

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 8 Mai 1945 – Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrotechnique et Automatique

Réf:...../2022



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER Académique**

Domaine: Sciences et Technologie

Filière: Electrotechnique

Spécialité: Réseaux électriques

Par: - AHMARLAINE Housseyn
- AIOUNI Rafik

Thème

Dispositif de conversion de l'énergie de la houle

Soutenu publiquement, le : 18/06 /2022, devant le jury composé de:

M. KACHI Miloud	Professeur	Univ. Guelma	Président/Encadreur
M. BOUCHEKHA Abdelhafid	MAA	Univ. Guelma	Examineur
M.REMADNIA Mokdad	MCA	Univ. Guelma	Examineur

Année Universitaire: 2021 /2022

Remerciement

Au nom d'Allah le plus miséricordieux le plus gracieux

Nous tenons à remercier en premier lieu notre dieu

Nous tenons à remercier Monsieur **KACHI Miloud**, Professeur de l'université de 8 MAI 1945 Guelma, pour l'encadrement qu'il nous a assuré et ses précieux et judicieux conseils qu'il n'a cessé de nous prodiguer tout au long de ce projet, sa confiance témoignée, sans oublier sa qualité humaine. Il trouve ici nos gratitudee et notre reconnaissance profonde.

Nous vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à nous recherches en acceptant d'examiner mon travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Nous remerciements vont également à tous nos chers enseignants des départements de Génie Electrotechnique et Automatique.

On tient également à remercier tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

DEDICACE

Je dédie ce travail à :

L'âme de la chère mère

Au père Que dieu le garde et le protège

À l'honorable famille

Et à tous les amis

Toute la promotion 2022 du Réseaux électriques

Université 8 MAI 1945 Guelma

Rafik

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I : Les Energies renouvelables	
I.1. Introduction	3
I.2. Les énergies renouvelables	3
I.2.1. Evolution de la production mondiale en énergies renouvelables	4
I.2.2. Secteur des transports	4
I.3. Différents types des énergies renouvelables	5
I.3.1. L'énergie solaire	5
I.3.1.1. Principe physique de l'énergie solaire	5
I.3.1.2. Types d'énergie solaire	6
I.3.1.2.1. L'énergie solaire photovoltaïque	6
I.3.1.2.2. L'énergie solaire thermique	7
I.3.2. L'énergie éolienne	8
I.3.2.1. Principe de fonctionnement	9
I.3.2.2. Les types d'éolienne	10
I.3.3. L'énergie géothermique	10
I.3.3.1. Principe de fonctionnement	11
I.3.3.2. Les types des centrales géothermiques	11
I.3.4. La Biomasse	13
I.3.4.1. Technologies de conversion de la biomasse	14
I.3.4.2. Le principe de la biomasse	14
I.3.5. L'énergie Hydraulique	15
I.3.5.1. Principe de fonctionnement	16
I.3.5.2. Les différents types de centrales hydrauliques	17
I.3.5.3. Typologie des turbines hydrauliques	18
I.3.6. L'énergie de la mer	20
I.4. L'énergie renouvelable dans le monde et en Algérie	20
I.4.1. Ressources renouvelables et production d'électricité dans le monde	20
I.4.2. L'énergie renouvelable en Algérie	22
I.4.3. Le programme national de développement des énergies renouvelables adopté	22
Chapitre II : Dispositif de conversion de l'énergie de la houle	
II.1. Introduction	26
II.2. Historique	26
II.3. Caractéristiques énergétiques de la houle	28
II.3.1. Caractéristiques principales de la houle	28

II.3.2. Evaluation du potentiel	28
II.4. Ressource mondiale	29
II.5. Les dispositifs de conversion d'énergie houlomotrice	30
II.5.1. Les systèmes à corps oscillants ou mus par la houle (Oscillating Bodies ou Wave Activated Bodies)	30
II.5.1.1. Le Pelamis	30
II.5.1.2. Le SEAREV	31
II.5.1.3. Le système Archimède Wave Swing (AWS)	33
II.5.2. Les systèmes à franchissement ou à rampe de déferlement (Overtopping Device)	34
II.5.2.1. TAPCHAN (Tapered Channel – canal convergent)	34
II.5.2.2. Le WaveDragon	35
II.5.3. Les systèmes à colonne d'eau oscillante (Oscillating Water Column)	36
Chapitre III : Réalisation du dispositif de récupération de l'énergie houlomotrice	
III.1. Introduction	39
III.2. Description du dispositif	39
III.3. Les composants du dispositif prototype	39
III.4. Principe de fonctionnement	40
III.4.1. Conversion unidirectionnel du mouvement	41
III.4.2. Multiplicateur de vitesse	41
III.4.3. La partie électrique	42
Conclusion générale	43
Bibliographie	

Introduction générale

La question énergétique est d'envergure mondiale et dont l'impact sur la vie quotidienne s'accroît de plus en plus notamment avec l'augmentation du besoin en énergie. Face à cette demande croissante, les énergies d'origine fossile ont été jusqu'à présent la source majeure répondant aux exigences de quantité et de coût de l'énergie. Cependant, la raréfaction des ressources fossiles non renouvelables et leur inégale répartition géographique ont pesé lourdement sur les prix. A cela s'ajoutent les conséquences très néfastes de l'énergie fossile sur l'environnement. Ces considérations géopolitiques et économiques mais aussi environnementales ont contribué à l'orientation des recherches vers les énergies propres et renouvelables en vue de diversification des ressources. La mer et les océans font partie des ressources renouvelables puisqu'ils constituent un grand réservoir d'énergie. En effet, les ondes et le mouvement mécanique des grandes masses d'eau forment un mouvement perpétuel qui peut être converti en électricité grâce aux machines électriques.

Dans le présent mémoire, nous présentons les différentes techniques de conversion de l'énergie des ondes en électricité. Dans le même contexte, un prototype simple a été réalisé au laboratoire de Génie Electrique. Le mémoire est organisé en trois chapitres :

Le premier recense les différentes ressources d'énergie renouvelables.

Le second chapitre montre les différentes techniques employées dans la conversion onde-électricité.

Le troisième présente le principe du prototype réalisé.

Chapitre I :

Les Energies renouvelables

I.1. Introduction

Aujourd'hui, plus de 85% d'énergie utilisée dans le monde provient de gisement de combustible fossile (charbon, pétrole, gaz) ou d'uranium, constitués au fil des âges et de l'évolution géologique. La limitation de la quantité de ces réserves, la crise successive du pétrole en 1973 et l'accroissement de la demande d'énergie dans tous les pays du monde ont conduit les pays industrialisés à chercher et à développer de nouvelles sources d'approvisionnement. La filière nucléaire était déjà lancée, mais son choix à grande échelle peut amener à des conséquences graves, surtout à l'environnement, à cause de la pollution et aussi les accidents nucléaires [1].

On désigne par énergies renouvelables l'ensemble des techniques de production d'énergie dont la mise en œuvre n'entraîne pas l'extinction de la ressource initiale et est renouvelable en permanence à l'échelle humaine. Fournies par le soleil, le vent, la chaleur de la terre, les chutes d'eau, les marées ou encore la croissance des végétaux, leur exploitation n'engendre pas ou peu de déchets ni d'émissions polluantes. Il s'agit donc d'énergies tirées d'une source renouvelable de manière permanente. On les qualifie d'énergies « flux » par rapport aux énergies « stock » constituées de gisements limités de combustibles fossiles : pétrole, charbon, gaz, uranium [2].

I.2. Les énergies renouvelables

Ce type d'énergie est considéré comme l'énergie de l'avenir. Les énergies renouvelables peuvent être classées en cinq grandes familles qui sont :

- L'énergie solaire : la lumière du soleil captée à l'aide de panneaux photovoltaïques ou de centrales solaires thermiques permet la production d'électricité.
- L'énergie éolienne : l'énergie cinétique du vent peut être transformée en énergie mécanique par des aérogénérateurs puis en électricité à l'aide d'une génératrice.
- La biomasse : des matériaux d'origine biologique peuvent être employés comme combustibles pour la production de chaleur, d'électricité ou de carburant.

- La géothermie : la chaleur stockée dans le sol peut être utilisée pour la production d'électricité ou de chaleur.
- L'énergie hydraulique : l'énergie de l'eau sous toutes ses formes possibles (potentielle et cinétique) peut être transformée en énergie mécanique puis en électricité [3].

I.2.1. Evolution de la production mondiale en énergies renouvelables

La production mondiale d'énergie commercialisée était en 2020, selon BP (**British Petroleum Company**) (voir la **figure I.1**), de 556,6 exajoules, en progression de 10,1 % depuis 2010. Elle se répartissait en 31,2 % de pétrole, 27,2 % de charbon, 24,7 % de gaz naturel, 4,3 % de nucléaire et 12,6 % d'énergies renouvelables (hydroélectricité 6,9 %, éolien 2,5 %, solaire 1,4 %, biomasse et géothermie 1,1 %, agro carburants 0,7 %) [4].

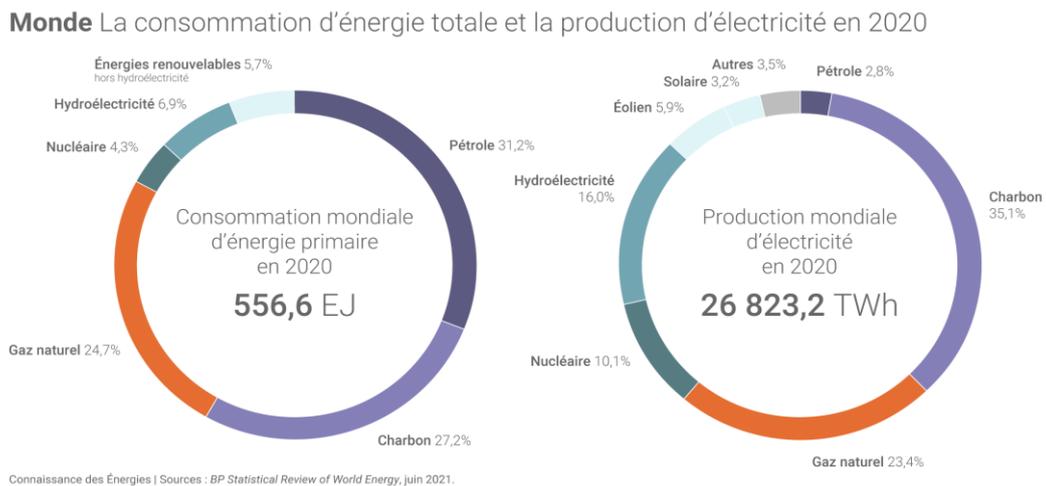


Figure I.1: Consommation des énergies (Source : BP statistical review of world energy, june 2021).

I.2.2. Secteur des transports

Dans le secteur des transports, le renouvelable est présent à travers les biocarburants et les véhicules électriques (trains, trams, automobiles). En Europe, ceux-ci se développent particulièrement en Norvège et en Suède. Parmi les biocarburants, les plus utilisés sont le biodiesel et le bioéthanol, qui représentent environ 3 % de la consommation mondiale de carburant, même si ce pourcentage est plus élevé dans certaines parties d'Europe ou encore au Brésil et aux États-Unis. Le biométhane est également utilisé en Europe, surtout en Allemagne et en Suède [5].

I.3. Différents types des énergies renouvelables

À l'origine de toutes les énergies renouvelables que l'humanité exploite aujourd'hui, il n'y a que deux grandes sources : le soleil et la terre. Toutefois, les spécialistes aiment à classer ces énergies en cinq grands types qui présentent chacun leurs spécificités. Ainsi, il existe cinq grands types d'énergies renouvelables. Leur caractéristique commune est de ne pas produire, en phase d'exploitation, d'émissions polluantes (ou peu), et ainsi d'aider à lutter contre l'effet de serre et le réchauffement climatique.



Figure I.2: Différents types des énergies renouvelables

I.3.1. L'énergie solaire

L'énergie solaire est l'une des sources d'énergie renouvelables et la plus abondante au monde. Le rayonnement solaire peut être utilisé dans plusieurs applications, y compris la production de réactions chimiques, la production de chaleur et la production d'électricité.

I.3.1.1. Principe physique de l'énergie solaire

Le soleil émet des rayonnements principalement dans la partie «visible » du spectre (lumière, entre 400 et 700 nm), plus la longueur d'onde du rayonnement est courte, plus la quantité d'énergie portée par les photons est grande. Cette énergie peut se transmettre sous forme de chaleur, l'énergie va exciter les atomes composant la matière, qui vont s'agiter et s'échauffer. Exposés aux rayons du soleil, les capteurs vont convertir l'énergie des photons, soit en énergie thermique, soit en énergie électrique [6].

I.3.1.2. Types d'énergie solaire

On utilise l'énergie solaire en captant les rayons du soleil et en la transformant en électricité ou en utiliser la chaleur qui en résulte. Il existe trois types d'énergie solaire sont :

I.3.1.2.1. L'énergie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque désigne l'énergie récupérée et transformée directement en électricité à partir de la lumière du soleil par des panneaux photovoltaïques. Elle résulte de la conversion directe dans un semi-conducteur d'un photon en électron. Outre les avantages liés au faible coût de maintenance des systèmes photovoltaïques, cette énergie répond parfaitement aux besoins des sites isolés et dont le raccordement au réseau électrique est trop onéreux. L'énergie solaire photovoltaïque est une source d'énergie non polluante. Modulaires, ses composants se prêtent bien à une utilisation innovante et esthétique en architecture. La stratégie énergétique de l'Algérie repose sur l'accélération du développement de l'énergie solaire. Le gouvernement prévoit le lancement de plusieurs projets solaires photovoltaïques d'ici 2030 [2].

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la conversion de la lumière du soleil en électricité au sein de matériaux semi-conducteurs comme le silicium. Ces matériaux photosensibles ont la propriété de libérer leurs électrons sous l'influence d'une énergie extérieure. C'est l'effet photovoltaïque. L'énergie est apportée par les photons, (composants de la lumière) qui heurtent les atomes et libèrent les électrons, induisant un courant électrique. Ce courant continu de micro puissance calculé en watt crête (Wc) peut être transformé en courant alternatif grâce à un onduleur.

L'électricité produite est disponible sous forme d'électricité directe ou stockée en batteries (énergie électrique décentralisée) ou en électricité injectée dans le réseau.

Un générateur solaire photovoltaïque est composé de modules photovoltaïques eux même composés de cellules photovoltaïques connectées entre elles.

Les performances d'une installation photovoltaïque dépendent de l'orientation des panneaux solaires et des zones d'ensoleillement dans lesquelles vous vous trouvez.

L'avenir du photovoltaïque dans les pays industrialisés passe par son intégration sur les toits et les façades des maisons solaires [7].

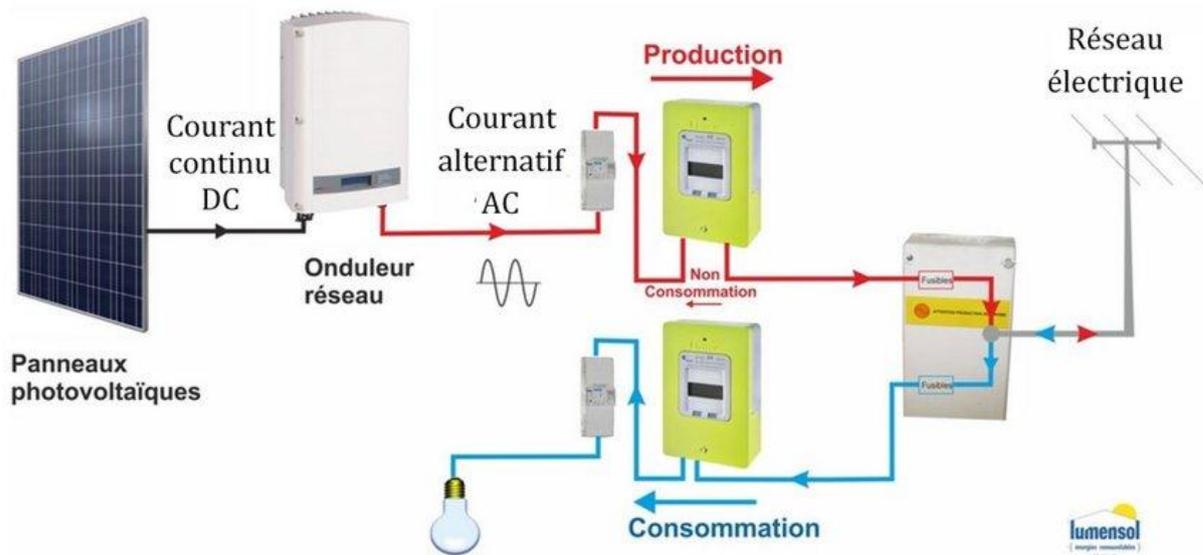


Figure I.3: Système photovoltaïque connecté au réseau électrique.

I.3.1.2.2. L'énergie solaire thermique

Le principe de l'énergie thermique consiste à transformer la chaleur du rayonnement solaire en énergie thermique grâce à un fluide qui circule dans des panneaux exposés au soleil. Il y a plusieurs manières pour capturer et exploiter cette chaleur du rayonnement solaire, on cite :

a. Capteur parabolique

Les capteurs paraboliques fonctionnent d'une manière autonome. Ils sont constitués d'une grande parabole de révolution réfléchissante et d'un moteur « Stirling » au foyer (on dit le foyer ou bien le récepteur) de la parabole. Le tout pivote sur deux axes pour suivre le déplacement du soleil afin de concentrer son rayonnement sur le foyer de la parabole réfléchissante. Le rapport de concentration est généralement d'environ 4000 et la température obtenue entre 500 et 1000°C. Ainsi, les rayons solaires chauffent le fluide comprimé afin de générer de l'électricité [8].

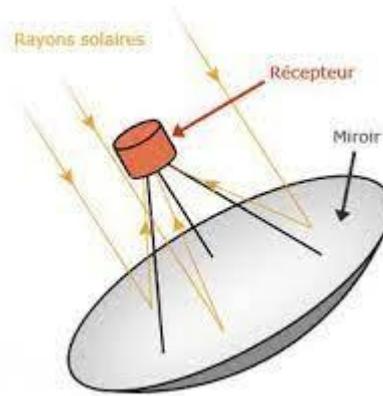


Figure I.4: Le fonctionnement d'un capteur parabolique.

b. capteur cylindro-parabolique

Ce type de centrale se compose d'alignements parallèles de longs miroirs hémicylindriques, qui tournent autour d'un axe horizontal pour suivre la course du soleil. Les rayons solaires sont concentrés sur un tube horizontal dans lequel circule un fluide caloporteur (généralement une huile synthétique). Les tuyaux étant noirs, ils absorbent toute la chaleur du soleil et permettent à la température du fluide de monter jusqu'à 500° C. La chaleur ainsi récupérée produit de la vapeur via un échangeur, cette vapeur à son tour va actionner des turbines pour produire de l'électricité [8].

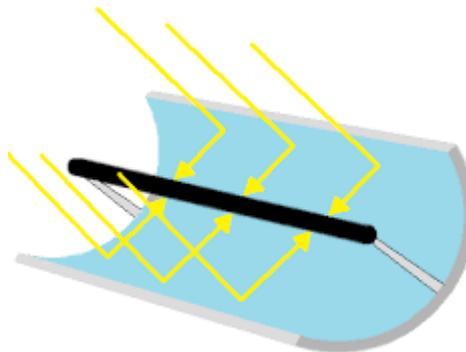


Figure I.5: Capteur cylindro parabolique

I.3.2. L'énergie éolienne

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière. De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) installés dans des zones géographiquement dégagées

pour éviter les phénomènes de turbulences. L'évolution technologique (augmentation de la taille et de la puissance des installations, optimisation des matériaux) alliées à la baisse continue des coûts de production font actuellement de l'éolien l'une des énergies renouvelables les plus compétitives [9].

I.3.2.1. Principe de fonctionnement

L'énergie éolienne est produite par la force que le vent exerce sur les pales d'une éolienne, les faisant tourner à une vitesse entre 10 et 20 tours par minute. Ces pales sont reliées à un alternateur qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique.

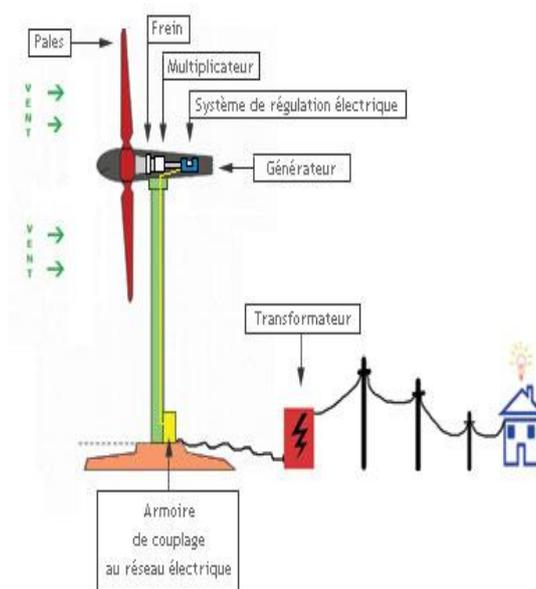


Figure I.6: Principe fonctionnement de l'énergie éolienne

La quantité d'énergie produite par une éolienne dépend de :

- la **vitesse du vent**, principalement ;
 - la **surface balayée** par les pales ;
 - la **densité** de l'air.
-
- un apport minimal de vent, généralement de 12 à 14 km/h, pour commencer à tourner et à produire de l'électricité ;
 - des vents de 50 à 60 km/h pour produire à pleine puissance ;

- des vents en deçà de 90 km/h. Quand le cap de 90 km/h est dépassé, il faut interrompre la production pour éviter le bris d'équipement [10].

I.3.2.2. Les types d'éolienne

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles, celles à axe vertical et celles à axe horizontal

a) Eoliennes à axe verticale : Ce type d'éolienne a fait l'objet de nombreuses recherches. Il présente l'avantage de ne pas nécessiter de système d'orientation des pales et de posséder une partie mécanique (multiplicateur et génératrice) au niveau du sol facilitant ainsi les interventions de maintenance. En revanche, certaines de ces éoliennes doivent être entraînées au démarrage et le mat souvent très lourd subit de fortes contraintes mécaniques [11].

b) Eolienne à axe horizontale : La technologie actuellement la plus utilisée pour capter l'énergie éolienne. Ce genre d'éolienne est efficace grâce à son faible volume (elles sont constituées de plusieurs pales profilées d'une façon aérodynamique à la manière des ailes d'avion) [11].

I.3.3. L'énergie géothermique

La géothermie (du grec "Gê", la terre, et "Thermie", la chaleur) consiste à capter la chaleur de la croûte terrestre pour produire du chauffage (température inférieure à 90°) ou de l'électricité (température entre 90 et 150°).

La géothermie a pour origine l'évacuation de la chaleur de l'intérieur du globe, chaleur qui a pour origine la désintégration de certains corps radioactifs. Cela provoque un flux moyen de 60 W/m² à la surface. Ce flux est inférieur à celui du soleil (340 W/m² en moyenne), mais à certains endroits il peut s'élever jusqu'à 200 W/m². Selon la température, il existe plusieurs types d'applications : la géothermie à haute température (de 120 à 200 °C) qui produit de l'électricité ; et la géothermie à basse température (de 50 à 100 °C) qui est surtout employée pour le chauffage des locaux. Malheureusement, les coûts de forage s'accroissent très rapidement avec la profondeur, et la température augmente également [12].

I.3.3.1. Principe de fonctionnement

Le principe de l'énergie géothermique est basée sur des stations thermiques qui constituent une source de production d'électricité via:

1. Subventionner la chaleur (de la terre) à l'eau qui se transforme en vapeur.
2. Turbine convertit une partie de la vapeur en énergie mécanique.
2. Génère de l'électricité grâce au générateur associé à une turbine.

Pour capter l'énergie géothermique on utilise le fluide géothermique contenu dans des réservoirs profonds pour actionner une turbine qui entraîne à son tour un alternateur qui produit un courant électrique.

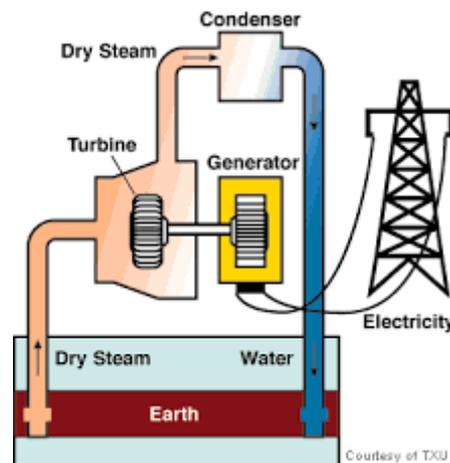


Figure I.7: Principe de l'énergie géothermie

I.3.3.2. Les types des centrales géothermiques

On distingue trois grands types de centrales électriques :

a) Centrale conventionnelle :

Centrale à vapeur sèche, vaporisation directe.

Centrale à vapeur flash, vaporisation éclair.

b) Centrale à cycle binaire.

Centrale de vapeur sèche (dry stem plants) : Ce type de centrales ont été les premières réalisées. Ce type dépend de la technique à vaporisation directe qui consiste à canaliser directement la vapeur d'eau, typiquement à une température supérieure à 150°C, à partir

des puits de vapeur sèche simplement en forant dans le sol jusqu'au réservoir et laisser échapper la vapeur sèche dans la turbine [13].

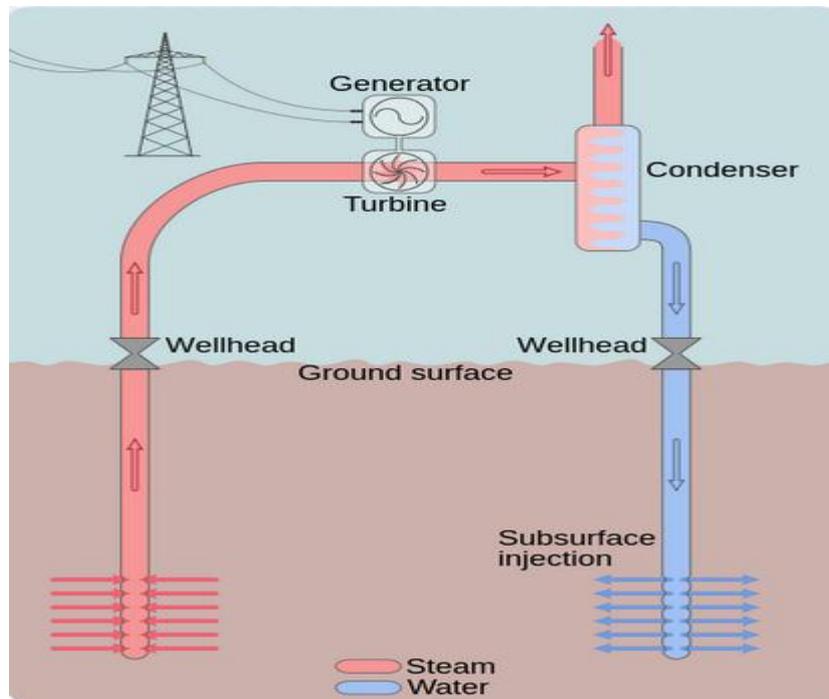


Figure I.8: Centrale de vapeur sèche

Centrales à vaporisation éclair (flash steam plant) : Ce type de centrale géothermique est le plus répandu dans le monde. La technique flash consiste à extraire l'eau chaude dont la température est de l'ordre de 180°C ou plus sous haute pression de la profondeur à la surface. En surface l'eau chaude à haute pression est envoyée dans un séparateur, une partie de l'eau se transforme rapidement en vapeur. Cette vapeur est ensuite utilisée pour tourner la turbine qui entraîne un générateur électrique. Après son usage, la vapeur est dirigée vers un condenseur où les conditions de vide sont maintenues par l'eau de refroidissement fournie par la tour de refroidissement afin de la condenser de nouveau en eau qui sera ensuite acheminé vers le bas dans le réservoir géothermique de sorte qu'elle puisse être réchauffée et réutilisée de nouveau (les capacités de production de ces unités de 20 à 110 MW) [13].

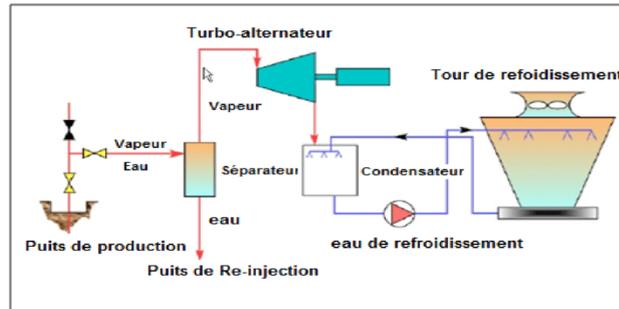


Figure I.9: Centrales à vaporisation éclairée

Centrales géothermique à cycle binaire : Ces centrales à cycle binaires diffèrent des autres centrales dans la manière de récupération de la chaleur profonde. Les réservoirs géothermiques profonds sont exploités en utilisant un fluide géothermique à moyenne température (85-170°C) et un fluide secondaire (appelé fluide de travail) ayant un point d'ébullition inférieur à celui de l'eau. Le fluide géothermique chaud passe à travers un échangeur de chaleur pour chauffer un fluide de travail dans une pipe celui-ci est ensuite vaporisé et passé à travers une turbine pour la production d'électricité [13].

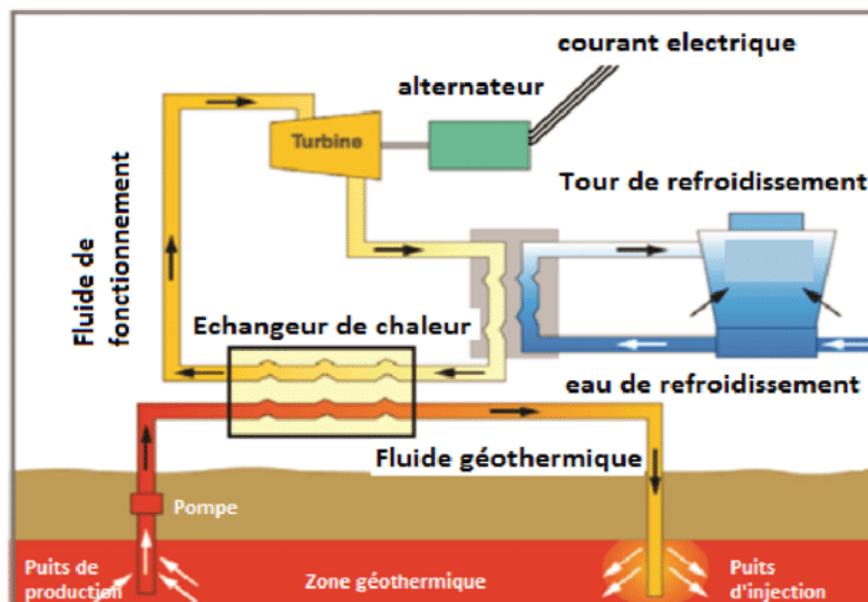


Figure I.10: Centrales géothermique à cycle binaire

I.3.4. La Biomasse

La biomasse concerne toutes les matières organiques qui peuvent produire de l'énergie suite à leur combustion ou à toute autre opération de transformation. Elle englobe ainsi tout ce qui se rapporte à la combustion directe du bois sous toutes ses formes (bûches,

granulés, etc.) et de ses dérivés (déchets de l'exploitation forestière ou issus des scieries et des industries de transformation du bois telles que les menuiseries et les fabricants de parquets, meubles, etc.). Mais elle vise également le traitement des déchets de l'industrie agroalimentaire, ceux issus de l'agriculture, ainsi que les ordures ménagères. En effet, le biogaz est obtenu grâce à la fermentation des déchets organiques et sa combustion produit de la chaleur ainsi que de l'électricité grâce à la cogénération [5].

I.3.4.1. Technologies de conversion de la biomasse

Les biocombustibles solides : Les bois combustibles solides proviennent principalement des forêts. On distingue deux origines les sous-produits de travaux sylvicoles de récoltes (houppiers, souches, branches ...) ou les bois de peu de valeur (rendions, billons). La biomasse brûlée permet la production de l'énergie par le bois et déchets agricoles (paille), déchets urbains ordures ménagères et déchet industriels du secteur agroalimentaire, ces déchets subissent des transformations thermochimiques (combustion, pyrolyse), permettant principalement de créer de la chaleur et de l'électricité [14].

Les biocarburants : Carburant bioéthanol (C_2H_5OH) vient de l'amidon et le glucose extraits de cultures sucrières (betterave, canne à sucre) et céréalières (blé, maïs); produisent de l'éthanol par procédé de fermentation alcooliques. Les éthers-carburants sont généralement préférés aux alcools pour leur moindre pouvoir corrosif et pour l'absence des problèmes de séparation de phases en présence d'hydrocarbures pour les faibles teneurs en éthanol [14].

Le biogaz : Sa composition comprend (55 à 65%) de méthane, du gaz carbonique (35 à 45%) et des traces d'impuretés (H_2S , NH_3 ...) utilisable, une fois épuré pour alimenter des véhicules fonctionnant au gaz naturel [14].

I.3.4.2. Le principe de la biomasse

Le principe de centrale à biomasse est montré sur la figure suivante :

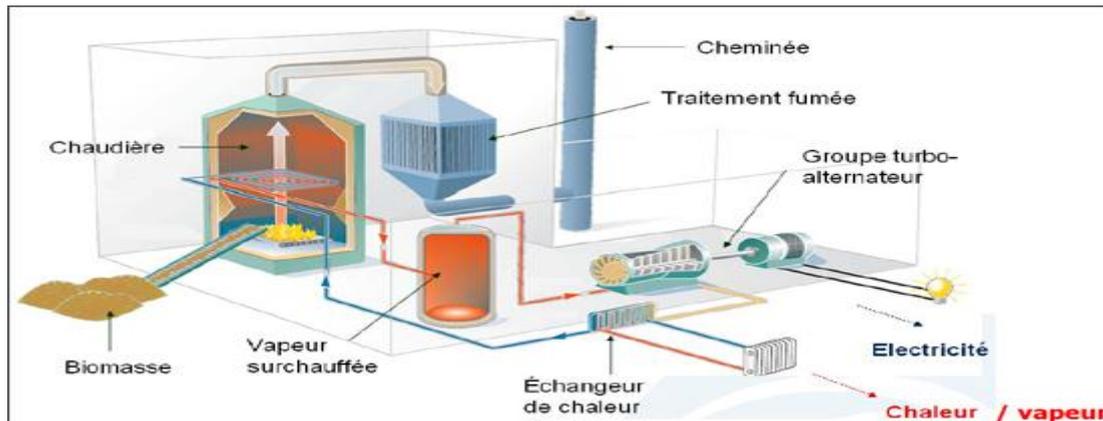


Figure I.11: Le fonctionnement d'une centrale à biomasse.

✚ La combustion

La biomasse est brûlée dans une chambre de combustion.

✚ La production de vapeur

En la brûlant, la biomasse dégage de la chaleur qui va chauffer de l'eau dans une chaudière. L'eau se transforme en vapeur, envoyée sous pression vers des turbines.

✚ La production d'électricité

La vapeur fait tourner une turbine qui fait à son tour fonctionner un alternateur. Grâce à l'énergie fournie par la turbine, l'alternateur produit un courant électrique alternatif. Un transformateur élève la tension du courant électrique produit par l'alternateur pour qu'il puisse être plus facilement transporté dans les lignes à moyenne et haute tension.

✚ Le recyclage

À la sortie de la turbine, une partie de la vapeur est récupérée pour être utilisée pour le chauffage. C'est ce que l'on appelle la cogénération. Le reste de la vapeur est à nouveau transformée en eau grâce à un condenseur dans lequel circule de l'eau froide en provenance de la mer ou d'un fleuve. L'eau ainsi obtenue est récupérée et ré-circule dans la chaudière pour recommencer un autre cycle [15].

I.3.5. L'énergie Hydraulique

Comme l'énergie éolienne qui utilise la force du vent, l'énergie hydraulique est une énergie primaire utilisant la force du mouvement d'eau (chutes d'eau, cours d'eau, courants

marin, marée, vagues), comme les barrages (Fig.I.12), les cascades...etc. L'énergie hydraulique est une manifestation indirecte de l'énergie du soleil, comme beaucoup de sources d'énergies renouvelables sur terre. Sa source est inépuisable mais contrairement à l'énergie du vent, les cours d'eau ne cessent de couler. L'énergie hydraulique est une énergie permanente qui trouve son origine dans le cycle d'eau (évaporation-précipitation) causé par le rayonnement solaire sur le globe terrestre ainsi que la force gravitationnelle qui permet à l'eau de couler de haut en bas. L'énergie hydraulique est utilisée depuis l'antiquité sous forme d'énergie mécanique pour moudre le grain dans les moulins à eau placés le long des cours d'eau. Ce principe a été perfectionné pour actionner des forges, pour carder la laine, tanner les peaux, etc., au cours de l'époque préindustrielle. Actuellement, l'énergie hydraulique est essentiellement utilisée pour produire de l'électricité, on parle alors d'énergie hydroélectrique [16].



Figure I.12: Exemple de barrage

I.3.5.1. Principe de fonctionnement

Une centrale hydraulique produit de l'électricité en utilisant la force de l'eau (Fig.I.13). L'hydroélectricité est la première énergie renouvelable dans le monde, il existe plusieurs types d'aménagement hydraulique en fonction de la hauteur de la chute (de haute chute, de moyenne chute et à la file de l'eau) et du débit de l'eau. Un barrage retient l'écoulement naturelle de l'eau, de grande quantité d'eau s'accumule et forme alors un lac de retenu. Une fois l'eau stockée, des vannes sont ouvertes au niveau du barrage pour que l'eau s'engouffre dans de longs tuyaux appelés conduite forcée, ces tuyaux à taille humaine, conduisent l'eau située en contrebas. Pour préserver le milieu aquatique, un débit minimal est maintenu dans le milieu naturel entre le barrage et la centrale. Dans la centrale, à la sortie de la conduite, la force de l'eau fait tourner une turbine qui fait à son tour tourner un générateur. A l'intérieure du générateur, l'interaction entre le rotor et les bobines de fils de

cuivre du stator produit un courant électrique, un transformateur élève ensuite la tension de ce courant à 225 ou à 400 V pour qu'il puisse être transporté plus facilement dans les lignes à très hautes tension du réseau.

Enfin, l'eau turbinée qui a perdu de sa puissance rejoint le lit naturel de la rivière par un canal spéciale appelé canal de fuite [17].

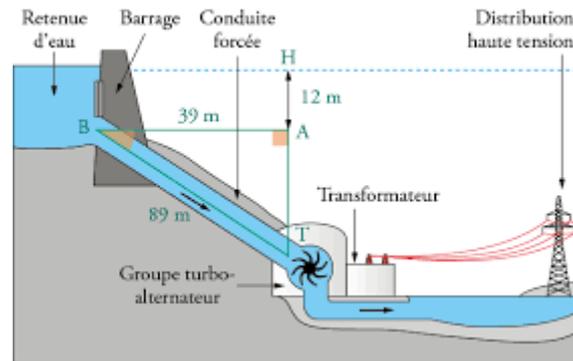


Figure I.13: Principe de fonctionnement d'une centrale hydroélectrique

I.3.5.2. Les différents types de centrales hydrauliques

Les centrales hydroélectriques sont classées en trois grandes catégories selon la hauteur de la chute d'eau et par voie de conséquence selon le débit, on trouve :

- **Les centrales de haute chute ($h > 300\text{m}$)** : Les centrales de haute chute ont des hauteurs de chute supérieures à 300 m, ces centrales se trouvent dans les Alpes et dans d'autres régions très montagneuses, la capacité du réservoir est relativement faible, elles utilisent des turbines Pelton ; est une turbine à injection partielle et à veine libre. Cette turbine ne comporte pas de diffuseur à la sortie de la roue l'eau s'écoule librement.
- **Les centrales de moyenne chute ($30 < h < 300\text{m}$)** : elles utilisent les réserves d'eau accumulées sur des courtes périodes. Ces centrales sont alimentées par l'eau retenue derrière un barrage construit dans le lit d'une rivière de région montagneuse, elles comportent un réservoir de grande capacité.
- **Les centrales de basse chute ($h < 30\text{m}$)** : ont des hauteurs de chute inférieures à 30 m elles utilisent des turbines Kaplan ou Francis, ces centrales sont établies sur les fleuves ou

les rivières à fort débit centrale Beauharnois, sur la Saint-Laurent hauteur de chute 25 m, puissance de 1575 MW, dans ce cas il n'y a pas de retenue d'eau et l'électricité est produite en temps réel [12].

I.3.5.3. Typologie des turbines hydrauliques

➤ Turbines à réaction

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

▪ Turbine Francis

La turbine Francis est utilisée pour des faibles variations de débit (débits moyens entre 100 l. s⁻¹ et 6000 l. s⁻¹), elle s'adapte bien aux chutes moyennes de 10 m à 100 m, elle a un bon rendement et une vitesse de rotation élevée (1000 tr/min) [18].

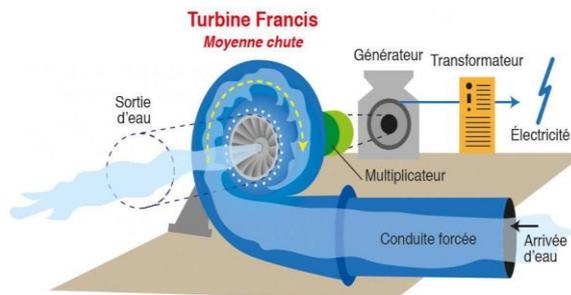


Figure I.14: Turbine Francis

▪ Turbine Kaplan

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

Kaplan Turbine:

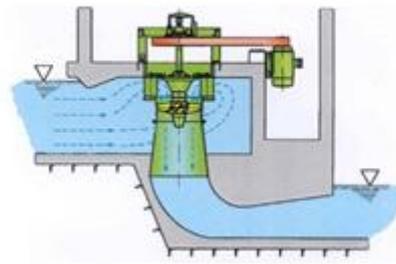


Figure I.15: Turbin Kaplan

➤ **Turbines à action**

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

▪ **Turbine Pelton**

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

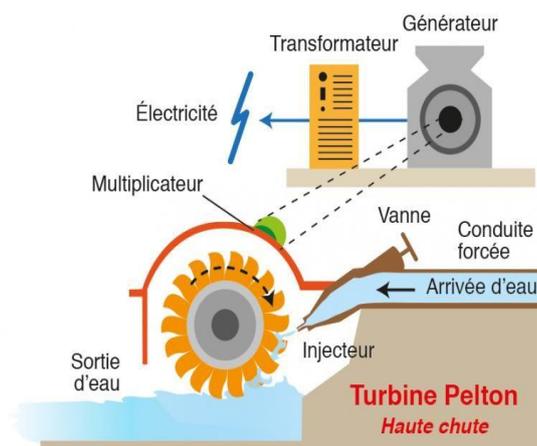


Figure I.16: Turbine Pelton

▪ **Turbine Crossflow « Banki Mitchel »**

La turbine Crossflow, est une machine à action qui a une particularité que l'eau traverse deux fois la roue. De construction simple, elle est constituée de trois parties principales : un injecteur de section rectangulaire, une roue en forme de tambour, dotée d'aubes cylindriques profilées, un bâti enveloppant la roue et sur lequel sont fixés les paliers de la turbine.

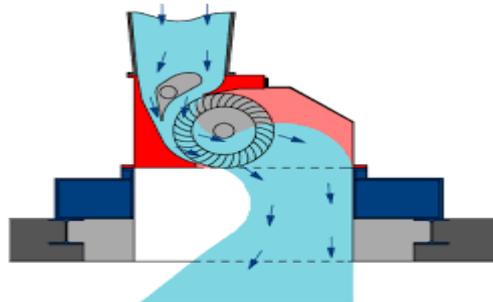


Figure I.17: Turbin Crossflow

En général sa vitesse de rotation est faible, ce qui justifie l'emploi d'un multiplicateur pour la coupler à une génératrice [18].

I.3.6. L'énergie de la mer

L'énergie des vagues est une forme particulière de l'énergie solaire. Le soleil chauffe les différentes couches atmosphériques ce qui provoque des vents qui engendrent par frottement des mouvements et qui animent la surface de la mer (courants, houle, vagues). Les vagues créées par le vent à la surface des mers, transportent de l'énergie. Lorsqu'elles arrivent sur un obstacle, elles cèdent une partie de cette énergie qui peut être transformée en courant électrique [19].

On peut citer trois grandes familles de systèmes :

- systèmes à déferlement
- systèmes à colonne d'eau oscillante
- systèmes mus par la houle

I.4. L'énergie renouvelable dans le monde et en Algérie

I.4.1. Ressources renouvelables et production d'électricité dans le monde

Selon le rapport annuel «Statistiques de capacité renouvelable 2020» de l'Agence Internationale pour les Energies Renouvelables (IRENA), un résumé de l'évolution des capacités cumulées de production d'électricité à base des principales ressources

renouvelables dans le monde sur les cinq dernières années (2015-2019), pour chacune de ces filières, est donné dans le Tableau I.1. Une brève analyse des statistiques ainsi présentées, permet déjà de dégager les premiers éléments qui pourraient aider à orienter objectivement les choix en matière de ressources renouvelables à développer dans le cadre d'une transition énergétique d'envergure.

Ainsi, selon les capacités cumulées installées à ce jour, il apparaît que la contribution de l'hydroélectricité reste encore dominante (47 %) quant à la génération d'électricité renouvelable dans le monde. Cependant, il faut remarquer que cette part qui était de 60 % il y a seulement cinq ans, a régulièrement régressé (Figure I.18) pour laisser place principalement à l'électricité éolienne (23.5 %) et solaire photovoltaïque (22.8 %) en 2019. Quant à la contribution de la biomasse et la géothermie à la production d'électricité renouvelable, elle reste faible (5.5 % en 2019) et présente une évolution très limitée.

Comme première conclusion, on peut retenir que seules l'hydroélectricité, l'éolien et le solaire peuvent à priori concourir à une production massive d'électricité et permettre ainsi une transition énergétique avec des objectifs ambitieux quant à la contribution des énergies renouvelables [20].

Tableau I.1: Capacités de production d'électricité (en GW) à base de ressources renouvelables sur les cinq dernières années

Source renouvelable primaire	2015	2016	2017	2018	2019
Hydro-électricité	1099	1129	1156	1177	1189
Eolien (On et Offshore)	416	467	514	564	623
Solaire (CSP + PV)	222	296	389	489	586
Biomasse	97	105	111	117	124
Géothermie	12	12	13	14	15
Total	1846	2009	2183	2361	2537

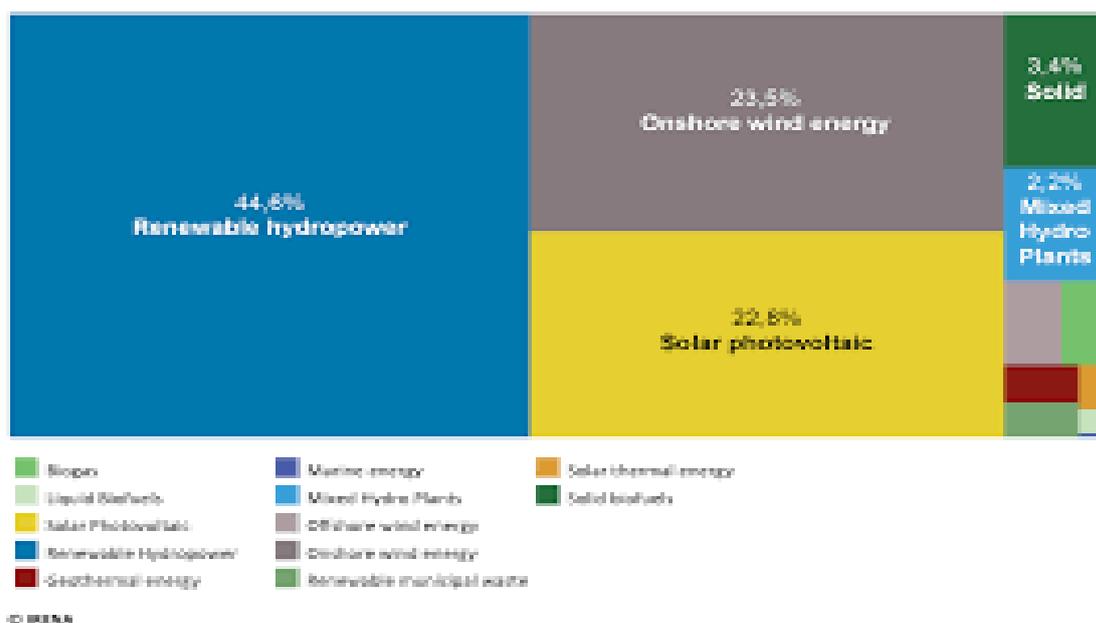


Figure I.18: Mix d'électricité d'origine renouvelable dans le monde et contribution des diverses technologies (2019)

I.4.2. L'énergie renouvelable en Algérie

Les besoins énergétiques de l'Algérie sont satisfaits presque exclusivement, par le pétrole et le gaz naturel. Ceci n'exclut pas l'intérêt des énergies renouvelables qui représente aussi beaucoup d'avantages. De ce fait, le rôle qui est dévolu aux énergies renouvelables, dans le cadre de la politique énergétique nationale, est de répondre à la demande énergétique sur les sites isolés et loin des réseaux d'électricité et de gaz naturel. La vision du gouvernement algérien s'appuie sur une stratégie axée sur la mise en valeur des ressources inépuisables comme le solaire et leur utilisation pour diversifier les sources d'énergie et préparer l'Algérie de demain. Grâce à la combinaison des initiatives et des intelligences, l'Algérie s'engage dans une nouvelle ère énergétique durable. [2]

I.4.3. Le programme national de développement des énergies renouvelables adopté

Selon le Programme algérien de développement des énergies renouvelables et d'efficacité énergétique (PENREE) de 2012, l'Algérie vise une puissance installée d'origine renouvelable de 22 000 MW d'ici 2030. Mais cinq ans plus tard, les réalisations sont très modestes : en 2017, selon l'Agence internationale de l'énergie (AIE), la part de l'éolien dans la production d'électricité n'était que de 0,01 % et celle du solaire de 0,8 %.

Pour 2015, le rapport annuel de l'AIE sur le solaire mentionne l'Algérie, annonçant qu'elle a installé 270 MWc au cours de l'année, portant sa puissance solaire totale à 300 MWc. Son rapport 2018 mentionne l'installation de 50 MWc en 2017, mais ses rapports 2019 et 2020 ne mentionnent pas l'Algérie.

Le gouvernement algérien a adopté fin février 2015 son programme de développement des énergies renouvelables 2015-2030. Une première phase du programme, démarrée en 2011, avait permis la réalisation de projets pilotes et d'études sur le potentiel national. Le nouveau programme précise les objectifs d'installations d'ici à 2030 :

- 13 575 MWc de solaire_photovoltaïque ;
- 5 010 MW d'éolien ;
- 2 000 MW de solaire_thermodynamique (CSP) ;
- 1 000 MW de biomasse (valorisation des déchets) ;
- 400 MW de cogénération ;
- 15 MW de géothermie.

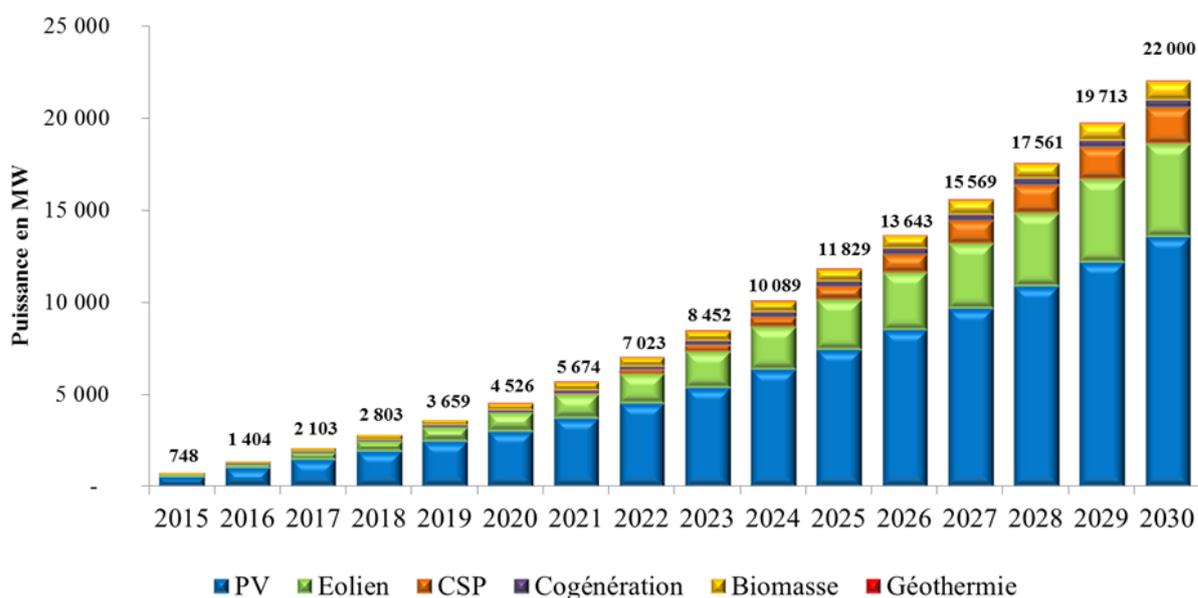


Figure I.19: Le nouveau programme précise les objectifs d'installations d'ici à 2030

Source : Ministère de l'énergie, Algérie

Le total s'élève ainsi à 22 GW, dont plus de 4,5 GW doivent être réalisés d'ici à 2020. En raison de leurs coûts encore élevés, les centrales héliio-thermodynamiques ne seront véritablement développées qu'à partir de 2021. Ce programme doit permettre à l'Algérie de produire 27 % de son électricité à partir des énergies renouvelables d'ici à 2030, afin d'épargner ses réserves en gaz. La réalisation du programme est ouverte aux investissements publics et privés, nationaux comme étrangers. Des tarifs d'achat garantis sur 20 ans ont été mis en place pour les filières photovoltaïque et éolienne. Les projets des autres filières seront financés à hauteur de 50 % à 90 %, taux variable selon la technologie et la filière, par le fonds national des énergies renouvelables et cogénération (FNERC), alimenté par un prélèvement de 1 % sur la redevance pétrolière. [21]

Chapitre II :

**Dispositif de conversion de l'énergie de la
houle**

II.1. Introduction :

Parmi toutes les énergies renouvelables dans le monde qui ont été citées dans le premier chapitre, nous allons nous intéresser plus particulièrement à l'énergie des vagues.

La houle transporte une énergie considérable. Elle résulte de l'effet du vent sur les surfaces marines. La puissance moyenne de la ressource est quantifiée en kW par mètre linéaire. La figure (II.1) présente la ressource disponible en Europe. Les côtes du Royaume-Uni, de la France et du Portugal sont particulièrement bien exposées avec des valeurs de 30 à 60 kW/m [22].

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

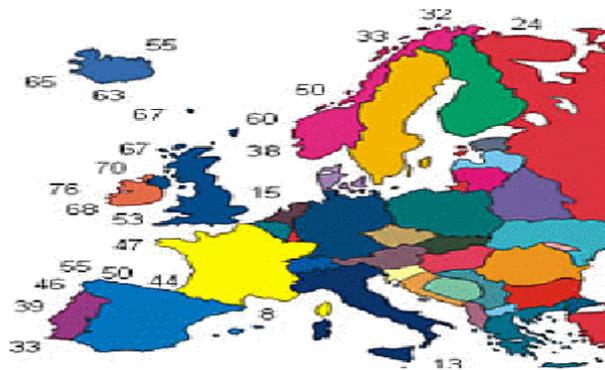


Figure II.1: Carte des ressources énergétiques de la houle en Europe (en kW/m)

II.2. Historique :

Le premier système destiné à la récupération de l'énergie des vagues est apparu au XVIII^e siècle. Celui-ci a fait l'objet d'un dépôt de brevet d'invention de quinze ans le 12 juillet 1799 par les sieurs GIRARD père et fils s'intitulait « Pour divers moyens d'employer les vagues de la mer, comme moteurs ».

En 1885, Don Jose Barrufet, inventeur espagnol, brevète un dispositif appelé « Marmotor », une série de bouées flottantes dans l'océan dont le mouvement ondulatoire de haut en bas engendré par la force motrice des vagues est transformé au travers de structures mécaniques et d'un générateur en électricité.

En 1965, Yoshio Masuda, officier de marine japonais, invente le premier convertisseur à « colonne d'eau oscillante » (Oscillating water column, QWC) destiné à l'alimentation électrique de bouées ou d'installation offshore. Avec des études menées dès les années 40, il est considéré comme le père des technologies modernes de récupération de l'énergie des vagues. Le principe de son convertisseur, basé sur une turbine à air, a été utilisé pour l'implantation de plus de mille bouées de navigation dans le monde entier.

En réponse à la crise pétrolière, la recherche dans le domaine de l'extraction de l'énergie des vagues a réellement commencé dans les années 70 dans plusieurs pays. Au Japon, après le succès des bouées à turbine à air de Masuda, le JAMSTEC (Japon Marine Science and Technology Center) crée en 1971, construit en 1976 le premier prototype flottant de convertisseur à grande échelle à être déployé au large. Le KAIMEI est une large barge de 80 mètres sur 12 utilisée en 1978 et 1979 comme plateforme de tests avec à son bord jusqu'à 9 OWC équipées de turbines à air différentes.

De 1975 à 1982, le gouvernement britannique autorisa un programme de recherche et développement d'envergure sur l'énergie des vagues, dirigé par Clive Grove-palmer. Le Department Of Energy (DOE) soutient financièrement durant cette période plusieurs projets :

- Le « Duck » de Stephen Salter ;
- Le « NEL OWC », un système à colonne d'eau développé par le National Engineering Laboratory(NEL) à East Kilbride en Ecosse ;
- Le « wave-contourig raft » communément appelé «Cockerell raft », un flotter (ou radeau) articulé développé par Sir Christopher Cockerell, ingénieur britannique.

Cette première génération de systèmes était très majoritairement shoreline, les inconvénients majeurs étant leur impact visuel et l'obligation de s'adapter à la topologie côtière. Depuis le début du XXI siècle, une seconde génération de systèmes, que nous allons présenter dans la suite de ce chapitre [23].

II.3. Caractéristiques énergétiques de la houle :

II.3.1. Caractéristiques principales de la houle :

Les paramètres ondulatoires de la houle sont :

- H : Hauteur (dénivellation maximale entre une crête et un creux successif)
- L/λ : Longueur d'onde (distance séparant deux crêtes successives)
- T : La période (temps qui sépare le passage de deux crêtes successives en un point fixe)
- a/η : Amplitude (égale à la moitié de la hauteur)
- $g/\epsilon c$: Cambrure (rapport H/L)
- c : Célérité (la vitesse moyenne de propagation des crêtes, i.e. L/T)
- d/h : Profondeur (la profondeur au repos)
- ϵH : Hauteur relative (rapport H/a)
- $\epsilon \lambda$: Longueur d'onde relative (rapport L/a)
- ϵU : Paramètre d'Ursell $\epsilon U = \epsilon c \cdot \epsilon \lambda$ [25]

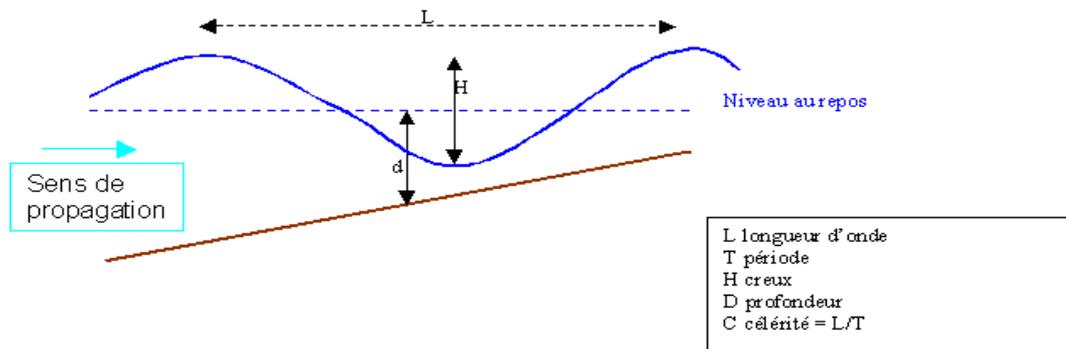


Figure II.2 : Schéma d'une houle avec ses paramètres ondulatoires

II.3.2. Evaluation du potentiel :

La puissance d'une vague progressive pure (parfaitement sinusoïdale et unidirectionnelle) peut se calculer assez aisément si la profondeur du milieu dans lequel elle se propage est supposée infinie (en pratique plus grande que la demi-longueur d'onde). Dans ces conditions, on peut démontrer que la puissance (moyenne) transmise par unité de largeur de front de vague dans la direction de propagation s'exprime par :

$$P_w = \frac{\rho \cdot g^2}{32\pi} H^2 \cdot T \quad (w/m) \quad (II.1)$$

Où ρ est la masse volumique de l'eau, g l'accélération de la pesanteur, H est la hauteur crête à creux de la houle et T sa période. Avec de l'eau de mer (masse volumique de 1024

kg/m³), le coefficient $\frac{\rho \cdot g^2}{32\pi}$ vaut environ 980 unités SI. Pour une mer irrégulière dont le spectre est spécifié par la hauteur significative H_s et sa période T_p on obtient :

$$P_w \approx 42 \cdot 0.H^2s.T_p \text{ (W/m)} \quad (\text{II.2})$$

L'énergie électrique effectivement récupérée dépend ensuite de la largeur de houle captée, de l'efficacité du dispositif de conversion et de la productivité du site considéré [26].

II.4. Ressource mondiale :

En mesurant la houle en différents points du globe sur plusieurs années, on est en mesure de dresser des cartes de la ressource moyenne disponible (figure II.3). En intégrant ces chiffres sur l'ensemble des mers du globe, on obtient une estimation de la ressource disponible. Ainsi, l'Agence internationale de l'énergie (IEA : <http://www.iea.org>) estime que l'énergie extractible dans le monde est d'environ 1500 TWh/an, soit 7% de la demande annuelle mondiale actuelle en électricité. La puissance théorique du flux d'énergie des vagues arrivant sur la littorale la France par exemple est estimée à 40 kW/m.

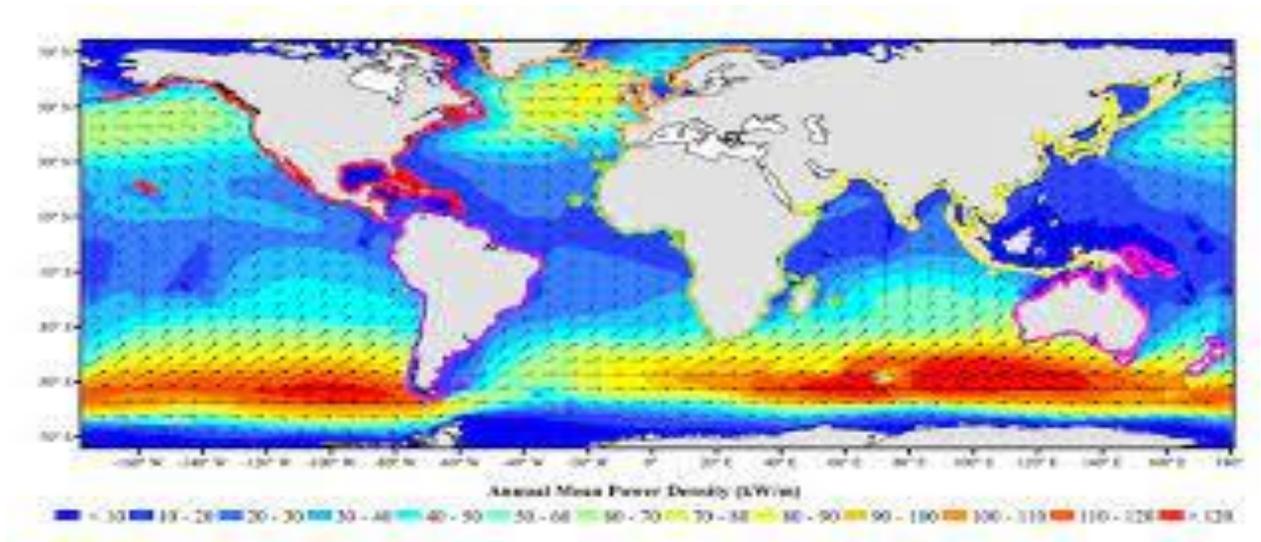


Figure II.3: Distribution mondiale de la ressource énergétique moyenne de la houle

Les principaux pays pouvant profiter de cette énergie sont donc ceux possédant des longueurs de côtes importantes et situés aux latitudes les plus productives :

- en Amérique : les États-Unis, le Canada et le Chili

- en Afrique : le Maroc, la Namibie et l'Afrique du Sud
- en Océanie : l'Australie et la Nouvelle-Zélande
- en Asie : la Russie, le Japon, la Corée, l'Inde et la Chine
- en Europe : la Norvège, le Royaume-Uni, l'Irlande, le Danemark, la Belgique la France, l'Espagne et le Portugal [26].

II.5. Les dispositifs de conversion d'énergie houlomotrice :

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

II.5.1. Les systèmes à corps oscillants ou mus par la houle (Oscillating Bodies ou Wave Activated Bodies) :

Dans ce cas-ci, le passage de la vague actionne des systèmes articulés dont le mouvement relatif, par rapport à une référence (fixe ou mobile), permet la conversion d'énergie. Ce type de technologie exploite soit le mouvement de la vague proprement parler, et nous aurons plutôt des systèmes flottants, soit la différence de pression qu'elle crée à son passage, auquel cas, les systèmes seront plutôt immergés [27].

II.5.1.1. Le Pelamis : Le Pelamis, nommé ainsi en référence au monstre marin de la mythologie grecque, est un long serpent rouge frétilant dans les vagues. Le mouvement des vagues agit dans chaque articulation de la structure et est utilisé pour produire de l'électricité. Ce type de convertisseur est développé par la société écossaise Océan Power Delivery (OPD). Il a une longueur de 150m, un diamètre de 3,5m, un poids d'environ 700t et fourni une puissance de 750kW.



Figure II.4: Le convertisseur Pelamis

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

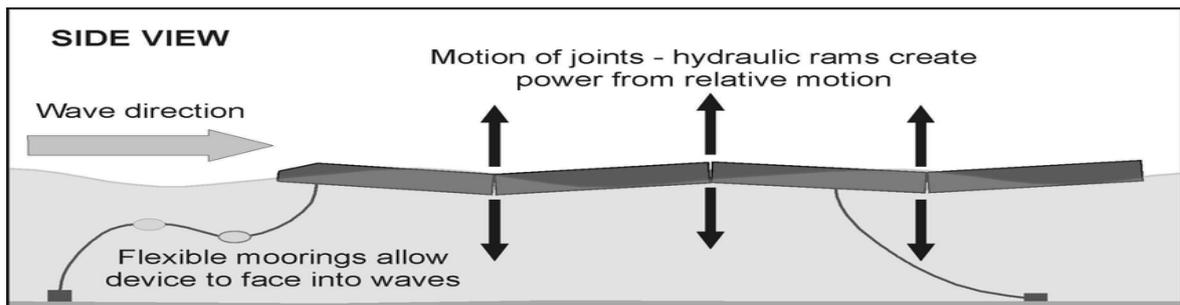


Figure II.5: Principe de Pelamis

Le « *serpent des mers* » (Pelamis) offre l'avantage de ne pas avoir de fondation, réduisant ainsi les frais de son installation. Il est tout simplement remorqué et amarré en mer. De plus, sa mobilité permet une maintenance aisée, maintenance faite après remorquage à terre. Mais son inconvénient réside en la complexité et les grandes dimensions de ses composants [7].

II.5.1.2. Le SEAREV :

Le système SEAREV (Système Électrique Autonome de Récupération de l'Énergie des Vagues) appartient à la dernière catégorie des systèmes présentés, à savoir les corps

mus par la houle. Le concept du SEAREV a été développé par Alain Clément, ingénieur de recherche CNRS au laboratoire de mécanique des fluides (LMF) de l'école Centrales de Nantes. Le LMF est en charge du projet global et plus particulièrement de la partie hydrodynamique dont il est spécialiste. La partie contrôle est étudiée quant à elle à l'Ircsyn de l'école Centrales de Nantes. Enfin la conversion électromécanique d'énergie est traitée par l'équipe du SATIE dans le cadre de cette thèse.

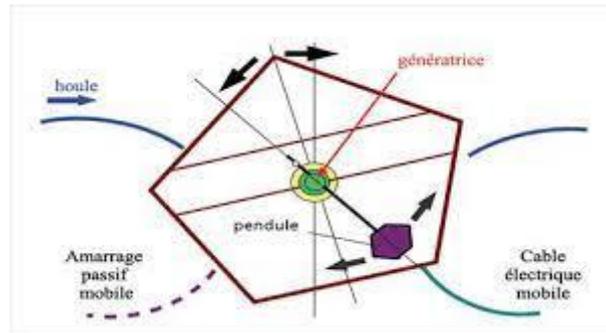


Figure II.6: Principe du système SEAREV

Il est composé d'un corps flottant, complètement clos, dans lequel est suspendu un volant rotatif à masse excéntrée. Sous l'action de la houle, le flotteur, comme la masse interne, développent des mouvements qui leur sont propres. Le mouvement relatif entre le flotteur et la masse mobile est alors mis à profit pour actionner le générateur électromécanique (Fig.II.7). Le volant s'apparente à un pendule. Les équations du mouvement du flotteur sont également (en négligeant les mouvements de translation) celles du pendule simple. La dynamique du système complet est donc celle d'un double pendule, c'est à dire un système de deux oscillateurs mécaniques couplés, pourvu de deux pulsations de résonance. Nous récupérons l'énergie en freinant plus ou moins le mouvement du volant. L'absorption d'énergie est maximale en houle régulière aux résonances du système, et faible lorsque les pulsations de la houle et du système ne sont plus accordés. Il constitue en quelque sorte un amortisseur actif et récupératif. La conception d'un générateur adapté à la houle doit avant tout tenir compte de la nature des sollicitations, notamment de leur complexité. Le dimensionnement et l'optimisation d'un tel système nécessite la prise en compte du couplage relativement fort existant entre les phénomènes physiques : hydrodynamiques - mécaniques - électriques (contrôle) [22].

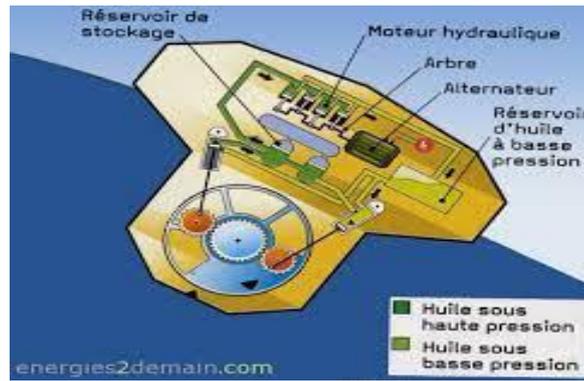


Figure II.7: Le convertisseur SEAREV

II.5.1.3. Le système Archimède Wave Swing (AWS) :

L'appareillage du système Archimède Wave swing (AWS) est très simple et ne nécessite pas de technologie très avancée, en effet la seule difficulté vient de la taille et des proportions inhabituelles que doivent prendre les différents composants du système AWS. Le système se compose d'un cylindre hermétique en acier, fixé à un guide vertical lui-même accroché au fond marin. Le cylindre se compose d'un cylindre mobile supérieur ou « flotteur » compris entre 10 et 20m de diamètre, et d'un cylindre fixe inférieur [29]. A l'intérieur du flotteur on trouve un système de générateur linéaire composé d'une bobine solidaire du cylindre fixe et d'une colonne d'aimants de polarités inverses solidaire du cylindre mobile.

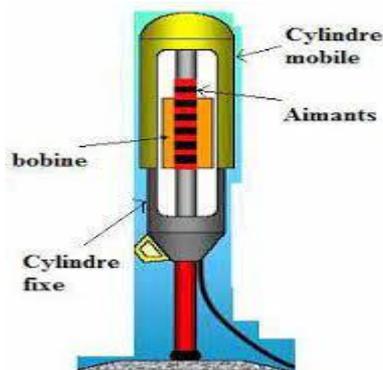


Figure II.8: Principe du système AWS

Le principe de fonctionnement est relativement simple, comme son nom l'indique le système Archimède Wave swing s'appuie sur la poussée d'Archimède, en effet le flotteur est rempli de gaz, généralement de l'air, bien sûr moins dense que l'eau, ce qui implique que la poussée d'Archimède s'appliquant sur le gaz va pousser le flotteur vers le haut. A

l'approche de la crête de la vague, la pression de l'eau sur le haut du cylindre augmente et la partie supérieure ou " flotteur " comprime le gaz dans le cylindre pour équilibrer la pression. Le mécanisme inverse se produit au passage du creux de la vague avec une expansion dans le cylindre. Le mouvement relatif entre le flotteur et la partie inférieure ou " silo " est converti en électricité à l'aide d'un système hydraulique et d'un groupe convertisseur. Ce groupe convertisseur composé de la bobine et de la colonne d'aimants va agir de la façon suivante : la colonne d'aimants de polarités différentes étant solidaire du flotteur va donc osciller de bas en haut en suivant la fréquence de la houle au contact de la bobine fixe. L'alternance des aimants polarisés nord ou sud dans la bobine induit un courant électrique récupéré par un réseau de câbles sous-marins [29].

II.5.2. Les systèmes à franchissement ou à rampe de déferlement (Overtopping Device) :

Les vagues sont capturées dans un réservoir dont la hauteur est supérieure au niveau moyen de la mer. Des rampes de déferlement peuvent être installées de façon à élever la vague au niveau du réservoir. Lorsque l'eau accumulée dans ce réservoir s'échappe, on récupère l'énergie potentielle stockée, par exemple, au moyen de turbines hydrauliques [27].

II.5.2.1. TAPCHAN (Tapered Channel – canal convergent):

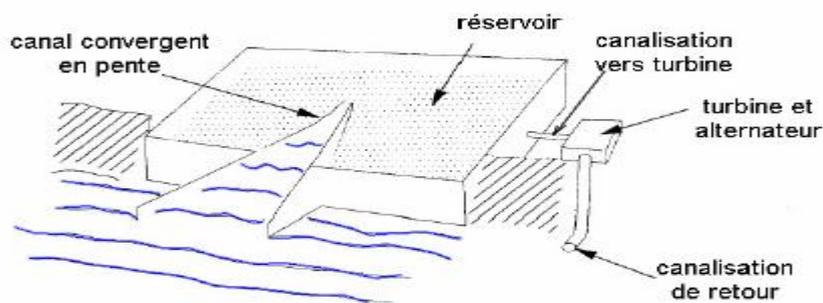


Figure II.9: Le convertisseur TAPCHAN

Les systèmes à canaux entonnoirs fonctionnent de manière très semblable à une centrale hydroélectrique, avec un barrage pour faire monter le niveau de l'eau et un réservoir pour la mettre en réserve. Le modèle TAPCHAN a été expérimenté en 1985 sur la côte norvégienne, à Toftestallen avec une puissance de 350 kW. Dans ce cas (modèle TAPCHAN), l'eau vient de l'océan sous forme de vagues. Les vagues sont orientées vers

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

Le système Tapchan a l'avantage d'avoir peu de pièces mobiles et permet de produire de l'énergie sur demande. Mais son inconvénient majeur est l'encombrement que représente le réservoir [28].

II.5.2.2. Le WaveDragon :

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



Figure II.10: Photographie du dispositif à échelle réduite

Les deux immenses bras fixes de forme parabolique font converger les vagues vers le centre de l'engin. L'eau qui monte sur le socle central est d'abord amenée dans un

réservoir surélevé. Une trappe s'ouvre avec les vagues pour laisser passer l'eau qui actionne ensuite une turbine de type Kaplan en retombant dans la mer.

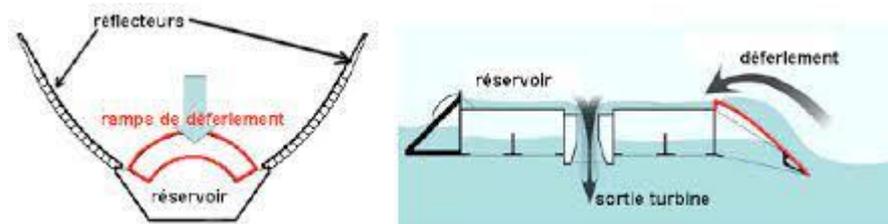


Figure II.11: Le système Wave Dragon

Le Wave Dragon est un dispositif offshore, flottant et amarré. Il est lié au fond par un système d'ancrage. Il possède des chambres de lestage permettant d'ajuster sa ligne de flottaison en fonction de la houle incidente. Il est équipé de 16 turbines basse chute permettant d'évacuer l'eau du réservoir [29].

II.5.3. Les systèmes à colonne d'eau oscillante (Oscillating Water Column) :

Les systèmes à colonne d'eau oscillante (CEO) ou Oscillating Water Column (OWC), sont onshore ou peuvent être flottants. Ils sont constitués de (figure II.12) :

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

Lorsque les vagues entrent dans la chambre (figure II.12.a) la hauteur d'eau augmente entraînant par pression une augmentation de l'air présent dans la colonne. L'air sous pression est propulsé vers le haut de la colonne où se situe la turbine qui est alors mise en rotation par le flux. Lorsque la vague se retire (figure II.12.b) le flux d'air dans la colonne s'inverse à nouveau la turbine. Celle-ci est conçue pour tourner dans le même sens quelle que soit la direction du flux d'air. La surface de l'eau se comporte donc comme un piston qui chasse et aspire alternativement de l'air dans un cylindre.

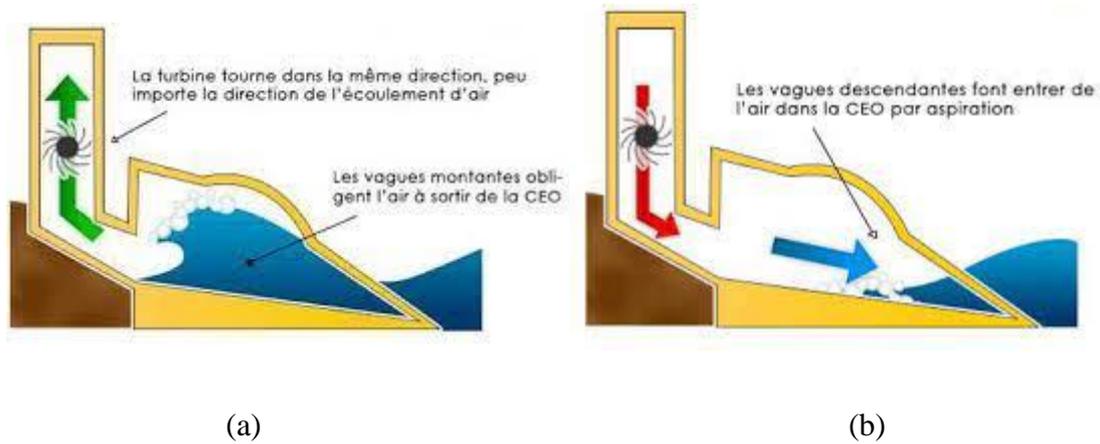


Figure II.12: Le système à colonne d'eau oscillante

Le calcul de l'énergie cinétique contenue dans le flux d'air présent dans la chambre est similaire à celui utilisé pour les éoliennes. La puissance extractible du flux d'air présent dans la chambre d'un OWC peut être exprimée par la relation suivante :

$$P = pvS + \frac{\rho v^3 S}{2} = \left(p + \frac{\rho v^2}{2}\right)vS \quad (\text{II.3})$$

Avec P la puissance disponible sur la turbine dans la chambre, v la vitesse de l'air, S la surface balayée par la turbine, p la pression de l'air et ρ la densité de l'air [23].

Basé sur le prototype de 75 KW construit en 1991 par le Queens University of Belfast (QUB), le LIMPET 500 (Land Island Marine Powered Energy Transformer – 500 KW) de la société britannique wavegen est un système onshore de 500 KW installé en 2000 sur la côte l'île d'Islay, à l'Est de L'Ecole, où le potentiel est de 10 à 20 KW/m (figure)

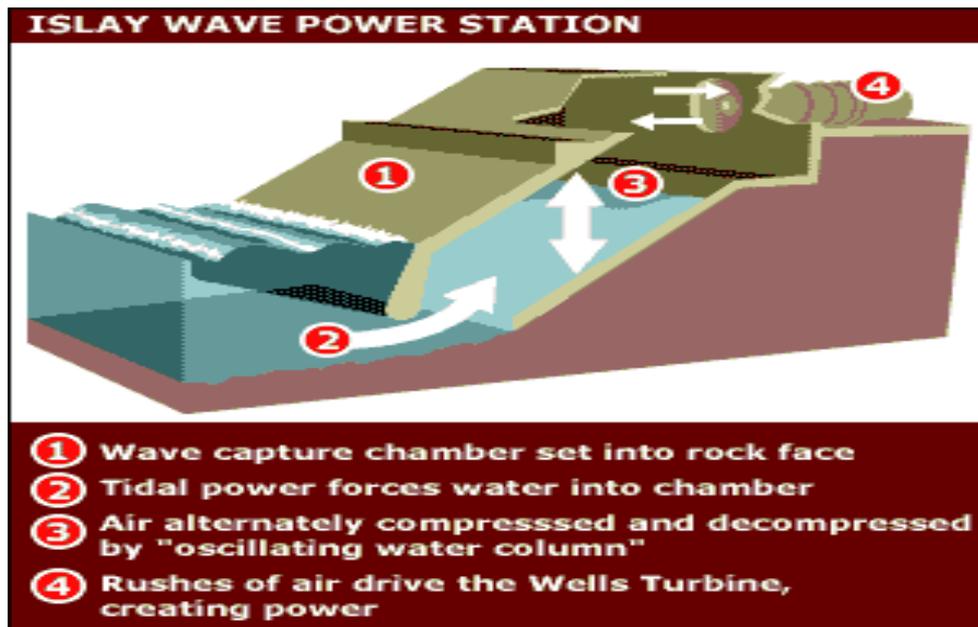


Figure II.13: Vue 3D du LIMPET 500

Son fonctionnement repose sur le principe des colonnes d'eau oscillantes qui sont ici au nombre de trois et dont la section de 6 mètres sur 6 mètres de chaque collecteur incliné à 40° autorise une surface totale de captation de 169 m². La conversion électromécanique est assurée par deux turbines Wells à 7 pales de 2,6 mètres de diamètre chacune directement couplées à un générateur asynchrone à rotor bobiné de 250 KW dont la vitesse de rotation varie entre 700 et 1500 tr/min pour une tension nominale de 400 V. Le système est connecté au réseau électrique triphasé 11 KV britannique. [23]

Chapitre III :

**Réalisation du dispositif de récupération
de l'énergie houlomotrice**

III.1. Introduction :

Dans le présent chapitre nous présentons le dispositif expérimental réalisé au laboratoire de Génie Electrique. Nous décrivons les différentes parties qui les composent et le principe de fonctionnement du prototype.

III.2. Description du dispositif

Le dispositif repose sur la conversion de l'énergie cinétique des vagues en énergie électrique. Pour cela, il y a deux conditions principales :

- La première la forme des vagues est sinusoïdales ;
- Le deuxième le mouvement des vagues est unidirectionnel.

III.3. Les composants du dispositif prototype

La figure III.1 montre le prototype de récupération de l'énergie de la houle réalisé au laboratoire. Il se compose de :

- Deux flotteurs
- Roue libre : conversion unidirectionnel du mouvement ;
- Chaines de transmission ;
- Multiplicateur de mouvement ;
- Machine électrique.

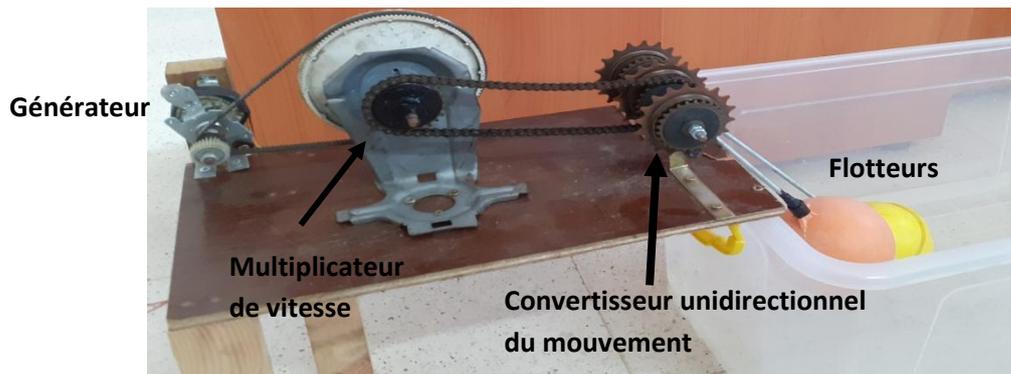


Figure III.1 : Le dispositif prototype

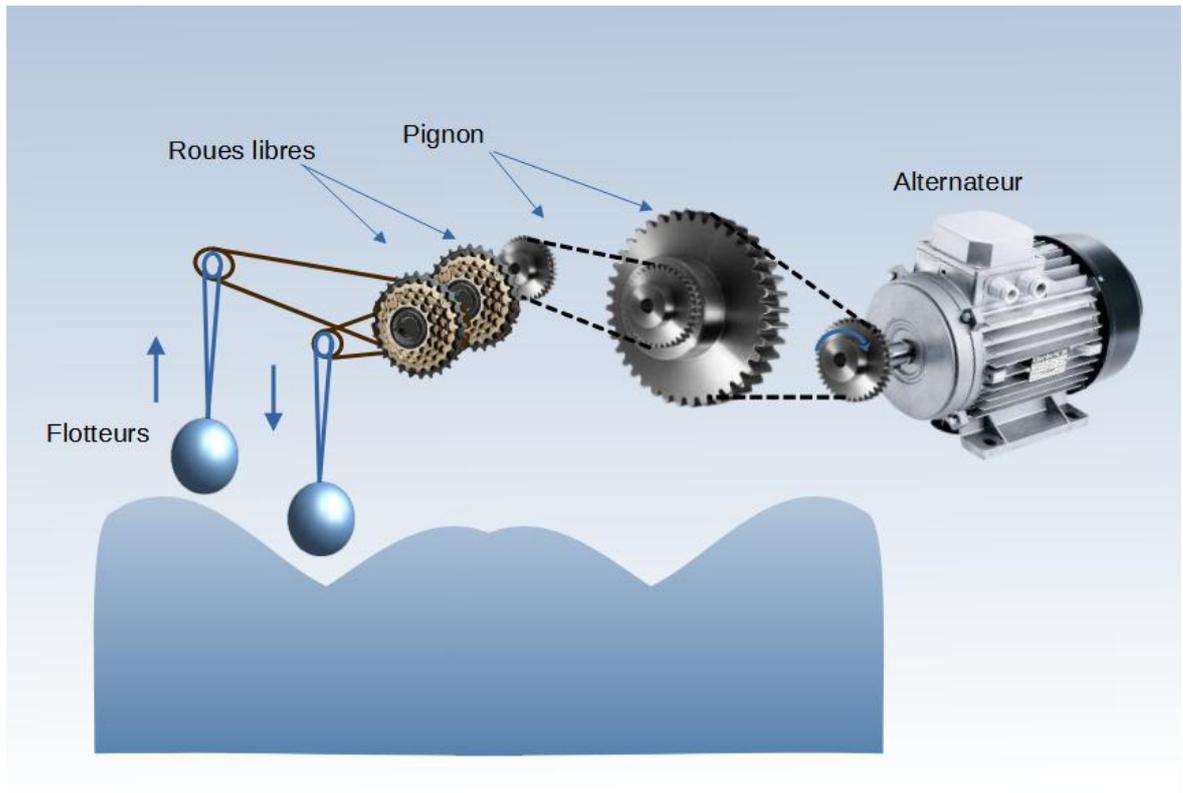


Figure III.2: Schéma de principe du dispositif

III.4. Principe de fonctionnement :

Le dispositif consiste à convertir le mouvement ondulatoire de l'eau en un mouvement rotatif continu, qui va servir à l'entraînement d'un alternateur. Le défi dans ce cas réside dans la conversion du mouvement à travers un système mécanique qui doit contenir moins de pièces tournantes possibles. A cet effet, la conversion tient compte de :

- La transformation du mouvement vertical des flotteurs en rotation
- La rotation doit être aussi continue que possible (éviter les à-coups)
- Profiter aussi bien de la période de montée que celle de descente de l'eau.
- Vitesse de rotation suffisante pour l'entraînement de l'alternateur.

Afin de répondre à toutes ces exigences la partie mécanique comporte essentiellement deux parties :

- Conversion unidirectionnel du mouvement
- Multiplication de la vitesse

III.4.1. Conversion unidirectionnel du mouvement

Deux pignons à roue-libre, reliés au même axe, servent à transformer le mouvement vertical des flotteurs en un mouvement rotatif. Les boules flottantes sont reliées aux roues libres par des bras. La longueur des bras reliant les flotteurs aux roues libres est différente afin de maximiser la récupération du mouvement et réduire les fluctuations du mouvement (Fig. III. 3). Lorsque les flotteurs sont installés à différentes distances de l'axe de rotation, le mouvement sera moins fluctuant que dans le cas où les deux seraient en même distance. De plus, le principe de la roue libre permet un mouvement libre de chaque flotteur. Ainsi, plus l'amplitude de l'onde est importante plus la rotation sera grande. De même, une fréquence élevée de l'onde (succession des pics d'amplitudes), plus le mouvement sera continu.



Figure III.3 : Conversion unidirectionnel du mouvement

III.4.2. Multiplicateur de vitesse

Le mouvement récupéré du déplacement des flotteurs peut ne pas engendrer une vitesse de rotation suffisante à l'alternateur. Il devient ainsi impératif d'augmenter la vitesse à travers un système de pignons multiplicateur de vitesse (Fig.III.4).



Figure III.4 : Multiplicateur de vitesse

Le multiplicateur de vitesse est une roue auxiliaire avec une taille plus importante que celle de roue libre et placée juste avant le générateur électrique afin d'augmenter le nombre de tour du rotor. Ceci améliore considérablement les caractéristiques de l'énergie électrique produite notamment la fréquence.

Le rapport des diamètres des roues permet de calculer la vitesse résultante :

$$\text{Le rapport de diamètre} = \frac{\text{diamètre de la roue menante}}{\text{diamètre de la roue menée}}$$

Un rapport supérieur à 1 signifie une augmentation de vitesse.

III. 4.3. La partie électrique

Il existe différents types générateurs qui peuvent être utilisés pour la conversion de l'énergie des vagues :

- à induction (asynchrone) ;
- à aimants permanentes (famille des synchrones) ;
- à réluctance variable (famille des synchrones).

Les machines synchrones à aimants permanentes sont considérées comme étant les plus adaptées pour la conversion directe de l'énergie des vagues.

Pour cela on utilise dans ce dispositif une machine électrique synchrone à aimants permanentes, de type Synchronous Motor TYJ dont les caractéristiques : AC 220 – 240 V, 50/60 Hz 4W (vitesse réduite : 5/6 tr/min). Grâce à l'aimant permanent le générateur n'aura pas besoin d'un système d'excitation externe, chose qui allègera et rend le dispositif simple.



Figure III.5 : Le générateur

Conclusion générale

La diversification du bouquet énergétique d'un pays exige la considération de toutes les ressources renouvelables possibles. L'énergie de la houle offre, en effet, plusieurs avantages à savoir :

- Production en masse de l'énergie
- Système compact et modulaire
- Différents schémas et principe peuvent être employés

L'Algérie avec 1200 Km de cote pourra bénéficier de cette technologie, relativement simple, pour diversifier ses ressources énergétiques.

Enfin, le dispositif réalisé pourra être amélioré d'avantage en lui ajoutant un amplificateur de mouvement afin de capter même les ondes de faibles amplitudes. Cela permettra son usage dans des lacs ou éventuellement des barrages.

Bibliographie

- [1] <http://dspace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/1067/8/introduction-generale.pdf>
- [2] Energ2020Programme des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique", Ministère de l'Energie et des Mines, mars 2011.
- [3] GUILHEM Dellinger, "Etude expérimentale et optimisation des performances hydrauliques des vis d'Archimède utilisées dans les micros centrales hydroélectriques ", Thèse de Doctorat, Université de Strasbourg, 2015.
- [4] "BP Statistical Review of World Energ2020", <https://www.connaissancedesenergies.org/bp-statistical-review-world-energy-2020-les-chiffres-cles-de-lenergie-dans-le-monde-220218>
- [5] FABIENNE Collard, "Les énergies renouvelables ", Courrier hebdomadaire N° : 2252-2253,2015.
- [6] Bernard Thonon, "Question de physique autour de l'énergie solaire", CEA, Paris.
- [7] "Energie solaire photovoltaïque", http://www.energiesrenouvelables.org/solaire_photovoltaique.asp
- [8] MENZER Meryem, "Analyse des performances d'un réseau électrique en présence des sources à énergie renouvelable ", Mémoire de Master, Université de Biskra, Juin 2018.
- [9] MAZED EL-Hanin, "Commande MPPT basée sur les informations fournies par les cellules de contrôle photovoltaïques et les réseaux de neurones artificiels ", Mémoire de Ingénieur d'Etat, Université de Tizi-Ouzou, 2008.
- [10] "Principe de fonctionnement de l'énergie éolienne" <http://www.hydroquebec.com/comprendre/eolienne/>
- [11] FREDREC Poitiers, "Etude et Commande de Génératrices Asynchrones pour l'utilisation de l'Energie Eolienne, Machine asynchrone à cage autonome; Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau ", Thèse de Doctorat, Université de Nantes, 2003.
- [12] MEKKI Mounira, "Récupération des déperditions d'énergie dans les complexes industriels et leur conversion en énergie électrique exploitable ", Thèse de Doctorat université de Annaba, 2014.

- [13] AMMAR Hachmei, “Modélisation énergétique et optimisation économique d’un système hybride dédié au pompage”, Thèse de Doctorat, Université de Biskra, Février 2017.
- [14] Alain Damien, “ la biomasse énergie”, Editions : DUNOD - 2^{ème} édition, 2008.
- [15] “le fonctionnement d’un centrale biomasse”, <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/le-fonctionnement-d-une-centrale-biomasse#:~:text=Une%20centrale%20biomasse%20produit%20de,turbine%20rel%20i%20C3%A9e%20%20C3%A0%20un%20alternateur.>
- [16] BOUALEM Boukezata, “Etude et commande d’une chaîne de conversion d’énergie d’un système solaire photovoltaïque ”, Thèse de Doctorat, Université de Sétif 1.
- [17] NGALEKIRA Rolmie Marlande, “Utilisation de l’énergie hydraulique des barrages dans la protection des écosystèmes : Impact sur l’environnement ”, Mémoire de Master, Université de Khemis Miliana, 2021.
- [18] MOHAMED Nasser, “Supervision de sources de production d’électriques hybrides éolien/hydraulique dans les réseaux d’énergie interconnectés ou isolés ”, Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers en France, Mai 2011.
- [19] MEKKAOUI Ali, “Contrôle intelligent des puissances dans un réseau électrique constitué de sources d’énergies renouvelables ”, Thèse de Doctorat Université de Sidi Belabes, juillet 2021.
- [20] “transition énergétique en Algérie”, www.cerefe.gov.dz.
- [21] “Energie en Algérie”
https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_en_Alg%C3%A9rie#cite_note-k-60-2
- [22] MARIE Ruellan, “Méthodologie de dimensionnement d’un système de récupération de l’énergie des vagues’”, Thèse de Doctorat, École Normale Supérieure de Cachan, 2007.
- [23] ROBYNS Benoît, DAVIGNY Arnaud, FRANÇOIS Bruno, HENNETON Antoine, SPROOTEN Jonathan, “Production d’énergie électrique à partir des sources renouvelables” Edition: Lavoisier, 2012.
- [24] Aurélien Babarit, Jean-Marc Rousset, Hakim Mouslim, Judicael Aubry, Hamid Ben Ahmed, Bernard Multon, “La récupération de l’énergie de la houle,

partie 1 : caractérisation de la ressource et bases de l'hydrodynamique'', Société de l'électricité, de l'électronique et des technologies de l'information et de la communication, pp.17-25, 2009.

- [25] “Houle et vagues”,
[file:///C:/Users/HP/Downloads/Rapport_P6_2021_46%20\(3\).pdf](file:///C:/Users/HP/Downloads/Rapport_P6_2021_46%20(3).pdf)
- [26] T. Kovaltchouk, H. Ben Ahmed, B. Multon, J. Aubry Houlogénérateurs : “projets, verrous et quelques solutions”, ENS Rennes, Université Bretagne Loire, CNRS, 35170 Bruz.
- [27] SEBASTIEN Olaya, “Contribution à la modélisation multi-physique et contrôle optimal d'un générateur houlomoteur - Application à un système ”deux corps”, Thèse de Doctorat, Université de Bretagne, Septembre 2016 ;
- [28] HOUNGBO Boris Anselme G, “Contribution à la conception d'un convertisseur d'énergie houlomotrice”, Université de Abomey-Calavi, 2010.
- [29]: “Energie Houlomotrice Groupe4 M2GH”, <https://pdfcoffee.com/energie-houlomotrice-groupe4-m2gh-pdf-free.html>