الجمهـــوريـــــة الجزائـــريـــــة الديمقـــراطيـــــة الشـعبيـــة
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التـــعـلـيـــــم العـــــالـــــي والبـــحـــــث العـلمـــــي
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أ حمد
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة و الأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département de maintenance en électromécanique

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière: maintenance industrielle

Spécialité :Électromécanique

Thème

ETUDE ET CONCEPTION D'UNE HYDROLIENNE

Présenté par :

SEBAHI IBRAHIM **YAAKOUB SEHAILIA**

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
TALHI Mama.	**MCA**	**IMSI.**	**Présidente**
BELARIFI Farid	**Professeur**	**IMSI**	**Encadreur**
ADJLOUA Abdelaziz	**MCA**	**IMSI**	**Examinateur**

Année 2024/2025

Remerciements

Je remercie tout particulièrement mon Directeur de mémoire Monsieur ***BELARIFI FARID*** *de l'université* ***d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed****-Institut de* ***maintenance et de sécurité industrielle****, qui a eu l'excellente initiative de proposer ce thème sur la conception d'une hydrolienne. Sa patience, sa disponibilité, ses conseils avisés et son soutien constant ont été d'une valeur inestimable tout au long de la réalisation de ce projet.*

Je suis profondément honoré(e) par la participation de Madame/Monsieur [Nom du Président du jury] de l'université ***d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed****-Institut de* ***maintenance et de sécurité industrielle*** *qui a accepté de présider le jury de notre soutenance. Sa présence et son expertise ont grandement enrichi ce travail.*

Mes remerciements s'adressent également à Madame/Monsieur [Nom de l'Examinateur] de l'université ***d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed****-Institut de* ***maintenance et de sécurité industrielle*** *pour avoir pris le temps d'examiner ce mémoire avec attention et pour sa contribution précieuse lors de la soutenance.*

Enfin, je tiens à exprimer ma gratitude à toute ma famille, en particulier mes parents, pour leur soutien indéfectible. Je remercie également toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce projet.

Dédicaces

Je dédie humblement ce travail à :

- Mes chers parents, pour leur amour inconditionnel, leurs sacrifices constants, leur soutien indéfectible et leurs encouragements sans cesse renouvelés.
- Mon frère bien-aimé, mes sœurs, ma grand-mère et mes cousins, pour leur affection, leur présence et leur soutien tout au long de ce parcours.
- Mes amis et collègues de l'IMSI, pour les moments partagés, leur entraide et leur camaraderie précieuse.

Résumé

Les hydroliennes jouent un rôle clé dans la production d'énergie renouvelable en exploitant l'énergie des courants aquatiques pour alimenter des systèmes électriques. Leur conception exige une attention particulière à l'efficacité énergétique et à la durabilité face aux contraintes mécaniques et environnementales, notamment la cavitation. Ce mémoire explore la conception d'une hydrolienne à axe horizontal, inspirée par des modèles tels que la Dual Nozzle XJ25-3.0DCTF4-Z, destinée à des applications domestiques et agricoles. La modélisation s'est concentrée sur l'optimisation de la géométrie des pales, la gestion des flux hydrodynamiques et l'intégration avec des systèmes de stockage d'énergie et d'irrigation. À travers des simulations numériques, nous avons amélioré la performance énergétique tout en réduisant les pertes liées à la cavitation, offrant ainsi une solution viable pour une électrification durable et décentralisée.

Mots clés : Hydrolienne, Énergie hydrocinétique, Conception de pales, Cavitation, Stockage d'énergie, Agriculture.

Introduction Générale....1

Chapitre1 : Les différents modes de production de l'énergie électrique

1.Introduction 3
2. Différentes formes et sources d'énergies 3
3. Rôle Central de l'énergie électrique dans les Sociétés Modernes 4
3.1.Principes de Base 4
3.2.Enjeux Énergétiques et Environnementaux....4
3.3.Vers une Transition Durable....5
4.Les différents procédés d'obtention de l'énergie électrique....5
4.1.Centrales Thermiques à énergie fossiles (à Charbon, Gaz, Fioul)....6
4.1.1. Les carburants issus du pétrole 6
4.1.2 Le charbon 7
4.1.3. Le gaz 7
4.1.4 Fonctionnement....8
4.1.5 Avantages....8
4.1.6 Inconvénients 8
4.1.7 Impact Environnemental....9
4.2. Centrales Hydrauliques 9
4.2.1. Avantages....10
4.2.2. Inconvénients 10
4.3. Centrales Nucléaires....11
4.3.1. Fonctionnement....11
4.3.2. Avantages....12
4.3.3. Inconvénients 12
4.4. Centrales Solaires....12
4.4.1. Avantages....13
4.4.2. Inconvénients : 13
4.4.3 Innovations :....13
4.5 Centrales Éoliennes....14
4.5.1. Avantages....15
4.5.2. Inconvénients: 15
5. Conclusion....15

Chapitre 2 : Production d'électricité par énergie éolienne et hydrolienne

1.Introduction 16
2. Les systemes eoliens 16
3. Structure générale 17
4. Les principaux composants d'une éolienne 19
4.1 La nacelle 19
4.2 La tour ou le mât 20
4.3 La base 20
5. Les principaux modèles d'éoliennes 20
5.1 Les éoliennes à axe vertical 20
5.2 Les éoliennes à axe horizontal 21
6. Génératrices 21
7. La chaîne de transformation énergétique 23
7.1 L'accélération du mouvement de rotation grâce au multiplicateur 23
7.2 La production d'électricité par le générateur 24
7.3 Le traitement de l'électricité par le convertisseur et le transformateur 24
8. Situation actuelle de l'énergie éolienne dans le monde 24
9. Situation actuelle de l'énergie éolienne dans l'Algérie 24
10. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne 25
10.1 Avantages : 25
10.2 Inconvénients 26
11. Les systemes hydrolienne 26
12. Fonctionnement d'une hydrolienne 27
13. Systèmes de fixation et d'installation 27
14. Les types d'hydroliennes 28
14.1 La turbine à axe vertical 28
14.2 Turbine à écoulement libre 28
14.3. L'effet Venturi 29
14.4. L'hydroptère oscillatoire 30
15. Les caractéristiques d'une hydrolienne 30
15.1 Caractéristiques Structurelles et Dynamiques 30
15.2 Performances et Efficacité 30

15.3. Adaptabilité et Applications 31
16. Puissance maximale extraite : Loi de Betz 31
17. Avantages et inconvénients de l'énergie hydrolienne : 32
17.1 Avantages : 32
17.2. Inconvénients 32
18. Conclusion 33

Chapitre 3 : Etude de la faisabilité de la conception de l'hydroéolienne

1. Introduction.....34
2. Éléments à considérer pour le projet 34
2.1 Débit et hauteur de chute :.....34
2.2 Conception du système :.....35
2.3 Solutions techniques envisageables : 35
2.4 Critères à prendre en compte lors de la conception 35
2.5. Principales caractéristiques de calcul à prendre en compte.....36
3. Faisabilité du projet pilote 38
4. Proposition d'un système hydroélectrique domestique agricole 39
4.1. Fonctionnement du système proposé 40
4.1.1. Extraction de l'eau depuis le puits 40
4.1.2. Transport de l'eau vers le bac principal 40
4.1.3. Conversion de l'énergie par l'hydrolienne 41
4.1.4. Stockage de l'énergie dans l'accumulateur.....41
4.1.5. Distribution de l'énergie via les câbles électriques 41
4.1.6. Retour de l'eau vers le bac secondaire 41
4.1.7. Soutien par la pompe hydraulique.....41
4.2. Composants Principaux du Système de Micro-Hydroélectricité 41
4.2.1. Pompe principale – SAER MBS Submersible Pump :.....41
4.2.2. Hydrolienne – Micro Hydro Turbine XJ25-3.0DCTF4-Z.....42
4.2.3. Canalisations – Réseau de tuyauterie 43
4.2.4. Pompe secondaire – SAER OP Multi-stage Surface Pump.....44
4.3. Faisabilité d'un système hydroélectrique pour une maison et une ferme 45
4.3.1. Paramètres du système.....45
4.3.2. Caractérisation numérique 46

4.4. Caractérisation des éléments constituant le système 48
4.4.1 Le puits (source d'eau) : 48
4.4.2 La conduite d'eau (tuyauterie inclinée) : 49
4.4.3 Les hydroliennes ou micro-turbines : 50
4.4.4 Le système de stockage de l'énergie (optionnel) : 51
4.4.5 Le bassin de stockage d'eau (final) : 51
5. Conclusion 52
Conclusion Générale 53
Bibliographie 54

Nomenclature

Variable	Désignation	Unité
P	Puissance (hydraulique, mécanique ou électrique)	W (Watt)
η	Rendement global (turbine, générateur, système)	- (sans unité)
ρ	Masse volumique de l'eau	kg/m^3
g	Accélération gravitationnelle	m/s^2
Q	Débit d'eau	m^3/s
H	Hauteur de chute (brute ou effective)	m
h	Hauteur de refoulement (pompe)	m
t	Temps (de fonctionnement, de charge…)	s ou h
E	Énergie produite ou stockée	Wh ou J
v_1	Vitesse du fluide en amont de la turbine	m/s
v_2	Vitesse du fluide en aval de la turbine	m/s
$v\infty$	Vitesse du fluide loin de l'hydrolienne	m/s
ω	Vitesse angulaire des pales ou du rotor	rad/s
R	Rayon de l'hydrolienne	m
φ	Diamètre de l'hydrolienne	m
S	Surface balayée par les pales ($S = H \times \varphi$)	m^2
C_p	Coefficient de puissance	Sans unité
C_m	Coefficient de moment	Sans unité
M_z	Moment (ou couple) selon l'axe de rotation	N·m
TSR	Tip Speed Ratio – Rapport de vitesse spécifique	Sans unité
P_0	Puissance du flux sans obstacle (rotor)	W
C	Coefficient de Hazen-Williams (rugosité des canalisations)	Sans unité
D	Diamètre de la canalisation	m

L	Longueur de la canalisation	m
h_f	Perte de charge hydraulique	m
V	Volume d’eau	m^3
f	Fréquence (usage ou débit cyclique)	Hz ou nombre/jour
P_pompe	Puissance absorbée par la pompe	W
P_générée	Puissance générée par la turbine	W

List de figures

Figure 1.1 Production d'électricité mondial en 2022.....5
Figure 1.2 Centrale Thermique.....6
Figure 1.3 Pompe a Bras.....7
Figure 1.4 Station de Detente et de Regulation du Gaz Naturel.....9
Figure 1.5 Centrales Hydroelectric.....10
Figure 1.6 Centrale Thermique a Flamme.....11
Figure 1.7 Centrale Nucleair.....12
Figure 1.8 Panneaux Solaires.....13
Figure 1.9 Centrale Solaire a Concentration (CSP).....14
Figure 1.10 Composants des Eoliennes.....14
Figure 2.1 : mecanismes de conversion energetique dans une Eolienne.....18
Figure2.2: compesent cles d'une Eloienne.....19
Figure 2.3 : types d'Eoliennes a axe vertical.....20
Figure 2.4 : Les éoliennes à axe horizontal.....21
Figure 2.5. Comparaison des technologies Eolienne,Generatrices Asynchrones vs Synchrones et.....23
conversion de Puissance.....23
Figure 2.6 : Potentiel Eolien en Algerie.....25
[14] Figure 2.7 : fonctionnement d'une hydrolienne.....27
Figure 2.8 / Figure 2.9 : La turbine à axe vertical.....28
Figure 2.10: Turbine à écoulement libre.....29
Figure 2.11 : hydrolienne a effet Venturi.....29
Figure 2.12. L'hydroptère oscillatoire.....30
Figure 3.1 Sortie de Tuyau de Puits.....34
Figure 3.2 Schéma Général du System.....39
Figure 3.3 SAER MBS Submersible Pump.....42
Figure 3.4 Micro Hydro Turbine XJ25-3.0DCTF4-Z.....43
Figure3.5Canalisations.....44
Figure 3.6 SAER OP Multi-stage Surface Pump.....45
Figure 3.7 Puit.....49
Figure 3.8 Conduite d'eau.....50
Figure 3.9 hydroliennes.....50

Figure 3.10 Schéma général du système stockage de l'énergie.....51
Figure 3.11 bassin de stockage d'eau.....51

Introduction Générale

L'énergie électrique constitue un socle essentiel du développement des sociétés modernes, jouant un rôle clé dans l'essor des industries, des transports, des technologies numériques et des besoins domestiques. Depuis les premières exploitations des ressources naturelles comme le bois, l'eau ou le vent par les civilisations anciennes, jusqu'à l'avènement de l'ère industrielle marquée par l'utilisation massive du charbon, du pétrole et du gaz, la production d'électricité a connu une transformation spectaculaire. Ces avancées ont permis une mécanisation accrue, une urbanisation rapide et une amélioration significative des conditions de vie. Cependant, cette dépendance aux combustibles fossiles, qui représentaient encore 60 % de la production électrique mondiale en 2023, pose des défis environnementaux majeurs, notamment en raison de leur contribution à 40 % des émissions globales de CO_2, exacerbant le réchauffement climatique. Face à ces enjeux, la transition énergétique vers des sources renouvelables (solaire, éolien, hydraulique, hydrolien) et l'énergie nucléaire s'impose comme une priorité stratégique pour concilier durabilité, fiabilité et accessibilité énergétique.

Les technologies renouvelables, exploitant l'énergie cinétique ou potentielle des phénomènes naturels, offrent des solutions prometteuses mais nécessitent des optimisations techniques pour maximiser leur rendement et leur intégration dans les réseaux électriques. Par ailleurs, dans des contextes ruraux ou isolés, les systèmes micro-hydroélectriques, comme ceux utilisant des puits pour alimenter des fermes et des habitations, émergent comme des alternatives viables, combinant autonomie énergétique et respect de l'environnement. Ces systèmes reposent sur des principes physiques fondamentaux, tels que la conversion de l'énergie cinétique ou potentielle de l'eau en électricité via des turbines adaptées, tout en tenant compte des pertes de charge et des contraintes de débit. Ce mémoire s'articule autour de trois chapitres complémentaires :

le chapitre 1 présente une analyse détaillée des différents modes de production d'électricité, leurs principes fondamentaux, leurs avantages, leurs limites et leurs impacts environnementaux.

Le chapitre 2 se focalise sur les énergies éolienne et hydrolienne, explorant leurs technologies, leurs mécanismes de fonctionnement, leurs applications et leur potentiel, notamment dans le contexte algérien avec ses opportunités éoliennes et hydrologiques.

Enfin, le chapitre 3 propose une étude de conception d'un système micro-hydroélectrique exploitant un puits de 100 mètres de profondeur, avec des calculs précis de la puissance générée,

des pertes de charge et de l'allocation énergétique pour répondre aux besoins d'une maison et d'une ferme, tout en optimisant l'excédent pour le stockage ou d'autres usages agricoles.

Chapitre1

Les différents modes de production de l'énergie électrique

1.Introduction

L'énergie constitue un pilier fondamental du développement et de l'évolution des sociétés humaines, jouant un rôle déterminant dans l'amélioration des conditions de vie et la croissance des activités industrielles. Depuis les premières civilisations, l'exploitation des sources d'énergie, comme le bois, le vent ou l'eau, a permis de répondre aux besoins essentiels, tels que le chauffage, la cuisson ou le transport. Avec la révolution industrielle, l'utilisation du charbon, puis du pétrole et du gaz, a propulsé les sociétés vers une modernisation sans précédent, facilitant la mécanisation, l'urbanisation et l'essor des technologies. Aujourd'hui, l'énergie soutient des secteurs clés comme les transports, la santé, l'éducation et les communications, tout en alimentant des industries de plus en plus sophistiquées. Cependant, la dépendance aux énergies fossiles pose des défis environnementaux majeurs, poussant les sociétés à innover vers des sources renouvelables, comme l'énergie solaire, éolienne ou hydraulique, pour assurer un développement durable. Cette transition énergétique, combinée à l'efficacité énergétique et à l'innovation technologique, est cruciale pour répondre aux besoins croissants des populations tout en préservant les ressources planétaires. Ainsi, l'énergie reste au cœur des dynamiques sociales, économiques et environnementales, façonnant l'avenir des sociétés humaines.

L'énergie est ce qui permet de fournir un travail, de faire fonctionner des machines. Il existe pour nous de nombreuses sources d'énergie (pétrole-charbon-gaz, nucléaire, solaire, eau, éolien, biomasse) [1]

2. Différentes formes et sources d'énergies

Il existe de multiples formes d'énergie :

- Énergie mécanique
- Énergie chimique
- Énergie électrique
- Énergie rayonnante
- Énergie éolienne

- Énergie nucléaire

On distingue plusieurs sources d'énergie telles que

- Des matières premières
- Des phénomènes naturels employés pour produire de l'énergie.

3. Rôle Central de l'énergie électrique dans les Sociétés Modernes

L'électricité est qualifiée d'énergie secondaire, car elle est produite par la transformation d'énergies primaires (fossiles, nucléaires, renouvelables). Comme le précise la source, elle est produite principalement à partir de sources d'énergie fossiles (charbon, gaz, fioul), nucléaire et renouvelables.

Elle représente 20 % de la consommation énergétique mondiale finale, mais son importance stratégique dépasse ce pourcentage, car elle est indispensable pour les secteurs clés comme les transports électrifiés, l'éclairage ou le numérique.[2]

3.1. Principes de Base

L'électricité repose sur des lois physiques fondamentales :

- **La tension (en volts)** : différence de potentiel entre deux points.
- **Le courant (en ampères)** : déplacement des électrons dans un conducteur.
- **La puissance (en watts)** : produit de la tension et du courant.

La Connaissance des énergies souligne que :

La production d'électricité repose sur l'induction électromagnétique, découverte par Michael Faraday au XIX^{e} siècle, qui permet de convertir l'énergie mécanique en courant alternatif via des turbines et alternateurs. [2]

3.2. Enjeux Énergétiques et Environnementaux

La production électrique est au cœur des défis climatiques. Bien que les énergies renouvelables (solaire, éolien, hydraulique) gagnent du terrain, les combustibles fossiles dominent encore,

En 2023, 60 % de l'électricité mondiale est issue du charbon, du gaz et du pétrole, générant d'importantes émissions de CO_2.

Cette dépendance aux énergies fossiles explique pourquoi le secteur électrique est responsable de 40 % des émissions globales de gaz à effet de serre [3]

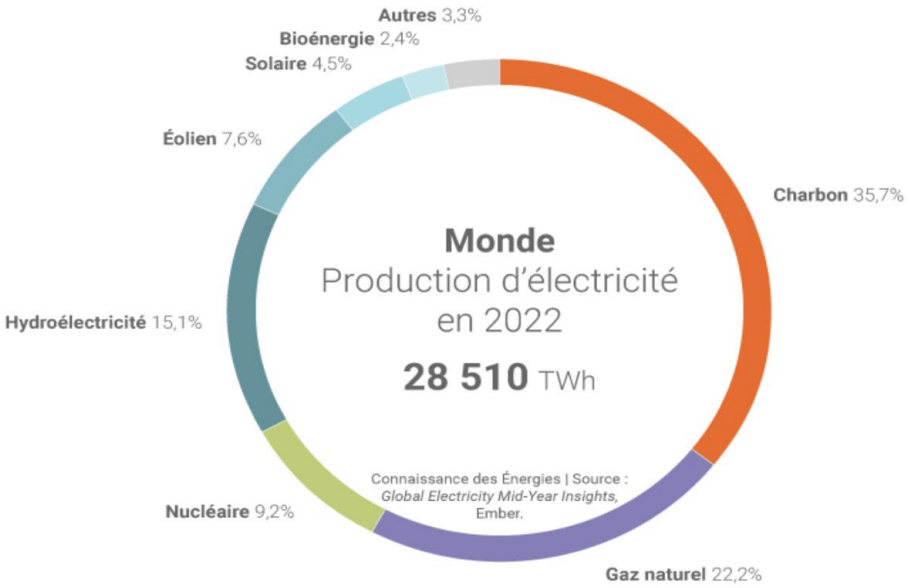


Figure 1.1 Production d'électricité mondial en 2022 [2]

3.3.Vers une Transition Durable

Les innovations technologiques et les politiques publiques visent à décarboner la production électrique. La source indique que :

L'énergie hydraulique (barrages) est la principale source renouvelable de production d'électricité dans le monde.

Cependant, le solaire et l'éolien progressent rapidement, avec des croissances annuelles de 15 % à 20 % depuis 2020. [3]

4.Les différents procédés d'obtention de l'énergie électrique

Il existe plusieurs procédés pour l'obtention de l'énergie électrique

- Centrales thermiques (charbon, gaz, fioul).
- Centrales hydrauliques (barrages, fil de l'eau).
- Centrales nucléaires (fission de l'uranium).
- Centrales solaires (photovoltaïque, thermodynamique).

- Centrales éoliennes (terrestres, offshore).

4.1. Centrales Thermiques à énergie fossiles (à Charbon, Gaz, Fioul)

Le charbon, le pétrole et le gaz naturel proviennent de la décomposition de végétaux et d'organismes vivants qui ont été enfouis sous la terre. Les ressources diminuent quand on les utilise car il leur faut des millions d'années pour se former et sont donc des sources d'énergies non renouvelable.[1]

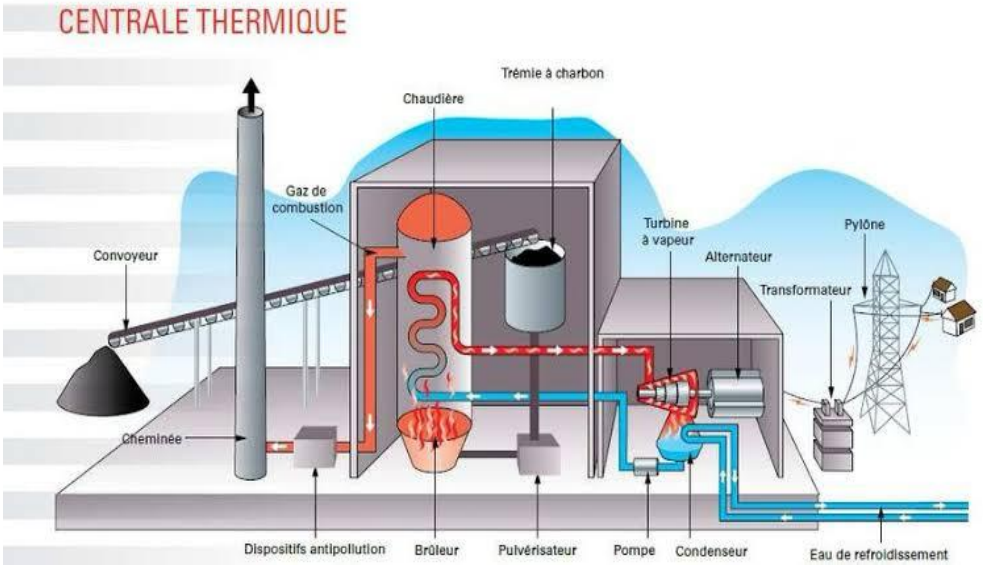


Figure 1.2 Centrale Thermique

4.1.1. Les carburants issus du pétrole

Le pétrole brut est une huile minérale foncée et visqueuse qui vient du sous-sol, et qui provient des restes d'animaux et de végétaux morts, le pétrole est donc une source d'énergie fossile non renouvelable.

Le raffinage permet d'isoler ses divers constituants et d'obtenir, après épuration, des carburants. La combustion de ce carburant crée de l'énergie.[2]

- **L'essence**

L'essence contient des métaux comme le plomb, rejetés dans l'air en même temps que les gaz d'échappement. Les rejets de plomb sont nocifs pour la santé et l'environnement.

- **Le gazole**

Le gazole est le carburant utilisé dans les moteurs Diesel. Le rendement énergétique du moteur Diesel est bien supérieur à celui du moteur à essence, il émet 14 fois plus de particules et il contient du soufre responsable de la formation de dioxyde de soufre SO2. Ces particules sont responsables de la pollution de l'air

4.1.2 Le charbon

C'est une matière combustible qui provient de résidus fossilisés de forêts. Lentement elles se sont transformées en charbon. Quand l'homme a découvert le charbon il l'a utilisé pour chauffer les maisons ou faire tourner les machines des usines ou faire fonctionner les trains. Aujourd'hui on s'en sert encore pour produire de l'électricité, mais lorsqu'il brule il émet beaucoup de CO^2. Cette émission de CO^2 est très polluante et accélère le réchauffement climatique. Le charbon est donc une source d'énergie fossile non renouvelable.

Figure 1.3 Pompe a Bras

4.1.3. Le gaz

Il y a des millions d'années des organismes vivants microscopiques ont été enfouis dans le sol et se sont transformés en gaz naturel sous l'action d'une température élevée, d'une forte pression et de l'absence de contact avec l'air.

Ces poches de gaz naturel se trouvent entre 3 000 et 4 000 mètres sous la surface de la Terre. C'est un très bon combustible qu'on utilise par exemple pour faire la cuisine, chauffer l'eau des maisons et produire du chauffage.

4.1.4 Fonctionnement

Les centrales thermiques à flamme transforment l'énergie chimique des combustibles fossiles en électricité. Comme l'explique Total Energies :

La centrale thermique à flamme produit de l'électricité à partir de la vapeur d'eau qui est produite grâce à la chaleur dégagée par la combustion du gaz, du charbon ou du fioul.

Ce processus implique trois étapes clés :

- **Combustion** : Le charbon, gaz ou fioul est brûlé pour générer une chaleur intense (jusqu'à 1 500°C).
- **Production de vapeur** : La chaleur chauffe l'eau dans une chaudière, la transformant en vapeur haute pression.
- **Turbine et générateur** : La vapeur entraîne une turbine connectée à un alternateur, produisant un courant électrique via le phénomène d'induction électromagnétique. [4]

4.1.5 Avantages

- **Flexibilité** : Capables de répondre rapidement aux pics de demande.
- **Maturité technologique** : Infrastructure bien développée, notamment dans les pays dépendants des énergies fossiles.

4.1.6 Inconvénients

- **Émissions polluantes** : Rejet de CO_2 (responsable du réchauffement climatique), SO_2 (pluies acides) et particules fines.
- **Ressources limitées** : Les combustibles fossiles sont non renouvelables et géopolitiquement sensibles.

4.1.7 Impact Environnemental

Selon Connaissance des Énergies :

L'électricité est produite principalement à partir de sources d'énergie fossiles (charbon, gaz, fioul), nucléaire et renouvelables. Les centrales thermiques contribuent à environ 40 % des émissions mondiales de CO_2 liées à l'énergie, selon les données de 2023. [2] Le gaz naturel est le moins polluant des combustibles fossiles, car sa combustion émet moins de particules et produit moins de CO2

Figure 1.4 Station de Detente et de Regulation du Gaz Naturel

4.2. Centrales Hydrauliques

L'énergie hydraulique exploite la force mécanique de l'eau. TotalEnergies précise :

La centrale hydraulique produit de l'électricité grâce à la force de l'eau. Cette eau est stockée dans un barrage ou déviée d'un cours d'eau." [4]

Deux types principaux existent :

- **Centrales au fil de l'eau**: Utilisent le débit naturel des rivières.
- **Centrales à réservoir** : Stockent l'eau dans des barrages pour une production ajustable.

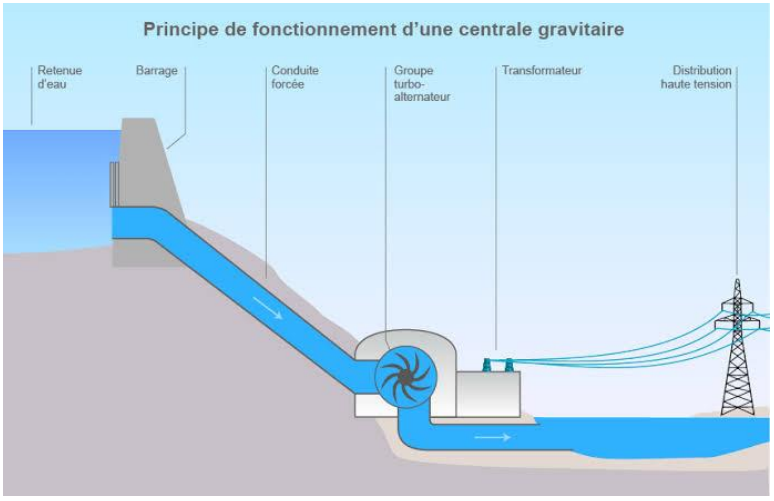


Figure 1.5 Centrales Hydroelectric

4.2.1. Avantages

- **Renouvelable et propre**: Aucune émission directe de gaz à effet de serre.
- **Stockage d'énergie** : Les barrages permettent de réguler la production selon la demande.

4.2.2. Inconvénients

- **Impact sur les écosystèmes**: Inondation de zones naturelles et perturbation des cours d'eau.
- **Coûts initiaux élevés**: Construction complexe des barrages.

Il est à faire remarquer que l'énergie hydraulique (barrages) est la principale source renouvelable de production d'électricité dans le monde.

Elle représente environ 16 % de l'électricité mondiale, dominant dans des pays comme la Norvège (96 % de son mix) ou le Brésil (65 %). [2]

4.3. Centrales Nucléaires

L'énergie nucléaire provient d'une matière première qui est l'uranium, c'est donc une énergie fossile. Cependant on la considère comme une alternative aux autres énergies fossiles car elle est n'émet pas de CO2 et offre une certaine indépendance énergétique même si elle suscite des problèmes de sécurité et de stockage des déchets radioactifs

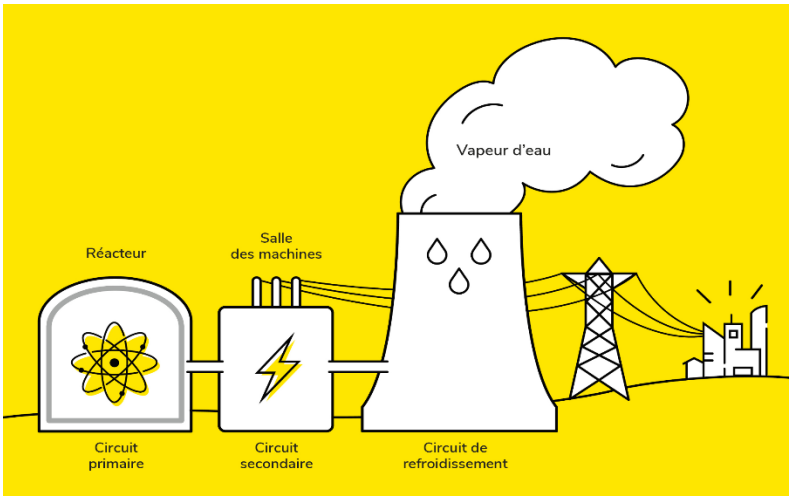


Figure 1.6 Centrale Thermique a Flamme

4.3.1. Fonctionnement

Le nucléaire repose sur la fission d'atomes d'uranium. TotalEnergies décrit :

La centrale nucléaire produit de l'électricité grâce à la chaleur dégagée par la fission d'atomes d'uranium. Cette chaleur transforme de l'eau en vapeur et fait tourner une turbine. [4]

Les réacteurs à eau pressurisée (REP), les plus courants, utilisent :

- **Cœur du réacteur** : Les neutrons fissurent l'uranium-235, libérant une chaleur intense.
- **Circuit primaire** : L'eau sous pression transfère la chaleur sans bouillir.
- **Circuit secondaire** : La vapeur entraîne la turbine et le générateur

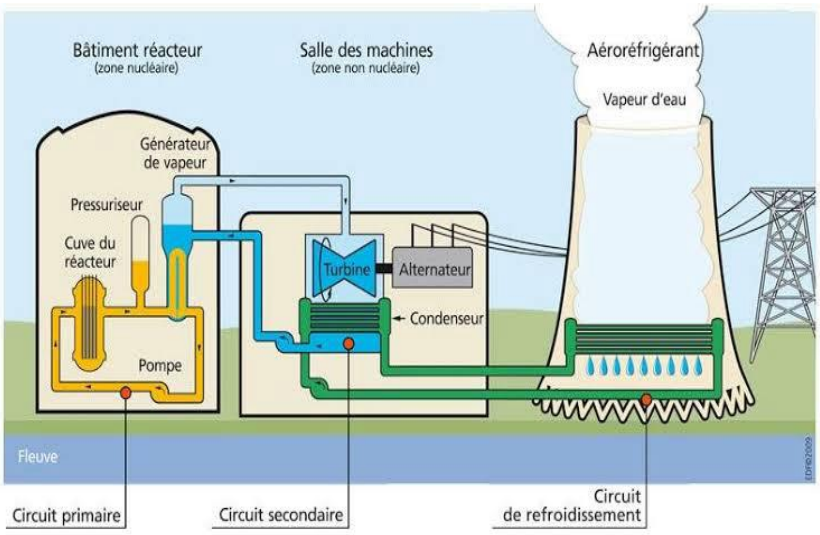


Figure 1.7 Centrale Nucleair

4.3.2. Avantages

- **Faibles émissions de CO_2** : 12 g/kWh contre 820 g/kWh pour le charbon.
- **Production massive** : Un réacteur de 1 300 MW alimente 1 million de foyers.

4.3.3. Inconvénients

- **Déchets radioactifs** : Gestion complexe des déchets à vie longue (plutonium, etc.).
- **Risques d'accidents** : Tchernobyl (1986) et Fukushima (2011) illustrent les dangers potentiels.

Il est à faire remarque que les centrales nucléaires utilisent la fission des noyaux d'uranium pour produire de la chaleur, convertie ensuite en électricité.

La France (70 % d'électricité nucléaire) et la Chine (en expansion) misent sur cette énergie pour décarboner leur mix. [1]

4.4. Centrales Solaires

Le solaire photovoltaïque convertit directement la lumière en électricité. Total Energies explique

La centrale solaire produit de l'électricité grâce à des panneaux photovoltaïques qui captent les rayons du soleil pour les transformer en énergie électrique.

Les cellules photovoltaïques (en silicium) génèrent un courant continu via l'effet photoélectrique, converti ensuite en courant alternatif par un onduleur. [4]

Figure 1.8 Panneaux Solaires

4.4.1. Avantages

- **Énergie inépuisable** : Le soleil fournit 10 000 fois la consommation énergétique mondiale annuelle.
- **Modularité** : Installations possibles de l'échelle domestique aux parcs de plusieurs GW.

4.4.2. Inconvénients :

- **Intermittence** : Production nulle la nuit et réduite par temps nuageux.
- **Besoins en surfaces** : 1 MW nécessite 1 à 2 hectares.

4.4.3 Innovations :

Technologie-Sciarretta Ajoute :

L'énergie solaire : provient du rayonnement solaire, exploité via des panneaux photovoltaïques ou des centrales thermiques solaires.

Les centrales à concentration (CSP), comme celles d'Ouarzazate au Maroc, utilisent des miroirs pour concentrer la chaleur et produire de la vapeur.

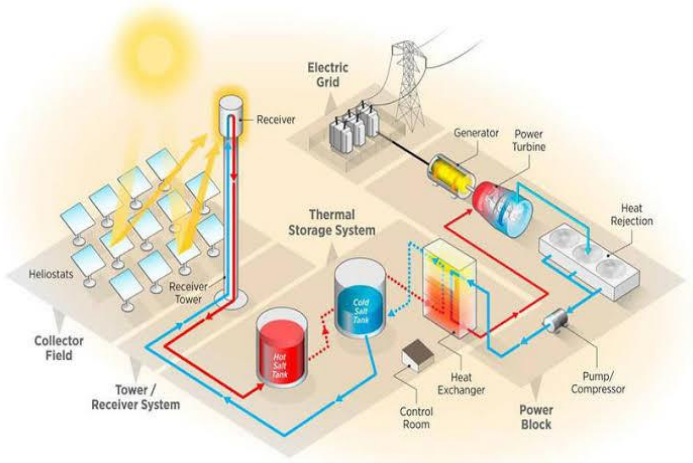


Figure 1.9 Centrale Solaire a Concentration (CSP)

4.5 Centrales Éoliennes

Les éoliennes transforment l'énergie cinétique du vent en électricité. Selon TotalEnergies :

La centrale éolienne produit de l'électricité grâce à la force du vent qui fait tourner les pales d'une éolienne. Celles-ci entraînent un générateur qui produit du courant électrique.

les modèles terrestres (onshore) et offshore (en mer) dominent, avec des puissances unitaires atteignant 15 MW pour les dernières. [4]

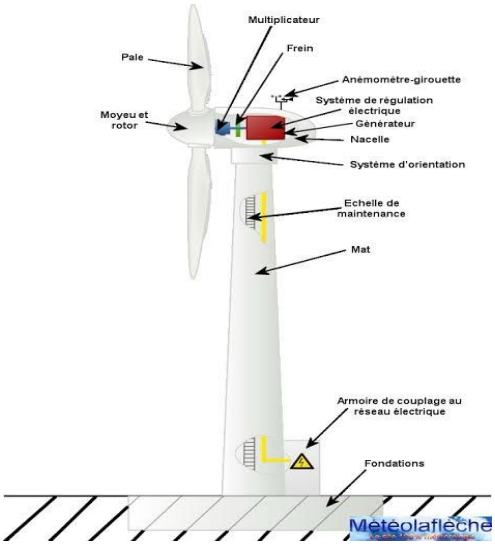


Figure 1.10 Composants des Eoliennes

4.5.1. Avantages

- **Coûts décroissants** : Baisse de 70 % depuis 2010 grâce aux progrès technologiques.
- **Compatibilité rurale** : Peuvent coexister avec des activités agricoles.

4.5.2. Inconvénients:

Variabilité : Dépendance aux conditions météorologiques.

Impact paysager : Controverses autour des parcs offshore visibles depuis les côtes.

il est à noter selon Technologie-Sciarretta , que :

L'énergie éolienne: énergie mécanique fournie par le vent (mouvement des masses d'air), utilisée pour faire tourner des turbines.

L'éolien représente 7 % de l'électricité mondiale, avec des leaders comme la Chine (342 GW en 2023) et les États-Unis (135 GW). [5]

5. Conclusion

Chaque mode de production d'électricité présente des atouts et limites, reflétant les compromis entre efficacité, coût et durabilité. Alors que les énergies fossiles dominent encore, la transition vers le nucléaire et les renouvelables (solaire, éolien, hydraulique) s'impose pour répondre aux défis climatiques. Une combinaison intelligente de ces technologies, couplée à des innovations en stockage et gestion de réseau, sera clé pour un avenir énergétique résilient et bas carbone.

Chapitre 2

Production d'électricité par énergie éolienne et hydrolienne

1.Introduction

Face aux défis environnementaux et climatiques, les énergies renouvelables sont essentielles pour assurer une transition énergétique durable. Parmi celles-ci, l'énergie éolienne et l'énergie hydrolienne se distinguent par leur capacité à produire de l'électricité à partir de l'énergie cinétique, offrant des solutions complémentaires pour répondre aux besoins énergétiques mondiaux. Ces technologies, bien qu'ancrées dans des principes communs, se déploient dans des environnements distincts et possèdent des spécificités techniques qui enrichissent le mix énergétique.

L'énergie éolienne repose sur la conversion de l'énergie du vent en électricité via des éoliennes équipées de générateur synchrones ou asynchrones. L'efficacité de ce processus dépend de la conception des pales et des systèmes de contrôle, comme la régulation de vitesse variable, qui optimise la capture d'énergie face à des vents fluctuants. Ces dispositifs, associés à des interfaces de connexion au réseau, garantissent une production stable et réduisent les pertes énergétiques.

L'énergie hydrolienne, en revanche, exploite les courants marins, dont la densité élevée permet des turbines compactes mais puissantes. Ces hydroliennes, qu'elles soient à flux axial ou transverse, ou dotées de conceptions innovantes comme les structures flottantes, minimisent l'impact visuel tout en offrant une production prévisible grâce à la régularité des marées. Leur intégration dans les zones côtières favorise une acceptation sociale accrue.

En somme, l'énergie éolienne et hydrolienne, par leurs atouts respectifs, jouent un rôle clé dans la diversification des sources renouvelables. Les éoliennes, technologiquement matures, et les hydroliennes, en plein essor, soutiennent un avenir énergétique durable, réduisant la dépendance aux énergies fossiles [6].

2. Les systemes eoliens

Ces dernières années, l'intérêt d'utilisation d'énergies renouvelables ne cesse d'augmenter, car l'être humain est de plus en plus concerné par les problèmes environnementaux. Parmi ces énergies, on trouve l'énergie éolienne. Les caractéristiques mécaniques de l'éolienne, l'efficacité

de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est très importante. Là encore, de nombreux dispositifs existent et, pour la plupart, ils utilisent des machines synchrones ou asynchrones. Les stratégies de commande de ces machines et leurs éventuelles interfaces de connexion au réseau doivent permettre de capter un maximum d'énergie sur une plage de variation de vitesse de vent le plus large possible, ceci dans le but d'améliorer la rentabilité des installations éoliennes. [6]

3. Structure générale

Une éolienne est constituée par un mât qui en moyenne a une longueur entre 50 et 100 mètres, voire plus pour les très grosses éoliennes, surmonté d'une nacelle sur laquelle est fixé un rotor avec un certain nombre de pales. La plupart des éoliennes de puissance sont des tripales. Ces pales sont soit fixes, soit mobiles autour de leur axe. Le rotor va récupérer l'énergie cinétique du vent pour le transformer en énergie mécanique et transmettre cette énergie mécanique à un multiplicateur. Pourquoi un multiplicateur ? Parce que le rotor tourne environ à 20 à 30 tr/m et en sortie de multiplicateur, la vitesse sera de l'ordre de 1500 tr/m compatibles avec la générateur asynchrone qui est derrière, autrement dit cette générateur va transformer l'énergie mécanique en énergie électrique. La nacelle est surmontée de capteurs, avec notamment une girouette qui indiquera la direction du vent de façon à placer le rotor perpendiculairement au vent en faisant pivoter la nacelle avec des moteurs hydrauliques. Cette éolienne est aussi instrumentée avec un anémomètre qui indiquera la vitesse du vent de façon à réguler la puissance de l'éolienne en faisant pivoter les pales, mettre les pales en drapeau ou arrêter l'éolienne en cas de vent excessif (voir le schéma général ci-dessous). [7]

Les petites éoliennes qui ont des pales fixes n'ont pas ce système et utilisent plutôt la régulation de type stoll par ce qu'on appelle décrochage aérodynamique . La pale est calculée de telle façon qu'à partir d'une certaine vitesse de vent, la portance décroit et régule automatiquement la vitesse de rotation . En cas de vent très fort, ces petites éoliennes s'effacent, soit d'une manière latérale c'est-à-dire qu'elles diminuent leur prise au vent, soit en s'inclinant à l'horizontale, ce qui est le cas aussi des éoliennes américaines . Les systèmes d'arrêt sont de deux types . On arrête les éoliennes en cas de vent excessif (au-delà de 25 m/s quasiment toutes les éoliennes sont arrêtées et mises en drapeaux), de problèmes électriques ou de problèmes mécaniques (ex : vibrations intempestives) . Il existe deux types de freins . Lorsqu'un rotor de cette dimension-là est en rotation, il est hors de

question de le freiner avec des systèmes mécaniques, on va utiliser plutôt des freins qu'on appelle aérodynamiques . On fait pivoter la pale - pour les pales qui peuvent pivoter -, en augmentant l'angle de calage de 0 à 90° . On va freiner le rotor et à 90° on aura les pales qui seront en drapeau et l'éolienne sera arrêtée . Pour les pales fixes, c'est l'extrémité de ces pales qui peut pivoter et freiner l'éolienne . Lorsque l'éolienne est arrêtée, on utilise des freins à disques, des gros freins à disques qui permettent de bloquer l'éolienne et éviter qu'elle ne reparte accidentellement lorsque les techniciens de maintenance sont à l'intérieur de la nacelle [6].

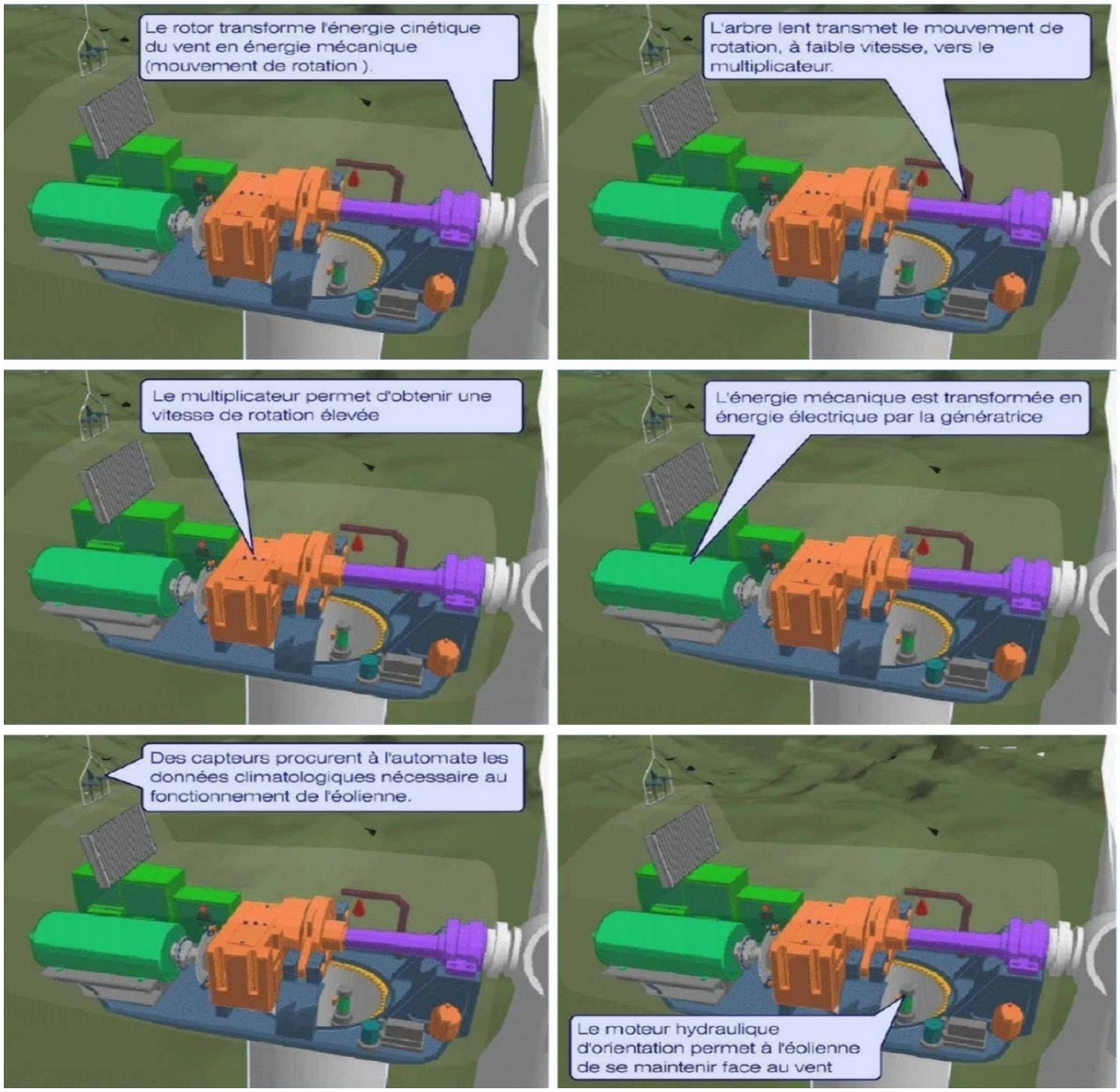


Figure 2.1 : mecanismes de conversion energetique dans une Eolienne

4. Les principaux composants d'une éolienne

- **Rotor**
- **Generateur**
- **Nacelle**
- **Nacalle**
- **Système dorientation de la nacelle**
- **Mat**
- **Trasformateur**
- **Base/fondation**
- **Cables electrique**

Figure2.2: compesent cles d'une Eloienne [6]

4.1 La nacelle

Il s'agit du grand boîtier de protection situé au sommet de la tour et contenant les principaux composants de l'éolienne, notamment le générateur électrique, la boîte de vitesse, les systèmes de contrôle et les instruments de mesure. .

4.2 La tour ou le mât

C'est la structure robuste et haute qui supporte l'éolienne et la hisse à une hauteur optimale pour capter le maximum d'énergie éolienne. Cette tour est habituellement fabriquée en acier ou en béton et intègre des chemins de câbles permettant de transporter le courant de l'alternateur au transformateur.

4.3 La base

Généralement circulaire et en béton armé, c'est la fondation de l'éolienne qui assure sa stabilité. La base abrite aussi le transformateur de l'électricité produite, qui assure la conversion du courant direct en courant continu pour pouvoir l'injecter dans le réseau électrique. [6].

5. Les principaux modèles d'éoliennes

5.1 Les éoliennes à axe vertical

Elles existent sous diverses configurations, mais elles partagent toutes le fait que leurs pales pivotent autour d'un axe de rotation qui est perpendiculaire au sol et à la direction du vent. [7]

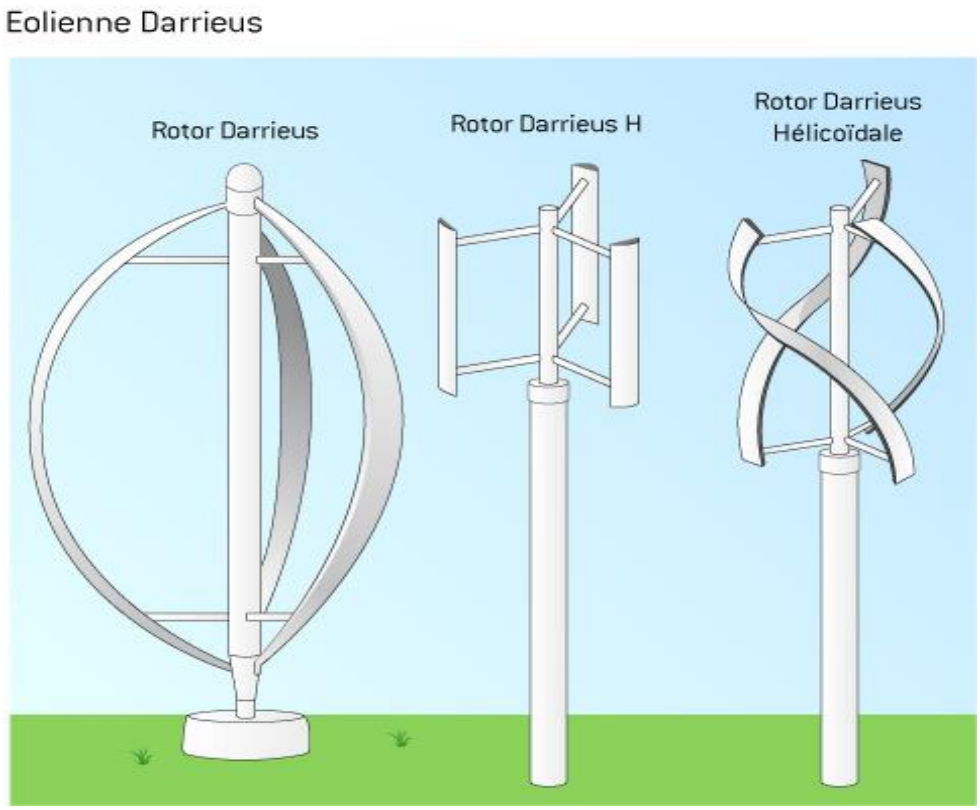


Figure 2.3 : types d'Eoliennes a axe vertical [9]

5.2 Les éoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont généralement celles qui viennent à l'esprit lorsqu'on pense aux éoliennes. Leurs pales tournent autour d'un axe qui est parallèle à la surface du sol et elles se positionnent face au vent. Elles sont les plus répandues en raison de leur efficacité et de leur haute capacité énergétiques malgré leur coût plus élevé. En outre, elles exigent des systèmes de contrôle plus complexes pour assurer l'orientation optimale face au vent. Parmi les éoliennes à axe horizontal, on trouve des modèles avec différents nombres de pales (une pale, deux pales et trois pales), mais les modèles à trois pales sont les plus utilisés et les plus efficaces [7] :

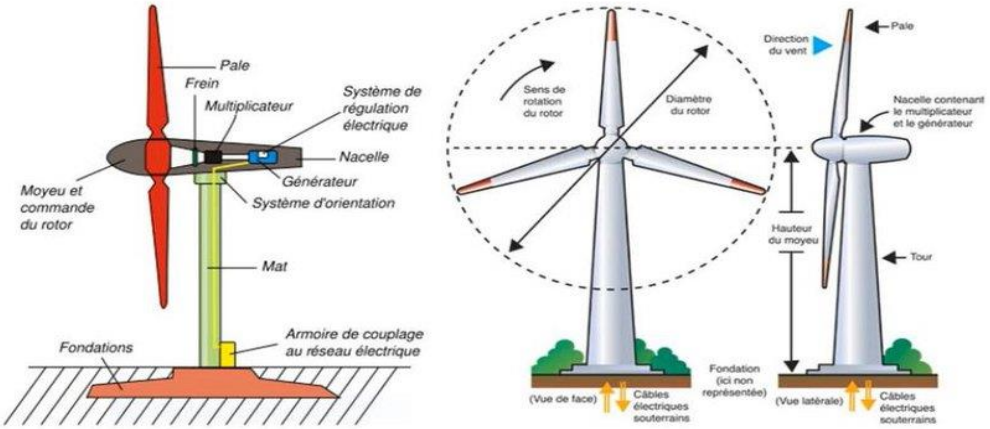


Figure 2.4 : Les éoliennes à axe horizontal [8]

6. Génératrices

Pour produire l'énergie, on a besoin de générateur. Il existe actuellement deux catégories d'éoliennes. Les éoliennes qui utilisent des générateur asynchrones, donc qui nécessitent un multiplicateur interposé entre le rotor et la générateur. Ce multiplicateur est un système mécanique. C'est une sorte de boîte de vitesses qui a un rendement très faible et qui va pénaliser le rendement total de l'éolienne. D'autre part, ce système tombe souvent en panne et pose des problèmes. Les nouvelles générations d'éoliennes sont des éoliennes à générateur synchrone à attaque directe. On voit ci-dessous sur la figure que la générateur se trouve directement reliée au rotor et se trouve derrière le rotor. Il n'y a plus de multiplicateur. Nous voyons sur les photos que l'on repère facilement tout cela lorsqu'on est au sol, [8]

Dans l'ancienne génération d'éoliennes, la nacelle est plutôt parallélépipédique. Les nouvelles générations d'éoliennes ont plutôt des nacelles ovoïdes, ressemblant à un ballon de rugby. Pour avoir les dimensions, il suffit d'observer les techniciens de maintenance qui se trouvent dans chacune de ces nacelles. Quel que soit le type de générateur, le signal produit est un signal triphasé,

alternatif à la fréquence variable. Quand l'éolienne démarre, la fréquence varie en fonction de la rotation du rotor. Il est donc impossible de connecter directement ce signal sur le réseau qui est à fréquence fixe. On a l'habitude de passer par ce qu'on appelle un bus continu, c'est-à-dire qu'à partir du signal alternatif à fréquence variable, on va le redresser avec des systèmes spécifiques, des redresseurs particuliers, pour fabriquer ainsi une tension continue. A partir de cette tension continue, on va fabriquer du signal alternatif à fréquence fixe grâce à des onduleurs. On pourra ainsi se connecter directement sur le réseau. Cette technique est actuellement la plus utilisée puisqu'elle laisse le rotor libre en rotation ce qui permet d'obtenir la puissance maximale extraite du vent. Les machines que l'on utilise actuellement sont des machines synchrones ou machines à aimants permanents, encore appelées machines brushless, c'est-à-dire « sans balais ». Elles utilisent simplement des aimants qui passent devant des bobines. Il y a deux catégories :

- Lorsque le champ magnétique est perpendiculaire à l'axe de rotation, on a à faire à des machines à champ radial, cylindriques.
- Lorsque le champ magnétique est parallèle à l'axe de rotation, on a à faire à des machines à champ axial qui s'appellent discoïdes.

Les aimants sont collés à l'intérieur d'un rotor sur lequel vont être fixées les pales de l'éolienne. Ils vont tourner et passer devant des bobines qui sont fixées sur le stator. Ces moteurs sont des moteurs que l'on utilise sur les vélos électriques. Ces machines brushless fonctionnent à moteur et sont réversibles puisqu'on peut récupérer de l'énergie en descente. Elles fonctionnent donc en générateur. Pour obtenir une tension continue, on utilise soit des redresseurs à diodes, soit des redresseurs à modulation de largeur d'impulsion MLI. Si on regarde production et dimension, on peut s'apercevoir qu'avec un rotor de 30 mètres, on peut espérer avoir une puissance de l'ordre de 30 kW. Lorsqu'on augmente la surface des rotors de 46 jusqu'à 125 mètres, la puissance augmente et avec un rotor de 125 mètres, on a des générateur et une production de puissance de l'ordre de 100MW. [9]

Figure 2.5. Comparaison des technologies Eolienne,Generatrices Asynchrones vs Synchrones et conversion de Puissance.

7. La chaîne de transformation énergétique

Une éolienne transforme l'énergie du vent en énergie électrique. Cette transformation se fait en plusieurs étapes :

La transformation de l'énergie par les pales

Les pales fonctionnent sur le principe d'une aile d'avion :

La différence de pression entre les deux faces de la pale crée une force aérodynamique, mettant en mouvement le rotor par la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. [10]

7.1 L'accélération du mouvement de rotation grâce au multiplicateur

Les pales tournent à une vitesse relativement lente, de l'ordre de 5 à 15 tours par minute, d'autant plus lente que l'éolienne est grande. La plupart des générateurs ont besoin de tourner à très grande vitesse (de 1000 à 2000 tours par minute) pour produire de l'électricité. C'est pourquoi le mouvement lent du rotor est accéléré par un multiplicateur. Certains types d'éoliennes n'en sont pas équipés, leur générateur est alors beaucoup plus gros et beaucoup plus lourd.

7.2 La production d'électricité par le générateur

L'énergie mécanique transmise par le multiplicateur est transformée en énergie électrique par le générateur. Le rotor du générateur tourne à grande vitesse et produit de l'électricité.

7.3 Le traitement de l'électricité par le convertisseur et le transformateur

Cette électricité ne peut pas être utilisée directement ; elle est traitée grâce à un convertisseur, puis sa tension est augmentée à 20 000 Volts par un transformateur. L'électricité est alors acheminée à travers un câble enterré jusqu'à un poste de transformation, pour être injectée sur le réseau électrique, puis distribuée aux consommateurs les plus proches [6]

8. Situation actuelle de l'énergie éolienne dans le monde

Les pays qui s'intéressent au développement de l'éolien sont encore en phase de premier investissement (mise en service de champs d'éoliennes qui n'existaient pas auparavant). De fait, les capacités installées croissent en permanence mais à des rythmes différents selon les pays, et classer les États par puissance installée donne un résultat mouvant d'une année à l'autre. Néanmoins, il ressort des chiffres actuels que les plus gros pays investisseurs sont les pays occidentaux (Amérique et Europe), mais l'Asie, avec l'Inde et la Chine, commence à tenir un rang important. [11],

9. Situation actuelle de l'énergie éolienne dans l'Algérie

L'énergie éolienne connaît une forte expansion dans les pays industrialisés, notamment en raison de la volonté de réduire les émissions de gaz à effet de serre. Toutefois, les avancées de l'Algérie dans ce domaine restent limitées par rapport aux progrès réalisés à l'échelle mondiale ou européenne. La rentabilité des systèmes éoliens dépend essentiellement de la ressource éolienne, c'est-à-dire du vent. [12]

En Algérie, le potentiel éolien varie fortement selon les régions, en raison de sa topographie et de son climat diversifiés , Le pays se divise en deux grandes zones géographiques :

- Le Nord, avec son littoral de 1200 km, ses montagnes (Atlas tellien et saharien), ses plaines et hauts plateaux à climat continental, présente généralement des vitesses de vent faibles, sauf dans certains microclimats (Oran, Béjaïa, Annaba, Tiaret, El Kheiter).

- Le Sud, au climat saharien, offre un meilleur potentiel éolien, en particulier le Sud-Ouest (région d'Adrar), où les vitesses de vent dépassent fréquemment 6 m/s**.** [12].

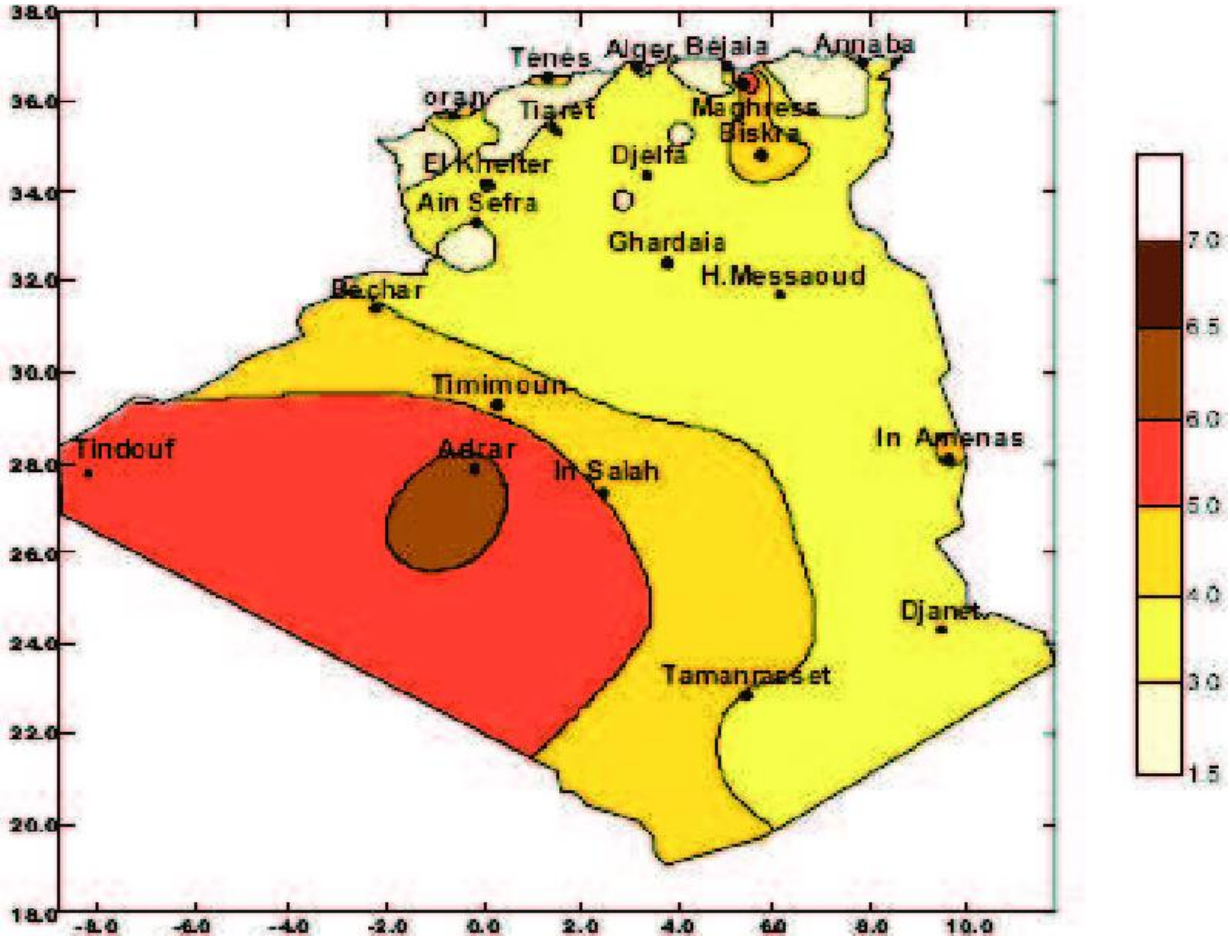


Figure 2.6 : Potentiel Eolien en Algerie [12]

10. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

La croissance de l'énergie éolienne est évidemment liée aux avantages de l'utilisation de ce type d'énergie. Cette source d'énergie a également des désavantages qu'il faut étudier, afin que ceux-ci ne deviennent pas un frein à son développement.

10.1 Avantages :

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier.
- L'énergie éolienne est une énergie propre. Elle n'a aucun impact néfaste sur l'environnement comme les autres sources d'énergie qui ont causé un changement radical du climat par la production énorme et directe du Co2 .

- L'énergie éolienne ne présente aucun risque et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs contrairement à l'énergie nucléaire.
- Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace
- C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie. Ainsi les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont moindres. Cette source d'énergie peut de plus stimuler l'économie locale, notamment dans les zones rurales
- C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables
- L'énergie éolienne crée plus d'emplois par unité d'électricité produite que n'importe quelle source d'énergie traditionnelle .

10.2 Inconvénients

- la nature stochastique du vent a une influence sur la qualité de la puissance électrique produite, ce qui représente une contrainte pour les gérants des réseaux .
- Le coût de l'énergie éolienne reste plus élevé par rapport aux autres sources d'énergie classique surtout sur les sites moins ventés .
- Le bruit : il a nettement diminué grâce aux progrès réalisés au niveau des Multiplicateurs.
- L'impact sur les oiseaux : certaines études montrent que ceux-ci évitent les aérogénérateurs, .D'autres études disent que les sites éoliens ne doivent pas être implantés sur les parcours migratoires des oiseaux, afin que ceux-ci ne se fassent pas attraper par les aéroturbines .
- Lorsque la production dépasse la consommation, le stockage est encore onéreux, mais en cas de raccordement de l'éolienne au réseau électrique, le stockage n'est pas nécessaire . [6]

11. Les systemes hydrolienne

Les hydroliennes convertissent l'énergie cinétique des courants marins en électricité. À puissance égale, elles sont plus compactes que les éoliennes car la puissance extraite dépend de la masse volumique du fluide et l'eau est environ 800 fois plus dense que l'air. Elles ont également l'avantage de s'insérer plus facilement dans le paysage car la plupart des dispositifs sont totalement immergés. Cela limite les problèmes d'acceptation par les populations locales, littorales et touristiques. Enfin, un des avantages majeurs des hydroliennes est que leur production est prévisible car les courants marins dépendent de la marée. Il existe une grande variété

d'hydroliennes. Généralement, les hydroliennes se divisent en deux grandes familles: celles à flux transverse et celles à flux axial. Ces dernières sont les plus utilisées . Leur axe de rotation se situe dans le plan horizontal, parallèle à l'écoulement. Elles utilisent un rotor à hélice. Les turbines à flux transverse peuvent avoir un axe vertical ou un axe horizontal . Il existe également d'autres concepts tels que les hydroliennes à ailes battantes , les hydroliennes à membrane oscillante (Eel energy), les hydroliennes cerf-volant (Minsesto)... Concernant le mode de fixation, certaines hydroliennes sont posées sur le fond alors que d'autres sont fixées sur des pieux ou des structures flottantes pour exploiter une énergie cinétique plus importante (la composante horizontale du courant augmentant généralement en intensité avec la distance au fond). Enfin, certaines hydroliennes utilisent un carénage pour canaliser les écoulements comme les technologies OpenHydro (Naval Energies) [13]

12. Fonctionnement d'une hydrolienne

Un hydrolienne se compose d'une turbine mise en rotation par le mouvement de l'eau. Un alternateur, entraîné par la turbine, produit un courant électrique continu, transformé ensuite en courant alternatif. Hydrolienne sous-marine : leur diamètre est compris entre 10 et 20 mètres. Elles sont immergées à 30 à 40 mètres de profondeur dans des zones de fort courant (supérieur à 4 ou 5 nœuds).[14]

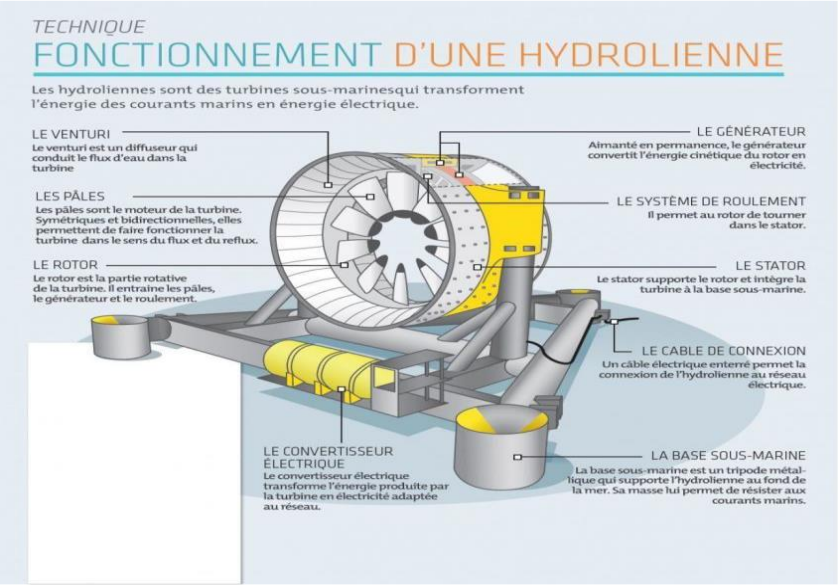


Figure 2.7 : fonctionnement d'une hydrolienne [17]

13. Systèmes de fixation et d'installation

Selon la configuration du site et la technologie utilisée, les hydroliennes peuvent être posées sur le fond marin, fixées sur des pieux ou installées sur des structures flottantes.

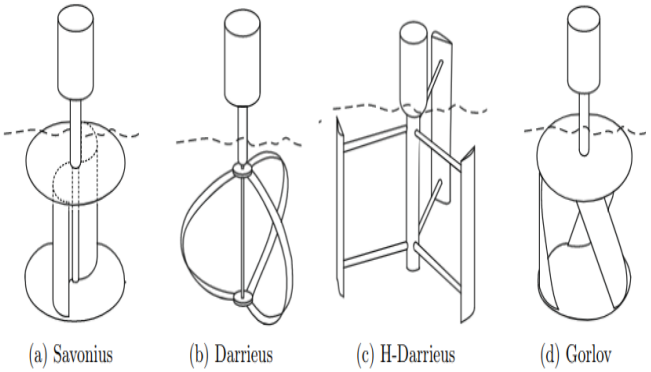
- Les systèmes posés sont simples mais captent un courant souvent plus faible.
- Les structures flottantes, en revanche, permettent de positionner la turbine plus haut dans la colonne d'eau, là où la vitesse du courant est plus élevée, car l'intensité de l'écoulement augmente généralement avec la distance au fond.

Certaines hydroliennes intègrent aussi un carénage ou conduit Venturi, comme c'est le cas avec la technologie OpenHydro, développée par Naval Energies. Le carénage permet d'accélérer le flux d'eau entrant dans la turbine, augmentant ainsi la puissance récupérable. [15]

14. Les types d'hydroliennes

14.1 La turbine à axe vertical

possède une hélice fixée à un mât, avec des pales tournant autour de lui Des pales sont en rotation sur un axe vertical, entraînant un générateur électrique



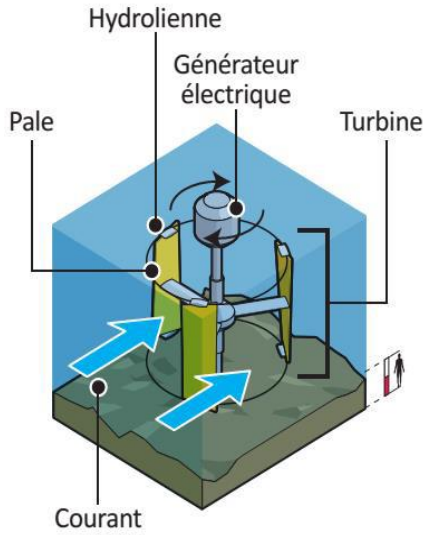


Figure 2.8 / Figure 2.9 : La turbine à axe vertical [17]

14.2 Turbine à écoulement libre

L'hydrolienne à écoulement libre reprend le même principe que pour l'éolien. La rotation de l'hélice provoquée par le courant entraîne un générateur électrique. L'hydrolienne comporte un nombre de pales variable selon les caractéristiques du courant.

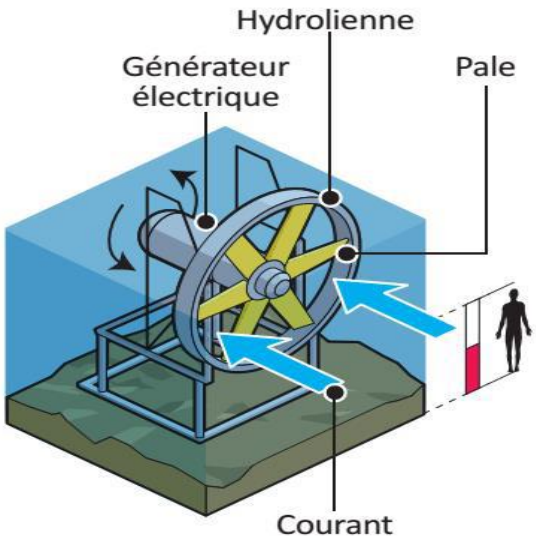


Figure 2.10: Turbine à écoulement libre [17]

14.3. L'effet Venturi

L'eau pénètre dans un conduit conique. En passant dans cet entonnoir, la vitesse des courants est augmentée ; cette accélération décuple la rotation de l'hélice, placée au point où le diamètre est le plus étroit et reliée à un générateur.

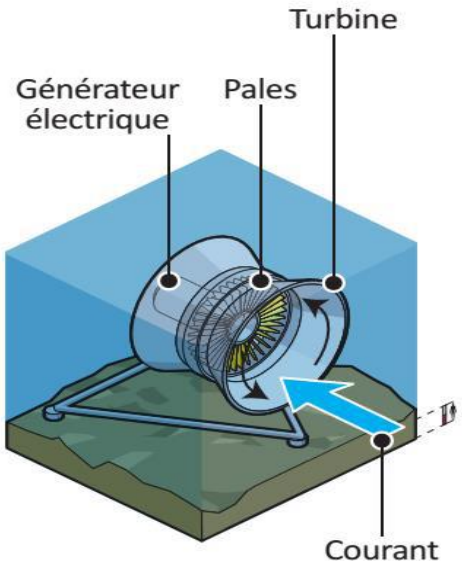
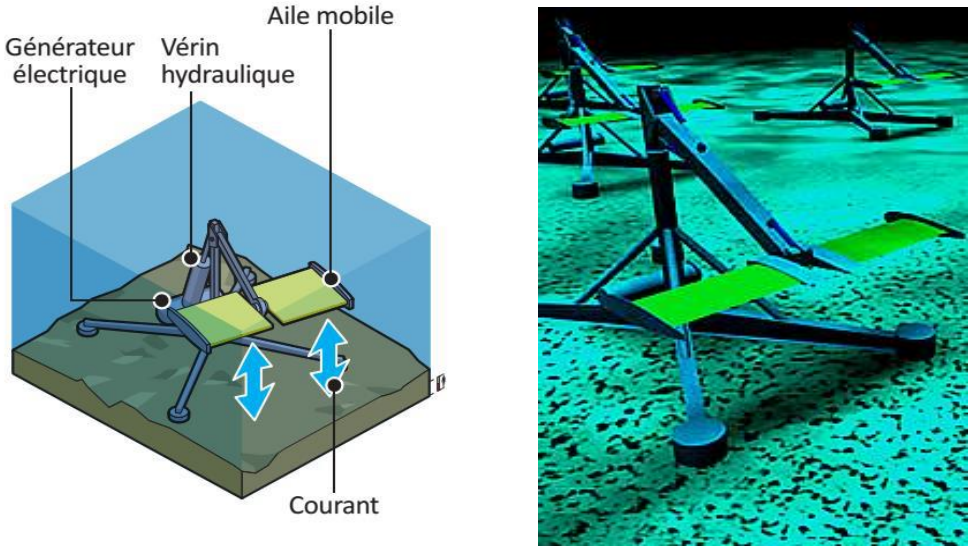


Figure 2.11 : hydrolienne a effet Venturi [17]

14.4. L'hydroptère oscillatoire

L'aile de l'hydroptère oscille face aux courants marins. Ce mouvement entraîne un vérin hydraulique qui envoie du fluide haute pression vers une turbine pour produire de l'électricité.



a. Schéma de principe b. la machine réelle

Figure 2.12. L'hydroptère oscillatoire [17]

15. Les caractéristiques d'une hydrolienne

15.1 Caractéristiques Structurelles et Dynamiques

- Les hydroliennes comportent des rotors (pales) qui tournent sous l'effet du courant, des paliers/bearings, et un système de gouvernance pour contrôler la vitesse et la stabilité.
- Le comportement dynamique du rotor dépend de l'interaction entre l'hydraulique, la mécanique, et parfois l'électromagnétisme. L'analyse de la dynamique inclut la réponse aux vibrations, la stabilité, et la gestion des pertes d'énergie internes.
- Les matériaux viscoélastiques dans le système de gouvernance peuvent influencer la stabilité et la réponse dynamique de l'hydrolienne3. [15]

15.2 Performances et Efficacité

- L'efficacité hydraulique varie selon la conception (type de turbine, forme des pales, angle d'attaque, etc.) et les conditions de fonctionnement (débit, vitesse de rotation).
- Les hydroliennes sont évaluées par leur coefficient de puissance, leur couple (torque), et leur rendement global. Par exemple, une micro-hydrolienne peut atteindre une efficacité

hydraulique de 72%6, tandis que des modifications géométriques peuvent améliorer l'efficacité jusqu'à 76,6%.

- Les pertes d'énergie (frottements, turbulences, cavitation) sont des facteurs clés qui limitent la performance et doivent être minimisées. [16]

15.3. Adaptabilité et Applications

- Les hydroliennes sont adaptées à différents contextes : micro-hydro (petits débits, faibles hauteurs de chute), fermes hydro cinétiques (plusieurs turbines en série), ou sites à faible potentiel.
- Les performances peuvent être optimisées en ajustant la configuration (nombre de pales, forme des guides, angles, etc.) et en tenant compte des interactions entre turbines dans une ferme. [15]

16. Puissance maximale extraite : Loi de Betz

Toutes les machines tournantes sous l'effet d'un fluide sont soumises à la loi de Betz, une loi qui définit la puissance maximale qu'on peut extraire de ce fluide traversant une turbine d'une section *S*. La puissance extraite de l'eau par le rotor est donnée par (GROUPE 12A ECP, 2005)

$$P = \frac{1}{2}\rho S\bar{v}(v_1^2 - v_2^2) \quad (2.1)$$

Avec : $v1$ et $v2$ sont respectivement les vitesses en amont et en aval de l'hydrolienne, ρ la masse volumique de l'eau et : $\bar{v} = \frac{1}{2}(v_1 + v_2)$ (2.2)

Par ailleurs, la puissance totale P0 d'un flux d'eau non perturbé traversant une surface similaire S sans la présence d'un rotor qui le ralentit, est :

$$P_0 = \frac{1}{2}\rho S v_1^3 \backslash tag2 \quad (2.3)$$

Le rapport entre ces deux puissances est alors de :

$$\frac{P}{P_0} = \frac{1}{2}\left(1 - \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^2\right)\left(1 + \frac{v_2}{v_1}\right) \quad (2.4)$$

La courbe de l'équation (3) atteint son maximum pour $v2/v1 = 1/3$, la valeur maximale est $P/P0 = 16/27$.

Vitesse spécifique ou Tip Speed Ratio La vitesse spécifique, appelée aussi paramètre d'avance, notée TSR pour Tip Speed Ratio, est le rapport entre la vitesse périphérique des pales et la vitesse de l'écoulement : $\lambda = \frac{\omega R}{v_\infty}$ (2.5)

avec ω la vitesse de rotation, R le rayon de l'hydrolienne et $v\infty$ la vitesse de l'écoulement loin de l'hydrolienne.

Coefficients de puissance et de moment On introduit le coefficient de moment comme suit :

$$C_M = \frac{M_z}{\frac{1}{2}\rho(H\phi)Rv_\infty^2} \quad (2.6)$$

avec Mz le couple suivant l'axe de rotation $\overrightarrow{oz}$, $S = H\ \phi$, H la hauteur de l'hydrolienne, ϕ le diamètre de l'hydrolienne.

Le coefficient de puissance CP est le rapport entre la puissance tirée de l'eau par l'hydrolienne et la puissance apportée par l'écoulement. IL s'écrit :

$$C_P = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho(H\phi)v_\infty^3} \quad (2.7)$$

Nous avons aussi la relation entre la puissance et le moment :

$$P = M_z\omega \quad (2.8)$$

À partir des relations précédentes, on peut déduire que :

$$C_P = \lambda C_M \quad (2.9)$$

17. Avantages et inconvénients de l'énergie hydrolienne :

17.1 Avantages :

- Energie propre et renouvelable
- Les courants marins sont réguliers et prévisibles, et l'estimation de la production d'électricité est plus précise
- Pas d'impact visuel comme avec les éoliennes.
- Elles peuvent être installées dans des zones marines non utilisées, évitant la concurrence avec l'agriculture ou l'habitat.
- Les installations peuvent être compactes et modulables selon la topographie du fond marin.

17.2. Inconvénients

- Coût très important.
- Pas encore assez de recul sur l'impact sur la faune et la flore sous-marine.
- Pour neutraliser le développement des algues sur les installations, on utilise une peinture « antifouling », contenant des biocides, produits toxiques pour la faune et la flore.

- Les filets peuvent se prendre dans les hélices et entraver le bon déroulement de la pêche.
- Les installations en mer sont souvent difficiles d'accès.
- L'entretien des composants sous l'eau est **complexe et coûteux**, nécessitant souvent des navires spécialisés ou des robots sous-marins. [13], [17]

18. Conclusion

La production d'électricité à partir des énergies renouvelables, notamment éolienne et hydrolienne, représente une alternative crédible, durable et respectueuse de l'environnement face aux énergies fossiles polluantes et limitées.

L'énergie éolienne a connu un développement spectaculaire à l'échelle mondiale, en particulier dans les pays industrialisés. Elle repose sur une technologie désormais bien maîtrisée, avec des éoliennes capables de produire de l'électricité à grande échelle. L'installation d'éoliennes nécessite toutefois des conditions de vent favorables, une étude rigoureuse de la ressource éolienne, et des infrastructures d'intégration au réseau. Malgré certaines limites – telles que l'intermittence du vent et l'impact visuel ou sonore – l'éolien constitue une solution efficace et rapidement déployable pour contribuer à la transition énergétique.

L'énergie hydrolienne, plus récente, exploite les courants marins ou fluviaux pour produire de l'électricité. Cette technologie présente de nombreux avantages : une production régulière et prévisible, un fort potentiel énergétique lié à la densité de l'eau, et un impact visuel quasi nul. Cependant, son développement est encore freiné par des coûts élevés, des défis techniques en milieu marin, et un nombre limité de sites réellement exploitables.

En combinant ces deux sources complémentaires – l'éolien pour sa maturité et sa flexibilité, l'hydrolien pour sa régularité et son fort potentiel – il est possible de construire un mix énergétique propre et diversifié, capable de réduire la dépendance aux énergies fossiles, de limiter les émissions de gaz à effet de serre et de garantir une production d'électricité plus durable.

Dans des pays comme l'Algérie, qui possèdent un potentiel éolien significatif au sud et un réseau hydrographique exploitable au nord, le développement de ces technologies représente une opportunité stratégique. Il est essentiel d'investir dans la recherche, l'aménagement des sites favorables et la mise en place de politiques énergétiques ambitieuses pour rattraper le retard accumulé et contribuer à un avenir énergétique plus propre.

Chapitre 3

Etude de la faisabilité de la conception de l'hydroéolienne

1. Introduction

Nous présentons dans ce chapitre, la conception d'un système hydroélectrique alimentant une maison et une ferme en utilisant un puits de 100 mètres de profondeur comme source d'eau. Le système inclut une turbine, un réservoir principal, et deux pompes pour gérer le cycle d'eau. Nous calculons la puissance générée, les pertes de charge, les besoins énergétiques, et proposons une allocation efficace de l'énergie excédentaire.

Suite à vos nouvelles directives, nous adaptons le système pour prioriser l'alimentation de la première pompe (qui élève l'eau du puits de 100 m vers le réservoir principal) et de la maison (23 kWh/jour), avec l'excédent dirigé vers la batterie sans contrainte de 10 kWh. La turbine XJ25-3.0DCTF4-Z, conçue pour des têtes de 18-20 m, est ajustée à notre hauteur effective de 8,03 m et un débit de 0,05 m^3/s pour vérifier sa viabilité.

2. Éléments à considérer pour le projet

2.1 Débit et hauteur de chute :

La faisabilité de produire de l'électricité dépend du débit d'eau et de la hauteur de chute (la différence de niveau) disponible. Les systèmes de micro-hydroélectricité nécessitent généralement un débit suffisant et une hauteur adéquate [18].

Figure 3.1 Sortie de Tuyau de Puits

2.2 Conception du système :

La première étape consiste à imaginer un système capable de convertir l'énergie cinétique de l'eau en électricité. Lorsque de l'eau est pompée ou descend naturellement par gravité depuis un puits vers les cultures, elle possède une énergie cinétique (liée à sa vitesse) et potentielle (liée à sa hauteur).

2.3 Solutions techniques envisageables :

- **Turbines hydroélectriques miniatures** : Des micro-turbines à faible débit peuvent être installées directement dans la conduite d'eau. Ces turbines utilisent la pression et le mouvement de l'eau pour faire tourner un générateur.
- **Systèmes à roue hydraulique** : Bien que plus traditionnels, les systèmes à roue peuvent être utiles dans les zones rurales où la technologie doit rester simple.
- **Hydroélectricité par chute d'eau** : Si la différence de hauteur entre le puits et les cultures est suffisante (même quelques mètres), une petite turbine Pelton ou Turgo peut être très efficace.
- **Intégration avec équipements d'irrigation**

Le système peut être conçu de manière à ne pas perturber l'irrigation existante mais plutôt à se greffer dessus pour exploiter l'énergie lors de l'écoulement. [18]

2.4 Critères à prendre en compte lors de la conception

- Débit d'eau disponible
- Hauteur de chute (ou pression)
- Durée et fréquence d'utilisation de l'eau
- Compatibilité avec les pompes ou conduites existantes

- **Stockage d'énergie**

La production d'électricité ne coïncide pas toujours avec les moments de consommation. Il est donc essentiel d'intégrer une solution de stockage pour garantir l'utilisation continue de l'énergie. [18]

- **Options de stockage**
  - **Batteries solaires** (Lithium-ion, plomb-acide ou LiFePO4) : Couramment utilisées dans les systèmes hors-réseau. Elles stockent l'énergie en courant continu (DC) pour une utilisation ultérieure.

- **Supercondensateurs** : Plus adaptés pour des applications nécessitant des cycles de charge/décharge rapides, bien qu'encore coûteux.
- **Stockage mécanique** : Dans certaines applications, des systèmes comme les volants d'inertie peuvent être envisagés, bien qu'ils soient plus rares en milieu rural.

- **Integration intelligente**
  - Ajouter un régulateur de charge pour éviter la surcharge ou la décharge profonde des batteries.
  - Installer un onduleur si les appareils agricoles fonctionnent en courant alternatif (AC).
  - Prédire les périodes **de** débit élevé pour ajuster la production et le stockage. [19].

2.5. Principales caractéristiques de calcul à prendre en compte

Pour concevoir un système de micro-hydroélectricité avec un puits et une pompe, les calculs suivants sont essentiels :

- **Calcul de la puissance hydroélectrique disponible**

Formule : $\mathbf{P = \eta \times \rho \times g \times Q \times H}$ (3.1)

- **P** : Puissance en watts (W)
- **η** : Rendement global (inclut le rendement de la turbine, du générateur, et des pertes dans le système ; typiquement entre 0,5 et 0,8 pour les micro-hydroliennes).
- **ρ** : Densité de l'eau (1000 kg/m³).
- **g** : Accélération gravitationnelle (9,81 m/s²).
- **Q** : Débit d'eau en m³/s (mesuré à la sortie de la pompe ou dans la conduite).
- **H** : Hauteur de chute en mètres (différence de niveau entre la sortie de la pompe et le point d'utilisation ou de la turbine)

- **Calcul du débit d'eau (Q)**

Mesurer la quantité d'eau pompée par seconde (en m³/s ou litres/s). Cela peut être fait :

- En chronométrant le temps nécessaire pour remplir un récipient de volume connu.
- En utilisant les spécifications de la pompe (débit nominal en m³/h ou l/s).

- En installant un débitmètre directement sur la conduite.

- **Calcul des pertes de charge**

Les pertes de charge dans la conduite (dues au frottement ou aux coudes) réduisent la hauteur effective (H). Ces pertes doivent être soustraites de la hauteur brute.en Utiliser la formule de Darcy-Weisbach ou des abaques pour estimer les pertes de charge en fonction :

- Du diamètre et de la longueur de la conduite.
- Du matériau de la conduite (PVC, polyéthylène, etc.).
- Du débit (Q).

- **Estimation du rendement global (η)**

Le rendement global dépend de :

- **La turbine** (Pelton, Turgo, Kaplan, etc.) : Typiquement 70-90 %.
- **Le générateur** : Typiquement 80-95 %.
- **Les pertes dans les composants électriques** (câbles, régulateur, onduleur) : Environ 5-10 % de pertes.

- **Dimensionnement du système de stockage**

On Calcul la capacité de stockage nécessaire (en kWh) pour répondre aux besoins énergétiques lorsque la turbine ne produit pas (par exemple, la nuit). Formule :

$$\mathbf{E = P \times t} \qquad (3.2)$$

Où : **E** : est l'énergie stockée (en Wh) et **t** est la durée d'utilisation (en heures).

Par exemple, si la turbine produit 500 W pendant 5 heures, elle génère 2500 Wh (2,5 kWh). La batterie doit être dimensionnée pour stocker cette énergie, en tenant compte des pertes (rendement de charge/décharge ≈ 85-90 % pour les batteries lithium-ion).

3. Faisabilité du projet pilote

Avant de généraliser le système à l'échelle de toute l'exploitation, il est fortement recommandé de mettre en place un prototype ou une installation de test. Ce projet pilote permet de valider le bon fonctionnement de la technologie dans des conditions réelles et d'apporter les ajustements nécessaires avant une mise en œuvre à grande échelle.

L'objectif principal est de vérifier si la production d'électricité estimée sur le papier correspond effectivement à celle obtenue sur le terrain. Il s'agit aussi d'observer comment le système s'intègre au terrain : l'eau s'écoule-t-elle correctement à travers la turbine ? Y a-t-il des pertes d'énergie ou des dysfonctionnements liés à la pression ou à la configuration du terrain ? En parallèle, il est crucial d'évaluer la durabilité du matériel utilisé. Le système doit pouvoir résister à l'humidité, à la poussière, à la corrosion et aux conditions climatiques de la région.

Ce projet pilote sert également à former les utilisateurs finaux, qu'il s'agisse des agriculteurs ou des techniciens locaux. Ils doivent être capables de comprendre le fonctionnement du système, de surveiller ses performances et d'en assurer l'entretien régulier pour garantir sa longévité.

Concrètement, le projet pilote consiste à installer une turbine simple sur une portion bien choisie de la canalisation d'irrigation. Une fois l'installation terminée, la production énergétique est suivie et enregistrée sur plusieurs jours ou semaines afin de détecter les éventuels écarts entre les performances théoriques et réelles. Durant cette période d'essai, tous les paramètres du système sont analysés, et des ajustements peuvent être faits pour optimiser le rendement. À la fin de cette phase expérimentale, une évaluation du retour sur investissement (ROI) est réalisée. Si les résultats sont satisfaisants en termes de production, de coût et de fiabilité, la généralisation du système à l'ensemble de l'exploitation peut alors être envisagée en toute confiance.

Même si le projet semble simple en apparence, une mauvaise conception peut entraîner des pertes énergétiques importantes ou endommager les systèmes existants. De ce fait la nécessiter de faire :

- **Évaluation de la faisabilité technique** : Identifier si le débit, la hauteur et les coûts justifient le projet.
- **Choix de la technologie** : Sélectionner la turbine, le type de stockage et les composants électriques les plus adaptés.

- **Sécurité** : Assurer que l'eau reste propre pour l'irrigation et que le système est protégé contre les surtensions ou débordements.
- **Subventions et aides** : Les entreprises spécialisées peuvent aussi vous aider à obtenir des aides gouvernementales ou ONG. [20]

4. Proposition d'un système hydroélectrique domestique agricole

Pour mettre en œuvre notre idée, il est essentiel de bien organiser les éléments du système, de la source d'eau à l'usage final. Dans ce contexte nous proposons la mise en œuvre d'une idée qui vise à exploiter l'énergie hydraulique d'un puits naturel pour produire de l'électricité afin d'alimenter une maison (23 kWh/jour) et charger une batterie (10 kWh/jour), avec un excédent (33,08 kWh/jour) destiné à la ferme et d'autres usages. Une hauteur de chute de 10 mètres et un débit initial de 0,05 m³/s sont considérés, ajustés par des pertes de charge.

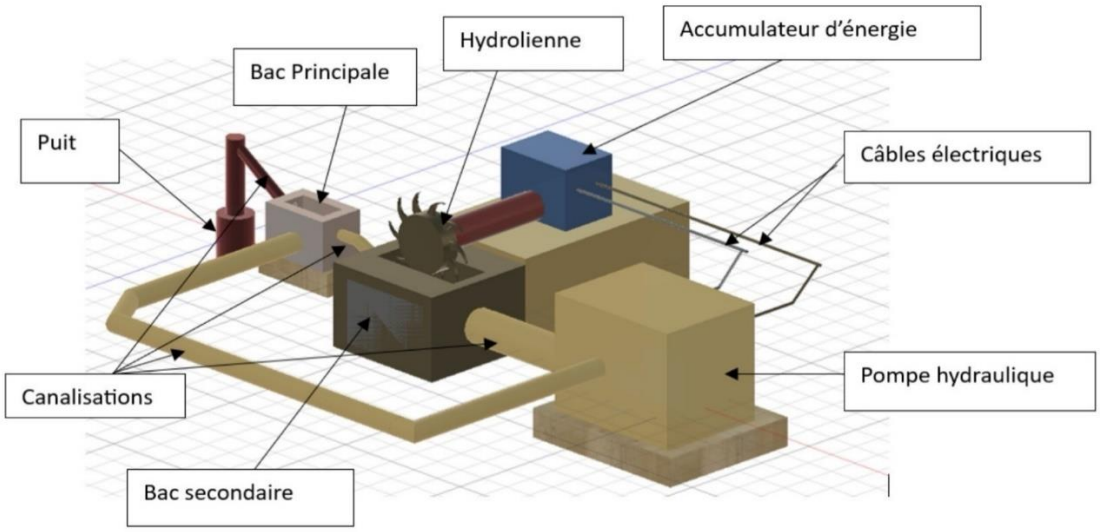


Figure 3.2 Schéma Général du System

4.1. Fonctionnement du système proposé

Description du Schéma :

- **Puit :** Source d'eau initiale, d'où l'eau est extraite par la pompe.
- **Pompe hydraulique :** Transporte l'eau du puits vers le système, créant une pression pour alimenter l'hydrolienne.
- **Hydrolienne :** Convertit l'énergie cinétique de l'eau en énergie mécanique, puis en électricité via un générateur.
- **Accumulateur d'énergie :** Stocke l'électricité produite pour une utilisation différée (par exemple, batteries).
- **Câbles électriques :** Transmettent l'énergie aux équipements ou au réseau.
- **Bacs (Principal et Secondaire) :** Récupèrent et régulent l'eau pour l'irrigation ou la réutilisation.
- **Canalisations :** Assurent l'acheminement de l'eau entre les différents composants.

Étapes de Fonctionnement :

1. L'eau est pompée depuis le puits vers le bac principal.
2. L'eau s'écoule à travers l'hydrolienne, générant de l'électricité.
3. L'énergie est stockée dans l'accumulateur ou distribuée via les câbles électriques.
4. L'eau restante est dirigée vers le bac secondaire pour l'irrigation ou la réutilisation.

4.1.1. Extraction de l'eau depuis le puits

Le processus commence au niveau du puits, qui sert de source principale d'eau. Une pompe hydraulique submersible, comme la SolidepumpMH Extra, est installée à l'intérieur du puits pour extraire l'eau des nappes phréatiques. Cette pompe est conçue pour fonctionner à des profondeurs allant jusqu'à 200 mètres, générant une pression suffisante pour soulever l'eau vers la surface. La profondeur typique du puits (par exemple, 100 mètres dans les régions algériennes comme le Nord ou les Hauts Plateaux) détermine la puissance nécessaire. L'eau extraite est ensuite dirigée vers le bac principal via des canalisations.

4.1.2. Transport de l'eau vers le bac principal

Une fois extraite, l'eau est acheminée à travers des canalisations en PVC ou PEHD, d'un diamètre typique de 75 mm, vers le bac principal. Ces canalisations, d'une longueur estimée à 100 mètres, sont conçues pour minimiser les pertes de charge grâce à une rugosité faible (coefficient de Hazen-Williams C = 150). Le bac principal agit comme un réservoir intermédiaire, régulant le flux d'eau et assurant une alimentation constante vers l'hydrolienne. La pente de la conduite peut être ajustée pour optimiser la hauteur de chute effective.

4.1.3. Conversion de l'énergie par l'hydrolienne

L'eau s'écoule du bac principal vers l'hydrolienne, un dispositif clé comme le Motenergy Micro Hydro Generator Kit (2-4 kW). L'hydrolienne, équipée d'une turbine (par exemple, Pelton ou Turgo), capture l'énergie cinétique de l'eau en mouvement. La turbine, avec un rendement de 88 %, fait tourner un générateur qui convertit cette énergie mécanique en électricité, avec un rendement supplémentaire de 90 %. La hauteur de chute nette (19,57 m dans l'exemple calculé) et le débit (0,01 m^3/s) déterminent la puissance produite, estimée à environ 1,4 kW dans les conditions actuelles.

4.1.4. Stockage de l'énergie dans l'accumulateur

L'électricité générée par l'hydrolienne est transmise via des câbles électriques vers un accumulateur d'énergie, tel qu'un système de batteries (par exemple, lithium-ion ou plomb-acide). Cet accumulateur, d'une capacité typique de 20 kWh, stocke l'énergie pour une utilisation différée, notamment la nuit ou lors de périodes de faible production. Un régulateur de charge est intégré pour éviter la surcharge ou la décharge profonde, assurant la longévité des batteries et une distribution stable de l'énergie aux équipements agricoles.

4.1.5. Distribution de l'énergie via les câbles électriques

Les câbles électriques relient l'accumulateur aux équipements consommateurs, tels que des pompes secondaires, des systèmes d'éclairage ou des capteurs d'humidité. Ces câbles, conçus pour minimiser les pertes (estimées à 8 %), garantissent une transmission efficace de l'énergie sur le site. Un onduleur peut être ajouté si les appareils fonctionnent en courant alternatif (AC), convertissant le courant continu (DC) stocké dans les batteries en AC adapté aux besoins.

4.1.6. Retour de l'eau vers le bac secondaire

Après avoir traversé l'hydrolienne, l'eau est redirigée vers un bac secondaire via des canalisations supplémentaires. Ce bac sert à récupérer l'eau utilisée, permettant son réacheminement vers les cultures pour l'irrigation. La conception du système garantit que l'écoulement reste fluide, avec des pertes minimales, et que l'eau reste propre pour une réutilisation agricole. Le niveau d'eau dans le bac secondaire peut être surveillé pour ajuster le débit en fonction des besoins.

4.1.7. Soutien par la pompe hydraulique

La pompe hydraulique joue un rôle crucial en maintenant la pression et le débit nécessaires au système. Installée après le bac secondaire, elle peut recirculer l'eau si nécessaire ou compenser les variations de débit dues à la profondeur du puits ou aux conditions climatiques. Avec une consommation estimée à 14,01 kW pour une hauteur de refoulement de 100 m, elle nécessite une alimentation électrique, qui peut être partiellement couverte par l'énergie produite ou complétée par une source externe (solaire ou réseau).

4.2. Composants Principaux du Système de Micro-Hydroélectricité

4.2.1. Pompe principale – SAER MBS Submersible Pump :

Cette pompe submersible, installée dans le puits, est chargée d'extraire l'eau à partir de grandes

Profondeurs pour alimenter le système. Elle fonctionne entièrement immergée, ce qui permet un refroidissement optimal du moteur et une aspiration directe.

Figure 3.3 SAER MBS Submersible Pump

Caractéristiques techniques :

- Type : Pompe submersible à moteur encapsulé
- Usage : Eaux claires, alimentation de systèmes pressurisés
- Profondeur d'installation : Jusqu'à 250 m
- Débit et pression élevés, idéal pour des applications continues

La SAER MBS est compacte, fiable, et conçue pour les systèmes autonomes comme les microcentrales hydrauliques. [21]

4.2.2. Hydrolienne – Micro Hydro Turbine XJ25-3.0DCTF4-Z

Cette micro-turbine transforme l'énergie cinétique de l'eau en électricité grâce à un système à deux injecteurs (double buse). Elle est le cœur de la production énergétique dans ce montage.

Figure 3.4 Micro Hydro Turbine XJ25-3.0DCTF4-Z [22]

Caractéristiques techniques :

- Débit optimal : ~18 L/s
- Hauteur de chute : 20–45 m
- Puissance : jusqu'à 3 kW
- Générateur intégré à courant continu

Avantages :

- Très efficace même avec des débits faibles
- Convient aux installations isolées et aux systèmes de récupération d'eau
- Entretien simple et fonctionnement silencieux. [22]

4.2.3. Canalisations – Réseau de tuyauterie

Les canalisations assurent le transport de l'eau entre les différents éléments du système : du puits vers le bac principal, de là vers la turbine, puis retour via la pompe secondaire.

Éléments clés à présenter :

- **Matériau** : PVC, polyéthylène haute densité (PEHD) ou acier galvanisé selon la pression

- **Diamètre** : Dimensionné selon le débit (éviter les pertes de charge)
- **Dispositions** : Prises d'air, clapets anti-retour, sections droites pour maximiser l'efficacité
- **Sécurité** : Résistance aux pressions et aux chocs thermiques/hydrauliques

Figure3.5Canalisations

Un bon dimensionnement garantit un rendement énergétique optimal en limitant les pertes de charge et en assurant un flux stable à la turbine. [23]

4.2.4. Pompe secondaire – SAER OP Multi-stage Surface Pump

Cette pompe de surface multi-étagée est utilisée pour réinjecter l'eau dans le circuit après son passage dans la turbine, ou pour assurer un circuit fermé (recyclage).

Caractéristiques techniques:

- Type : Pompe centrifuge multicellulaire horizontale
- Pression élevée avec faible consommation
- Silencieuse et résistante à la corrosion

La série OP de SAER offre une haute pression, idéale pour reconstituer une chute d'eau artificielle, essentielle pour faire fonctionner la turbine de manière continue. [24]

Figure 3.6 SAER OP Multi-stage Surface Pump

4.3. Faisabilité d'un système hydroélectrique pour une maison et une ferme

Cette étude ajuste la conception d'un système hydroélectrique utilisant un puits naturel de 100 mètres de profondeur, avec la turbine **Dual Nozzle XJ25-3.0DCTF4-Z** de Suneco Hydro (https://www.micro-hydro-power.com/micro-hydro-power-dual-nozzle-xj25-3.0dctf4-z.htm) à 70 % d'efficacité. Les besoins énergétiques sont redéfinis : la première pompe et la maison sont prioritaires, et l'excédent est alloué à la batterie sans exiger une capacité fixe de 10 kWh. Nous recalculons la puissance générée, les pertes de charge, et l'allocation d'énergie pour optimiser le système.

4.3.1. Paramètres du système

- **Puits :** Profondeur de 100 m, source d'eau naturelle, débit initial de 0,05 m³/s.
- **Réservoir principal :** Capacité de 15 m³, positionné à 10 m au-dessus de la turbine.
- **Hauteur de chute effective :** 8,03 m (après pertes de charge).
- **Débit à la turbine :** 0,05 m³/s.
- **Turbine :** Dual Nozzle XJ25-3.0DCTF4-Z, efficacité de 70 %.
- **Générateur :** Rendement de 90 %.
- **Rendement global :**
  - $\eta = \eta_{\text{turbine}} \times \eta_{\text{générateur}} = 0{,}70 \times 0{,}90 = 0{,}63$ (4.3)

- **Première pompe :** Éleve l'eau du puits (100 m) vers le réservoir, débit de 0,05 m³/s, rendement de 70 %.

- **Deuxième pompe :** Débit de 0,02 m³/s, fonctionnement 10 h/jour, hauteur de pompage 10 m, rendement de 70 %.

- **Consommation**** : Maison (23 kWh/jour), première pompe (à calculer), excédent pour la batterie.

4.3.2. Caractérisation numérique

- **Calcul des Pertes de charge (Équation de Hazen-Williams)**

Les pertes de charge dues au frottement dans les canalisations réduisent la hauteur disponible. L'équation de Hazen-Williams est :

$$[\boldsymbol{h_f = 10.67 \times L \times \left(\frac{Q}{C \times D^{2.63}}\right)^{1.852}}] \quad (3\text{-}4)$$

Où :

$(L = 50\,\text{m})(longueurestimée)$,

$(Q = 0{,}05\,\text{m}^3/\text{s})(débit)$,

$(C = 100)(coefficientpourunecanalisationmoyenne)$,

$(D = 0{,}2\,\text{m})(diamètre)$.

Calcul :

$$[0{,}2^{2.63} \approx 0{,}0477]$$

$$[\frac{0{,}05}{100 \times 0{,}0477} \approx 0{,}01048]$$

$$[(0{,}01048)^{1.852} \approx 0{,}0037]$$

$$h_f = 10.67 \times 50 \times 0{,}0037 \approx 1{,}97\,\text{m}$$

Hauteur effective :

$(H = 10 - 1{,}97 = 8{,}03\,\text{m})$.

- **Calcul de la Puissance hydraulique théorique**

La puissance générée par la turbine est donnée par :

$$[\boldsymbol{P\text{générée} = \rho \times g \times h \times Q \times \eta}] \quad (3\text{-}1)$$

Où

$(\rho = 1000\,\text{kg/m}^3)(densitédel'eau)$,

$g = 9{,}81\,\text{m/s}^2(gravité)$,

$h = 8{,}03\,\text{m}(hauteureffective)$,

$Q = 0{,}05\,\text{m}^3/\text{s}(débit)$,

$\eta = 0{,}63(rendementglobal)$.

Calcul :

$$[P_{\text{générée}} = 1000 \times 9{,}81 \times 8{,}03 \times 0{,}05 \times 0{,}63]$$

$$[P_{\text{générée}} = 1000 \times 9{,}81 \times 0{,}4015 \times 0{,}63 \approx 2482\,\text{W} \approx 2{,}48\,\text{kW}]$$

Énergie par jour :

$E_{\text{générée}} = 2{,}48 \times 24 \approx 59{,}52\,\text{kWh/jour}$.

- **Calcul de la consommation électrique par la première pompe**

La première pompe élève l'eau du puits (100 m) vers le réservoir principal avec un débit de 0,05 m³/s. La puissance est :

$$[\boldsymbol{P_{\text{pompe1}} = \frac{\rho \times g \times h \times Q}{\eta_{\text{pompe}}}}] \quad (3\text{-}6)$$

Où :

$h = 100\,\text{m}(hauteurdepompage)$,

$\eta_{\text{pompe}} = 0{,}7(rendement)$.

Calcul :

$[\ P_{\text{pompe1}} = \frac{1000 \times 9{,}81 \times 100 \times 0{,}05}{0{,}7}\ ]$

$[\ P_{\text{pompe1}} = \frac{49050}{0{,}7} \approx 70{,}07\,\text{kW}\ ]$

$E_{\text{pompe1}} = 70{,}07\,\text{kWh/h}$

- **Calcul de la consommation électrique par la deuxièmme pompe**

La deuxième pompe fonctionne 10 h/jour :

La deuxième pompe, avec un débit de 0,02 m³/s et 10 heures d'utilisation quotidienne, maintient le réservoir plein en recyclant une partie de l'eau, tout en respectant l'allocation de l'eau restante à l'agriculture et à la maison.

$$[P_{\text{pompe2}} = \frac{1000 \times 9{,}81 \times 10 \times 0{,}02}{0{,}7} \approx 2{,}8\,\text{kW}]$$

$$[E_{\text{pompe2}} = 2{,}8 \times 10 = 28\,\text{kWh/jour}].$$

- **Excédent pour la batterie**

Priorité est donnée à la maison et la deuxième pompe :

- Maison : 23 kWh/jour

- Deuxième pompe : 28 kWh/jour

- Total prioritaire : $(23 + 28 = 51\,\text{kWh/jour})$

nous calculons l'excédent basé sur la production restante :

$$E_{\text{excédent}} = 59{,}52 - 51 = 8{,}52\,\text{kWh/jour}$$

Cet excédent est alloué à la batterie.

4.3.3. Discussion des résultats

La turbine XJ25-3.0DCTF4-Z génère 2,48 kW (59,52 kWh/jour), permettant aux agriculteurs de bénéficier de l'eau pour produire de l'électricité. La consommation de la première pompe (70,07 kWh/jour pour 1 h) dépasse la production, nécessitant une alimentation externe (ex. : réseau ou solaire). Avec la maison (23 kWh/jour) et la deuxième pompe (28 kWh/jour) couvertes, un excédent de 8,52 kWh/jour est disponible pour la batterie. La turbine, optimisée pour 18-20 m, fonctionne à une efficacité réduite à 8,03 m. Pour optimiser :

- Ajuster le débit ou le temps de fonctionnement de la première pompe.

4.4. Caractérisation des éléments constituant le système

4.4.1 Le puits (source d'eau) :

Le puits représente la source initiale de l'eau utilisée pour l'irrigation et constitue donc le point de départ du système. Selon la profondeur et les caractéristiques du site, il peut être équipé soit d'une pompe électrique, soit d'un système de pompage manuel. La fonction de cette pompe est d'amener l'eau à la surface pour être redirigée vers les parcelles agricoles. Ce point joue aussi un rôle essentiel dans la production d'énergie, car il fournit la pression initiale de l'eau, un facteur déterminant pour optimiser le rendement des turbines placées en aval. Il est donc important de s'assurer que le débit est stable, continu et suffisant pour alimenter l'ensemble du circuit.

Figure 3.7 Puit

Il est à faire remarquer que la profondeur des puits en Algérie, varie considérablement selon les régions et les usages (agricoles, domestiques ou industriels). Voici des estimations générales :

- Nord de **l'Algérie** (région du Tell) : Les puits font généralement entre 30 et 100 mètres de profondeur, car les nappes phréatiques sont plus accessibles grâce à une pluviométrie plus élevée et à la présence d'eaux de surface.
- Hauts Plateaux et zones steppiques : Les puits atteignent souvent des profondeurs de 100 à 200 mètres, selon l'aquifère.
- Régions sahariennes (Sud de l'Algérie) : Dans des régions comme Adrar, Tamanrasset ou Ouargla, les puits dépassent fréquemment 300 mètres, certains allant jusqu'à 600 mètres ou plus pour atteindre des aquifères fossiles profonds comme l'Intercalaire Continental ou le Terminal Continental. [25]

4.4.2 La conduite d'eau (tuyauterie inclinée) :

Une fois l'eau extraite du puits, elle est transportée via une conduite, idéalement inclinée, qui permet de créer une différence de hauteur exploitable énergétiquement. Cette canalisation joue un double rôle : elle assure l'acheminement de l'eau vers les cultures, tout en créant une hauteur de chute, même faible, nécessaire pour convertir l'énergie potentielle de l'eau en énergie cinétique. Une inclinaison bien pensée, associée à un bon diamètre de tuyauterie, favorise un flux régulier

sans pertes de pression. Le choix du matériau (PVC, polyéthylène, etc.) et la résistance aux conditions climatiques sont également des éléments à prendre en compte dans la conception.

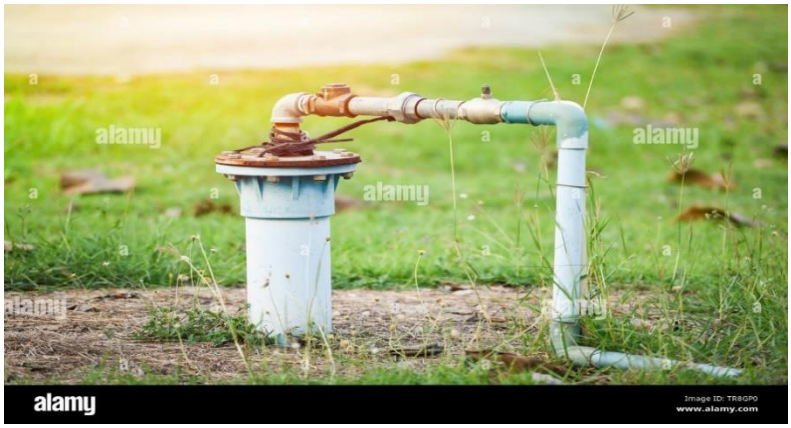


Figure 3.8 Conduite d'eau

4.4.3 Les hydroliennes ou micro-turbines :

Le cœur du système réside dans l'installation de micro-turbines ou d'hydroliennes adaptées aux faibles débits et basses pressions. Ces turbines doivent être installées à un emplacement stratégique de la conduite, généralement juste après le point de pompage ou sur une section en pente. Leur rôle est de capter l'énergie cinétique de l'eau en mouvement et de la convertir en énergie mécanique, qui sera ensuite transformée en électricité via un générateur. Le choix du type de turbine (Pelton, Kaplan, Turgo, etc.) dépendra des caractéristiques hydrauliques du site. Une installation correcte permet d'assurer un bon rendement énergétique même dans un contexte rural ou à faible débit.

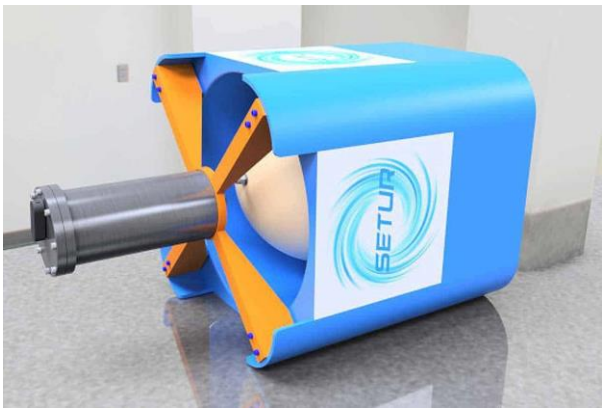


Figure 3.9 hydroliennes

4.4.4 Le système de stockage de l'énergie (optionnel) :

L'électricité produite par les turbines peut être utilisée directement ou stockée pour un usage différé. C'est là qu'intervient le système de stockage, souvent basé sur des batteries (lithium-ion, plomb-acide ou autres). Ce stockage permet de conserver l'énergie lorsque la production dépasse la consommation immédiate, par exemple en journée, pour pouvoir l'utiliser la nuit. Le système doit également inclure un régulateur de charge pour éviter la surcharge ou la décharge profonde des batteries, garantissant ainsi leur longévité. L'énergie stockée peut alimenter différents équipements agricoles : pompes secondaires, systèmes d'éclairage, capteurs d'humidité ou encore stations météo connectées. [26]

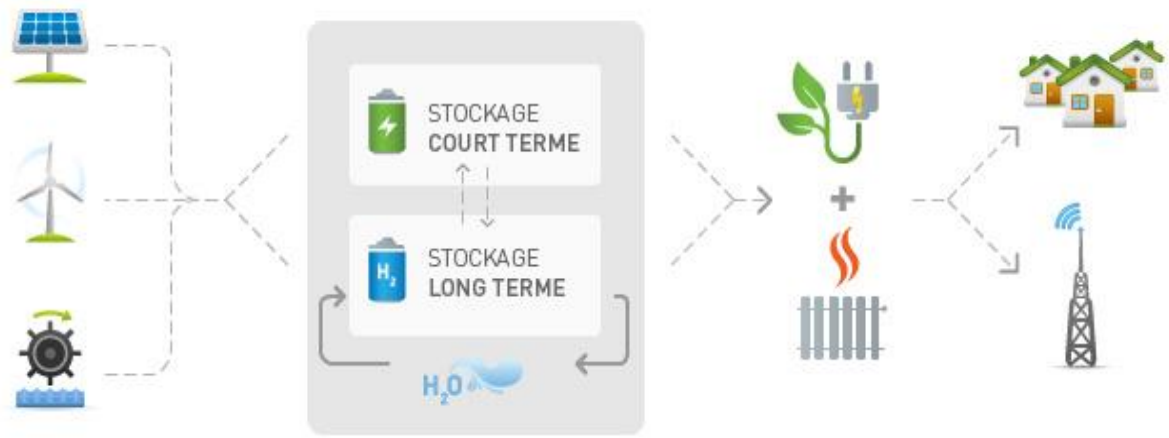


Figure 3.10 Schéma général du système stockage de l'énergie

4.4.5 Le bassin de stockage d'eau (final) :

Après avoir traversé les turbines, l'eau est récupérée dans un réservoir ou bassin de stockage. Ce bassin permet ensuite d'irriguer les champs selon les besoins agricoles.

Figure 3.11 bassin de stockage d'eau

5. Conclusion

Le travail proposé dans ce chapitre à permis d'explorer en détail la conception d'un système hydroélectrique alimentant une maison et une ferme à partir d'un puits de 100 mètres de profondeur. L'étude a démontré la viabilité technique d'un système intégrant la turbine Dual Nozzle XJ25-3.0DCTF4-Z, avec une hauteur de chute effective de 8,03 mètres et un débit de 0,05 m^3/s, générant une puissance théorique de 2,48 kW, soit environ 59,52 kWh par jour. Les calculs des pertes de charge (1,97 m) et des besoins énergétiques (maison : 23 kWh/jour ; première pompe : 70,07 kWh/jour ; deuxième pompe : 28 kWh/jour) ont révélé un excédent de 8,52 kWh/jour alloué à la batterie, malgré la dépendance initiale de la première pompe à une source externe en raison de sa forte consommation.

Cette conception, bien que prometteuse, met en lumière des défis, notamment l'inefficacité de la turbine à une hauteur inférieure à sa plage optimale (18-20 m) et la nécessité d'optimiser le fonctionnement de la pompe principale pour réduire sa consommation énergétique. Les solutions techniques envisagées, telles que l'ajustement du débit, l'intégration de pompes à haute efficacité comme la série SAER OP, ou l'ajout d'une source complémentaire (solaire ou réseau), offrent des pistes pour améliorer le rendement global. Le projet pilote recommandé permettra de valider ces hypothèses sur le terrain, d'évaluer la durabilité des composants dans les conditions locales, et de garantir une intégration harmonieuse avec les besoins agricoles et domestiques.

En somme, ce système représente une solution innovante pour l'exploitation durable de l'énergie hydraulique dans un contexte rural, avec un potentiel significatif pour les régions comme l'Algérie, à condition d'effectuer des ajustements précis et de tirer parti des subventions disponibles. Les prochaines étapes consisteront à affiner les paramètres techniques et à généraliser le système après une phase expérimentale réussie.

Ce projet permet aux agriculteurs de tirer parti de l'eau du puits pour générer de l'électricité, alimentant la maison (23 kWh/jour) et la deuxième pompe (28 kWh/jour), avec 8,52 kWh/jour pour la batterie. Cependant, la première pompe requiert une alimentation externe pour assurer le fonctionnement du système.

Conclusion Générale

Dans le domaine de la production énergétique, l'électricité joue un rôle central, soutenant le fonctionnement des sociétés modernes tout en posant des défis environnementaux et techniques majeurs. Une meilleure compréhension des mécanismes de production d'électricité, qu'ils soient basés sur des sources fossiles, nucléaires ou renouvelables, permet d'optimiser leur efficacité tout en réduisant leur impact écologique, contribuant ainsi à une transition énergétique durable.

Ce mémoire a abordé l'étude des différents modes de production électrique, en mettant l'accent sur les énergies renouvelables, notamment l'éolien et l'hydrolien, ainsi que sur la conception d'un système micro-hydroélectrique innovant. Nous avons analysé les principes de fonctionnement, les avantages, les limites et les impacts environnementaux des différentes technologies, en soulignant leur potentiel dans des contextes variés, y compris en Algérie. Une étude de faisabilité a été réalisée pour un système micro-hydroélectrique utilisant un puits de 100 mètres, intégrant une turbine adaptée à faible débit et des pompes pour répondre aux besoins énergétiques d'une maison et d'une ferme. Les calculs effectués montrent que la puissance générée, après prise en compte des pertes de charge, permet de couvrir les besoins prioritaires tout en stockant l'excédent pour des usages secondaires. Cependant, il est crucial de respecter les contraintes techniques, telles que le dimensionnement optimal des composants et la gestion des débits, pour éviter des pertes d'efficacité ou des dysfonctionnements.

Ainsi, une conception judicieuse, combinant des choix technologiques adaptés et une analyse précise des paramètres hydrauliques et électriques, est essentielle pour garantir une production énergétique fiable, durable et respectueuse de l'environnement, tout en minimisant les coûts et les impacts écologiques.

Bibliographie

[1] MAAFA, A., Énergie et environnement [en ligne]. Université Mentouri Constantine 1. Disponible sur : https://fac.umc.edu.dz/fstech/cours/ST/Energie%20et%20environnement_Maafa.pdf

[2] CONNAISSANCE DES ÉNERGIES, Fiche pédagogique : L'électricité [en ligne]. Disponible sur : https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/electricite

[3] PLANÈTE ÉNERGIES, Les différentes formes d'énergie [en ligne]. Disponible sur : https://www.planete-energies.com/fr/media/article/differentes-formes-denergie

[4] TOTALEENERGIES, Les différents types d'électricité [en ligne].Disponible sur : https://services.totalenergies.fr/particuliers/conseils/energies-habitat/electricite/les-differents-types-electricite

[5] SCIARRETTA, A., Les différentes formes d'énergies [PDF en ligne]. 2017. Disponible sur : https://technologie-sciarretta.ovh/wp-content/uploads/2017/09/Les-diff%C3%A9rentes-formes-d%C3%A9nergies.pdf

[6] ADEME. Guide tout comprendre éolien : Guide complet sur l'énergie éolienne [en ligne]. ADEME. Disponible sur : https://librairie.ademe.fr/ged/8955/guide-tout-comprendre-eolien.pdf

[7] ÉTS Montréal. *Types d'éolienne : Présentation sur les types d'éoliennes* [en ligne]. École de technologie supérieure, 2021. Disponible sur : https://ena.etsmtl.ca/pluginfile.php/1078903/mod_folder/content/0/01-Pr%C3%A9sentations%20%28format%20PDF%29/12.2%20Types%20d%C3%A9olienne%202021-01-27.pdf

[8] AOUAOUDA, I. *Étude sur l'énergie éolienne en Algérie* [en ligne]. Thèse d'ingéniorat, Université Badji Mokhtar – Annaba, 2022. Disponible sur : https://biblio.univ-annaba.dz/ingeniorat/wp-content/uploads/2022/05/AOUAOUDA-IMAD.pdf

[9] NERGICA. *Fiche technologie : Mise à jour sur la technologie éolienne* [en ligne]. Pour le climat, 2024. Disponible sur : https://pourleclimat.ca/storage/app/media/Fiches%20PDF%20-%20%C3%89nergies%20renouvelables/UMQ_Fiche_NERGICA_Technologie_2024-3.pdf

[10] Université de Perpignan. *Calcul éolienne BEM : Calculs de la théorie de l'élément de pale* [en ligne]. Université de Perpignan, 2019. Disponible sur : http://gim.iut.univ-perp.fr/cours/cours_polytech_4A/conference%20SupEnr%20L4-2019-calcul%20eolienne%20BEM.pdf

[11] Scribd. *Chapitre I : Introduction à l'énergie éolienne* [en ligne]. Scribd.Disponible sur : https://fr.scribd.com/document/629643679/9-chapitre-I

[12] Université de Tiaret. *Chapitre I : Principes de l'énergie éolienne* [en ligne]. Université de Tiaret. Disponible sur : http://dspace.univ-tiaret.dz/bitstream/123456789/11642/4/CHAPITREI..pdf

[13] STI Orléans-Tours. *Hydrolienne : Introduction aux turbines hydroliennes* [en ligne]. Académie Orléans-Tours. Disponible sur : http://sti.tice.ac-orleans-tours.fr/spip2/IMG/pdf/hydrolienne.pdf

[14] DIRIEH-NASTEHO, D. *Conception des systèmes d'énergie hydrolienne* [en ligne]. Thèse de doctorat, Université de Toulon, 2022. Disponible sur : https://theses.hal.science/tel-03847694/file/sygal_fusion_31307-djama_dirieh-nasteho_635a948a3ae02.pdf

[15] CLEMENCOT, L. *Optimisation des turbines hydroliennes* [en ligne]. Thèse de doctorat, Université de Bretagne Occidentale, 2023. Disponible sur : https://theses.hal.science/tel-04099182v1/file/CLEMENCOT_2023_archivage.pdf

[16] HAL Science. *Étude technique sur l'énergie hydrolienne* [en ligne]. HAL, 2016. Disponible sur : https://hal.science/hal-01370667/document

[17] Maison de l'Énergie. *Hydrolienne : Aperçu de l'énergie hydrolienne* [en ligne].

Maison de l'Énergie. Disponible sur : https://www.maisondelenergie.fr/sites/maisondelenergie.fr/files/hydrolienne_.pdf

. [18] International Renewable Energy Agency (IRENA), Micro-Hydro Power: Technology Brief [en ligne]. IRENA. Disponible sur : https://www.irena.org/publications/2020/Jan/Micro-Hydro-Power-Technology-Brief

[19] International Renewable Energy Agency (IRENA), *Renewable Energy Technologies: Storage Solutions* [en ligne]. IRENA. Disponible sur : https://www.irena.org/publications/2023/Feb/Renewable-Energy-Technologies-Storage-Solutions

[20] International Renewable Energy Agency (IRENA), Innovation Outlook: Renewable Mini-Grids [en ligne]. IRENA. Disponible sur : https://www.irena.org/publications/2022/May/Innovation-Outlook-Renewable-Mini-Grids

[21] SAER Elettropompe, MBS Submersible Pump Series [en ligne]. SAER. Disponible sur : https://www.saer.com/en/products/submersible-pumps/mbs-series

[22] Suneco Hydro, Micro Hydro Turbine Dual Nozzle XJ25-3.0DCTF4-Z [en ligne]. Suneco Hydro. Disponible sur : https://www.micro-hydro-power.com/micro-hydro-power-dual-nozzle-xj25-3.0dctf4-z.htm

[23] Hazen, A., & Williams, G. S., Hydraulic Tables: The Flow of Water in Pipes John Wiley & Sons.

[24] Suneco Hydro, Micro Hydro Turbine Dual Nozzle XJ25-3.0DCTF4-Z.

[25] Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural (Algérie), Étude sur les nappes phréatiques et l'irrigation en Algérie)

[26] International Renewable Energy Agency (IRENA), Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030 sur: https://www.mdpi.com/1996-1073/16/19/6874