

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 Technologies
Filière : Electrotechnique
Spécialité : Commandes Electriques

THÈME

Contribution au contrôle avancé d'une ferme houlomotrice

Préparé par :

ABDAOUI KHEIRA

NHANTUMBO DELCIDIO

Devant le Jury :

Nom et prénoms	Grade	Qualité
M.KOULALI	MAA	Président
K. BELHACEL	MAA	Examinatrice
BENSOLTANE	MAA	Examineur
A. BERKANI	MCA	Encadreur
Y. BEKAOUAL	MAA	Co-Encadreur

PROMOTION 2021 /2022



Remerciement

Nos remerciements vont tout premièrement, à ALLAH le tout puissant qui, nous a donné la foi, le courage et la patience de parvenir à réaliser ce modeste travail.

Nous voudrions dans un premier temps remercier, notre encadreur de mémoire M. BERKANI, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion.

Nous remercions également madame BEKAOUAL de nous avoir accordé sa confiance et d'avoir relu et corrigé notre mémoire.

Nos vifs remerciements s'adressent également à tous les membres du jury qui nous ont honoré par leurs présences et d'avoir acceptés d'examiner et d'évaluer ce travail.

Nous tenons à témoigner toute nos reconnaissances à nos parents, pour leur soutien constant et leurs encouragements

SOMMAIRE :

INTRODUCTION GENERALE	8
-----------------------------	---

Chapitre 1 : Généralités sur les énergies marines

1.1 INTRODUCTION	9
1.2 PRINCIPES DE SYSTEME ENERGETIQUE OCEANIQUE	9
1.3 TYPES DE SYSTEME ENERGETIQUE OCEANIQUE	10
1.4 ÉNERGIE MAREMOTRICE	11
1.4.1 FONCTIONNEMENT TECHNIQUE :	12
1.4.2 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UNE USINE MAREMOTRICE	12
1.5 ÉNERGIE HOULOMOTRICE (OU ENERGIE DES VAGUES)	14
1.5.1 FONCTIONNEMENT TECHNIQUE :	15
1.5.2 TYPES DE CONVERTISSEUR D'ENERGIE HOULOMOTRICE :	15
1.6 CHAINE DE CONVERSION DE PUISSANCE POUR WEC	19
1.6.1 CONVERSION PRIMAIRE	19
1.6.2 CONVERSION SECONDAIRE :	20
1.7 LES DIFFERENTES TURBINES	20
1.7.1 TURBINES A AIR	20
1.7.2 TURBINE WELLS	20
1.7.3 TURBINES A IMPULSION	21
1.7.4 TURBINE DENNIS AULD	21
1.8 LES GENERATEURS ELECTRIQUES UTILISES	21
1.8.1 GENERATEURS A INDUCTION A CAGE D'ECUREUIL (SCIG) :	21
1.8.2 GENERATEURS A INDUCTION A DOUBLE ALIMENTATION (DFIG)	22
1.9 SYSTEMES DE TRANSMISSION	23
1.9.1 TRANSMISSION HVAC	23
1.9.2 TRANSMISSION HVDC :	23
1.10 CONCLUSION	23

Chapitre 2 : Modélisation des éléments de la chaîne de conversion houlomotrice

2.1 INTRODUCTION	26
2.2 VAGUES ET ENERGIE DES VAGUES	26
2.3 MODELISATION DES ELEMENTS DE LA CHAINE DE CONVERSION HOULOMOTRICE	26
2.4 MODELISATION DE L'ONDE IRRÉGULIÈRE	27
2.5 MODELISATION DE LA TURBINE (OSCILLATING WATER COLUMNS-OWC)	29
2.6 SYSTEME ELECTRIQUE	31
2.7.1 MODELE VECTORIEL DANS UN REFERENTIEL FIXE :	32

2.7.2 MODELE VECTORIEL EN REFERENTIEL TOURNANT :	33
2.8 MODELISATION DE L'ONDULEUR MLI	34
2.8.1 DESCRIPTION :	34
2.8.3 COMMANDE DE L'ONDULEUR :	36
2.9 MODELISATION DU FILTRE	37
2.9.1 DESCRIPTION :	37
2.9.2 MISE EN EQUATIONS :	38
2.11 MODELISATION DU BUS CONTINU	40
2.12 CONCLUSION	41

Chapitre 3 : Etude et simulation de la chaine de conversion houlomotrice

3.1 INTRODUCTION	43
3.2 CONTROLE DES GENERATEURS A BASE D'ONDULEURS DE PUISSANCE	44
3.3 RACCORDEMENT DES GENERATEURS HOULOMOTRICE AU RESEAU	47
3.4 SYSTEME DE CONTROLE DU CONVERTISSEUR COTE GENERATEUR	49
3.4.1 SYSTEME DE CONTROLE DU CONVERTISSEUR LATERAL GSAP :	49
3.4.1.1 CONTROLE DU COUPLE MAXIMAL :	50
3.4.1.2 CONTROLE DU FACTEUR DE PUISSANCE UNITAIRE :	50
3.4.2 SYSTEME DE CONTROLE DU CONVERTISSEUR COTE RESEAU :	53
3.5 CONCEPTION ET CONTROLE DU CONVERTISSEUR COTE RESEAU (CCR)	57
3.5.1 CONCEPTION DES ELEMENTS PASSIFS :	57
3.5.2. DETERMINATION DE LA TENSION DE REFERENCE DU BUS CONTINU :	58
3.6 RESULTATS DE SIMULATION ET INTERPRETATIONS	58
3.7 CONCLUSION	66
CONCLUSION GENERALE	68
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	71

Liste de figures :

Chapitre 1 : Généralités sur les énergies marines

FIGURE 1.1 PRINCIPES DU SYSTEME ENERGETIQUE OCEANIQUE	10
FIGURE 1.2 FORMES DES SYSTEMES ENERGETIQUES OCEANIQUES	11
FIGURE 1.3 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UNE CENTRALE MAREMOTRICE AVEC SIMPLE BASSIN	13
FIGURE 1.4 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UNE CENTRALE MAREMOTRICE AVEC DOUBLE BASSIN	14
FIGURE 1.7 COLONNE A OSCILLATION VERTICALE	18
FIGURE 1.9 COLONNE D'EAU	19
FIGURE 1.10 PRINCIPE DIFFERENTES ETAPES D'UNE CHAINE DE CONVERSION DE PUISSANCE POUR UN WEC	20

Chapitre 2 : Modélisation des éléments de la chaîne de conversion houlomotrice

FIGURE 2.1 REPRESENTATION SCHEMATIQUE D'UNE ONDE REGULIERE	28
FIGURE 2.2 STRUCTURE DE OWC	30
FIGURE 2.3 SCHEMA D'UNE PHASE DE LA GENERATRICE SYNCHRONNE A AIMANT DE TYPE BEHN-ESCHENBURG	32
FIGURE 2.4 SCHEMA DE PRINCIPE DE L'ONDULEUR A MLI	35
FIGURE 2.5 MLI SINUS TRIANGLE	37
FIGURE 2.6 MODELE ELECTRIQUE DU FILTRE	38
FIGURE 2.7 SCHEMA FONCTIONNEL DU BUS CONTINU	40

Chapitre 3 : Etude et simulation de la chaîne de conversion houlomotrice

FIGURE 3.1 STRUCTURE DE CONTROLE D'UN GENERATEUR A BASE D'UN ONDULEUR DE TENSION CONTROLE EN MODE Vf	44
FIGURE 3.2 STRUCTURE DE CONTROLE D'UN GENERATEUR PROGRAMMABLE A BASE D'UN ONDULEUR DE TENSION CONTROLE EN MODE PQ	45
FIGURE 3.3 STRUCTURE DE CONTROLE D'UN GENERATEUR NON PROGRAMMABLE A BASE D'UN ONDULEUR DE TENSION CONTROLE EN MODE PQ	45
FIGURE 3.4 STRUCTURE GENERALE DE CONTROLE D'UN GENERATEUR A BASE D'UN ONDULEUR DE PUISSANCE CONTROLE EN TENSION.	46
FIGURE 3.5 SYSTEME DE CONTROLE DE LA CHAINE GLOBALE	48

FIGURE. 3.6 SCHEMA DE PRINCIPE DE LA COMMANDE DU CONVERTISSEUR COTE GENERATEUR	49
FIGURE 3.9 SCHEMA DE STRUCTURE DU CONVERTISSEUR DE SOURCE DE TENSION PWM COTE RESEAU.....	53
FIGURE 3.10 SCHEMA FONCTIONNEL DU SYSTEME DE CONTROLE DU CONVERTISSEUR COTE RESEAU	56
FIGURE 3.11 MODELE SIMULINK DU SYSTEME ETUDIE	59
FIGURE 3.12 LA PARTIE AVANT D'ONDE DU MODELE SIMULINK. LE TRANSFERT D'ENERGIE DU FRONT D'ONDE VERS LA TURBINE ET LE GENERATEUR	59
FIGURE 3.13 COUPLE DE LA TURBINE TT	60
FIGURE 3.14 COEFFICIENT DU COUPLE CT	61
FIGURE 3.15 COEFFICIENT DU FLUX FI	61
FIGURE 3.16 COURANT DE GSAP	61
FIGURE 3.17 VITESSE DE GSAP.....	62
FIGURE 3.18 COUPLE ELECTROMAGNETIQUE DE GSAP	61
FIGURE 3.19 TENSION COTE GENERATEUR	62
FIGURE 3.20 ZOOM DE TENSION COTE GENERATEUR	63
FIGURE 3.21 COURANT COTE GENERATEUR	62
FIGURE 3.23 EVOLUTION DE LA PUISSANCE COTE GENERATEUR (AVANT).....	63
FIGURE 3.24 EVOLUTION DE LA PUISSANCE COTE GENERATEUR (APRES).....	63
FIGURE 3.25 TENSION DE COTE RESEAU	64
FIGURE 3.26 ZOOM TENSION COTE RESEAU.....	65
FIGURE 3.27 COURANTS TRIPHASES COTE RESEAU.....	65
FIGURE 3.28 ZOOM DE COURANTS TRIPHASES COTE RESEAU	66
FIGURE 3.29 EVOLUTION DE LA PUISSANCE ACTIVE ET REACTIVE COTE RESEAU	65
FIGURE 3.30 TENSION CONTINUE DU CIRCUIT INTERMEDIAIRE (U_c et U_{ref}).....	65



NOMECLATURES

VSC	Voltage Source Converter (convertisseur de source de tension)
FSC	Finite Set Control (contrôle d'ensemble fini)
PVM	Pulse Width Modulation (modulation de largeur d'impulsion)
SVPWM	Space Vector Pulse Width Modulation (modulation de la largeur d'impulsion du vecteur spatial)
HPP	High Pressure Processing (traitement à haute pression)
SVRF	Stator Voltage Fixed Reference (référence fixe tension stator)
PLL	Phase Locked Loop (boucle à verrouillage de phase)
MPPT	max power point timing (synchronisation maximale du point de puissance)
PCC	power conversion Chain (chaîne de conversion de puissance)
WEC	Waves Energy conversation (conversion de l'énergie des vagues)
OWC	Oscillating Water Columns (la colonne d'eau oscillatoire)

INTRODUCTION GENERALE

En raison de l'augmentation de la consommation d'énergie, il y a eu une recherche de sources d'énergie alternatives aux combustibles fossiles pour la production d'énergie utile. L'une de ces sources alternatives est l'énergie contenue dans les vagues de l'océan. Cette source d'énergie est une ressource renouvelable que l'on trouve en abondance sur toute la planète et qui peut être exploitée par plusieurs pays contribuant à leurs besoins énergétiques. Comparées à d'autres sources d'énergie renouvelables, principalement l'énergie solaire et éolienne, les vagues océaniques ont des densités d'énergie plus élevées. Cependant, la distribution de la densité d'énergie contenue dans les ondes n'est pas uniforme sur toute la planète, ce qui rend l'exploitation de cette ressource plus adaptée à certains pays [1].

Pour atténuer les problèmes de demande d'énergie, l'énergie des vagues a attiré plus d'attention au cours des deux dernières décennies, ce qui a conduit au développement de divers systèmes d'énergie houlomotrice. L'énergie houlomotrice jouera un rôle déterminant dans la transition vers un avenir 100% renouvelable pour les raisons suivantes :

- Le vaste potentiel de l'énergie propre. Le potentiel théorique mondial d'énergie houlomotrice est estimé à 16 000 TWh/an, ce qui peut être une contribution considérable pour répondre à la demande mondiale croissante d'énergie [2].
- La complémentarité temporelle des ressources houlomotrices avec d'autres ressources renouvelables, telles que l'éolien et le solaire, peut conduire à des synergies positives entre ces ressources. Ces synergies permettront aux systèmes d'approvisionnement d'accepter les énergies renouvelables à des coûts inférieurs à ceux du système existant, qui repose fortement sur l'énergie éolienne et solaire [2].

Comme d'autres sources d'énergie renouvelables (SER), la ressource d'énergie houlomotrice est intermittente, relativement imprévisible et très variable, ce qui pose un défi important pour l'intégration au réseau [1]. L'intégration du réseau d'énergie houlomotrice présente divers problèmes, tels que la variabilité de la puissance de sortie, le contrôle des convertisseurs de puissance et les exigences de stockage optimales. Une autre couche de difficulté dans l'énergie des vagues est la mise en œuvre du contrôle du convertisseur d'énergie houlomotrice réactive (WEC), qui nécessite un flux de puissance bidirectionnel entre l'appareil et le réseau. Il est nécessaire de s'attaquer aux problèmes mentionnés ci-dessus pour augmenter la pénétration de l'énergie des vagues dans les réseaux électriques [3].

Il est important de préciser que le développement d'un convertisseur d'énergie houlomotrice (WEC) est une tâche trop multidisciplinaire, composée d'un certain nombre d'obstacles, à mentionner: l'adaptation du contrôle en temps réel de l'accumulation d'énergie pour chaque onde d'entrée, le dimensionnement structurel pour de bonnes capacités d'absorption et une grande robustesse, Utilisation efficace des matériaux, développement de principes et de composants de machines, conception pour prolonger la durée de vie des composants, en plus d'un transport sûr et efficace de l'énergie vers la côte. Il est également essentiel de garantir une

Introduction générale

interférence minimale de la vie marine aux utilisations de la mer, telles que la pêche, ajoutées à un service d'installation, d'exploitation et d'entretien [1][3].

Dans ce travail qui est divisé en trois chapitres nous nous intéressons à étudier tout le système de conversion commençant de la turbine houlomotrice passant par les convertisseurs statiques jusqu'au réseau électrique.

Après l'introduction générale, le premier chapitre présente une brève description sur les généralités de la production d'énergie électrique à partir des énergies marines.

Dans le deuxième chapitre nous présentons les différents composants de la chaîne de conversion de puissance des énergies houlomotrice puis nous examinons les détails du fonctionnement et de la modélisation du générateur synchrone à aimant permanent. Ensuite, le découplage des tensions du générateur dans le repère dq , le convertisseur de source de tension (VSC) et le contrôleur de courant à connecter au GSAP sont discutés [5].

Une étude et simulation d'un système de conversion houlomotrice basée sur la colonne d'eau oscillante reliée à un GSAP. La chaîne de production électrique est connectée au réseau dans le cas d'un fonctionnement sain côté réseau seront l'objet du chapitre trois [5] et les résultats de la simulation sont interprétés.

Enfin, ce travail sera clôturé par une conclusion générale à travers laquelle on exposera les principaux résultats obtenus et on donnera les perspectives à envisager suite à ce travail.



Généralités sur les énergies marines

1.1 Introduction

Les énergies renouvelables sont des sources d'énergie d'origine naturelle dont le renouvellement est suffisamment rapide à l'échelle humaine du temps pour qu'elles puissent être considérées comme presque inépuisables. Elles sont issues du rayonnement solaire, des vents, du cycle de l'eau, de la biomasse, du flux de chaleur interne de la terre. Les énergies renouvelables sont loin de constituer une nouveauté puisqu'elles ont été les premières à être utilisées par les hommes [10].

Depuis le début de l'humanité jusqu'à la fin du XVIe siècle, les seules formes d'énergie couramment utilisées étaient renouvelables. En partant des temps les plus anciens, on évoquera tout d'abord la combustion du bois et plus généralement de la biomasse- la maîtrise du feu par l'homme étant apparue il y a au moins 400 000 ans. Puis l'énergie mécanique du vent et celle de l'eau ont été utilisées par l'homme. Moulins à eau et à vent ont ainsi accompagné le développement technologique de nos sociétés de l'antiquité au XIXe siècles et ont contribué à réduire en proportion le recours à la force humaine [14]

Dans ce premier chapitre nous présentons des généralités sur les énergies marines et ses différents types. Nous allons présenter aussi la chaîne de conversion, chaque fois que sera possible, nous mentionnerons les caractéristiques de la turbine et la génératrice et les contraintes imposées, compte tenu de leurs paramètres de performance.

1.2 Principes de système énergétique océanique

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 1.1 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. 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 [4].

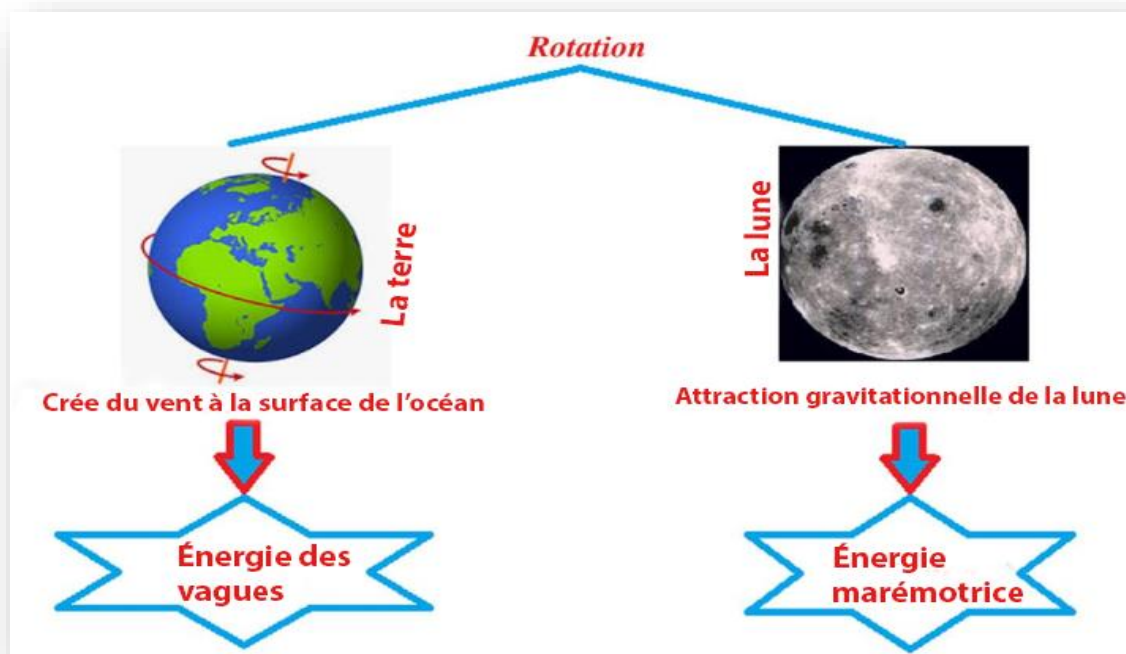


Figure 1.1 Principes du système énergétique océanique

1.3 TYPES DE SYSTEME ENERGETIQUE OCEANIQUE

Dans le scénario actuel, le système d'énergie océanique est la technologie la plus prometteuse pour les systèmes d'énergie renouvelable. Dans cette technologie, les niveaux d'eau de mer jouent un rôle important et 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 ou l'énergie marémotrice est une forme d'hydroélectricité qui convertit l'énergie obtenue à partir des marées. 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.

3. Système d'énergie éolienne en mer : L'énergie éolienne en mer ou 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 [4].

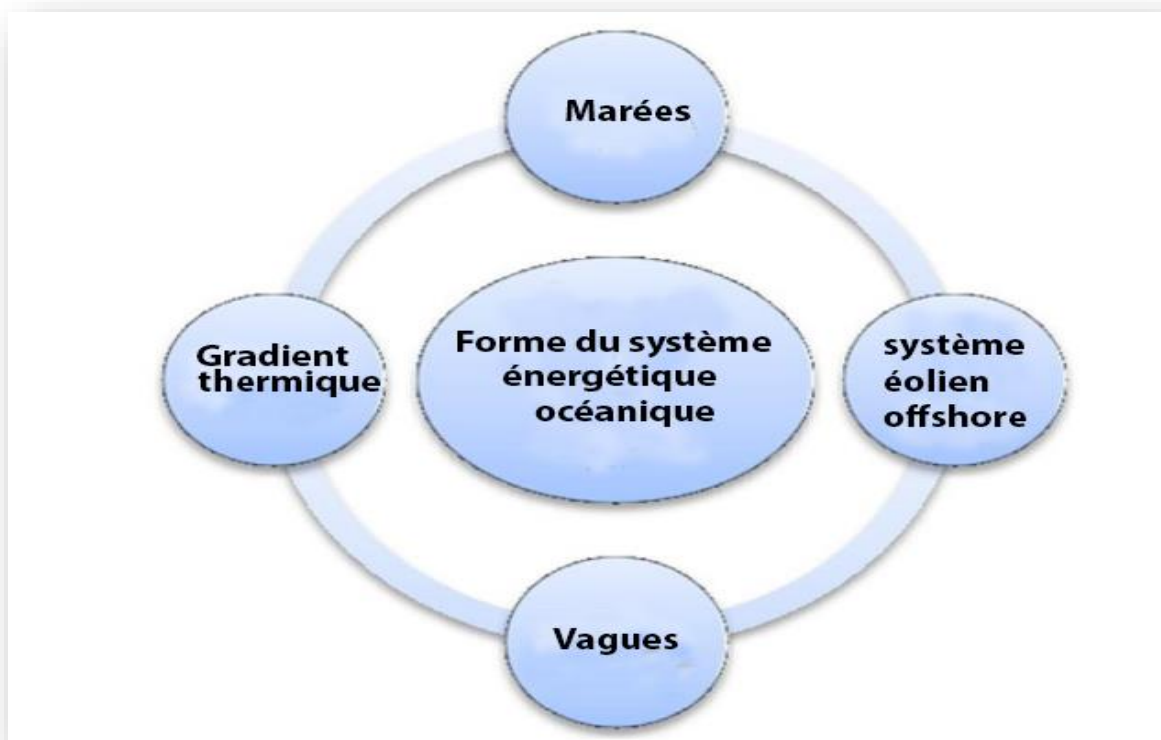


Figure 1.2 Formes des systèmes énergétiques océaniques

1.4 ÉNERGIE MAREMOTRICE

L'énergie marémotrice consiste à exploiter l'énergie issue des marées dans des zones littorales de fort marnage (différence de hauteur d'eau entre la marée haute et la marée basse se succédant). Le phénomène de marée est induit par l'effet gravitationnel sur l'océan de deux astres à proximité de notre planète : la Lune et le Soleil. Contrairement aux hydroliennes qui captent l'énergie cinétique des courants de marée, le principe d'une centrale marémotrice s'appuie sur une énergie potentielle : cette source d'énergie utilise le marnage pour produire de l'électricité en exploitant la différence de hauteur entre deux bassins séparés par un barrage. La centrale de la Rance en Bretagne a été

la première grande centrale marémotrice dans le monde et longtemps la plus puissante avec une capacité installée de 240 MW [4][6].

1.4.1 Fonctionnement technique

Le rythme semi-diurne (deux marées par jour) du phénomène des marées provient de la rotation de la Terre sur elle-même. L'alternance entre grandes marées et mortes eaux provient quant à lui des positions relatives de la Lune et du Soleil au cours du mois lunaire. La Lune, moins massive mais plus proche que le Soleil, produit l'effet le plus important sur les marées terrestres.

Tous ces mouvements astraux peuvent être calculés sur des milliers d'années, ce qui permet d'obtenir une prédiction des marées à très long terme en horaire et en amplitude. [4].

1.4.2 Principe de fonctionnement d'une usine marémotrice

Un bras de mer ou un estuaire en zone de fort marnage est équipé d'une infrastructure qui met en œuvre des turbines de basse chute actionnées par le flux d'eau de mer entre les deux bassins (situés à des niveaux différents).

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

- Un marnage supérieur à 5 mètres, idéalement entre 10 et 15 mètres ;
- Une profondeur de 10 à 25 mètres sous les basses mers ;
- 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 [4].

a) Le simple bassin

Consiste à barrer un bras de mer par un ouvrage capable de retenir un important volume d'eau. Le barrage délimitant le bassin est percé d'ouvertures, certaines étant dotées de vannes simples, d'autres étant dotées de vannes munies de turbines. Par exemple, la centrale de Rance est composée de 24 travées contenant autant de turbines et d'un barrage mobile constitué de 6 vannes (de 15 x 10 m). Il existe alors trois techniques de production d'énergie électrique [6] :

le « simple effet au vidage » : le bassin de retenue est, avec les vannes fermées, « clôturé » à marée haute. Puis on ouvre les vannes lorsque le niveau de la mer est redescendu suffisamment bas pour faire fonctionner les turbines (ou « bulbes ») connectées à des alternateurs ;

le « simple effet au remplissage » : à l'inverse, on isole le bassin de retenue à marée basse afin d'obtenir une différence de hauteur au fur et à mesure de la marée montante. Lorsque la marée est haute, on ouvre les vannes et l'eau pénétrant dans le bassin de retenue par les vannes fait tourner les turbines. Cette méthode nécessite de conserver un niveau bas dans le bras de mer (côté bassin de retenue) sur une longue durée et peut poser des problèmes environnementaux et d'usages pour la navigation ;

le « double effet » : on fait tourner les turbines à la fois lors du remplissage et lors du vidage, ce qui offre une plage de production plus longue (exemple de la Rance). Des pompes

complémentaires permettent d'optimiser les différences de niveau tout en préservant le bilan énergétique [4].

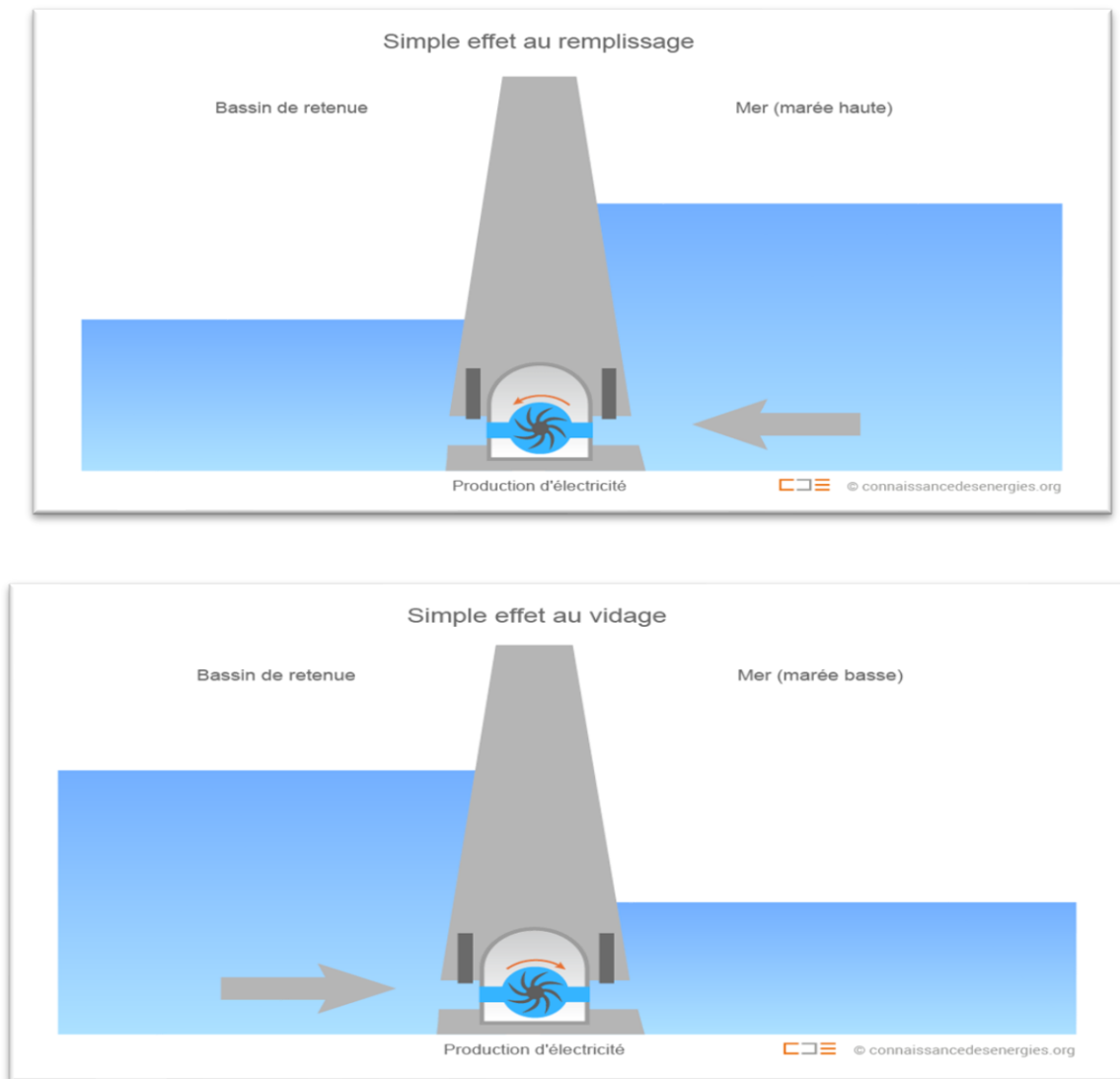


Figure 1.3 Principe de fonctionnement d'une centrale marémotrice avec simple bassin

b) Le double bassin

Consiste à rajouter un bassin artificiel, situé plus bas que le niveau de la mer (y compris à marée basse). Compte tenu du décalage quotidien de l'heure de la marée, la production électrique est disponible certains jours à l'heure de pointe et d'autre jour en période de faible consommation [6].

Un bassin supplémentaire permet l'exploitation d'une différence de potentiel quelle que soit la hauteur d'eau de la mer (il est également possible de « sur-remplir » le bassin de la vallée de la Rance et de turbiner au moment le plus opportun). Il constitue un moyen de stockage (comme une STEP) pour une meilleure maîtrise de la production en conjuguant turbinage et

pompage. Ce dispositif offre des plages de production plus longues mais nécessite une infrastructure plus complexe et plus coûteuse.

Un concept de lagons artificiels plus au large est également à l'étude afin d'éviter les inconvénients liés aux grandes infrastructures sur le littoral. De tels dispositifs nécessiteraient toutefois des endiguements plus longs et seraient donc plus coûteux. Ils supposent en outre de faibles profondeurs d'eau, donc des zones déjà fortement convoitées pour d'autres usages. Aucun lagon artificiel n'a été réalisé à ce jour pour installer une centrale marémotrice [4][6].

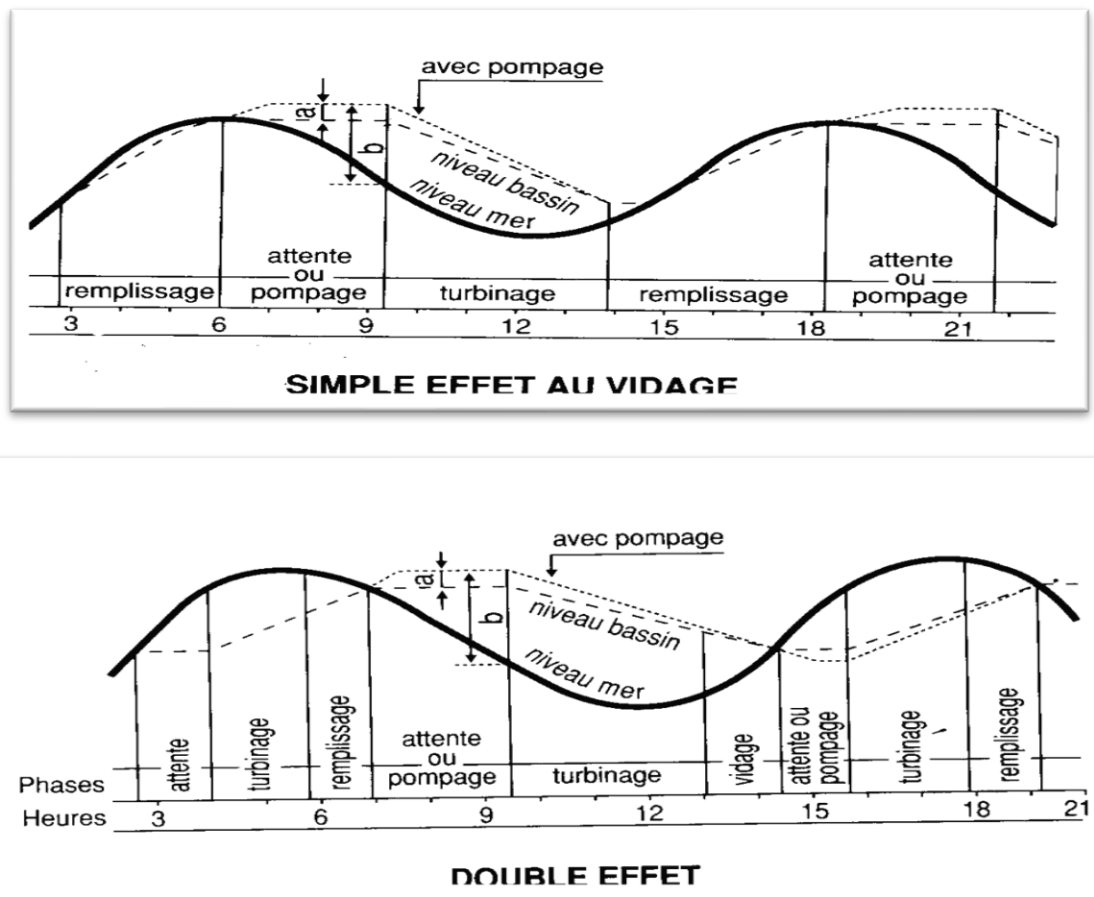


Figure 1.4 Principe de fonctionnement d'une centrale marémotrice avec double bassin

1.5 ÉNERGIE HOULOMOTRICE (OU ENERGIE DES VAGUES)

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 parfois propagées sur de très longues distances. 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.

L'énergie houlomotrice représente un potentiel énorme dans le mix énergétique mondial. En effet 71 de la surface de la planète est recouverte par la mer ou l'océan. Le conseil mondial de

l'énergie estime que 10 de la demande annuelle mondiale d'électricité pourraient être couverts grâce à l'énergie houlomotrice [8].

Toutefois, cette énergie vaut la peine d'être étudiée plus en profondeur car elle présente énormément d'avantages :

L'aspect le plus important : la quantité inépuisable d'énergie de la houle. C'est à dire que même si l'on récolte de l'énergie de la houle, elle ne perd pas de sa puissance, ce qui fait de l'énergie houlomotrice une énergie renouvelable comme l'énergie éolienne et à l'inverse du nucléaire. De plus, comme notre planète est recouverte à 70% d'eau, la houle est présente sur d'énormes distances. Cela nous permet donc de produire de l'énergie sur de longues distances et au long terme. Ce type d'exploitation peut paraître idéal car comparé aux éoliennes terrestre, ces installations ne représentent aucune pollution visuelle. Et comparé au nucléaire, ce n'est pas dangereux, en tout cas pour l'homme. Par rapport à l'énergie solaire, la production d'énergie houlomotrice est jugée deux cents fois plus petite (chiffres de 2011). Pour donner une idée chiffrée du potentiel titanesque de nos océans : la capacité de production d'énergie houlomotrice étant estimée entre 2000 et 8000 TWh/an. « En Europe, elle est estimée à 150 TWh/an, avec une puissance moyenne sur la côte atlantique de 45 kW par mètre linéaire de front de vague au large (25 kW par mètre au voisinage des côtes). » selon connaissancedesenergies.org. En Grande-Bretagne, le potentiel d'énergie électrique d'origine houlomotrice est de 50 TWh par an, ce qui équivaut à 5 réacteurs nucléaires. En France, il est estimé à 40 TWh/an, sachant que la consommation d'énergie électrique en France est d'environ 475 TWh/an [14].

1.5.1 Fonctionnement technique

Il existe un vaste inventaire de solutions houlomotrices, certaines d'entre elles étant immergées, d'autres installées en surface, sur le rivage ou au large. 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 procédés existants ou à l'étude peuvent être classifiés en 6 grands systèmes (dont nous avons librement formulé l'intitulé) [5][4].

1.5.2 Types de convertisseur d'énergie houlomotrice

La grande variété de conceptions WEC a naturellement conduit à proposer de les regrouper en catégories. Typiquement, ils sont classés selon leur mode de fonctionnement (principe de fonctionnement) ; où ils travaillent (littoral, nearshore, offshore) ou par leur stade actuel de développement (première, deuxième, troisième génération) [4]. De toute évidence, une classification complète d'un WEC particulier inclura les trois composants.

Les principes de fonctionnement des WEC peuvent être décrits de diverses manières. Nous adoptons ici le système recommandé par l'Européen Marine Energy Centre (EMEC), basé dans les îles Orcades, en Écosse, qui couvre la plupart des dispositifs actuellement à un stade avancé de développement [5].

a) Chaîne flottante articulée

Il s'agit d'une structure composée d'un enchaînement de plusieurs flotteurs alignés. Ils sont positionnés perpendiculairement aux vagues. La tête de la chaîne est ancrée au fond marin grâce à un câble. La houle (les vagues) crée une oscillation de la chaîne, qui est exploitée au niveau des articulations pour comprimer un fluide hydraulique. Celui-ci entraîne à son tour une turbine. C'est ce procédé qui est le plus connu et qui semble le plus prometteur pour l'énergie houlomotrice actuellement.

Un des avantages de ce type de système est que l'installation et la maintenance sont relativement faciles, puisqu'il s'agit uniquement de remorquer la structure et de l'amarrer. Toutefois, cela ne peut s'effectuer que lors de certaines saisons et l'engin est très lourd [12].

Un des avantages de ce type de systèmes est qu'à la fin de leur vie, on peut les recycler, par exemple en les coulant au fond de l'océan pour qu'ils se transforment en récif artificiel. En créant un récif artificiel, on peut favoriser le développement d'un écosystème riche. Un récif artificiel peut être par exemple des blocs de béton, des carcasses d'automobiles ou de bateaux, voire de vieux pneus. Mais attention, les structures rejetées dans le but de devenir des récifs doivent être implantées dans des sites rigoureusement sélectionnés, pour ne pas déranger la faune et la flore. Le matériau et la forme du déchet jouent un rôle particulièrement important. Le projet le plus avancé de chaîne flottante articulée est le Pelamis. Un engin d'environ 120 mètres de long (produisant 750 kW/h) peut alimenter près de 3000 foyers en un an. On constate qu'un parc de machine d'une surface de 1 km² délivrerait de l'énergie pour alimenter 20 000 foyers, ce qui est tout de même considérable [3][6].



Figure 1.5 Chaîne flottante articulée

b) Paroi oscillante immergée

Le fonctionnement de la paroi oscillante consiste à installer une structure entièrement immergée et composée d'une paroi plane fixée sur une articulation centrale. La paroi oscille

en fonction des mouvements marins créés par les vagues et actionne, grâce à ce mouvement, une turbine qui permettra de faire tourner un alternateur.

Ce système présente plusieurs inconvénients. On peut tout d'abord voir que le système est assez imposant : il est installé dans environ 10 mètres de profondeur, est relié au sol et s'étend jusqu'à la surface de l'eau, la paroi parallèle à la côte, pèse 200 tonnes. Il s'agit donc d'une structure plus dérangeante pour la faune sous-marine que la chaîne flottante articulée. De plus, l'installation et la production d'Oyster est difficile et chère : de par son poids et sa taille, il doit être emmené en mer sur une grande péniche plate et installé en plusieurs étapes compliquées. En outre, les turbines et générateurs peuvent créer une pollution sonore et ainsi gêner la faune sauvage sur la côte. Toutefois, on s'attend à ce que ce bruit soit couvert par le bruit naturel du vent et des vagues. Du bruit et des vibrations sous-marines seront aussi présents, ce qui interférerait avec la vie animale, masquant les sons naturels, gênant la communication entre espèces, induisant du stress, et pouvant même causer la perte d'audition d'espèces marines. Il pourrait également détruire l'habitat de certaines espèces [1][6].

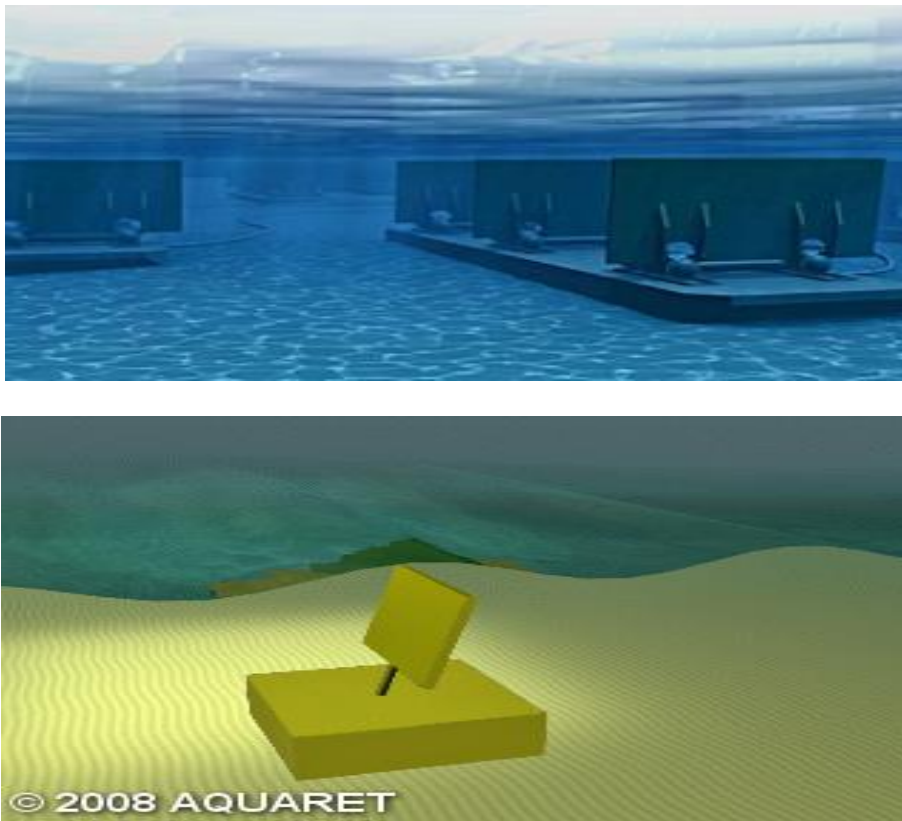


Figure 1.6 Paroi oscillante immergée

c) Colonne à oscillation verticale

Placée sur la surface de la mer, cette installation est composée d'une bouée qui oscille verticalement grâce au mouvement des vagues, ce qui permet d'activer une pompe. Cette pompe servira ensuite à mettre sous pression un fluide hydraulique qui fera ensuite tourner une turbine qui entraînera avec elle un alternateur.

L'avantage d'un système comme celui-ci, est qu'il utilise l'eau de mer comme masse d'inertie, ce qui permet de réduire les coûts des matériaux de construction de la structure. Mais comme tous les autres modèles, il doit être assez solide pour résister aux conditions météorologiques extrêmes du off-shore ainsi qu'à l'érosion, et doit veiller à ne pas déranger la vie sous-marine. On peut cependant s'imaginer qu'un système non ancré au sol gêne moins la faune et la flore qu'un système accroché au fond sous-marin, ce qui est par exemple le cas de la paroi oscillante immergée [6].

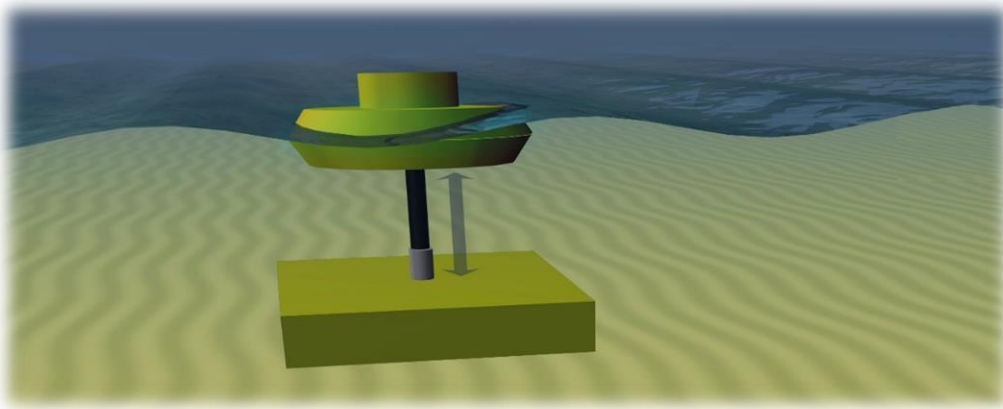


Figure 1.7 Colonne à oscillation verticale

d) Capteur de pression immergé

Il s'agit d'un système ancré au fond marin qui utilise le mouvement orbital des vagues pour comprimer un fluide hydraulique. Le capteur le plus simple à utiliser est un ballon. Il est possible de constituer un réseau de capteurs et recueillir le fluide comprimé à terre où il est turbiné pour produire de l'électricité [6].

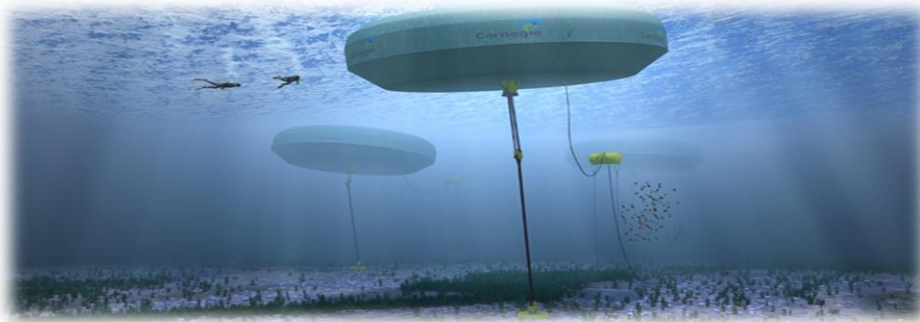


Figure 1.8 Capteur de pression immergé

e) La colonne d'eau

Ce système est le plus coûteux à mettre en œuvre, car il s'appuie sur une structure flottante en acier ou en béton qui est ouverte à la base et fermée sur son dessus. Le principe consiste à ce que de l'eau entre et sorte de la structure par l'ouverture basse pour comprimer et décompresser l'air existant dans la partie supérieure de l'installation de manière alternative. Un mouvement d'expulsion et d'aspiration d'air est alors créé. Cet air en mouvement fera ensuite tourner une turbine bidirectionnelle qui produira de l'électricité [6].

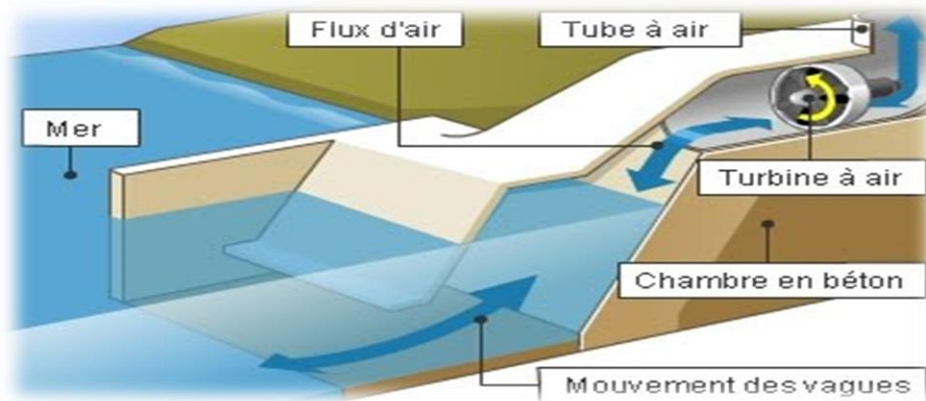


Figure 1.9 Colonne d'eau

1.6 Chaîne de conversion de puissance pour WEC

Le processus de conversion d'énergie qui produit l'énergie électrique requise pour la connexion d'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 [3]. Ceux-ci pourraient être classés largement dans les sous-catégories suivantes :

- 1) Conversion primaire,
- 2) Conversion secondaire,
- 3) Conversion tertiaire.

Les étapes de conversion ainsi que quelques exemples ont été expliqués en détail ci-dessous. [5].

1.6.1 Conversion primaire

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. Le mouvement horizontal des vagues peut être converti à l'aide de flottant ou des dispositifs mécaniques immergés pour extraire l'énergie. La différence de pression

entre les mouvements d'onde sont convertis à l'aide de tubes de type venturi pour augmenter l'élan du flux d'énergie [5].

1.6.2 Conversion secondaire

L'étape suivante du processus tente de convertir le fluide de travail en énergie électrique utile. Turbines hydrauliques et pneumatiques, vérins hydrauliques, moteurs hydrauliques et électriques les générateurs sont quelques exemples qui rendent cette conversion possible [3] La faible rotation les vitesses inhérentes à ces dispositifs sont converties en vitesses de rotation élevée pour plus d'énergie conversion. La classification essentielle des appareils qui composent cette étape de conversion sera décrit dans les sections suivantes [5].

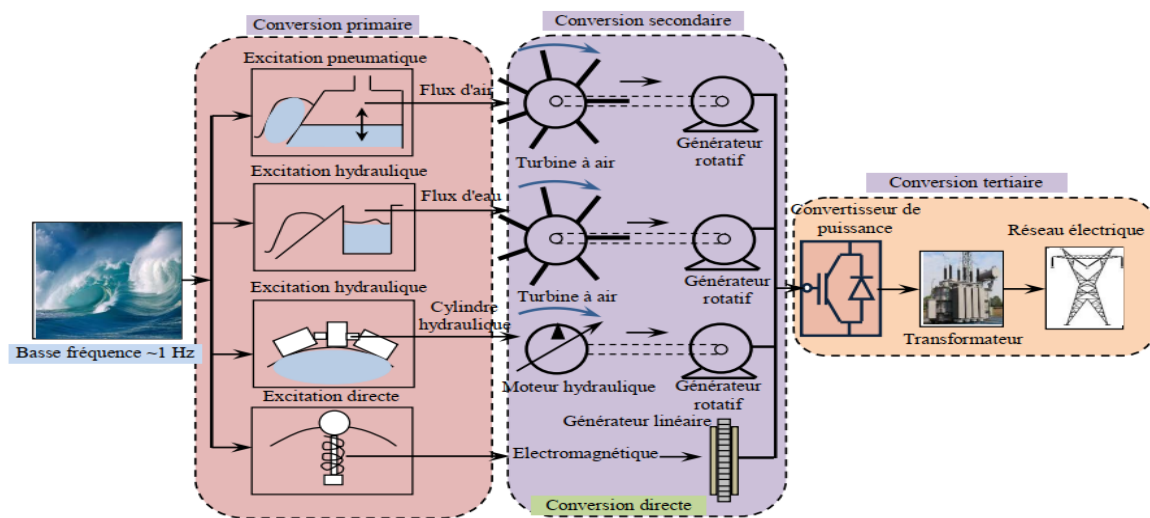


Figure 1.10 Principe Différentes étapes d'une chaîne de conversion de puissance pour un WEC

1.7 LES DIFFERENTES TURBINES

1.7.1 Turbines à air

Au cours des dernières décennies, l'utilisation de turbines à air unidirectionnelles uniquement pour la technologie WEC a abouti à la nécessité de rectifier les vannes en tant qu'équipement supplémentaire. Les turbines à air à redressement automatique telles que les turbines Wells, Impulse et Dennis Auld étaient mis en œuvre [3][5].

1.7.2 Turbine Wells

Une turbine à flux axial produit un couple qui n'est pas affecté par la direction du flux d'air. Peu de ses avantages incluent un coût bon marché, des vitesses de rotation élevées pour un débit d'air relativement faible et une bonne efficacité de pointe. Cependant, cela vient avec les inconvénients d'être bruyant, équipement de grande taille et couples négatifs ou faibles pour une petite entrée de débit [4][5].

1.7.3 Turbines à impulsion

L'axe de rotation de ces types de turbines est orienté dans le sens de l'air couler. Les avantages et les inconvénients de ce type de turbines dépendent des versions des modèles et sur la base de la comparaison [4].

1.7.4 Turbine Dennis Auld

Comparable à une version de la turbine Wells, les aubes sont situées en périphérie du rotor et facilite ainsi une direction axiale pour l'écoulement de l'air plutôt qu'un écoulement tangentiel comme dans les deux autres turbines. L'efficacité de cette turbine est plus élevée que celle de la version Wells, en raison d'une plus grande fraction de la surface totale de la lame zone de balayage de la turbine, appelée solidité [3][4].

1.8 LES GENERATEURS ELECTRIQUES UTILISES

1.8.1 Générateurs à induction à cage d'écureuil

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 [5]

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 moteur asynchrone, 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 moteur 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 [3][5].

Les moteurs à cage d'écureuil 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 moteurs asynchrones. 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 [3].

1.8.2 Générateurs à induction à double alimentation

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 [5]. Un moteur à double alimentation 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 GADA 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, le la puissance gérée par le circuit du rotor est (Tazil et al.2010) [4][5].

1.8.3 Générateur synchrone à aimant permanent

Un GSAP adopte un aimant permanent pour générer le champ magnétique nécessaire à la génération de l'électricité. Par conséquent, il n'est pas nécessaire de fournir une alimentation externe pour l'excitation et il n'est pas nécessaire d'avoir un circuit de rotor. Cela simplifie la structure et réduit le coût de la maintenance. Les GSAP sont plus efficaces que les générateurs à induction et le facteur de puissance peut être l'unité ou même le leadership. De plus, les GSAP ont une densité de puissance très élevée et deviennent location voiture le prix des aimants aux terres rares a diminué de plus d'une commande de magnitude au cours des 10 dernières années. En conséquence, les GSAP deviennent de plus en plus populaires pour les applications d'énergie hydraulique. Un GSAP fonctionne à la vitesse synchrone et à la fréquence de L'électricité produite est directement proportionnelle à la vitesse mécanique et donc le glissement est zéro. Cela pourrait être utilisé pour éliminer le besoin d'un capteur mécanique pour mesurer la vitesse de la turbine [3].

1.9 SYSTEMES DE TRANSMISSION

Après la conversion électronique de puissance, l'énergie doit être transmise au réseau via réseaux de transmission. Le courant alternatif haute tension (HVAC) et le courant continu haute tension (HVDC) sont les deux types de transmission qui peuvent être mis en œuvre. Bien que les systèmes de transmission ne tiennent 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. Le coût d'acheminer l'énergie vers le réseau devient une fonctionnalité sur laquelle la solution WEC sera pesé lors de la mise en œuvre de la ferme WEC [3].

1.9.1 Transmission HVAC

Avec des décennies de technologie éprouvée, la transmission HVAC est la forme la plus courante de transmission électrique off-shore sur longue distance. Les transformateurs ne seront pas indispensables si les tensions au réseau et à la ligne de transport sont maintenues au même niveau qu'est typique dans le cas des fermes à petites vagues de l'ordre de 30 à 36 kV [5].

1.9.2 Transmission HVDC

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 [24]. Les sous-stations du système VSC sont moins chères et plus petites et sont préférables aux sous-stations LCC [5].

1.10 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 concentré sur les types de générateurs utilisés dans la chaîne de conversion électrique et les systèmes de transmission.





MODELISATION DES ELEMENTS DE LA CHAINE DE CONVERSION HOULOMOTRICE

2.1 Introduction

Afin de simuler le comportement du convertisseur d'énergie houlomotrice proposé, il est important de modéliser les différents composants de la chaîne de conversion. Dans ce chapitre, nous discuterons de la modélisation de différents la chaîne de conversion houlomotrice [3]

La modélisation est l'un des outils mathématiques le plus utilisé dans le domaine du prédimensionnement en ingénierie, est la compréhension d'un système étudié dans le but de le contrôler. La connaissance de la structure du système du point de vue électromécanique, électrique et mécanique est nécessaire pour la compréhension et l'analyse des performances statiques et dynamiques du système [4].

La mise en évidence des notions de force électromotrice (FEM) a été proposé à l'aide des modèles dynamiques des générateurs synchrones à aimants permanents (GSAP) avec leurs circuits équivalents. Pour produire un couple constant, une GSAP possédant une FEM sinusoïdale avec des courants statoriques sinusoïdaux est nécessaire. Le modèle de la génératrice synchrone à aimants permanents est développé pour prévoir par exemple les défauts de court-circuit, 1 'enclenchement et le délestage de charge [4]

En effet, le prototype de la modélisation est très important pour la conception et l'analyse de ses performances statiques et dynamiques.

2.2 Vagues et énergie des vagues

Les vagues sont décrites par leur longueur et leur hauteur H , comme le montre la figure 2.1. h dans La figure 2.1 représente la distance entre le niveau d'eau moyen et le fond marin tandis que H représente la distance verticale maximale entre un creux et une crête de la vague. Se représente l'élévation instantanée de la surface de la vague au-dessus ou au-dessous de l'eau moyenne niveau. Pour décrire précisément le comportement des ondes, différentes théories des ondes selon la profondeur de l'eau et la raideur de la vague sont appliquées.

Pour les eaux profondes où la longueur d'onde de la vague est inférieure à la moitié de la profondeur de la mer lit, $< 0.5 h$, 95% de l'énergie des vagues est piégée entre la surface et une profondeur de $=4$.

Comme le montre le côté de la figure 2.1, les particules d'eau se déplaçant selon un modèle oscillant sous l'eau ont une diminution exponentielle des diamètres des cercles avec une augmentation de profondeur d'eau. Pour les eaux profondes, une théorie linéaire des vagues1 pourrait être appliquée [4][5].

2.3 Modélisation des éléments de la chaîne de conversion houlomotrice

Un convertisseur d'énergie houlomotrice immergé est modélisé dans le domaine temporel à l'aide d'ondes linéaires théorie et en définissant les équations des mouvements du corps dans différentes directions. Le WEC l'appareil dans des conditions immergées fera face à des mouvements différents dans les trois axes différents et pour la modélisation du dispositif

WEC nous ne considérerons que les mouvements des axes dans le sens du soulèvement. Pour toutes les stratégies de modélisation et de contrôle expliquées ci-dessous, la direction du soulèvement doit être notée z. Basée sur la loi du mouvement de Newton, la dynamique des forces agissant sur le dispositif WEC dans le sens du soulèvement peuvent être exprimées comme suit [3] :

$$m\ddot{z}_{WEC}(t) = F_{e_z} + F_{gen_z} + F_{r_z} \quad (2.1)$$

Où :

$z_{WEC}(t)$: est le position du WEC dans le sens de la houle,

$m\ddot{z}_{WEC}(t)$: est l'accélération du WEC dans le sens de la houle,

m : est la masse du dispositif WEC,

F_{e_z} : est la force d'excitation développée sur le WEC,

F_{gen_z} : est la force d'entrée manipulable de la prise de force pour contrôler le système,

F_{r_z} : est les forces de rayonnement développées par le WEC.

La force de rayonnement est développée par le mouvement de l'appareil et donc la force développée par les ondes rayonnantes peut être écrit simplement comme :

$$F_{r_z} = -A_{zz}\ddot{z}_{WEC}(t) - A_{zx}\ddot{x}_{WEC}(t) - A_{zR_y}\ddot{R}_{yWEC}(t) - B_{zz}\dot{z}_{WEC}(t) - B_{zx}\dot{x}_{WEC}(t) - B_{zR_y}\dot{R}_{yWEC}(t) \quad (2.2)$$

Où :

A_{ijx} : est la masse ajoutée agissant sur le système dans la direction i en raison des forces dans direction j,

B_{ijx} : est l'amortissement visqueux agissant sur le système dans la direction i en raison des forces dans direction j.

$\dot{z}_{WEC}(t)$: est la vitesse du WEC dans le sens du soulèvement,

$\dot{x}_{WEC}(t)$: est la vitesse du WEC dans la direction de l'onde de choc,

$\ddot{x}_{WEC}(t)$: est l'accélération du WEC dans la direction de l'onde de choc,

$\dot{R}_{yWEC}(t)$: est la vitesse angulaire du WEC dans la direction du pas,

$R_{yWEC}(t)$: est l'accélération angulaire du WEC dans le sens de la houle,

Les paramètres A_{zz} , B_{zz} et F_{ez} dépendent de la fréquence du signal de la vague entrante. Ces valeurs peuvent être calculées à l'aide de modèles numériques et pour la simulation logicielle, ces valeurs doivent être estimées en fonction de la fréquence de l'onde entrante.

Ainsi, en combinant l'équation du mouvement du dispositif WEC dans la direction du soulèvement, il peut être écrit comme :

$$m\ddot{z}_{WEC}(t) = F_{e_z} + F_{gen_z} - A_{zz}\ddot{z}_{WEC}(t) - A_{zx}\ddot{x}_{WEC}(t) - A_{zR_y}\ddot{R}_{yWEC}(t) - B_{zz}\dot{z}_{WEC} - B_{zx}\dot{x}_{WEC} - B_{zR_y}\dot{R}_{yWEC}(t) \quad (2.3)$$

2. 4 Modélisation de l'onde irrégulière

Les vagues régulières et irrégulières sont modélisées sur la base de la théorie des vagues linéaires dans laquelle nous supposons que les hauteurs des vagues sont plus petites par rapport à la longueur des vagues. On suppose également que le fluide est non visqueux, irrotationnel et incompressible. Les ondes régulières peuvent être représentées en spécifiant

simplement la hauteur et la période des vagues. Les ondes irrégulières par contre, sont construits à partir d'un spectre de fréquence d'onde en utilisant l'addition de plusieurs sinusoïdes choisies dans le spectre. Une représentation schématique d'une onde avec leurs paramètres sont illustrée sur la figure. 2.1[4][5].

La longueur d'onde,

L : est la distance entre deux points de passage par zéro vers le haut et l'élévation de la vague en tout point dans la direction de la houle ($x - \text{axe}$) est représenté par. La hauteur significative des vagues,

H_s : est la distance verticale entre la crête et le creux d'une vague spécifiée. La profondeur de fonctionnement,

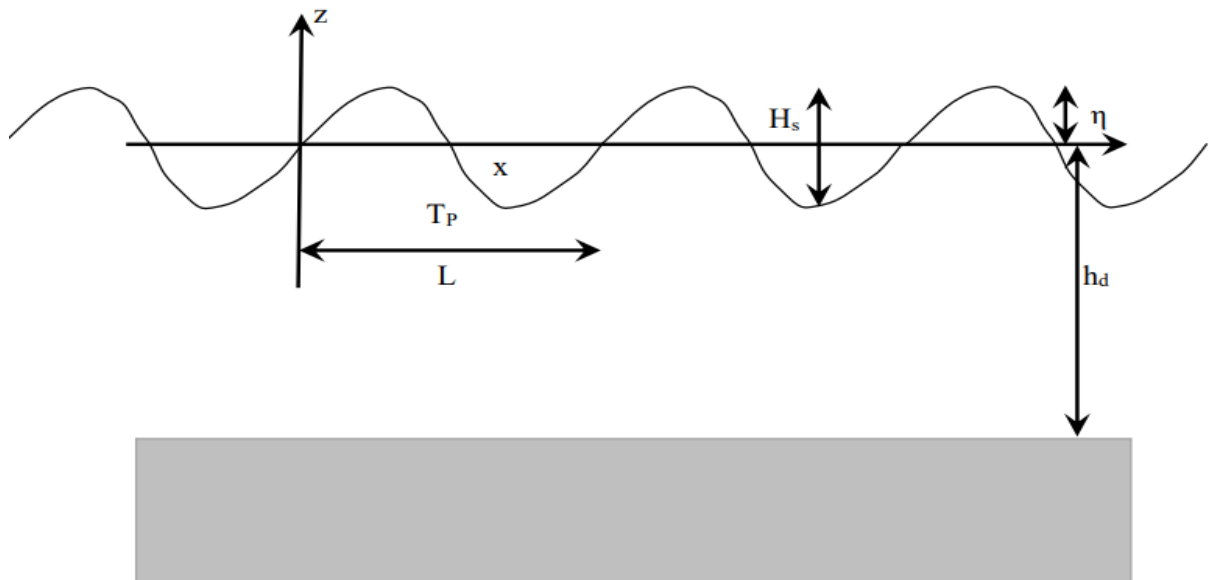


Figure 2.1 Représentation schématique d'une onde régulière

H_d : est une valeur positive spécifiant la distance entre le fond marin et l'origine ou le sommet de l'appareil. La période d'onde,

T_p : est l'espacement entre deux points de passage par zéro.

Ces paramètres seront être utilisé pour développer des profils de vagues de séries chronologiques dans les sections suivantes.

Une série temporelle d'ondes irrégulières est créée par déphasage aléatoire et super imposant plusieurs sinusoïdes de hauteurs et de périodes différentes. La hauteur et la période de chaque sinusoïde constitutive peut être dérivée d'un spectre de fréquences. La vague irrégulière était décrit sur la base du spectre JONSWAP (Joint North Sea Wave Atmosphere Program) qui est

une extension du spectre Pierson-Moskowitz (pour les mers de vent pleinement développées) pour inclure les mers de vent à fetch limité, et décrit donc les mers en développement [3].

Le spectre a été calculé en utilisant la relation suivante :

$$S(\omega) = A_{\gamma} \frac{5}{16} H_s^2 \omega_p^4 \omega^{-5} e^{\left[\frac{5}{4} \frac{\omega}{\omega_p} - 4 \right] \gamma} e^{-0.5 \left[\frac{\omega - \omega_p}{\sigma \omega_p} \right]^2} \quad (2.4)$$

Où :

γ : est un paramètre de forme non dimensionnel et $\gamma=3,3$,

A_{γ} : est un facteur de normalisation et $A_{\gamma} = 1 - 0,287 \ln(\gamma)$,

ω_p : est la fréquence spectrale angulaire et $\omega_p = 2\pi\sigma/T_p$ est un paramètre spectral et $\sigma=0,07$ pour $\omega \leq \omega_p$ et $\sigma = 0,09$ pour $\omega \geq \omega_p$.

La broche d'alimentation qui peut être capturée pour un périphérique WEC avec une longueur, W_w faisant face à la direction d'onde d'une onde irrégulière peut être exprimée comme :

$$P = \frac{\rho g^2 H_s^2 T_e^2 W_{\omega}}{64\pi} \quad (2.5)$$

Où :

ρ : est la densité de l'eau,

g : est la constante gravitationnelle,

H_s : est la hauteur significative des vagues,

T_e : est la période de temps d'onde d'énergie dominante.

2.5 Modélisation de la turbine (Oscillating Water Columns-OWC)

L'OWC est une chambre ayant des parties sous-marines et de surface : dans la première partie, il y a une ouverture pour l'entrée d'eau, et au sommet de la partie supérieure une turbine à air est installée. Lorsque le niveau de l'eau augmente, la pression sur l'air à l'intérieur de la chambre augmente et devient au-dessus de la pression atmosphérique, l'air passe à travers la turbine vers l'extérieur, qui dans ce cas est entraîné en rotation. Après avoir traversé la crête de la vague, la pression à l'intérieur de la chambre commence à baisser et devient inférieure à la pression atmosphérique ; l'air atmosphérique circule à travers la turbine dans la chambre, provoquant la rotation de la turbine. La turbine à air est utilisée, dont le sens de rotation ne dépend pas de la direction du flux d'air (turbine Wells ou turbines à impulsion).

Pour éviter tout dommage lors d'une forte mer agitée, une soupape d'échappement est placée dans la chambre. Un OWC peut être placé dans une structure fixe ou une structure flottante [11].

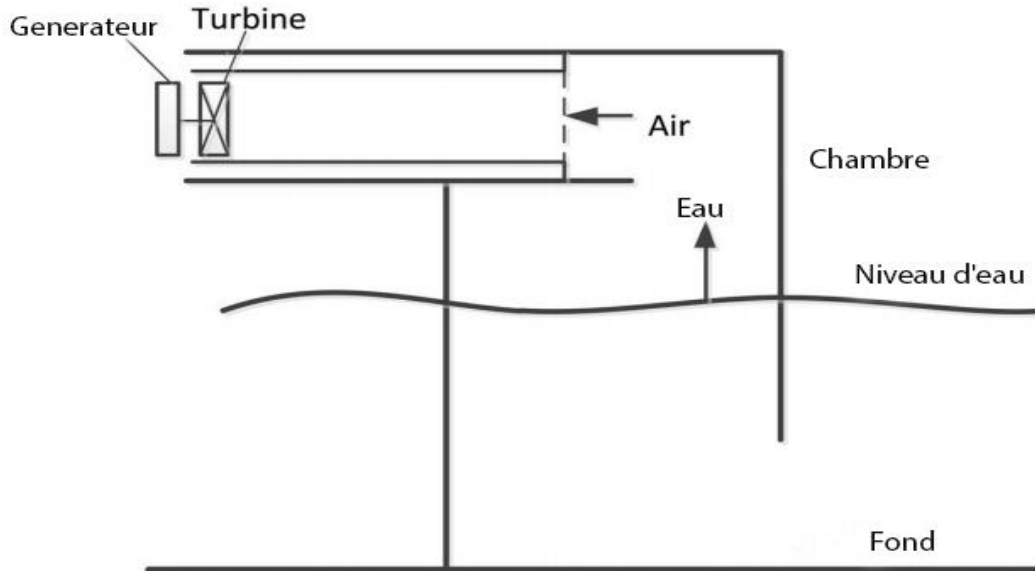


Figure 2.2 structure de OWC

Dans l'OWC, la conversion de l'énergie des vagues en énergie électrique s'effectue en deux étapes : la conversion de l'énergie des vagues en énergie pneumatique dans la chambre OWC et la conversion de cette dernière en énergie mécanique, puis en énergie électrique dans la turbine à air avec un générateur. Dans la littérature, on peut avoir deux approches comme pour l'étude de l'OWC. L'évaluation et la modélisation de la première étape de conversion nécessitent une connaissance détaillée de la conception de la caméra ; par conséquent, dans un certain nombre d'ouvrages, seule la deuxième étape est étudiée ; la valeur d'entrée est la perte de charge dans la turbine dP , en utilisant des valeurs expérimentales ou postulées de cette quantité. Dans d'autres études, des relations approximatives sont utilisées pour estimer la vitesse du flux d'air V_x en fonction des informations sur les paramètres des vagues [11].

Les équations suivantes sont valables pour la turbine Wells :

$$dP = C_a K \left(\frac{1}{\alpha} \right) [V_x^2 + (r\omega_t)^2] \quad (2.6)$$

$$T_t = C_a K_r [V_x^2 + (r\omega_t)^2] \quad (2.7)$$

$$\Phi = \frac{V_x}{r\omega_t} \quad (2.8)$$

$$K = \rho b l n / 2$$

Où :

dP est la chute de pression à travers le rotor (Pa),

C_a est le coefficient de puissance,

α est la section transversale (m^2),

V_x est la vitesse du flux d'air (m/s),

ω_t est la vitesse angulaire de la turbine (rad/s),

Tt est le couple produit par la turbine (Nm),

Ct est le coefficient de couple,

φ est le coefficient d'écoulement,

b est la hauteur de la pale (m),

l est la longueur de corde de la lame (m),

n est le nombre de pales,

r est le rayon moyen,

ρ est la densité de l'air.

2.6 Système électrique

Le système électrique du PCC vise à réguler la puissance fournie au système électrique réseau à tension constante et fréquence de faisceau fixe. Le générateur est alors couplé au réseau électrique public via un convertisseur buck to buck. Le convertisseur buck to buck se compose d'un convertisseur AC-DC et DC-AC étiqueté respectivement N et O et assure l'énergie électrique générée est envoyée au réseau étiqueté R, à tension constante et à fréquence fixe [1].

Les convertisseurs buck to buck contrôlés en courant à l'aide du vecteur spatial modulation de largeur d'impulsion (SVPWM) pour coupler le générateur et le réseau. Sur le générateur côté rotor, un contrôleur de vitesse est utilisé pour contrôler les performances du système à différentes vitesses des vagues. Cela réduit les contraintes au niveau du rotor, tout en conservant un suivi maximal du point de puissance (MPPT) avec variation de vitesse d'onde. L'onduleur côté réseau vise à contrôler la liaison de tension continue à la valeur pré-réglée et le courant injecté au réseau au facteur de puissance unitaire pour atteindre puissance maximale fournie au réseau dans les conditions de fonctionnement souhaitées. Il existe plusieurs technologies de générateurs qui ont été développées pour les énergies renouvelables l'énergie au cours des dernières décennies. Les deux principaux types de générateurs actuellement disponibles dans les systèmes d'énergie houlomotrice sont les générateurs à induction à double alimentation (DFIG) et les Générateurs synchrones à aimants (PMSG) [12][3].

2.7 Modélisation de la GSAP

L'utilisation de la génératrice à aimants est sollicitée car elle ne manifeste pas de phénomènes transitoires remarquables, en outre, elle est plus facile à réaliser et possède un meilleur rendement. Ce type de machines fait partie de celles à champ tournant. De ce fait et suite à la nature tournante du champ, la modélisation vectorielle lui est très appropriée. En l'occurrence toutes les commandes dynamiques d'une génératrice synchrone sont des commandes vectorielles pour cette raison, des hypothèses simplificatrices sont considérées pour sa modélisation [7] :

- Le bobinage statorique possède une distribution des conducteurs de sorte que la répartition du champ magnétique soit sinusoïdale pour chaque phase,
- La régularité de l'entrefer avec une largeur constante,
- Absence de saturation présentant la caractéristique linéaire du circuit magnétique,
- La formation de système triphasé équilibré par les courants.

2.7.1 Modèle vectoriel dans un référentiel fixe

Afin de concorder aux hypothèses ci-dessus, un modèle équivalent de type Behn-Eschenburg est conforme pour la présenter le principe du modèle vectoriel dans un référentiel fixe. En conséquence, chaque phase de la génératrice est représentée par la mise en série d'une résistance R_s , d'une inductance synchrone L_s et d'une force électromotrice. Ce qui donne un schéma spécifique montré dans la figure 2.3 avec φ_{fs} le vecteur flux inducteur [4].

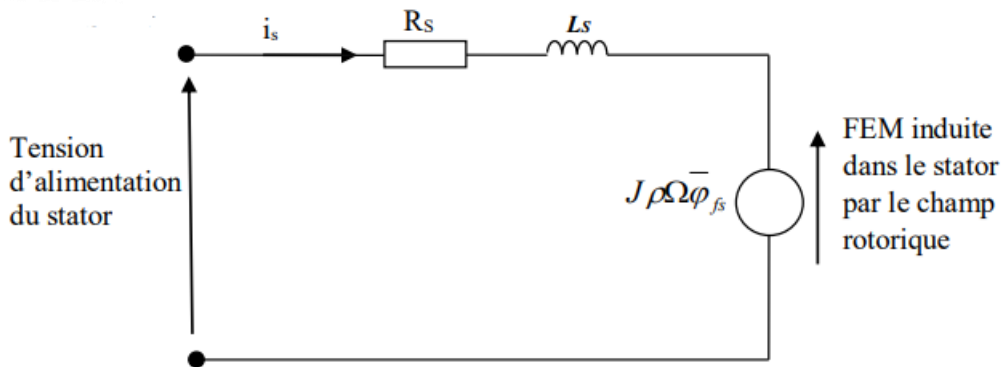


Figure 2.3 schéma d'une phase de la génératrice synchrone à aimant de type Behn-Eschenburg

On définit un vecteur tournant par :

$$\bar{v}_s = R_s \bar{i}_s + L_s \frac{d\bar{i}_s}{dt} + \frac{d\bar{\varphi}_{fs}}{dt} \quad (2.9)$$

Les équations triphasées des trois tensions statoriques donnent l'équation du modèle de base :

$$\bar{v}_s = R_s \bar{i}_s + L_s \frac{d\bar{i}_s}{dt} + \frac{d\bar{\varphi}_{fs}}{dt} \quad (2.10)$$

Où

v_s : vecteur des tensions statoriques et i_s : vecteur des courants statoriques. Le couple électromagnétique est donné par la relation suivante :

$$T_{em} = pI_m g [\overline{i_s \varphi_{fs}}] \quad (2.11)$$

Où :

T_{em} : couple électromagnétique et p : nombre de paires de pôles de la génératrice.

2.7.2 Modèle vectoriel en référentiel tournant

Les lignes de champ magnétique ne sont pas influencées par les aimants de la génératrice synchrone, d'où, l'entrefer doit être constant si ces derniers sont collés. En évidence, pour une machine rapide, il existe une certaine influence des aimants et l'entrefer magnétique n'est plus tout à fait constant. Des équations peuvent être écrites dans un référentiel tournant lié au rotor avec un passage au moyen d'une rotation de vecteurs, Modèle de Park. Ce modèle exprime le passage des variables triphasées aux variables transformées dans le repère (d,q) et vice versa [5]:

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta_G & \cos\left(\theta_G - 2\frac{\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_G + 2\frac{\pi}{3}\right) \\ -\sin\theta_G & -\sin\left(\theta_G - 2\frac{\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_G + 2\frac{\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

$$\begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta_G & -\sin\theta_G \\ \cos\left(\theta_G - 2\frac{\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_G - 2\frac{\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_G + 2\frac{\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_G + 2\frac{\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Le contrôle de la génératrice par le biais du contrôle de son modèle transformé s'effectue en temps réel. Les axes du référentiel (d,q), se mettent en rotation. Le stator se déplace par rapport à ce référentiel et l'axe (d) de ce dernier est orienté suivant la direction du vecteur φ_{fs} . Ainsi les équations (2.10) et (2.11) deviennent :

$$\overline{(v_{sd})} = R_s \overline{(i_{sdq})} + L_s \frac{d\overline{(i_{sdq})}}{dt} + j \frac{d\theta_G}{dt} \overline{(i_{sdq})} + L_s \overline{(i_{sdq})} + \frac{d(\varphi_{fsdq})}{dt} + j \frac{d\theta_G}{dt} (\varphi_{fsdq}) \quad (2.15)$$

$$T_G = pI_m g \left[\overline{(i_s)} \overline{(\varphi_{fsdq})} \right] \quad (2.16)$$

De manière générale, si on projette un vecteur suivant les deux axes (d et q), on obtient :

$$\bar{X} = X_d + jX_q \quad (2.17)$$

Cela permet l'obtention d'un modèle de la génératrice nommé modèle de Park. Ce dernier peut prendre en compte les irrégularités éventuelles de l'entrefer dues au montage des aimants par l'introduction des deux inductances statoriques L_d et L_q de valeurs distinctes. Par choix du référentiel :

$$|\bar{\varphi}_{fs}| = \varphi_{fsd} \text{ car } \varphi_{fsq} = 0 \quad (2.18)$$

De plus, pour une génératrice synchrone à aimants, φ_{fsd} est constant. Le modèle de Park s'écrit :

$$\begin{cases} v_{sd} = R_s i_{sd} + L_d \frac{di_{sd}}{dt} - \frac{d\theta_G}{dt} L_q i_{sq} \\ v_{sq} = R_s i_{sq} + L_q \frac{di_{sq}}{dt} - \frac{d\theta_G}{dt} L_d i_{sd} + \frac{d\theta_G}{dt} \varphi_{sd} \end{cases} \quad (2.19)$$

$$T_G = p\varphi_{fsd}i_{sq} + (L_d - L_q)i_{sd}i_{sq} \quad (2.20)$$

Le produit $p\varphi_{fsd}$ s'appelle aussi constante de couple de la génératrice synchrone. La position mécanique du rotor, θ_{mG} , est en général obtenue à travers un capteur de position électrique, θ_G , ensuite $\theta_G = p\theta_{mG}$. Le même capteur est utilisé pour l'asservissement de la vitesse de rotation de la génératrice. La position du vecteur courant statorique i_s dans le référentiel tournant, qui est également la position du champ tournant statorique par rapport au champ tournant rotorique, s'appelle angle d'autopilotage σ . Pour $\sigma=\pi/2$, la composante i_{sd} est nulle (on ne se sert pas de la composante réluctante du couple électromagnétique). D'ailleurs, du point de vue industriel, cela est la seule valeur intéressante pour σ (entre autres, elle conduit à un couple électromagnétique maximal) ne dépendant pour son contrôle que du courant i_{sq} . La position des vecteurs est fixe dans le référentiel pour le régime établi, ce qui implique des grandeurs transformées constantes. Les composantes sont en mode continue pendant le régime variable. De ce fait, le contrôle du couple de la génératrice se ramène au contrôle d'un courant continu (i_{sq}). Les puissances instantanées (p_s et q_s) s'obtiennent par [4][5] :

$$p_s = v_{sq}i_{sq} \quad \text{et} \quad q_s = -v_{sd}i_{sq} \quad (2.21)$$

On peut donc, exprimer la puissance mécanique convertie par la génératrice par :

$$P_G = T_{em}\Omega \quad (2.22)$$

Pour la simulation du comportement et l'élaboration de la commande, le choix approprié doit être le modèle de Park.

2.8 Modélisation de l'onduleur MLI

2.8.1 Description

Le schéma de la figure 2.4 donne le principe de l'onduleur de tension à MLI alimentant une MSAP :

- l'onduleur est alimenté par une source de tension E supposée parfaite ;
- il est constitué d'interrupteurs statiques (transistors IGBT) T1, ' T1, T2, ' T2, T3 et ' T3 montés respectivement en tête bêche (antiparallèle) avec les diodes de récupération D1, ' D1,

D2 , ' D2 , D3 et ' D3 . 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 [4] :

- 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 $i = a,b,c$

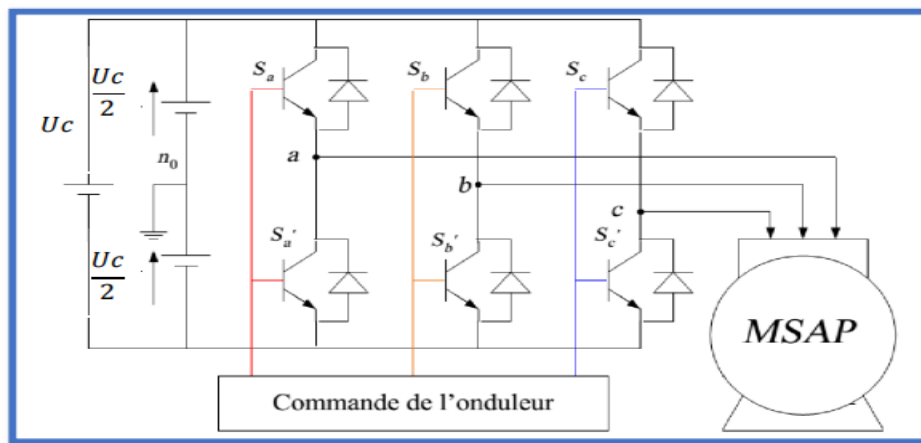


Figure 2.4 Schéma de principe de l'onduleur à MLI

2.8.2 Equations de tensions

Les interrupteurs fermés imposent des tensions entre les bornes de sortie a, b, c et le point 0 n (neutre fictif) de la source de tension continue [3][4]:

$$V_{an0} = \frac{E}{2} \quad \text{Quand } T1 \text{ est fermé (donc } T1' \text{ ouvert)}$$

$$V_{an0} = -\frac{E}{2} \quad \text{Quand } T1' \text{ est fermé (donc } T1 \text{ ouvert)}$$

$$V_{bn0} = \frac{E}{2} \quad \text{Quand } T2 \text{ est fermé (donc } T2' \text{ ouvert)}$$

$$V_{bn0} = -\frac{E}{2} \quad \text{Quand } T2' \text{ est fermé (donc } T2 \text{ ouvert)}$$

$$V_{cn0} = \frac{E}{2} \quad \text{Quand } T3 \text{ est fermé (donc } T3' \text{ ouvert)}$$

$$V_{cn0} = -\frac{E}{2} \quad \text{Quand } T3' \text{ est fermé (donc } T3 \text{ ouvert)}$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} v_{an0} = \frac{E}{2} C_a \\ v_{bn0} = \frac{E}{2} C_b \\ v_{cn0} = \frac{E}{2} C_c \end{cases} \quad (2.23)$$

Les tensions composées aiguillées par l'onduleur sont :

$$\begin{cases} v_{ab} = v_{an0} - v_{bn0} = \frac{E}{2} (C_a - C_b) \\ v_{bc} = v_{bn0} - v_{cn0} = \frac{E}{2} (C_b - C_c) \\ v_{ca} = v_{cn0} - v_{an0} = \frac{E}{2} (C_c - C_a) \end{cases} \quad (2.24)$$

Les tensions aux bornes du rotor s'écrivent :

$$\begin{cases} v_a = \frac{1}{3} (2v_{an0} - v_{bn0} - v_{cn0}) \\ v_b = \frac{1}{3} (2v_{bn0} - v_{an0} - v_{cn0}) \\ v_c = \frac{1}{3} (2v_{cn0} - v_{an0} - v_{bn0}) \end{cases} \quad (2.25)$$

Car le système est équilibré $(v_{an0} + v_{bn0} + v_{cn0}) = 0$

On écrit alors les tensions V_a, V_b, V_c , sous forme matricielle de la manière suivante :

$$[v] = \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \frac{E}{2} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

2.8.3 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 (voir figure 2.5) [4] :

- 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 :

$$X_1(t) = -V_p + 2 \frac{V_p(t)}{T_p} \quad (2.27)$$

$$X_2(t) = -V_p - 2 \frac{V_p(t)}{T_p} \quad (2.28)$$

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 : $V_{ref}(t) = V_s \sin(2\pi ft)$

Sachant que sa pulsation est $\omega = 2\pi f$

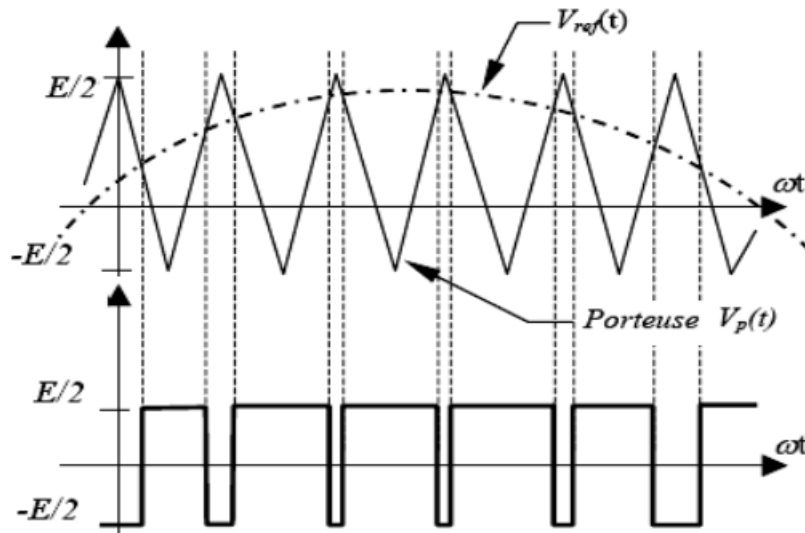


Figure 2.5 MLI sinus triangle

2.9 Modélisation du filtre

2.9.1 Description

Le filtre que nous étudions est donné par la figure 2.4. Il doit être inséré entre le convertisseur MLI1 et le convertisseur MLI2. Il est constitué de :

- d'une inductance L_f en parallèle avec
- une capacité C_f .

Le filtre constitue un quadripôle ayant pour grandeurs d'entrée (délivrées par le redresseur MLI1) :

- la tension U d sensiblement constante ;
- le courant i légèrement ondulé.

Et pour grandeurs de sortie (alimentant l'onduleur MLI2) :

- la tension U ;
- le courant e .

Remarque

La capacité C_f a pour rôle de supprimer les brusques variations de la tension filtrée U_f à l'entrée de MLI2 durant les intervalles de commutation, et absorbe le courant négatif restitué (pendant sa phase de charge) à travers les diodes de récupération. Il fournit aussi de l'énergie réactive à la MSAP [3].

L'inductance L_f permet de rendre sensiblement constant le courant i , alors que le courant i_e absorbé par l'onduleur est fortement ondulé [5].

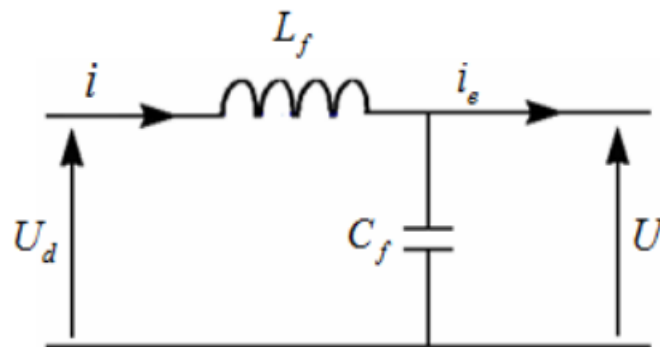


Figure 2.6 Modèle électrique du filtre

2.9.2 Mise en équations

Les équations du filtre sont :

$$\frac{di}{dt} = \frac{(U_d - U)}{L_f} \quad (2.29)$$

$$\frac{dU}{dt} = \frac{(i - i_e)}{C_f} \quad (2.30)$$

Remarque

Afin de faciliter le filtrage des harmoniques d'ordre élevées provoquées par le fonctionnement de l'onduleur, on a choisi le filtre passe-bas dont la fréquence de résonance f_r est loin de la fréquence d'utilisation, afin d'éviter l'interaction entre les fréquences.

La relation qui permet de déterminer les paramètres du filtre est :

$$L_f C_f \omega \gg 1 \text{ cela implique que } C_f \omega = \frac{1}{L_f} \quad (2.31)$$

2.10 Réseau de distribution d'électricité

Pour modéliser le côté alternatif, les équations électriques dynamiques du convertisseur côté réseau en utilisant la transformation de Park dq des puissances sont données par les relations suivantes [5] :

$$v_{dg} = R_g i_{dg} + L_g \frac{di_{dg}}{dt} - L_g \omega_g i_{qg} + e_d \quad (2.32)$$

$$v_{qg} = R_g i_{qg} + L_g \frac{di_{qg}}{dt} + L_g \omega_g i_{dg} + e_q \quad (2.33)$$

Où :

v_{dgrid} : est la tension générée dans l'axe d

v_{qgrid} : est la tension générée dans l'axe q

i_{dgrid} : est le courant généré dans l'axe d

i_{qgrid} : est le courant généré dans l'axe q

e_d : est la tension de réseau transformée de l'axe d

e_q : est la tension de réseau transformée de l'axe q

R_g : est la résistance du réseau

L_g : est l'inductance du réseau

ω_g : est la fréquence angulaire du réseau

La puissance électrique de sortie fournie au réseau est donnée par la relation suivante :

$$P_g = \frac{3p}{2K^2} [(v_{dgen} i_{dgen}) + (v_{qgen} i_{qgen})] \quad (2.34)$$

Le comportement de la liaison CC commune dans l'hypothèse où les convertisseurs ont un rendement de 100 % est représenté en utilisant la puissance injectée et consommée du bus continu :

$$C v_{dc} \frac{dv_{dc}}{dt} = P_{sortie-gen} - P_g \quad (2.35)$$

Où :

v_{dc} : Est la tension du bus continu

c : Est la capacité du bus continu

Pour réduire la relation ci-dessus pour un contrôleur linéaire, l'équation doit être simplifiée.

En supposant que les pertes du filtre sont négligeables et que l'axe d est synchronisé avec la tension du réseau (par Phase Locked Loop Control PLL), l'équation est réduite à :

$$\frac{C}{2} \frac{dv_{dc}^2}{dt} \approx P_{sortie-gen} - P_g \quad (2.36)$$

2.11 Modélisation du bus continu

Le modèle du bus DC est présenté dans figure. 2.7. Afin de contrôler les échanges de puissance autour du bus DC, le DC le couplage doit être modélisé en détail :

$$i_{dc} = i_{red} - i_{ond} \quad (2.37)$$

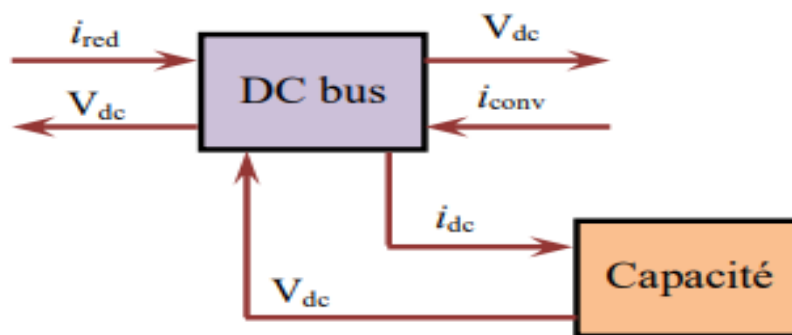


Figure 2.7 Schéma fonctionnel du bus continu.

Où :

i_{red} : est le courant modulé du redresseur

i_{ond} : est le courant modulé de l'onduleur.

Le condensateur de bus continu est un élément avec accumulation d'énergie et sa tension est calculé à partir de l'équation dynamique suivante :

$$C_{dc} = \frac{dV_{dc}}{dt} = i_{dc} \quad (2.38)$$

Où :

C_{dc} : est le condensateur du bus continu et U_{dc} est la tension du bus continu.

Le modèle du tout le système de conversion de l'énergie houlomotrice peut être obtenu en combinant tous les modèles mathématiques développés précédemment, comme illustré à la Figure 2.8 [5].

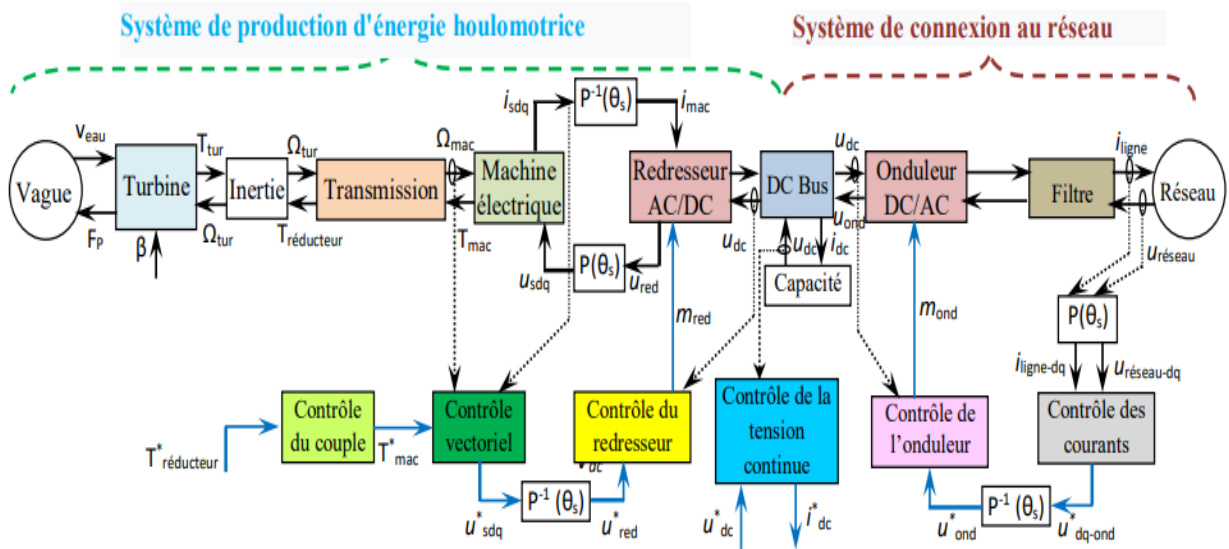


Figure 2.8 Schéma de contrôle de l'ensemble du système de conversion de l'énergie houlomotrice

2.12 Conclusion

Dans ce chapitre, une modélisation complète des éléments de la chaîne de conversion a été présentée, la modélisation des ondes irrégulières, qui nous pouvons les représenter en spécifiant simplement la hauteur et la période des vagues, la modélisation de la turbine OWC, la modélisation d'onduleur et la modélisation de système électrique, qui vise à réguler l'alimentation du réseau électrique à tension constante et à fréquence de réseau fixe.

Nous avons aussi étudié la modélisation de la machine synchrone à aimant permanent, fonctionnement en génératrice. En se basant sur quelques hypothèses simplificatrices, un modèle mathématique a été établi. Nous avons constaté que le modèle de la machine synchrone à aimant permanent est un système à équations différentielles dont les coefficients sont des fonctions périodiques du temps, la transformation de Park nous a permis de simplifier ce modèle.

Le chapitre suivant consacré aux commandes et stratégies de contrôle de la chaîne de conversion houlomotrice et a simuler le modèle obtenu au chapitre deux.



ETUDE ET SIMULATION DE LA CHAINE DE CONVERSION HOULOMOTRICE

3.1 Introduction

La pollution de l'environnement et la crise énergétique sont les deux problèmes les plus préoccupants dans le monde. Pour résoudre ces problèmes, les énergies renouvelables ont été développées pour remplacer une partie de l'approvisionnement énergétique. De nombreux efforts ont été faits dans les domaines de l'énergie éolienne, solaire, houlomotrice et marémotrice puissance, etc. Avec la caractéristique de la densité d'énergie la plus élevée, l'énergie des vagues suscite de plus en plus d'intérêts ces derniers temps. La ressource houlomotrice est importante et la ressource totale autour du monde est de 10 TW en haute mer, ce qui est comparable à la consommation électrique totale mondiale [9].

Dans le développement de la conversion de l'énergie des vagues (WEC) techniques, différents types de dispositifs WEC ont été proposés tels que AWS, OWC, Pelamis, Wave Dragon, Mighty Whale, etc. L'un des nombreux dispositifs qui ont été suggérés pour absorber l'énergie des vagues océaniques est le dispositif OWC. Dans sa forme la plus simple, il s'agit d'un tube vertical partiellement immergé. Une pression oscillante à l'extrémité inférieure ouverte due au passage d'une onde fait osciller la colonne d'eau dans le tube et comprime l'air à l'extrémité supérieure en le forçant à travers une vanne reliée à une petite turbine. Cette idée a été développée avec succès par Masuda au Japon pour être utilisée comme bouées de navigation auto-alimentées [3][1].

L'intérêt accordé à la technologie OWC a donné lieu à un certain nombre de publications orientées vers son contrôle et rassemblées dans un certain nombre de publications de revues [1]. Les sous-sections suivantes présentent une collection des stratégies de contrôle de la génératrice asynchrone à double alimentation pour assurer l'optimisation de la production d'énergie dans les systèmes OWC avec trois approches principales [8] :

- Maximiser la puissance captée entre les vagues et la chaîne de conversion marémotrice.
- Optimiser la production d'électricité depuis l'énergie captée jusqu'à la connexion au réseau via les convertisseurs statiques de l'électronique de puissance.
- Conditionner la puissance pour une meilleure intégration au réseau.

L'objectif de ce chapitre est de donner un aperçu général sur la technologie d'une centrale houlomotrice basée sur GSAP dans le but d'expliquer en quoi consiste l'architecture et de présenter sa structure de contrôle. Ce chapitre traitera des généralités sur les stratégies de contrôles utilisées dans la chaîne de conversion houlomotrice. Dans une deuxième étape, la stratégie de contrôle sera discutée et synthétisée. Enfin, pour valider la technique de contrôle proposée et d'analyser le comportement du système étudié, des essais de simulations seront effectués dans des différentes conditions de fonctionnement.

3.2 Contrôle des générateurs à base d'un onduleur de puissance

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 3.1) [4].

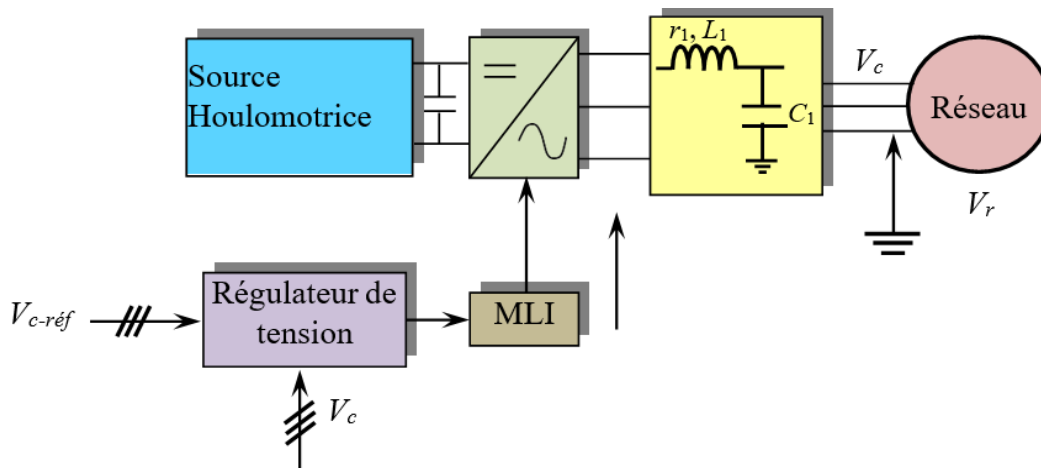


Figure 3.1 Structure de contrôle d'un générateur à base d'un onduleur de tension contrôlé en mode Vf

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 3.2) [4]. La source primaire est responsable de répondre à cette demande de puissance de façon à maintenir constante la tension de bus.

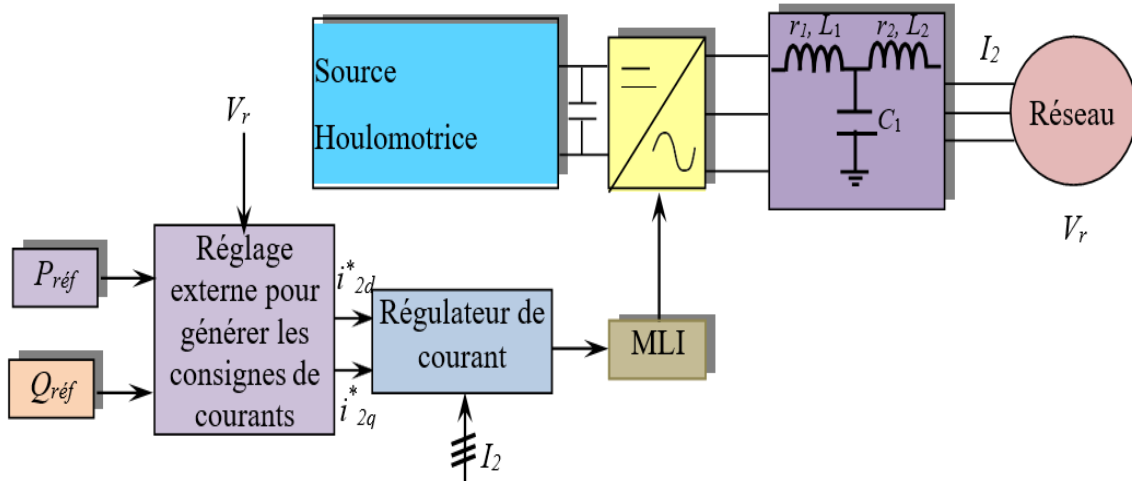


Figure 3.2 Structure de contrôle d'un générateur programmable à base d'un onduleur de tension contrôlé en mode PQ .

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 3.3) [4].

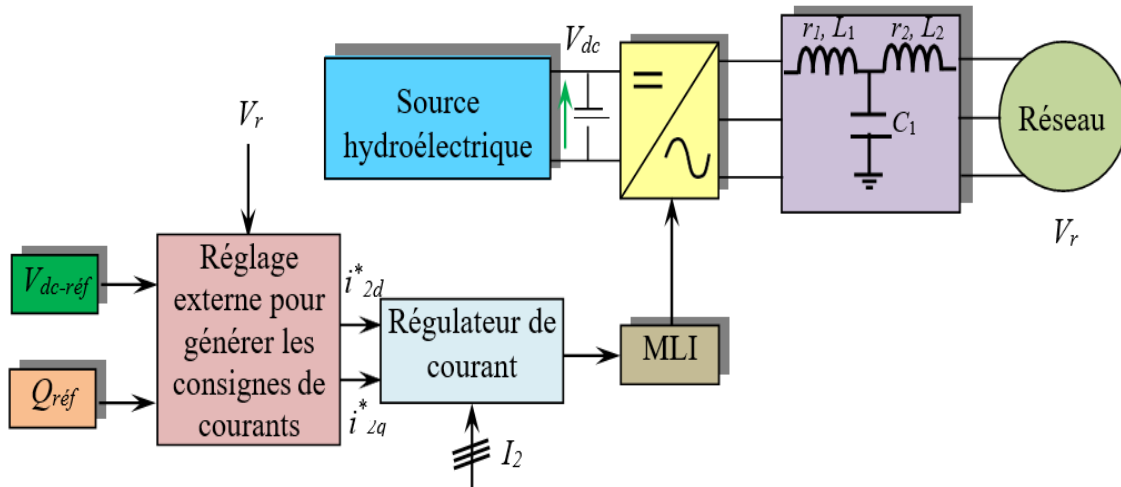


Figure 3.3 Structure de contrôle d'un générateur non programmable à base d'un onduleur de tension contrôlé en mode PQ .

La Figure 3.4 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 [4]:

$$\begin{cases} V_{ca}^* = E \sin(\theta_v) \\ V_{cb}^* = E \sin(\theta_v - \frac{2\pi}{3}) \\ V_{cc}^* = E \sin(\theta_v - \frac{4\pi}{3}) \end{cases} \quad (3.1)$$

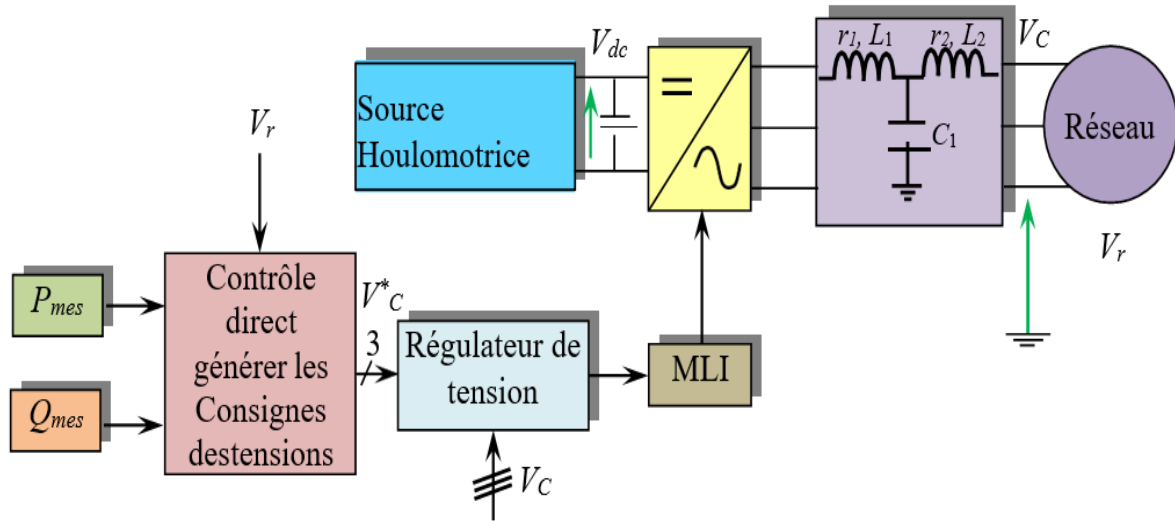


Figure 3.4 Structure générale de contrôle d'un générateur à base d'un onduleur de puissance contrôlé en tension.

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

$$\omega = \omega_v - K_p(P - P_i) \quad (3.2)$$

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 :

$$\Delta\theta_v = \{\Delta\omega dt \quad (3.3)$$

En conséquence :

$$\Delta\theta = K_p \varepsilon = -K_p(P_{mes} - P_i) \quad (3.4)$$

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 :

$$\varepsilon = P_n \quad (3.5)$$

Donc, K_p sera défini comme :

$$K_p = \frac{\Delta\omega}{P_n} = \frac{2\pi\Delta f}{P_n} \quad (3.6)$$

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.

3.3 Raccordement des générateurs houlomotrices au réseau

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 [4].

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.

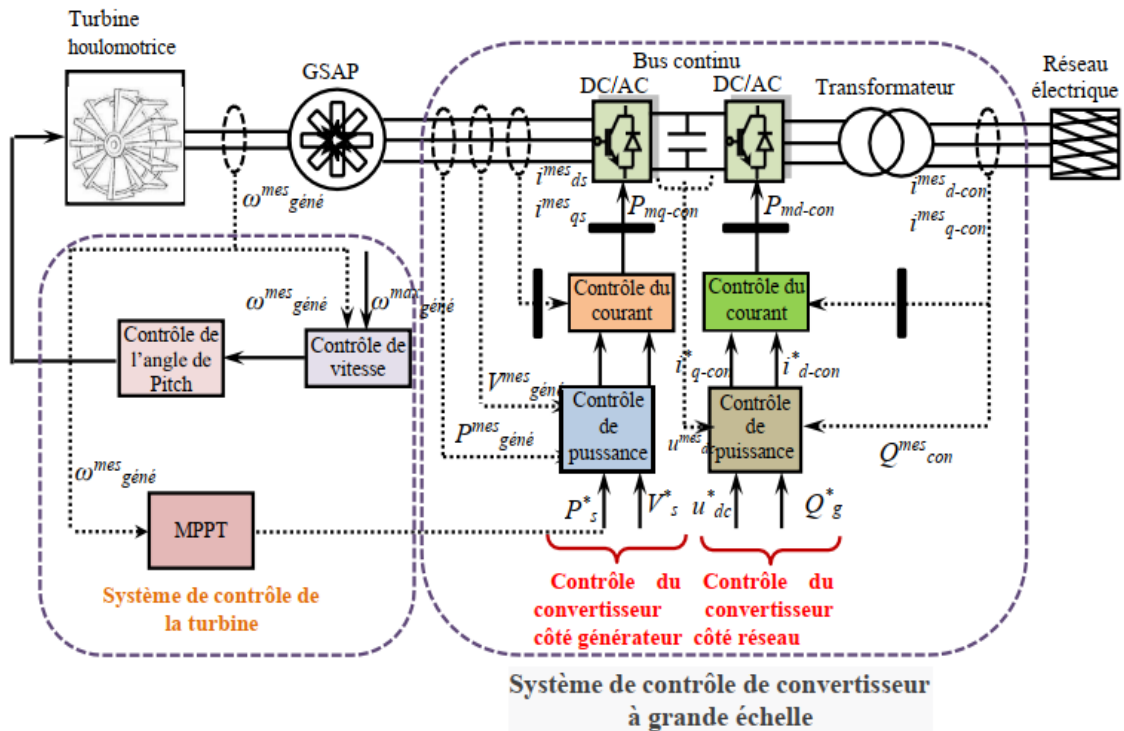


Figure 3.5 Système de contrôle de la chaîne globale

Le schéma fonctionnel du système de contrôle est illustré par la Figure 3.5. 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 [4].

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 [8].

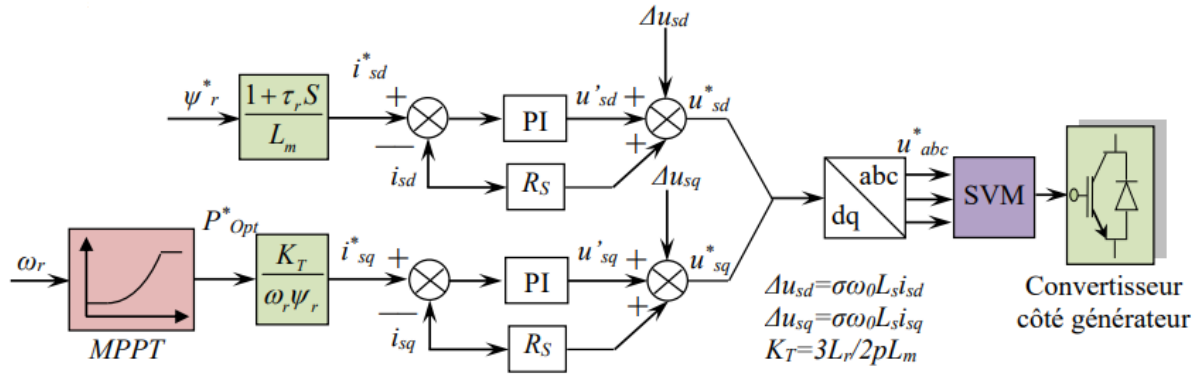


Figure 3.6 Schéma de principe de la commande du convertisseur côté générateur

3.4 Système de contrôle du convertisseur cote générateur

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 GSAP largement utilisé.

3.4.1 Système de contrôle du convertisseur latéral GSAP

Pour le convertisseur côté générateur, trois différentes stratégies de commande peuvent être utilisées, comme indiqué dans la figure 3.7 :

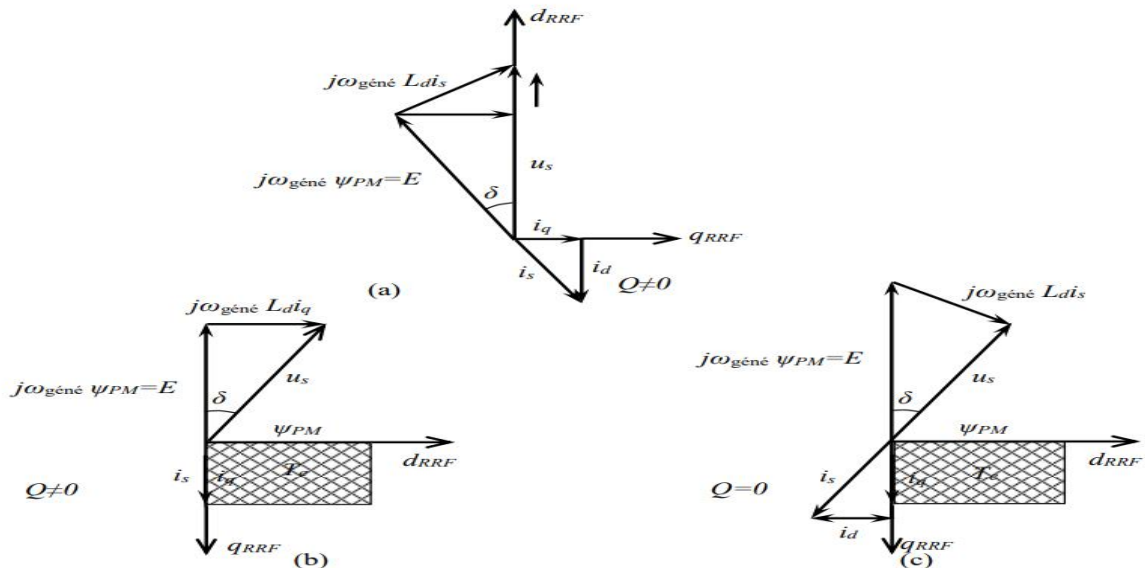


Figure 3.7 Diagramme vectoriel pour trois stratégies de contrôle du convertisseur côté générateur : a) tension statorique constante, (b) couple maximal (c) facteur de puissance unitaire.

3.4.1.1 Contrôle du couple maximal

Sous le RRF, l'équation du couple électromagnétique du GSAP est le suivant :

$$T_{em} = \frac{3}{2} n \cdot I_m [\bar{\Psi}_s^* \bar{i}_s] = \frac{3}{2} n [\Psi_{sd} i_{sq} - \Psi_{sq} i_{sd}] = \frac{3}{2} n [(L_d - L_q) i_{sd} i_{sq} - \Psi_{PM} i_{sd}] = \frac{3}{2} n [\Psi_{PM} i_{sq}] \quad (3.7)$$

Comme indiqué en équation (3.7), 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 [4].

3.4.1.2 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 [4].

3.4.1.3 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, qui est déterminée par les composantes des axes d et q du courant du stator respectivement :

$$\begin{cases} P_s = \frac{3}{2} u_{sd} i_{sd} \\ Q_s = -\frac{3}{2} u_{sd} i_{sq} \end{cases} \quad (3.8)$$

La puissance active du générateur dépend de la composante de l'axe d du courant du stator. La tension du stator peut être maintenue à la valeur nominale grâce au contrôle de la composante de l'axe q. L'avantage d'une stratégie de contrôle de tension constante du stator est que le générateur et le convertisseur peut continuer à fonctionner à la tension nominale, et le convertisseur a un rapport constant de u_{dc}/u_{ac} , éliminant la surtension et la saturation du

convertisseur à une vitesse élevée. Cependant, le mode de contrôle augmente la capacité nominale du convertisseur.

En résumé, le contrôle de tension constante du stator s'est avéré être le meilleur des trois stratégies de contrôle. La commande vectorielle de courant du stator avec orientation de la tension du stator peut réaliser le découplage entre la puissance active et réactive d'une GSAP, et est généralement utilisé pour maintenir la tension statorique de la GSAP à la valeur nominale et la puissance active à la valeur de référence ; c'est-à-dire pour atteindre le MPPT du générateur.

Avec direction de l'axe d du cadre de référence à rotation synchrone comme tension du stator direction vectorielle et rotation de l'axe q dans le sens inverse des aiguilles d'une montre de 90 le long de la direction de l'axe d, nous obtiendrons $u_{sd} = u_s$ et $u_{sq} = 0$. Comme le rotor GSAP est symétrique, on suppose que les axes d et q ont la même réactance inductive :

$L_d = L_q = L$. Dans cette hypothèse, les équations de liaison de tension et de flux du stator pour la GSAP peuvent être simplifiées comme suit [4] :

$$\begin{cases} u_{sd} = r_s i_{sd} + \frac{d\Psi_d}{dt} - \omega_e \Psi_q = u_s \\ u_{sq} = r_s i_{sq} \frac{d\Psi_q}{dt} + \omega_e \Psi_d = 0 \end{cases} \quad (3.9)$$

$$\begin{cases} \Psi_{sd} = L i_{sd} + \Psi_{PM} = 0 \\ \Psi_{sq} = L i_{sq} = -\frac{u_s}{\omega} \end{cases} \quad (3.10)$$

Les équations (3.9) et (3.10) montrent :

$$\begin{cases} u_{sd} = r_s i_{sd} + L \frac{di_{sd}}{dt} - \omega_e L i_{sq} \\ u_{sq} = r_s i_{sq} \frac{di_{sq}}{dt} + \omega_e (L i_{sq} + \Psi_{PM}) \end{cases} \quad (3.11)$$

La puissance active et réactive de la GSAP peut être simplifiée comme :

$$\begin{cases} P_s = \frac{3}{2} u_s i_{sd} \\ Q_s = -\frac{3}{2} u_s i_{sq} \end{cases} \quad (3.12)$$

Par conséquent, les courants actifs et réactifs sont complètement découplés dans le SVRF, et les vecteurs de tension de commande correspondants sont couplés. Deux nouvelles entrées peuvent être définies comme suit :

$$\begin{cases} u'_{sd} = u_{sd} + \omega_e L i_{sq} \\ u'_{sq} = u_{sq} - \omega_e L i_{sd} \end{cases} \quad (3.13)$$

En remplaçant (3.11) en (3.13), nous pouvons obtenir :

$$\begin{cases} u'_{sd} = r_s i_{sd} + L \frac{di_{sd}}{dt} \\ u'_{sq} = r_s i_{sq} + L \frac{di_{sq}}{dt} + \varphi_e \Psi_{PM} \end{cases} \quad (3.14)$$

À partir de là, une commande découplée du courant peut être obtenue grâce à une compensation par anticipation ; c'est-à-dire que les entrées anticipées $\omega_e Li_{sq}$ et $-\omega_e Li_{sd}$ sont ajoutées aux axes d et q contrôleurs de courant. Pour le convertisseur PWM, la relation entre les tensions AC et DC peut être exprimée comme suit :

$$\begin{cases} u_{sd} = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} p_{md} U_{dc} \\ u_{sq} = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} p_{mq} U_{dc} \end{cases} \quad (3.15)$$

Où : p_{md} et p_{mq} sont les composantes des axes d et q du facteur de modulation du convertisseur. En tant que tel, le découplage de la puissance active et réactive du générateur peut être réalisé grâce au contrôle du facteur de modulation du convertisseur.

Le schéma de principe du système de commande du convertisseur côté générateur est illustré dans le graphique 3.8. Il vise à modifier la puissance active envoyée au réseau depuis la GSAP selon la courbe de puissance optimale et maintenir la tension statorique à sa valeur de référence. Le système de commande du convertisseur côté générateur est divisé en deux boucles de contrôle, un contrôleur interne et de contrôleur externe. Le contrôleur de boucle interne est utilisé pour contrôler les composantes des axes d et q du courant du convertisseur côté générateur, le contrôleur de la boucle extérieure contrôle l'entrée de puissance active vers le convertisseur à partir du générateur et la tension statorique de la GSAP. Les valeurs de référence des composants actuels sont déterminées par le contrôleur de puissance active et de tension de la boucle externe, la valeur de référence de la puissance active dépend des caractéristiques MPPT, dans le but de faire fonctionner le générateur à tout moment à la vitesse de fonctionnement optimale - courbe de puissance, garantissant optimale $C_p(\lambda)$. La valeur de référence de la tension statorique est généralement réglée à sa valeur nominale [4].

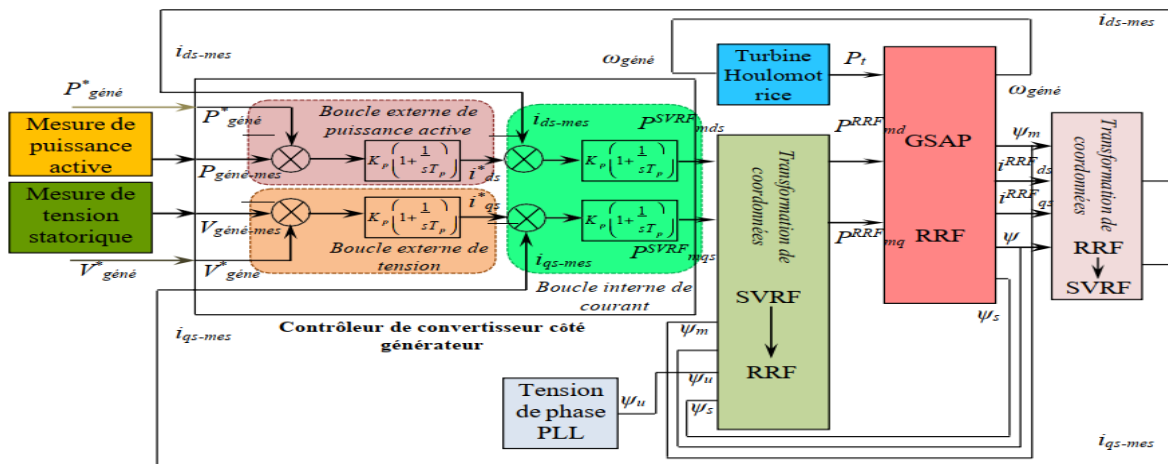


Figure 3.8 Schéma fonctionnel du système de contrôle du convertisseur côté générateur.

3.4.2 Système de contrôle du convertisseur côté réseau

Le convertisseur côté réseau est contrôlé à l'aide d'un contrôle vectoriel orienté de tension pour obtenir une commande découplée de la puissance active et réactive entre le convertisseur côté réseau et le réseau électrique. Il est principalement utilisé pour réguler la tension du bus continu et la puissance réactive entre le générateur et le réseau. Ses objectifs de contrôle sont :

- Maintenir la tension continue constante [4] ;
- Maintenir la puissance réactive échangée entre le convertisseur côté réseau et le réseau à la valeur de référence.

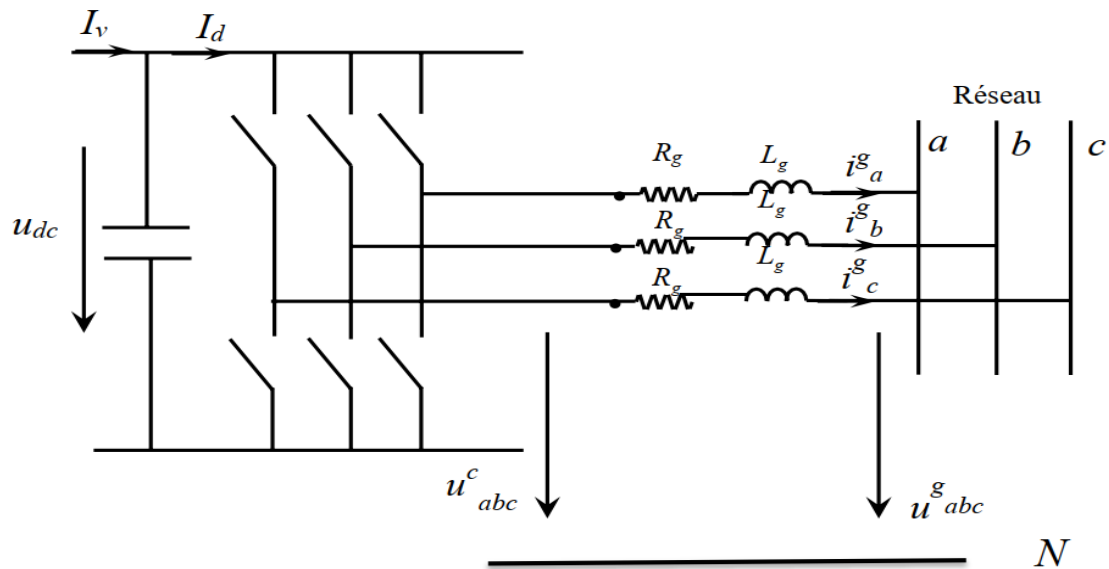


Figure 3.9 Schéma de structure du convertisseur de source de tension PWM côté réseau.

La figure 3.9 montre :

$$\begin{bmatrix} u_{ga} \\ u_{gb} \\ u_{gc} \end{bmatrix} = R_g \begin{bmatrix} i_{ga} \\ i_{gb} \\ i_{gc} \end{bmatrix} + L_g \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ga} \\ i_{gb} \\ i_{gc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{ca} \\ u_{cb} \\ u_{cc} \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

Où :

u_{gabc} : la tension du réseau triphasé (en kV) ;

u_{cabc} : la tension du convertisseur triphasé côté réseau (en kV) ;

i_{gabc} : les courants du convertisseur triphasé côté réseau (en kA) ;

R_g et L_g : la résistance série (Ω) et l'inductance (H) du convertisseur côté réseau ;

I_d et I_v : les courants continus (en kA) du côté réseau et du côté générateur ;

C : le circuit intermédiaire.

Grâce à une transformation de Park de l'équation (3.16), nous pouvons obtenir l'équation de tension dans le repère d-q à rotation synchrone :



$$\begin{cases} u_{gd} = R_g i_{gd} + L_g \frac{di_{gd}}{dt} - \omega_0 L_g i_{gq} + u_{cd} \\ u_{gq} = R_g i_{gq} + L_g \frac{di_{gq}}{dt} + \omega_0 L_g i_{gd} + u_{cq} \end{cases} \quad (3.17)$$

Où :

i_{gd}, i_{gq}, u_{gd} et u_{gq} : les composantes des axes d et q du courant et de la tension du réseau,

u_{cd} et u_{cq} : les composantes des axes d et q de la tension du convertisseur au côté réseau.

La puissance active P_g et la puissance réactive Q_g échangées entre le convertisseur côté réseau et le réseau peuvent être exprimées comme suit :

$$\begin{cases} P_g = \frac{3}{2} (u_{gd} i_{gd} + u_{gq} i_{gq}) \\ Q_g = \frac{3}{2} (u_{gq} i_{gd} - u_{gd} i_{gq}) \end{cases} \quad (3.18)$$

Dans cette section, le contrôle vectoriel orienté de tension du réseau est adopté avec la direction de l'axe d comme direction de tension de réseau et l'axe q tournant de 90° le long de l'axe d. Dans ce cas, la composante de l'axe q du vecteur de la tension du réseau $u_{gq} = 0$, et :

$$\begin{cases} P_g = \frac{3}{2} u_{gd} i_{gd} \\ Q_g = -\frac{3}{2} u_{gq} i_{gq} \end{cases} \quad (3.19)$$

Si la tension du réseau est considérée comme constante, u_{gd} est également constant. Puis la puissance active P_g et la puissance réactive Q_g échangées entre le convertisseur côté réseau et le réseau sont contrôlées respectivement par i_{gd} et i_{gq} .

La perte de commutation est une perte majeure du convertisseur et peut être équivalente à une résistance entre les pôles de la liaison continue. Comme la perte est relativement faible, elle peut être ignorée et il en va de même pour la perte de la résistance série du convertisseur. Être un convertisseur idéal, et l'équation suivante peut être dérivée :

$$U_{dc} I_{dc} + \sqrt{3} \operatorname{Re}(U_{dc} I_{dc}^*) = 0 \quad (3.20)$$

Autrement dit :
$$U_{dc} I_{dc} = \sqrt{3} u_{gd} i_{gd} = P_g \quad (3.21)$$

La relation entre les tensions AC et DC du convertisseur PWM est réécrite comme suit :

$$\begin{cases} u_{gd} = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} p_{md} U_{dc} \\ u_{gq} = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} p_{mq} U_{dc} \end{cases} \quad (3.22)$$

Où p_{md} et p_{mq} sont les facteurs de modulation PWM du convertisseur côté réseau :

$$I_d = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} p_{md} i_{gd} \quad (3.23)$$

Pour le condensateur C de la boucle continue, la formule suivante tient :

$$C \frac{dU_{dc}}{dt} = I_d - I_v \quad (3.24)$$

Nous pouvons obtenir la relation entre la tension continue U_{dc} et la composante du courant i_{gd} du réseau actif comme :

$$C \frac{dU_{dc}}{dt} = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{3}} p_{md} i_{gd} - I_v \quad (3.25)$$

Par une transformée de Laplace de l'équation ci-dessus avec I_v comme variable de perturbation, nous pouvons obtenir la fonction de transfert avec la tension continue U_{dc} comme sortie et le composant actif du courant i_{gd} du réseau comme entrée :

$$\frac{U_{dc}(s)}{i_{gd}(s)} = \frac{3p_{md}}{2\sqrt{2}C_s} \quad (3.26)$$

L'équation 3.26 montre que la tension du circuit intermédiaire U_{dc} est contrôlée par i_{gd} . En tant que convertisseur est finalement contrôlé par la tension, il est nécessaire d'établir la relation entre la tension de l'onduleur u_{cabd} et le courant i_{gd}/i_{gq} .

Dans (3.27), nous supposons que :

$$\begin{cases} u'_{gd} = R_g i_{gd} + L_g \frac{di_{gd}}{dt} \\ u'_{gq} = R_g i_{gq} + L_g \frac{di_{gq}}{dt} \end{cases} \quad (3.27)$$

L'équation (3.17) peut être transformée en :

$$\begin{cases} u_{cd} = u_{gd} - u'_{gd} + \omega_e L_g i_{gq} \\ u_{cq} = u_{gq} - u'_{gq} - \omega_e L_g i_{gd} \end{cases} \quad (3.28)$$

Grâce à la transformation de Laplace de l'équation (3.28), nous pouvons obtenir la fonction de transformation avec u'_{gq} comme entrée et le courant de réseau i_g comme sortie :

$$\frac{di_{gd}(s)}{u'_{gd}(s)} = \frac{di_{gq}(s)}{u'_{gq}(s)} = \frac{1}{L_g s + R_g} \quad (3.29)$$

Pour établir une relation entre le courant du réseau i_g et la tension du convertisseur u_{cabc} , les liens d'anticipation $\omega_e L_g i_{gq}$ et $-\omega_e L_g i_{gd}$ doivent être introduits dans le système de contrôle.

Le convertisseur côté réseau vise à maintenir la tension du circuit intermédiaire à la valeur constante prédéfinie et pour s'assurer que la puissance réactive est la valeur de référence prééglée selon l'exigence du HPP. Afin de profiter pleinement de la capacité de contrôle du convertisseur et générer autant de puissance active que possible, l'échange de puissance

réactive entre le convertisseur côté réseau et le réseau est mis à 0. Cependant, sous certaines conditions de fonctionnement, si le réseau a besoin du HPP pour fournir un support de puissance réactive, la valeur de référence de la puissance réactive peut être fixée pour répondre aux besoins du réseau [4][5].

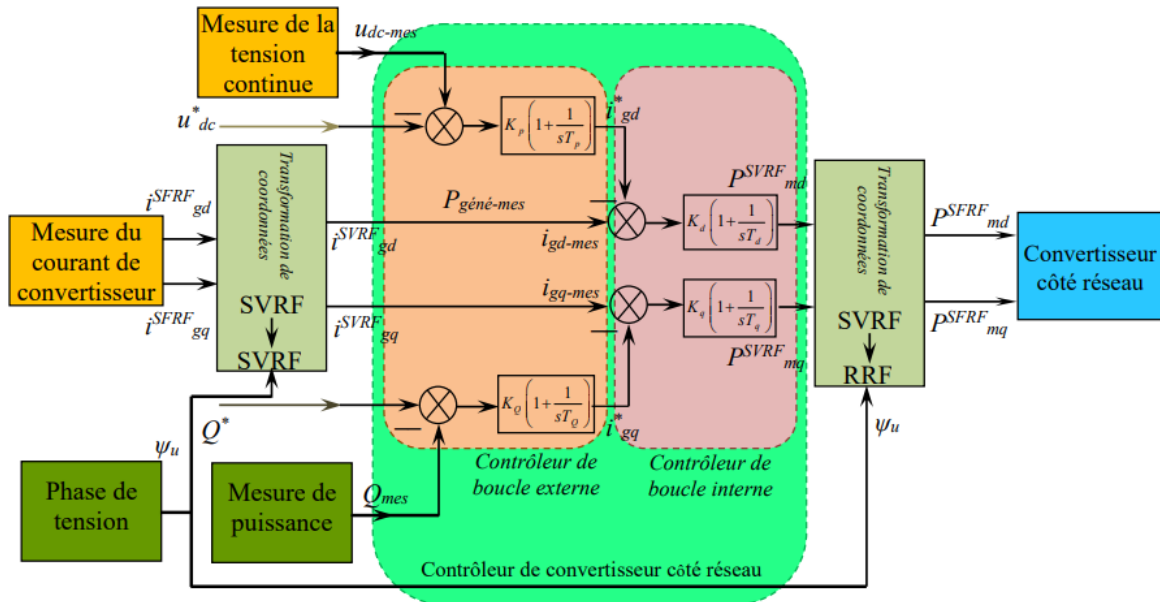


Figure 3.10 Schéma fonctionnel du système de contrôle du convertisseur côté réseau

La figure 3.10 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 ;

6-Contrôleur de convertisseur côté réseau.

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 définissent 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 [4][5].

3.5 Conception et contrôle du convertisseur coté réseau (CCR)

Dans cette section, la conception et le contrôle de CCR sont discutés en ce qui concerne la conception de composants passifs (condensateurs de liaison continue et le filtre d'harmonique côté réseau), la détermination de l'amplitude de la tension de référence du bus continu et l'orientation de la tension du réseau (synchronisation du réseau) [4].

3.5.1 Conception des éléments passifs

Le convertisseur côté réseau a besoin de composants passifs sur les côtés continu et alternatif pour effectuer des fonctions de stockage et de filtrage. Un condensateur est utilisé comme composant passif continu et sa valeur est calculée selon l'expression suivante :

$$C_{dc} = \frac{T_r \Delta P_{dc}}{2V_{dc} \Delta V_{dc}} \quad (3.30)$$

Où :

C_{dc} : La capacité du condensateur de liaison continue ;

T_r : Le retard de commande introduit en raison du filtrage de la tension du bus continu et du contrôle du courant alternatif ;

ΔP_{dc} : La variation maximale admissible de la puissance continue ;

V_{dc} : La tension nominale du bus continu ;

ΔV_{dc} : L'ondulation de tension du bus continu admissible.

Les variables $T_r, \Delta P_{dc}, V_{dc}$ et ΔV_{dc} , ainsi que la réponse dynamique, la taille et le coût, sont utilisés comme compromis pour concevoir la valeur du condensateur de liaison continu. Les composants passifs AC ne stockent qu'une fraction ($\approx 5\%$) de l'énergie totale stockée du système. Le filtre d'harmonique côté alternatif peut être réalisé par un filtre inductif (L) ou inductif-capacitif-inductif (LCL). Comparé au filtre L, le filtre LCL offre une excellente qualité de courant de réseau. Cependant, ce filtre implique le problème critique de la résonance lors du changement d'étape dans les conditions de fonctionnement [1][4].

3.5.2. Détermination de la tension de référence du bus continu

Le VSI connecté au réseau fonctionne avec un indice de modulation m_a compris entre zéro et un. Pour garantir le bon fonctionnement du VSI, la tension du bus continu V_{dc} doit être supérieure à la tension crête ligne à ligne du réseau V_{gL-L} . La tension de référence du bus continu V_{dc}^* est sélectionnée en fonction de l'indice de modulation et de la tension de phase efficace du réseau V_g , comme illustré ci-dessous :

$$V_{dc}^* = \frac{\sqrt{2}V_{gL-L}}{m_a} = \frac{\sqrt{6}V_g}{m_a}, \quad 0 < m_a < 1 \quad (3.31)$$

La tension de phase efficace V_g du réseau est égale à la valeur efficace de la composante de fréquence fondamentale de la tension de phase du VSI. La sélection des V_{dc}^* appropriés doit tenir compte des variations de tension et des transitoires du réseau pendant les conditions de fonctionnement dynamiques. Une valeur d'indice de modulation de 0,8 est raisonnable pour permettre une marge de réglage de 20% pendant les transitoires. Par conséquent, la V_{dc}^* est définie en termes de tension de phase du réseau comme suit :

$$V_{dc}^* = \frac{\sqrt{6}V_g}{m_a} = \frac{\sqrt{6}V_g}{0.8} = 3.062V_g \quad (3.32)$$

Le schéma de contrôle du VSI doit garantir que la tension V_{dc} est maintenue à sa valeur de référence dans toutes les conditions de fonctionnement. Le contrôle de la tension du bus continu est généralement réalisé par un contrôleur PI dans la boucle de contrôle externe.

3.6 Résultats de simulation et interprétations

L'ensemble du périphérique WEC décrit au chapitre 2 a été simulé dans MATLAB/Simulink. Le comportement du périphérique WEC était simulé à l'aide de séries chronologiques d'ondes régulières [5]. 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 centrale houlomotrice basée sur une GSAP avec boucle de courant, puissance active et réactive et tension continue à l'aide de contrôleurs non linéaire [4].

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 [5].

Nous avons commencé la simulation avec l'onde sinusoïdale avec les 15 premières minutes, après avoir tourné l'interrupteur pour l'onde d'irrigation jusqu'à 40 min. nous sommes revenus en première position.

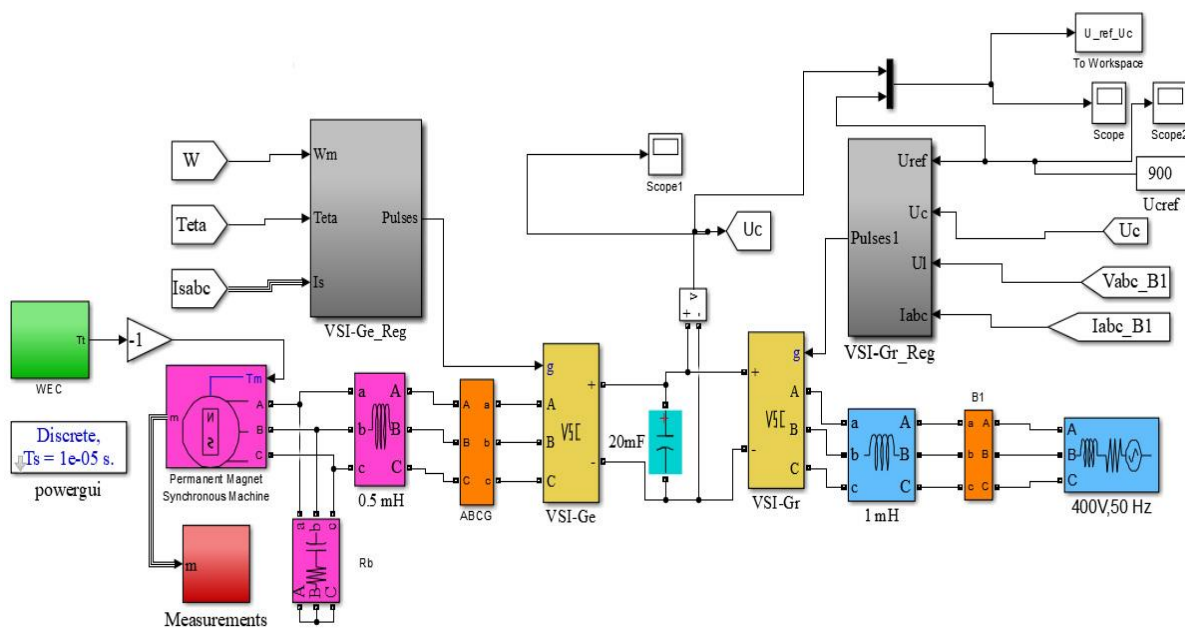


Figure 3.11 Modèle Simulink du système étudié

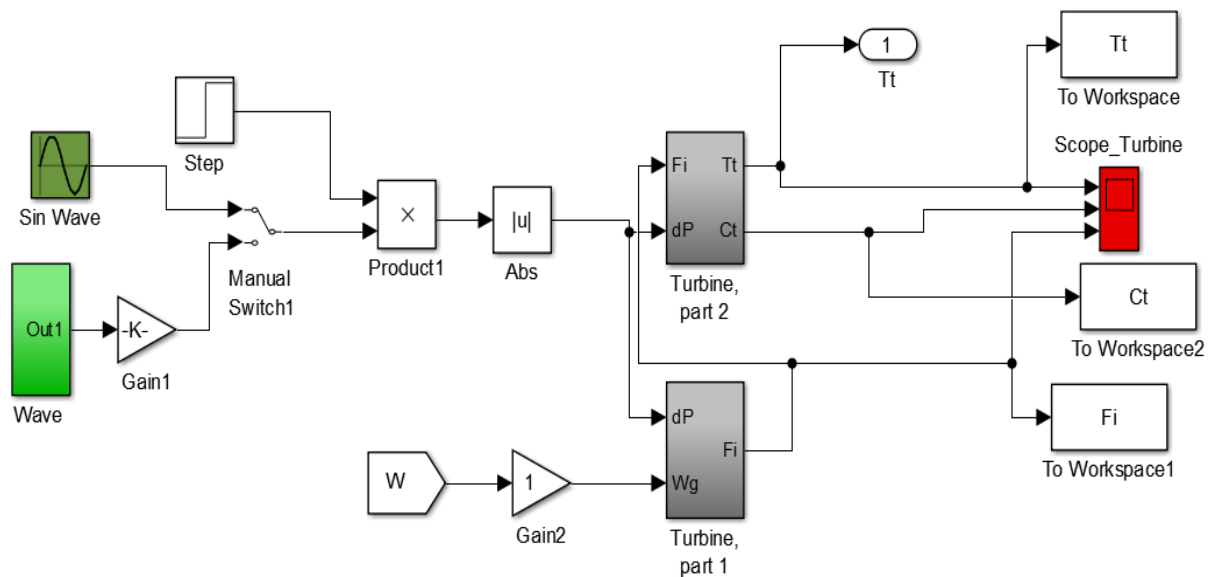


Figure 3.12 La partie avant d'onde du modèle Simulink. Le transfert d'énergie du front d'onde vers la turbine et le générateur

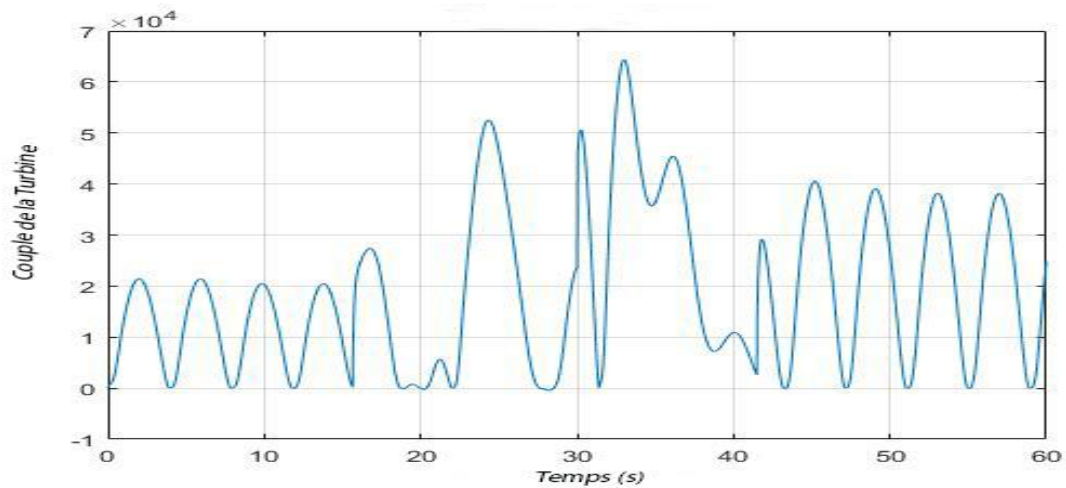


Figure 3.13 Couple de la Turbine T_t

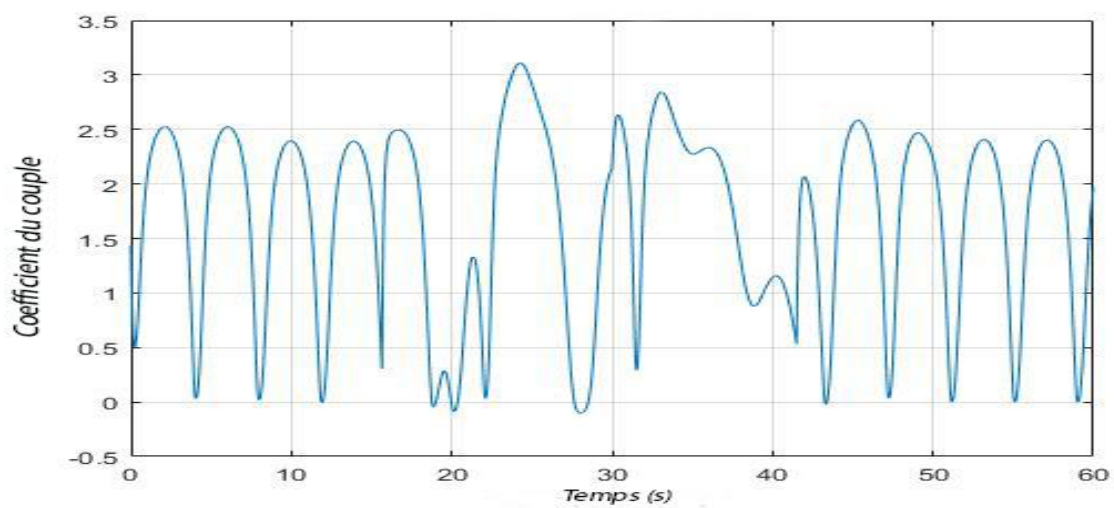


Figure 3.14 Coefficient du couple C_t

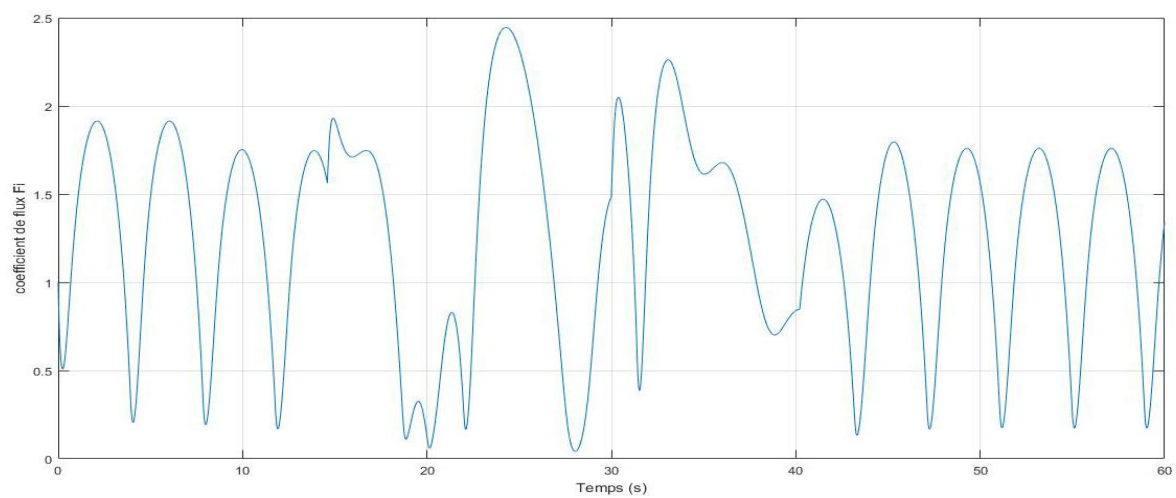


Figure 3.15 Coefficient du flux F_i

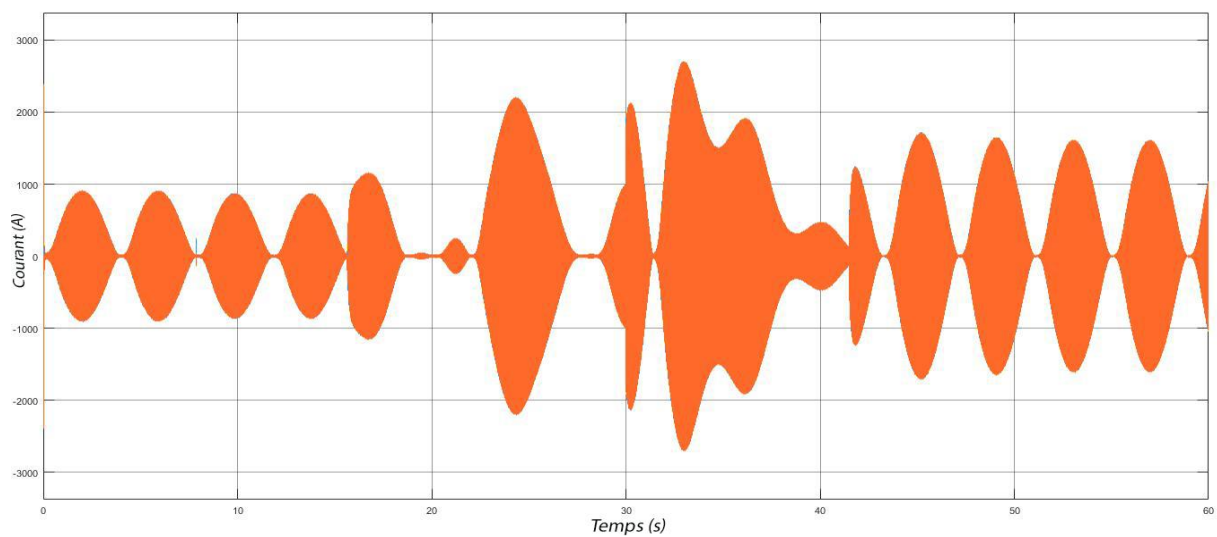


Figure 3.16 Courant de GSAP

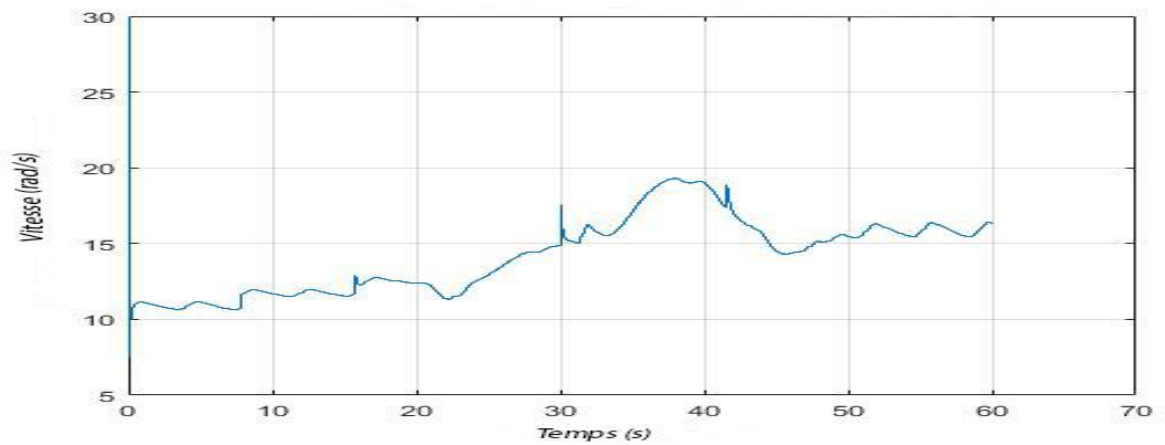


Figure 3.17 Vitesse de GSAP

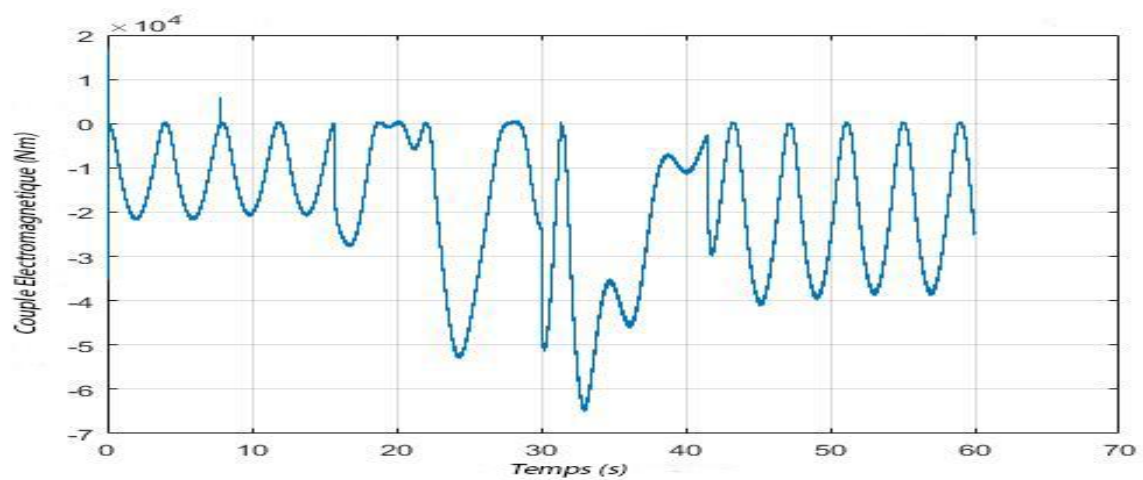


Figure 3.18 Couple électromagnétique de GSAP

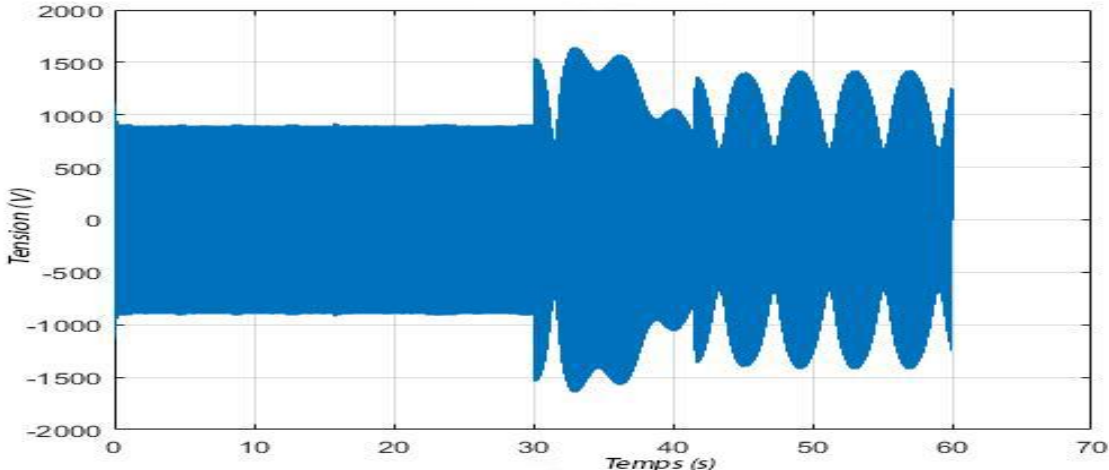
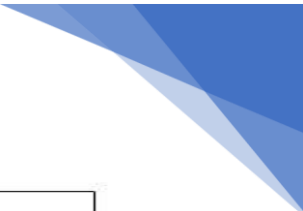


Figure 3.19 Tension côté générateur

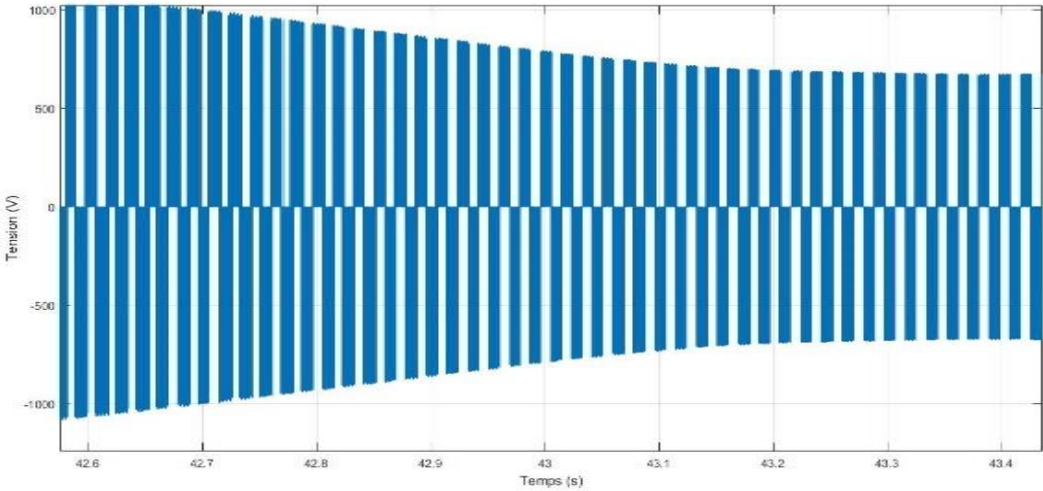


Figure 3.20 Zoom de Tension côté générateur

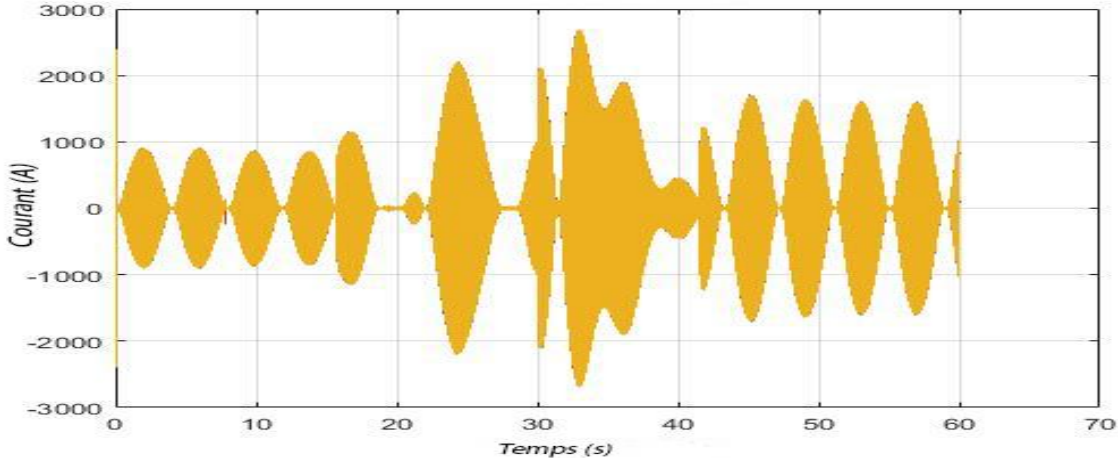


Figure 3.21 Courant côté générateur

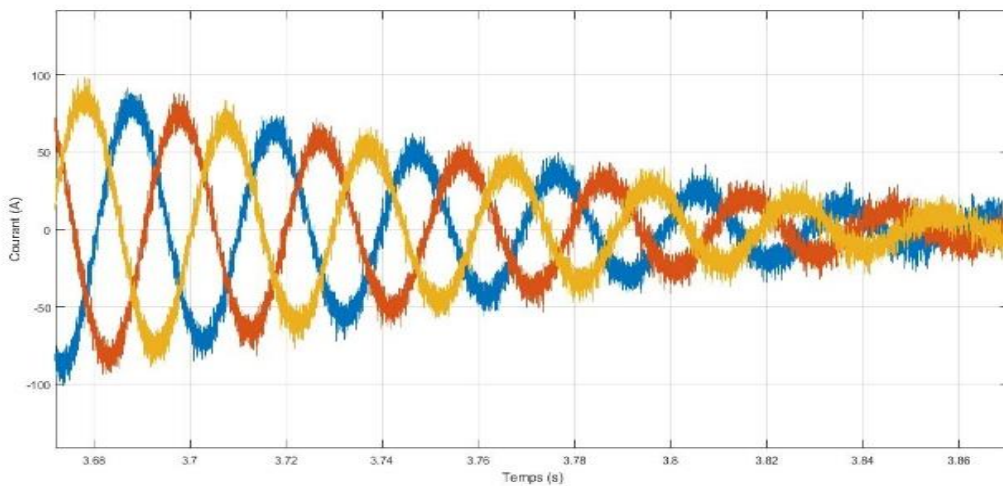


Figure 3.22 Zoom de Courant côté générateur

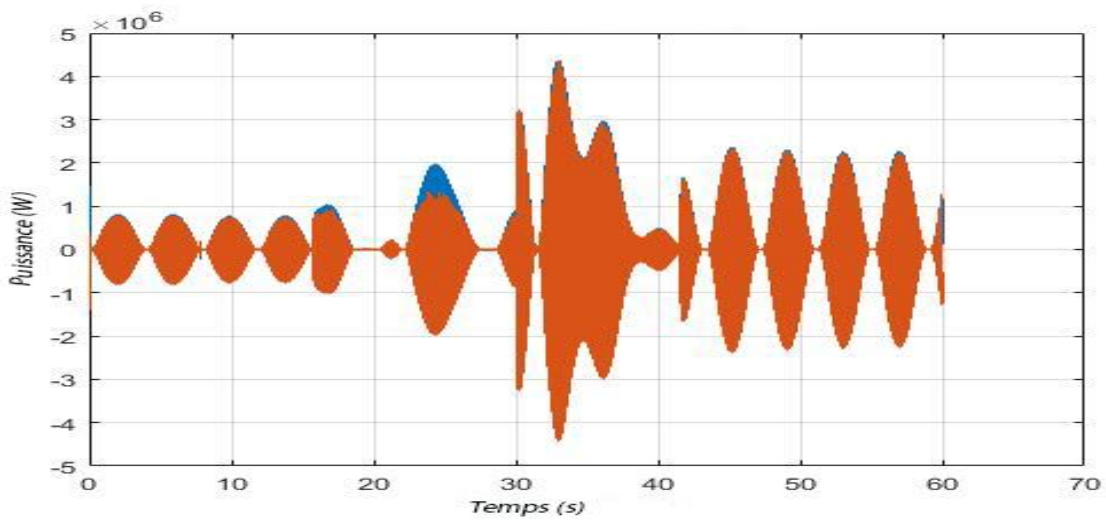


Figure 3.23 Evolution de la puissance coté Générateur (avant)

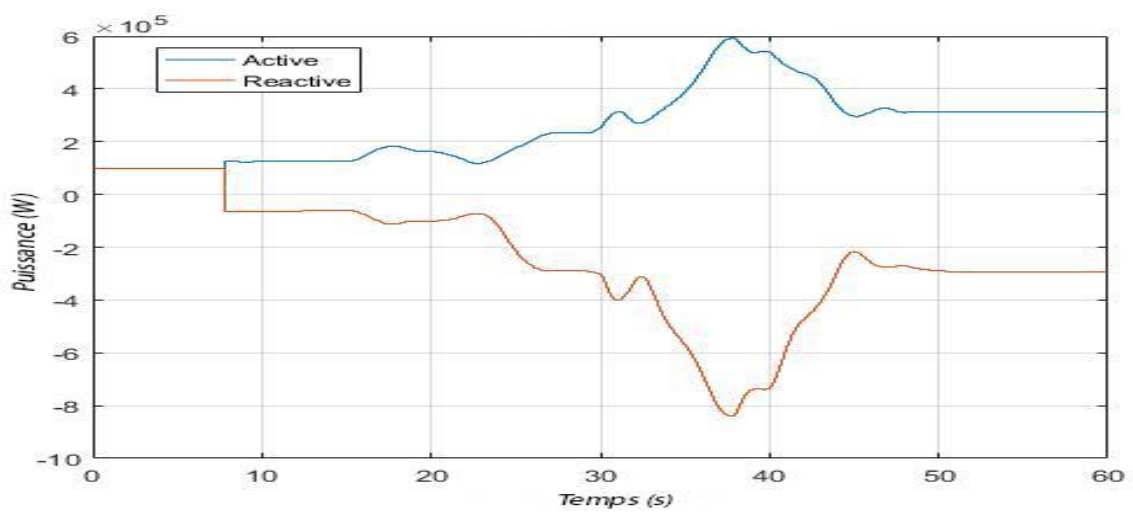


Figure 3.24 Evolution de la puissance coté Générateur (après)

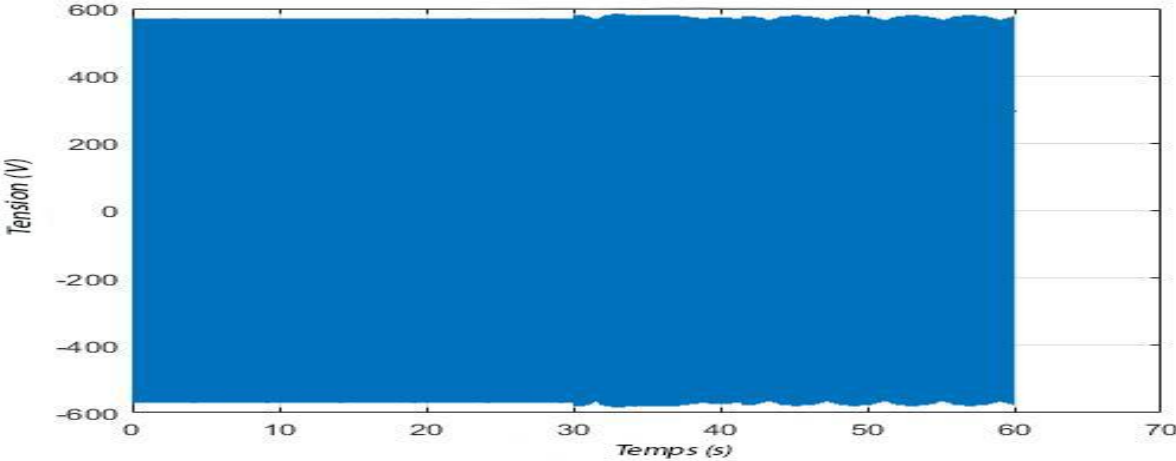


Figure 3.25 Tension de côté réseau

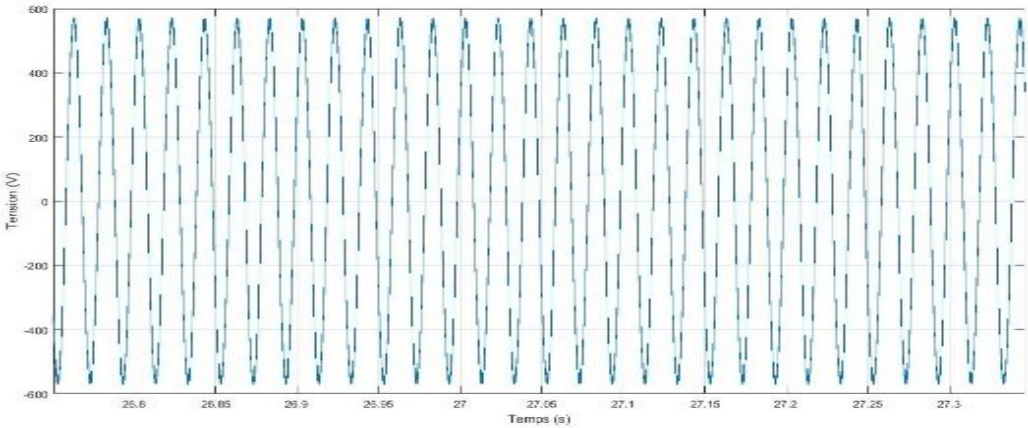


Figure 3.26 Zoom tension côté réseau

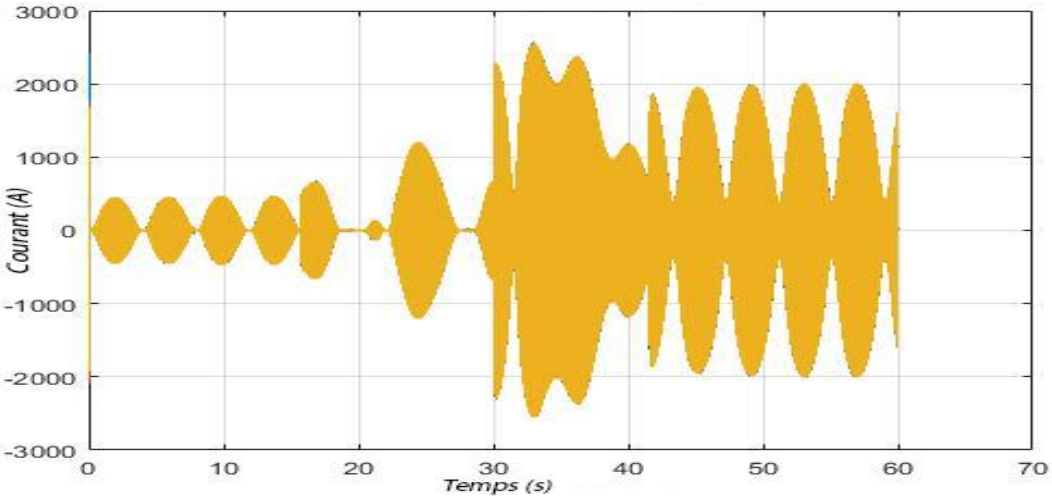


Figure 3.27 Courants triphasés côté réseau

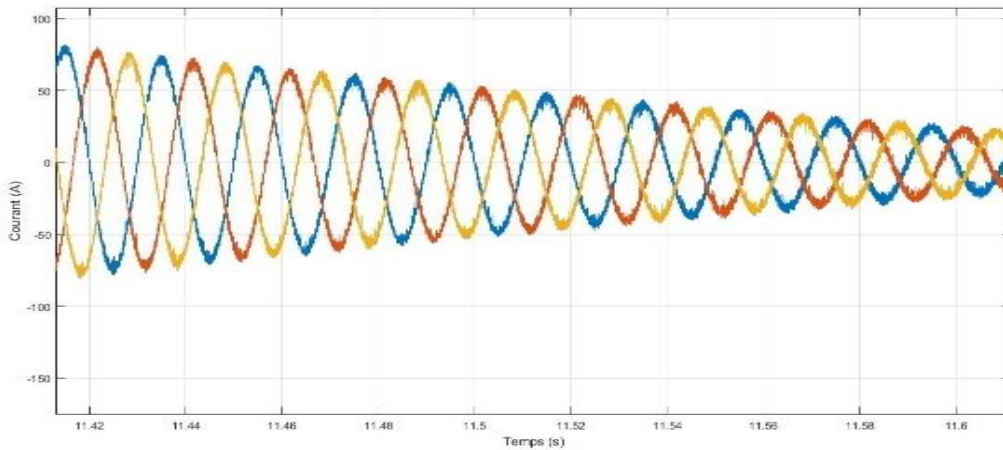


Figure 3.28 Zoom de courants triphasés côté réseau

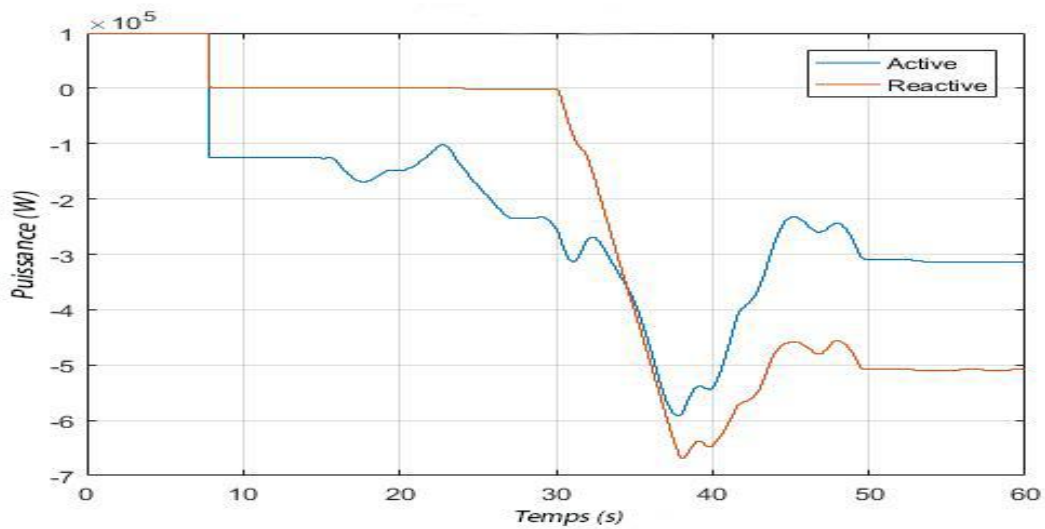


Figure 3.29 Evolution de la puissance active et réactive coté Réseau

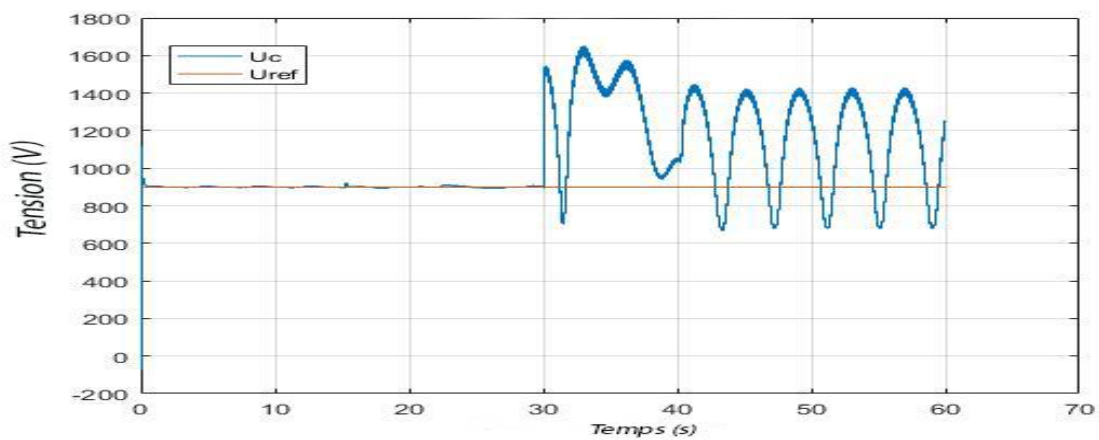


Figure 3.30 Tension continue du circuit intermédiaire (U_c et U_{ref})

Le WEC basé sur OWC était connecté à un système de bus infini, La dynamique du couple et les deux coefficients C_t et F_i de la turbine est représentée sur les figures (3.13, 3.14 et 3.15) respectivement. Comme on peut le voir sur la figure 3.13, le couple de la turbine houlomotrice, ce qui permet d'avoir une puissance extraite maintenue dans ses valeurs nominales.

Les figures (3.16, 3.17,3.18) représentent, le courant, la vitesse de sortie et le couple électromagnétique fourni par le générateur GSAP. En raison des différentes entrées, des pics variables sont visibles à partir de la tension et le courant du générateur comme les montrent les figures (3.19, 3.20) et (3.21, 3.22). A partir de la figure 3.24, on constate que les puissances active et réactive suivent leurs références avec un régime transitoire très rapide et sans dépassement.


Cependant, la tension du réseau et la tension du circuit intermédiaire sont maintenues constantes. La tension du bus continu suit parfaitement sa valeur de référence comme le montre la Figure 3.30, on peut voir que le convertisseur élévateur produit une tension fixe de 900 V pour alimenter l'onduleur. Ce réglage est assuré par le régulateur non linéaire proposé.

Les figures (3.25, 3.26) et (3.27, 3.28) montrent le courant et la tension du réseau avec leurs zoom, elles sont sinusoïdales ce qui montre l'efficacité de la stratégie de contrôle appliquée au convertisseur qui donne une meilleure qualité d'énergie au réseau. On voit que le courant présente des variations similaires aux variations de la puissance active ce qui montre que le courant est l'image des puissances.

3.7 CONCLUSION

Dans ce chapitre, un système de centrale houlomotrice connecté au réseau électrique via des convertisseurs d'électroniques de puissance dos à dos ont été présentés. Le modèle dynamique, le contrôle et les simulations du schéma de structure proposé ont été effectués, en utilisant Matlab/Simulink. Le système énergétique a été développé et testé ainsi que son dispositif de supervision-contrôle. La combinaison de la turbine houlomotrice et du GSAP, ainsi que le redresseur à pont de diodes et l'onduleur triphasé de tension permettent de satisfaire la demande du réseau. La conversion de la sortie de la structure du mouvement des vagues en sortie de courant alternatif est assurée par l'utilisation d'un onduleur triphasé à deux niveaux, ces convertisseurs de puissance sont contrôlés pour fournir une puissance de sortie maximale dans toutes les conditions de fonctionnement afin de répondre aux exigences du réseau.

Avec l'intégration du WEC basé sur OWC dans le réseau électrique via les convertisseurs dos à dos à grande échelle et leurs contrôleurs, le WEC peut maintenir la puissance active et la tension aux bornes constantes.



CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Le travail qui nous avons présenté dans ce mémoire a porté sur la production et la commande d'une chaîne de génération électrique à base d'énergie houlomotrice.

Dans le premier chapitre, un contexte a été donné concernant l'importance de l'énergie des vagues et une brève introduction aux différentes classifications des convertisseurs d'énergie houlomotrice a également été examinée.

Le deuxième chapitre portait sur les chaînes de conversions (PCC) existants pour les technologies ondulatoires bien développées. Sur la base de ces critères, un PCC spécifique au convertisseur d'énergie houlomotrice a été proposé, rentable, redondant et sans entretien. Afin de garantir une durée de vie plus longue et des rendements plus élevés, le générateur électrique proposée est un GSAP. Étant donné que les GSAP fonctionnent généralement à des vitesses inférieures (≤ 600 tr/min) [1][3], Différentes topologies ont été établies dans le but de choisir une structure basée sur une génératrice synchrone à aimant permanent interfacée au réseau par un redresseur triphasé et un onduleur de tension à deux niveaux via un bus continu. Les éléments de la chaîne de conversion houlomotrice ont été modélisés afin de faire une simulation numérique. [3].


Le chapitre trois a porté sur la commande de la chaîne houlomotrice. Trois stratégies de contrôle ont été élaborées. La première concerne la commande MPPT de la turbine houlomotrice où l'objectif principal a été l'optimisation du rendement de la turbine par la vitesse variable et surtout en mode connecté au réseau, suivie par l'introduction de la commande vectorielle au système. Les courants de la génératrice ont été contrôlés par régulateur PI. Cette commande est efficace face à la complexité et la non linéarité du système étudié. La troisième stratégie a pour but de contrôler les puissances actives et réactives du système ainsi que la tension du bus continu. Une commande du convertisseur côté réseau a été introduite dans le but d'assurer une alimentation sans interruption en respectant les normes et la sensibilité des réseaux électriques. Une simulation numérique a été effectuée et Les résultats obtenus ont été analysés et interprétés [4].

A la fin des travaux de ce mémoire on estime avoir contribué à :

- ✓ La définition et la classification des différentes techniques de production de l'électricité par l'énergie des vagues marines.
- ✓ La modélisation et la simulation dynamique de la chaîne de conversion houlomotrice qui permet le soutien d'un réseau ou l'alimentation des charges isolées sous différents scénarios.
- ✓ L'optimisation du fonctionnement de la centrale houlomotrice grâce à des algorithmes de commande et d'optimisation proposée.
- ✓ L'analyse de la qualité des courants injectés au réseau et surtout l'effet des oscillations de la vitesse de rotation.

Conclusion générale

- ✓ La commande par mode glissant à vitesse variable du système. Cette commande a été proposée comme alternative à la commande en vitesse afin de simplifier cette dernière par l'élimination de sa boucle de contrôle.
- ✓ La simulation dynamique en utilisant Matlab/Simulink. Les résultats obtenus sont très encourageants.



REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

Références Bibliographiques

- [1] Hafz Ahsan Said, Demian ´ García-Violini, John V. Ringwood -Wave-to-grid (W2G) control of a wave energy converter; 2022.
- [2] Reikard G, Robertson B, Bidlot J-R. Combining wave energy with wind and solar: Short-term forecasting. *Renew Energy* 2015;81:442–56.
- [3] NITHIN JOSE MADASSERY -Design and Layout of Power Conversion Chain for a Wave Energy Converter; 2017
- [4] BOUFADINA Aymen- Modélisation et contrôle d'un système de conversion d'énergie marémotrice, MEMOIRE Pour l'obtention du diplôme de Master de l'Université IBN-KHALDOUN DE TIARET ; 2021
- [5] CHIBI Nessrine- Etude et Simulation d'une Chaîne de Conversion Houlomotrice, MEMOIRE Pour l'obtention du diplôme de Master de l'Université IBN-KHALDOUN DE TIARET ; 2021
- [6] <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/energie-houlomotrice-ou-energie-des-vagues>; (accessed on 10 and 15 may 2022)
- [7] Zhong, C.; Wei, L.; Yan, G. Low Voltage Ride-through Scheme of the PMSG Wind Power System Based on Coordinated Instantaneous Active Power Control. *Energies*; 2017.
- [8] 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.
- [9] Michel Benoit, Jean-François Dhédin, Giovanni Mattarolo, *Energies marines hydrolienne et houlomotrice, Exemples de projets et de travaux de R&D, Conférence Institut Coriolis – 24 septembre 2010*
- [10] REN21, R. Global Status Report. Available online:<https://www.ren21.net/reports/global-status-report/> (accessed on 15 may 2022)
- [11] Andrea Stevens Karnyoto1- *Hydro and Marine Power Plants*; 2012
- [12] António F. O. Falcão- *O aproveitamento da energia das ondas*; 2018
- [13] KÁSSIO JOSÉ MARTINS- *Análise do Potencial Energético das Ondas via Projeto HiWave-5*; 2021.
- [14] Joaquim Carneiro, Universidade do Minho- *FUNDAMENTOS SOBRE ENERGIA DAS ONDAS*; 2017.

Références Bibliographiques

- [15] R. WATERS, "Energy from ocean waves full scale experimental verification of a wave energy converter," Ph.D. dissertation, Uppsala Universitet, 2008.
- [16] J. Villate, "Situacion actual de las energías marinas y perspectivas de futuro." *Seminario Anual de Automatica Electronica e Instrumentacion (SAAEI)*, 2010.
- [17] M. Previsic, "Deployment effects of marine renewable energy technologies," *U.S. Department of Energy*, 2010.
- [18] Paul-Emile Meunier- Contrôle collaboratif d'une ferme de génératrices houlomotrices ; 2018.
- [19] Sikorski, A.; Falkowski, P.; Korzeniewski, M. Comparison of Two Power Converter Topologies in Wind Turbine System. *Energies* ; 2021.
- [20] Xing, P.; Fu, L.; Wang, G.; Wang, Y.; Zhang, Y. A composite control method of low-voltage ride through for PMSG-based wind turbine generator system. *IET Gener. Transm. Distrib.* 2018.
- [21] Kim, C.; Kim, W. Low-Voltage Ride-Through Coordinated Control for PMSG Wind Turbines Using De-Loaded Operation. *IEEE Access* 2022
- [22] Zhou, A.; Li, Y.W.; Mohamed, Y. Mechanical Stress Comparison of PMSG Wind Turbine LVRT Methods. *IEEE Trans. Energy Convers.* 2021
- [23] B. Drew, A. R. Plummer, and M. N. Sahinkaya, "A review of wave energy converter technology," *IMEchE Part A: J. Power and Energy*, vol. 223, 2009.
- [24] Minh Huynh Quang, Optimisation de la production de l'électricité renouvelable pour site isolé, Thèse de Doctorat de l'Université de Reims Champagne-Ardenne, Spécialité : Automatique, 2013.
- [25] A. Babarit and A. Clement, "Optimal latching control of a wave energy device in regular and irregular waves. *appl ocean res*," *Applied Ocean Research*, 2006.
- [26] V. S. N. Ann R. Dallman, "Characterization of u.s. wave energy converter (wec) test sites, a catalogue of met-ocean data," *SANDIA REPORT, SAND2014-18206*, 2014.
- [27] Hansen RH. Design and control of the powertake-off system for a wave energy converter with multiple absorbers. Department of Energy Technology, Aalborg University; 2013.

Abstract - The thesis aims at modeling and designing the different power conversion chain of the entire wave energy converter device. The process of energy conversion that yields the required electrical energy for connecting a wave energy converter to an electrical network is termed as the power conversion chain. A detailed electro-mechanical model of the wave energy converter system connected to power grid is developed in the Matlab/SIMULINK environment and its corresponding generator. The simulation response of the wave energy converter along with the power conversion chain is investigated.

Résumé - La mémoire vise à modéliser et à concevoir les différentes chaînes de conversion de puissance de l'ensemble du dispositif de convertisseur d'énergie houlomotrice. Le processus de conversion d'énergie qui produit l'énergie électrique requise pour connecter un convertisseur d'énergie houlomotrice à un réseau électrique est appelé chaîne de conversion de puissance. Un modèle électromécanique détaillé du système de convertisseur d'énergie houlomotrice connecté au réseau électrique est développé dans l'environnement Matlab/SIMULINK et son générateur correspondant. La réponse de simulation du convertisseur d'énergie houlomotrice ainsi que la chaîne de conversion de puissance sont étudiées.

المخلص - تهدف الأطروحة إلى نمذجة وتصميم سلسلة تحويل الطاقة المختلفة لجهاز تحويل طاقة الموجة بأكمله. تسمى عملية تحويل الطاقة التي تنتج الطاقة الكهربائية المطلوبة لتوصيل محول طاقة الموجة بشبكة كهربائية باسم سلسلة تحويل الطاقة. تم تطوير نموذج كهروميكانيكي مفصل لنظام تحويل طاقة الموجة المتصل بشبكة الطاقة في بيئة Matlab / SIMULINK والمولد المقابل لها. يتم التحقيق في استجابة المحاكاة لمحول طاقة الموجة جنباً إلى جنب مع سلسلة تحويل الطاقة.

Key Word : GSAP, chaine de conversion, Convertisseur d'énergie houlomotrice, énergie de vagues, Houle, vague, VSC, PCC, MPPT.