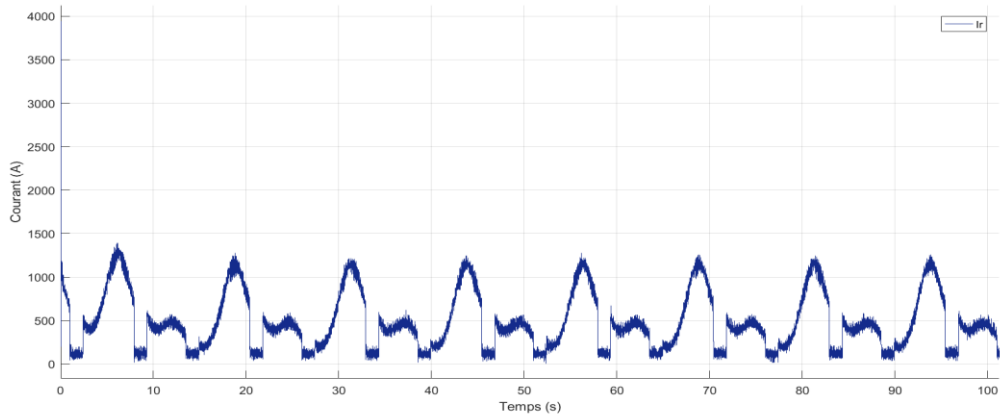


Figure III.23 : Le courant du bus.

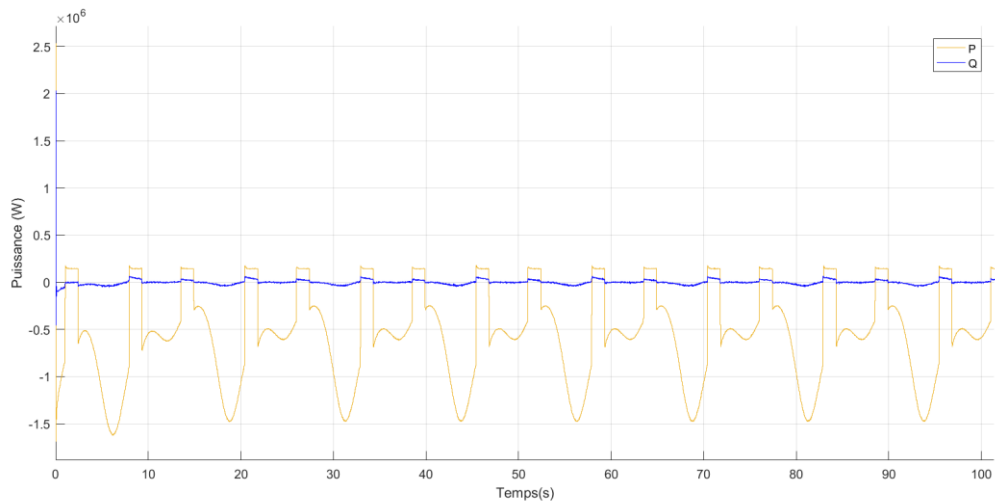


Figure III.24 : Evaluation de la puissance active et réactive.

La figure III.23 représente l'analyse de la puissance active et réactive, en ce voie que la réactive est nulle qui permet de comprendre la consommation d'énergie réelle du système, les pertes d'énergie et l'équilibre de la charge.

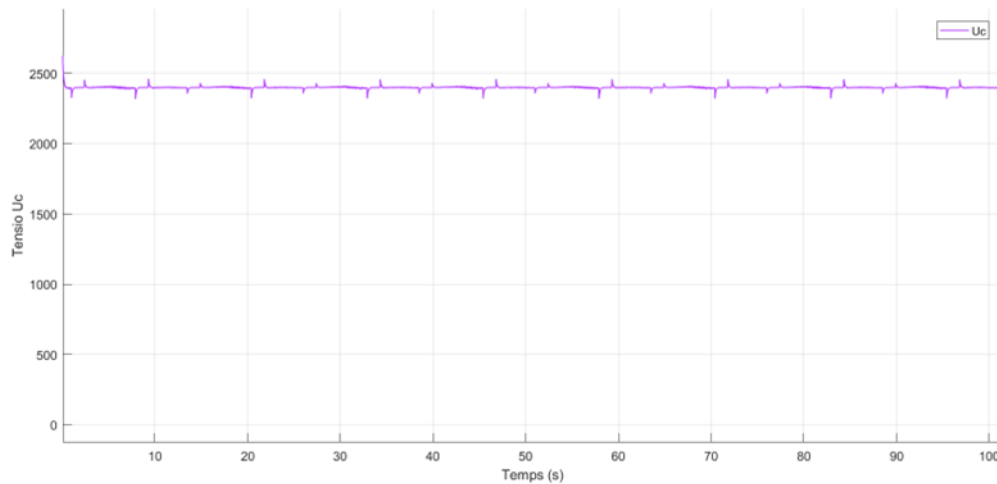


Figure III.25 : La variations du la tension Uc en fonction du temps.

La tension Uc fait référence à la tension mesurée au niveau de la ligne de transmission. Cette tension peut être utilisée pour évaluer la stabilité du réseau électrique et la qualité de la tension fournie au réseau. Des fluctuations importantes ou des variations anormales de la tension Uc pourraient indiquer des problèmes potentiels dans la ligne de transmission ou des déséquilibres de charge.


En fin, on peut évaluer la stabilité, la qualité de l'énergie fournie et les performances du système électrique après l'accord avec la ligne de transmission. Cela vous permettra de surveiller l'équilibre du réseau, de détecter les éventuels problèmes électriques et d'optimiser l'efficacité globale de notre système de conversion d'énergie houlomotrice.

III.5 CONCLUSION

Dans cette étude de simulation, nous avons examiné en détail une chaîne de conversion d'énergie basée sur PMSG et nous avons consacré notre attention au contrôle de la chaîne globale. Nous avons utilisé des modèles de simulation MATLAB SIMULIK, précis pour représenter les interactions entre les différents composants de la chaîne, notamment la turbine, le PMSG et le convertisseur.

En nous concentrant sur le contrôle de la chaîne globale, nous avons développé des stratégies de contrôle avancées visant à optimiser les performances du système. Nous avons exploré différentes approches de contrôle, telles que le contrôle pitch et de la vitesse, le contrôle de la puissance maximale et le contrôle de la tension, en ajustant les paramètres de contrôle en fonction des conditions de fonctionnement.

En conclusion, grâce à la simulation, nous avons pu obtenir des résultats détaillés représentés sous forme de graphes. Ces graphes ont été essentiels pour évaluer les performances de la chaîne. L'interprétation des résultats a permis de mieux comprendre le comportement du système et d'identifier les domaines où des améliorations peuvent être apportées.



CONCLUSION
GENERALE

CONCLUSION GÉNÉRALE

Au terme de ce mémoire consacré à l'étude et à la simulation d'une chaîne de conversion houlomotrice avec un PMSG, nous pouvons conclure sur l'importance de cette technologie dans le domaine de la production d'énergie électrique. Les résultats obtenus grâce à notre approche multidisciplinaire fournissent des informations précieuses sur les performances et le comportement de ce système dans différentes conditions opérationnelles.

L'étude de la conversion houlomotrice a révélé son potentiel considérable en tant que source d'énergie renouvelable. Les vagues et les courants marins offrent une ressource abondante et durable, avec une densité d'énergie élevée. En utilisant un PMSG, nous avons constaté que cette technologie présente de nombreux avantages, tels qu'un rendement élevé, une maintenance réduite et une grande fiabilité.

La modélisation détaillée de la chaîne de conversion houlomotrice a permis de prendre en compte les interactions complexes entre les différents domaines, notamment électromagnétique, mécanique. Les simulations réalisées ont fourni des informations précieuses sur les performances du système, en mettant en évidence les variations de ces performances en fonction des paramètres opérationnels.

Les résultats obtenus sont encourageants, mais ils soulignent également certains défis et limitations. Les variations de la hauteur des vagues, de la fréquence et de la vitesse du courant marin peuvent influencer significativement les performances du système. Il est donc essentiel de poursuivre les recherches pour mieux comprendre ces variations et développer des stratégies d'optimisation afin d'exploiter au mieux l'énergie houlomotrice.

En conclusion, cette hypothèse a contribué à l'avancement des connaissances sur la chaîne de conversion houlomotrice avec un PMSG. Les résultats obtenus ont démontré le potentiel de cette technologie pour la production d'énergie renouvelable, en offrant des performances élevées et une grande fiabilité. Cependant, des efforts supplémentaires sont nécessaires pour relever les défis techniques et opérationnels, afin de permettre une utilisation plus répandue et plus efficace de l'énergie houlomotrice dans le futur.

Cette dernière ouvre la voie à de nouvelles opportunités de recherche et d'innovation dans le domaine de l'énergie marine. Il constitue également une base solide pour la conception et l'optimisation de systèmes de conversion houlomotrice. En continuant à explorer et à améliorer

Conclusion générale.

cette technologie, nous pourrons contribuer de manière significative à la transition énergétique vers des sources d'énergie plus propres et durables.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] M.RUELLAN , « Méthodologie de dimensionnement d'un système de récupération de l'énergie des vagues » , thèse doctorat , Ecole Doctorale des Sciences Pratiques, 2007
- [2] BOUFADINA Aymen, << Modélisation et contrôle d'un système de conversion d'énergie marémotrice >>, thèse master, UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET, 2020/2021.
- [3] <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/energie-maremotrice>,
[13/04/2023](https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/energie-maremotrice)
- [4] <https://rcet.org.in>, [15/05/2023](https://rcet.org.in)
- [5] AHMARLAINE Housseyn, AIOUNI Rafik, << Dispositif de conversion de l'énergie de la houle >>, thèse master, Université 8 Mai 1945 – Guelma, 2021/2022.
- [6] Abdus Samad, S. A. Sannasiraj, V.Sundar, Paresh Halder, <<Ocean Wave Energy Systems Hydrodynamics, Power Takeoff and Control Systems >>, livre, Manhar R. Dhanak, Florida Atlantic University SeaTech, Dania Beach, USA , Nikolas I. Xiros, University of New Orleans, New Orleans, LA, USA, 2020.
- [7] TOUFIK ZIDELMAL, << MODÈLE DE PRÉDICTION ET DE COMMANDE DE LA MACHINE SYNCHRONE À AIMANTS PERMANENTS : APPLICATION DANS LES AÉROGÉNÉRATEURS >>, MAÎTRISE EN INGÉNIERIE, UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN ABITIBI-TÉMISCAMINGUE ÉCOLE DE GÉNIE, 2015.
- [8] M.Elzalabani , A . Nafeh, « Modelling and Simulation of Tidal Current Turbine with Permanent Magnet Synchronous Generator », article, Faculty of Electronic Engineering, MenoufiaUniversity, Egypt, 2015
- [9] <https://hal.science/hal-01208538>, [06/04/2023](https://hal.science/hal-01208538)
- [10] <https://www.researchgate.net/publication/279947566>, [01/05/2023](https://www.researchgate.net/publication/279947566)

- [11] S.MOUZAOUI, “Etude d’une Machine Synchrone Aimants Permanents en Présence de Défauts de Courts-Circuits et de Désaimantations par la Méthode des Eléments Finis”, mémoire master, FACULTE DU GENIE ELECTRIQUE ET D’ INFORMATIQUE DEPARTEMENT D’ ELECTROTECHNIQUE, 2015
- [12] A.KHEIRA ,N.DELCIDIO,” Contribution au contrôle avancé d'une ferme houlomotrice”, mémoire master , UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUEES DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE, 2021 /2022
- [13] C.Nessrine,” Etude et Simulation d’une Chaîne de Conversion Houlomotrice”, mémoire master, UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUEES DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE, 2020 /2021
- [14] Feng Wu, Xiao-Ping Zhang, Senior Member, IEEE, Ping Ju, Member, IEEE, and Michael J. H. Sterling-Modeling and Control of AWS-Based Wave Energy Conversion System Integrated into Power Grid; 2008
- [14] <http://dspace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/1067/8/introduction-generale.pdf>, 22/03/2023
- [15] MENZER Meryem, “Analyse des performances d’un réseau électrique en présence des sources à énergie renouvelable ”, Mémoire de Master, Université de Biskra, Juin 2018.
- [16] MEKKI Mounira, “Récupération des déperditions d’énergie dans les complexes industriels et leur conversion en énergie électrique exploitable ”, Thèse de Doctorat université de Annaba, 2014.
- [17] L. Belhadji, S. Bacha and D. Roje, "Modeling and control of variable-speed micro-hydropower plant based on Axial flow turbine and permanent magnet synchronous generator

(MHPP-PMSG)," IECON 2011 - 37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Melbourne, VIC, 2011, pp. 896-901, doi: 10.1109/IECON.2011.6119429.

[18] Zhou, W. (2017). Modeling, Control and Optimization of a Hydropower Plant. University College of Southeast Norway Faculty of Technology, Natural Sciences and Maritime Sciences, PhD dissertation in Process, Energy and Automation Engineering, Doctoral dissertation no. 33 2017.

[19] D. Borkowski, "Analytical Model of Small Hydropower Plant Working at Variable Speed," in IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 33, no. 4, pp. 1886-1894, Dec. 2018,

[20] Chenna, A., Aouzellag, D., Ghedamsi, K. (2020). Study and control of a pumped storage hydropower system dedicated to renewable energy resources. Journal Européen des Systèmes Automatisés, Vol. 53, No. 1, pp. 95-102. <https://doi.org/10.18280/jesa.530112>.

[21] Spiridakis Michaël. Récupération de l'énergie des vagues par les systèmes à déferlement. Mécanique des fluides [physics.class-ph]. Université de Nantes Français, 2017

[22] A. Babarit, "Optimisation hydrodynamique et contrôle optimal d'un récupérateur d'énergie des vagues", Thèse de Doctorat de l'Ecole Centrale de Nantes, soutenue le 27 octobre 2005

[23] Mohamed KH, Sahoo NC, Ibrahim TB. A survey of technologies used in wave energy conversion systems. In: 2011 International conference on energy, automation, and signal (ICEAS); 2011, p.1-6.

[24] K. Nielsen e T. Pontes, «Report T02-1.1 OES IA Annex II Task 1.2 Generic and Site related Wave Energy Data,» September 2010.

Références bibliographiques

- [25] Casaubieilh, P.; Thiebaut, F.; Bosma, B.; Retzler, C.; Shaw, M.; Letertre, Y.; Sheng, W. Performance Improvements of Mooring Systems for Wave Energy Converters. In Proceedings of the 1st International Conference on Renewable Energies O_{shore}, Lisbon, Portugal, 24–26 November 2014
- [26] Ortiz, J.P.; Bailey, H.; Buckham, B.; Crawford, C. Surrogate Based Design of a Mooring System for a Self-Reacting Point Absorber. In Proceedings of the 25th International Ocean and Polar Engineering Conference, Kona, HI, USA, 21–26 June 2015

الملخص - تركز هذه الأطروحة على دراسة ومحاكاة طاقة الأمواج كمصدر للطاقة المتجددة. باستخدام أدوات النمذجة والمحاكاة المتقدمة، يهدف إلى تقييم كفاءة وأداء تقنيات تحويل الطاقة الموجية المختلفة. يتضمن التحليل تصميم النماذج العددية والتوربينات المغمورة، بالإضافة إلى محاكاة تشغيلها (WEC) التي تمثل أنظمة التقاط الأمواج مثل محولات الطاقة الموجية في ظروف المحيطات المختلفة. تُستخدم النتائج التي تم الحصول عليها لتحسين تكوينات ومعايير الأجهزة، وتقييم كفاءة طاقتها والتنبؤ بسلوكها في سيناريوهات حقيقية. تساهم هذه الدراسة في فهم أفضل للطاقة الموجية، وتسهل صنع القرار المستنير في تطوير المشاريع، وتمهد الطريق لاستخدام أكثر كفاءة وفعالية من حيث التكلفة لهذا المصدر الواعد للطاقة المتجددة.

Résumé - Cette thèse se concentre sur l'étude et la simulation de l'énergie houlomotrice en tant que source d'énergie renouvelable. En utilisant des outils de modélisation et de simulation avancés, il vise à évaluer l'efficacité et les performances des différentes technologies de conversion de l'énergie des vagues. L'analyse comprend la conception de modèles numériques représentant les systèmes de capture des vagues tels que les convertisseurs d'énergie des vagues (WEC) et les turbines submergées, ainsi que la simulation de leur fonctionnement dans différentes conditions océaniques. Les résultats obtenus permettent d'optimiser les configurations et les paramètres des dispositifs, d'évaluer leur rendement énergétique et de prédire leur comportement dans des scénarios réels. Cette étude contribue à une meilleure compréhension de l'énergie houlomotrice, facilite la prise de décisions éclairées dans le développement de projets et ouvre la voie à une exploitation plus efficace et rentable de cette source d'énergie renouvelable prometteuse.

Abstract - This thesis focuses on the study and simulation of wave energy as a renewable energy source. Using advanced modeling and simulation tools, it aims to evaluate the efficiency and performance of different wave energy conversion technologies. The analysis includes the design of numerical models representing wave capture systems such as wave energy converters (WEC) and submerged turbines, as well as simulation of their operation in different ocean conditions. The results obtained are used to optimize the configurations and parameters of the devices, evaluate their energy efficiency and predict their behaviour in real scenarios. This study contributes to a better understanding of wave energy, facilitates informed decision-making in project development and paves the way for more efficient and cost-effective use of this promising renewable energy source.