



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Amar Thelidji- Laghouat

FACULTE: Technologies

DEPARTEMENT : Electrotechnique

MEMOIRE DE MASTER

Présenté par :
HAMDI Fatima el Zohra

DOMAINE : Sciences et Technologies.

FILIERE : Electrotechnique.

OPTION : Energies renouvelables en électrotechnique.

Thème

**Estimation de la production d'hydrogène vert par
l'énergie éolienne à la région de laghouat**

Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	qualité
CETTIH Saliha	Professeur	Président
BIRANE Mouhoub	MCB	Examineur
BOUCHIBA Oum El Kheir	MCB	Encadreur
CHAKNANE Ali	Professeur	Co -Encadreur

Promo : 2022/2023

Dédicaces

Avec tous mes sentiments de respect, avec D'expérience de ma reconnaissance, je dédie ma remise de diplôme et ma joie

*À mon paradis, à la prunelle de mes yeux, à la source de ma joie et mon bon fleur, ma lune et le fil d'espoir qui allumer mon chemin, ma moitié,
Maman.*

*À celui qui m'a fait une femme, ma source de vie, d'amour et d'affection. à mon support qui était toujours à mes côtés pour me soutirent m'encourager,
À mon prince papa*

*A mes chères sœurs **Fatima el Zohra Meriem** pour leurs encouragements permanents, et leur Soutien moral*

*À mes, frères **AbuBaker Iyad Djawad** je suis dévouée à leur amour, leurs encouragements et leur soutien.*

A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire,

*A mes chères amies **Amira yousra Khadîdja Safana wiam***



Remerciements

Tout d'abord, je remercie Dieu de m'avoir donné la volonté de me préparer à ce travail.

Ma gratitude et la reconnaissance que je peux exprimer de manière adéquate, nous allons d'abord à qui j'ai suggéré de suivre, diriger et encourager mon superviseur, Mme O. BOUCHAIBA pour terminer ce travail avec une grande générosité, qui trouve ici notre meilleure expression. C'est considéré. Sans sa vision et son soutien, il aurait été impossible de terminer ce travail. Restera connu Et son expérience est une source constante d'apprentissage pour moi. Je lui dois ma gratitude. Il me fait grand plaisir d'exprimer ici ma profonde gratitude à Professeur A. CHAKNANE , mon co-directeur de mémoire.

Mes remerciements vont également à :

Le nombre de jurés qui ont travaillé avec nous a l'honneur d'évaluer et de juger notre travail.

Nous tenons également à exprimer notre profonde gratitude à tous les enseignants du département de génie électrique ainsi qu'à tous ceux qui ont participé à notre formation.

SOMMAIRE.....	Error! Bookmark not defined.
Liste des tableaux	viii
Liste des figures	ix
Introduction générale	1
Chapitre 1 Survol sur les énergies de éolienne et d'hydrogène	3
1.1 Introduction.....	4
1.2 Définition de l'énergie éolienne.....	4
1.3 L'énergie éolienne en Algérie.....	4
1.4 Atlas éolienne de l'Algérie	5
1.5 Application des éoliennes	5
1.6 Production d'hydrogène	6
1.7 L'Electrolyse de l'Eau.....	7
1.8 Principe de l'électrolyse de l'eau	8
1.9 Technologies des électrolyseurs d'eau	8
1.9.1 Les électrolyseurs Alcalins	8
1.9.2 Les électrolyseurs SOE (Solid Oxide Electrolyser) à oxyde solide	9
1.9.3 Les électrolyseurs PEM.....	9
1.10 Production d'hydrogène dans la centrale éolienne locale	9
1.10.1 Description du système	9
1.11 Stockage d'hydrogène.....	10
1.11.1 Stockage à haute pression sous forme gazeuse.....	10
1.11.2 Stockage de l'hydrogène dans des hydrures métalliques.....	10
1.11.3 Stockage de l'hydrogène à basse température sous forme liquide	10
1.11.4 . Le stockage sous basse pression	11
1.12 Conclusion.....	11

Chapitre 2	12
Modélisation du Système éolien-	12
Hydrogéné	12
2.1 Introduction.....	13
2.2 Modélisation du vent	13
2.3 Variabilité temporelle du vent	13
2.3.1 Distribution de Wei bull	13
2.3.2 Distribution hybride Wei bull	14
2.3.3 Distribution de Rayleigh.....	14
2.4 Paramètres du vent	14
2.5 Variabilité spatial du vent.....	16
2.5.1 Loi de cisaillement du vent.....	16
2.5.2 Extrapolation verticale des paramètres de Wei bull.....	17
2.6 Modélisation du potentiel énergétique éolien.....	17
2.6.1 Densité de puissance disponible	17
2.6.2 Densité d'énergie annuelle récupérable maximale	17
2.6.3 Productivité éolienne(WPP)	18
2.6.4 Évaluation des performances des éoliennes	18
2.6.5 Facteur de capacité.....	18
2.6.6 Taux de fonctionnement	19
2.6.7 Système de production d'hydrogène.....	19
2.8 Etude économique	19
2.8.1 La valeur actuelle des coûts.....	20
2.8.2 Le coût actualisé de l'énergie	21
2.8.3 Coût unitaire de l'hydrogène	21
2.9 Conclusion	22
Chapitre 3 Production et étude économique	23
3.1 Introduction.....	24

3.2	Présentation des sites d'étude	24
3.3	Résultats de la simulation	25
3.4	Adaptation et choix des aérogénérateurs	27
3.5	Analyse des coûts énergétiques	31
3.6	Conclusion	33
	Conclusion Générale	34
	Reference Bibliographies	36

Liste des symboles

$f(v)$ est la fréquence d'occurrence de la vitesse du vent

Références Bibliographiques

k et C	<i>les paramètres de Wei bull.</i>
ff_0	<i>le pourcentage de vitesses de vent nulles.</i>
Z	<i>l'altitude en m à laquelle on désire calculer la vitesse du vent</i>
$V(z)$	<i>la vitesse en m/s à calculer</i>
Z_R	<i>l'altitude de référence en m</i>
$V(Z_R)$	<i>la vitesse connue à l'altitude de référence en m/s</i>
Z_0	<i>la rugosité en m</i>
A	<i>la surface en [m²]</i>
C	<i>le facteur d'échelle</i>
$f(v)$	<i>la densité de probabilité de présence de la vitesse du vent</i>
$Pe(V)$	<i>la puissance caractéristique de la courbe de puissance de l'éolienne</i>
T	<i>le temps de la période de calcul</i>
P_n	<i>la puissance nominale de l'éolienne.</i>
V_c	<i>la vitesse de démarrage de l'éolienne.</i>
V_f	<i>la vitesse d'arrêt de l'éolienne</i>
V_R	<i>la vitesse nominale de l'éolienne.</i>
$k(h)$	<i>le facteur de forme de Wei bull à la hauteur du moyeu de l'éolienne</i>
$c(h)$	<i>le facteur d'échelle de Wei bull à la hauteur du moyeu de l'éolienne</i>
P_n	<i>la puissance nominale de WCS.</i>

Références Bibliographiques

<i>CF</i>	<i>le facteur de capacité</i>
<i>Eh</i>	<i>le taux de fonctionnement</i>
<i>I</i>	<i>la dimension du terrain perpendiculaire à la direction prédominante</i>
<i>L</i>	<i>la dimension du terrain parallèlement à la direction prédominante</i>
<i>D</i>	<i>le diamètre du rotor de la machine</i>
<i>H</i>	<i>hauteur du pylône.</i>
<i>N1</i>	<i>le nombre d'aérogénérateurs par rangée.</i>
<i>N2</i>	<i>le nombre de rangée d'aérogénérateurs</i>
<i>N</i>	<i>le nombre total d'aérogénérateurs à placer sur le site.</i>
<i>IC</i>	<i>le coût d'investissement initial.</i>
<i>Com(p)</i>	<i>la valeur actualisée des coûts d'exploitation et de maintenance</i>
<i>E_{wgt}</i>	<i>pendant la durée de vie du système représente l'énergie totale générée par l'éolienne pendant toute sa durée de vie.</i>
<i>M_{h2}</i>	<i>mass d'hydrogène.</i>

Liste des tableaux

Tableau 1 - les expressions des vitesses moyennes, cubiques moyennes et la variance. . .	16
Tableau 2 - les paramètres du vent de la région de Laghouat à 10m.	25
Tableau 3 - Données techniques des différentes éoliennes commerciales utilisées.....	27
Tableau 4 – factures des capacités de chaque région.	29
Tableau 5 – Productivité annuelle de chaque région	29
Tableau 6 - Taux de fonctionnement de chaque région.	30
Tableau 7 – Mass d’hydrogène de chaque région	30
Tableau 8 - Gamme de coût spécifique des éoliennes.....	31
Tableau 9 - Coût unitaire (\$/kW ;\$/kg) de chaque région.	32

Liste des figures

Figure 1 - Conversion de l'énergie cinétique du vent.....	4
Figure 2 - Atlas vent de l'Algérie à 10 m du sol.....	5
Figure 3 - Une éolienne domestique pour votre maison.....	6
Figure 4 - Principales origines de l'hydrogène.	8
Figure 5 - Production de systèmes éoliens à hydrogène.	9
Figure 6 - système de production d'Hydrogène.	11
Figure 7 - site étudié, région de Laghouat	24
Figure 8 - Distribution annuelle de Wei bull à la région L'Est.....	25
Figure 9 - Distribution annuelle de Wei bull à la région sud	26
Figure 10 - Distribution annuelle de Wei bull à la région sud-ouest	26
Figure 11 - Distribution annuelle de Wei bull à la région nord.	27
Figure 12 - Productivité d'énergie éolienne annuelle	28
Figure 13 – Facteur de capacité de chaque région	28
Figure 14 – Coût unitaire énergie et hydrogène de la centrale éolienne.....	32

Introduction générale

Respirer de l'air frais, vivre dans un confort thermique et manger bio c'est le rêve de tout individu; pour cela le monde entier tente de trouver un remède pour remédier aux contraintes qui l'empêche. la pollution et l'augmentation des émissions de dioxyde de carbone (CO₂), en font parties, ceci est dû en premier lieu à la consommation d'énergie fossile (pétrole, gaz et charbon) qui est devenue au fil du temps la solution la plus adaptée. En conséquence, la consommation de ses énergies fossile provoque un grand impact sur notre environnement, la pollution atmosphérique, les émissions des gaz à effets de serre et bien sur le réchauffement climatique. Aujourd'hui, c'est face aux défis des sources d'énergie durables et propre que l'on peut diminuer la consommation des énergies polluantes pour cela, la promotion des énergies renouvelables est devenu l'un des principaux axes de la politique énergétique et de l'environnement dans de nombreux pays. L'Algérie face à l'épuisement des réservoirs de gaz au fil de ses derniers années, Elle s'engage pour un avenir propre et plus énergétique, une stratégie de développement énergétique a été mise en place pour viser à augmenter la part des énergies renouvelables, comme l'énergie du vent, solaire et la biomasse et l'hydrogène . Dans une vision d'augmenter le taux d'intégralité des énergies renouvelables dans le parc de production nationale et avec la disponibilité des grands potentiels d'énergie, en particulier l'énergie éolienne. L'énergie électrique d'origine éolienne est parfois considérée comme la plus prometteuse des énergies renouvelables à développer pour remplacer les hydrocarbures. L'hydrogène est la forme d'énergie la moins nocive pour l'environnement. Équipé d'un cycle énergétique fermé, il peut être utilisé pour diverses applications telles que la production d'électricité, le chauffage des habitats et l'approvisionnement en carburant des transports. L'hydrogène se présente comme un excellent alternatif dans un premier temps et un substitut par la suite. Elle peut jouer un rôle plus important que l'énergie conventionnelle. En effet, elle a l'avantage d'être non polluante et peut utiliser les mêmes moyens de transport que l'énergie conventionnelle. Non seulement il peut répondre aux besoins énergétiques locaux, mais il peut également être un important produit d'exportation.

Dans ce cadre, plusieurs études ont été menées pour rechercher des sources d'énergies renouvelables, notamment l'énergie éolienne dans cette zone d'étude, afin de l'exploiter dans la production d'énergie électrique. Suite aux études [4, 5] du gisement éolienne d'un nombre

Références Bibliographiques

de sites entourant la ville de Laghouat nous donne une vitesse moyenne annuelle du vent comme suit : la région sud $\langle V \rangle = 6.12$ m/s, la région Nord $\langle V \rangle = 4.46$, la région sud-est $\langle V \rangle = 3.85$, et la région sud-ouest $\langle V \rangle = 6.49$ m/s [6].

Ce travail se penche sur une étude techno-économique pour estimer la production d'hydrogène vert à source éolienne à la région de Laghouat et d'évaluer le coût unitaire de kilowattheure éolien et chaque kilogramme de masse d'hydrogène.

Le premier chapitre comprendra des informations générales sur les éoliennes et ces applications, et nous montrerons la production et le stockage d'hydrogène

Dans le deuxième chapitre, nous présentons les différents modèles utilisés dans la modélisation de la vitesse du vent pour l'estimation de la productivité éolienne de chaque aérogénérateur, afin d'évaluer la masse d'hydrogène produite et le coût unitaire de chaque source de production.

Le dernier chapitre de ce travail discute les différents résultats obtenus dans l'étude des gisements éoliens de la région, la vitesse moyenne, la densité d'énergie moyenne ainsi la production énergétique éolienne et la masse d'hydrogène à chaque région. De plus, nous estimerons le coût unitaire éolien et d'hydrogène vert produit.

Finalement une conclusion générale résumera tous les résultats obtenus dans ce présent mémoire.

Chapitre 1

Survol sur les énergies d'éolienne et d'hydrogène

1.1 Introduction

L'électricité produite par les éoliennes est utilisée pour les circuits de charge de batterie, les systèmes de production d'énergie résidentiels, les systèmes de production distribuée et les grands réseaux de services publics. Les différents éléments des éoliennes sont conçus pour maximiser cette conversion énergétique ; d'une manière générale, une bonne adéquation entre les caractéristiques couple/vitesse de la turbine et de la génératrice électrique est indispensable. [1]

1.2 Définition de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne (du mot grec Eole, le Dieu du vent) est l'énergie produite par le vent. On appelle énergie éolienne, la conversion de la force des vents en énergie mécanique, énergie électrique ou énergie cinétique.

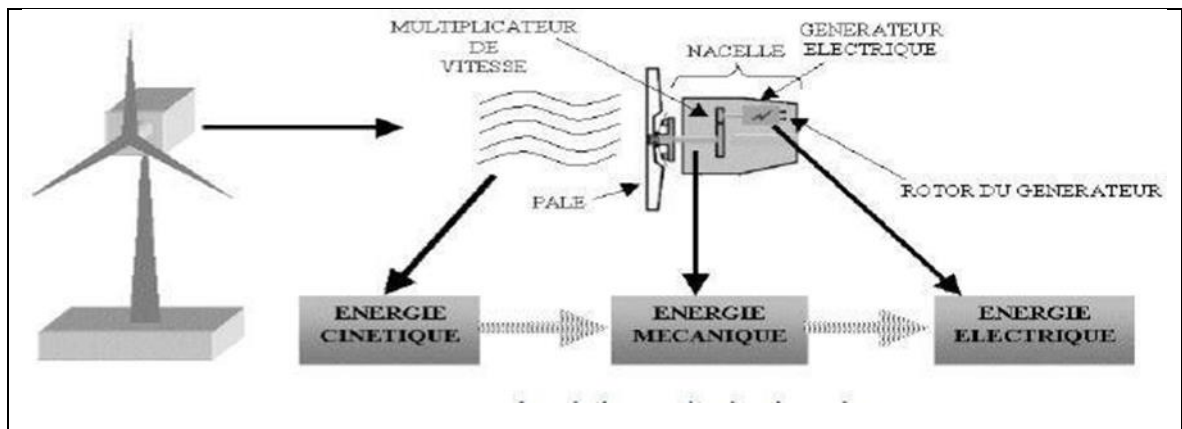


Figure 1 - Conversion de l'énergie cinétique du vent.

1.3 L'énergie éolienne en Algérie

En 1957 c'était la première tentative de raccorder des éoliennes au réseau de distribution d'énergie électrique, avec l'installation d'un aérogénérateur de 100 kW sur le site des grands vents (Alger). Le 1er prototype était un bipale de type pneumatique à pas variable de 30 m de haut avec un diamètre de 25m conçu par l'ingénieur ANDREAU initialement installer en Angleterre et qui fut rachetée par Électricité et Gaz d'Algérie puis démontée et installée en Algérie. [2]

Références Bibliographiques

A la fin des années 80 l'exploitation de l'énergie éolienne a pris un essor considérable, en 2000 et afin de permettre une vue globale des répartitions géographique des ressources éoliennes, N.Kasbadji Merzouk a cartographié l'Atlas éolien de l'Algérie pour localiser des régions intéressantes en termes d'énergie éolienne telles que les régions d'Adrar et de Tiaret.

1.4 Atlas éolienne de l'Algérie

L'Atlas vent a été actualisé en 2011 par F.Chellali et en 2013 par S.Boudia. En 2017, un nouvel Atlas a été établi par H.Daaou et S.Haddouche en utilisant des bases de données de vitesse moyennes tri-horaires de 74 station météorologique de L'ONM(l'Office National de la Météorologie). Sur le terrain, trois éoliennes de 25 KW de 10m de diamètre et à une hauteur de 18m, ont été installées en 2006 dans le site des Grands Vents de Dély Brahim à Alger, en 2014 première ferme éolienne de 10M W a été installée et mise en service en 2014, dans les régions de Kaberten dans la wilaya d'Adrar. Cette centrale de production d'électricité est la première du genre à l'échelle nationale, est constituée de 12 éoliennes Games de 850 kW de puissance. [2]

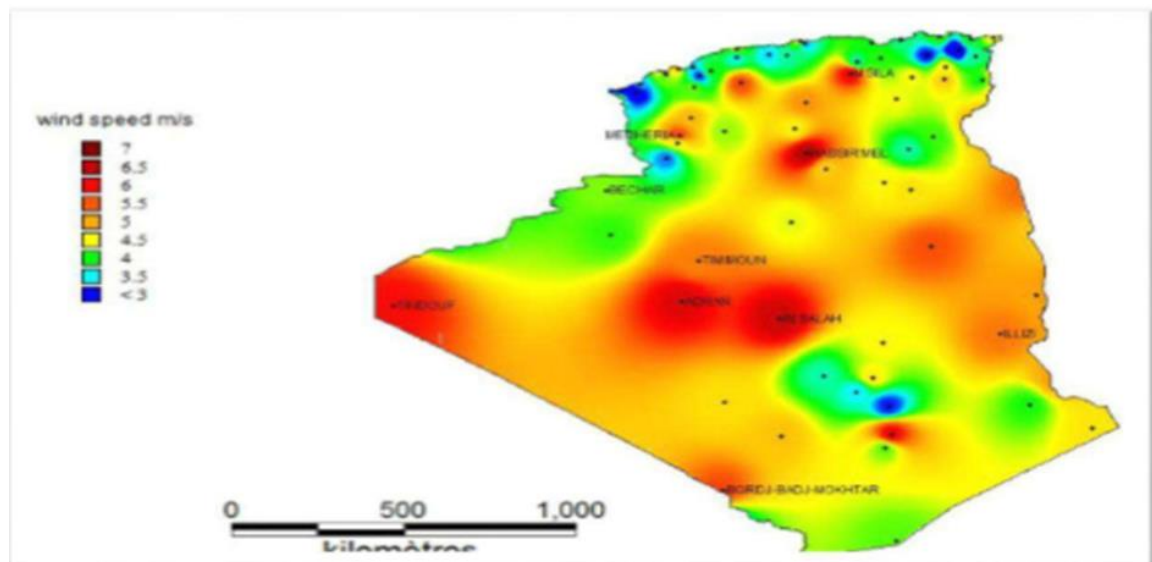


Figure 2 - Atlas vent de l'Algérie à 10 m du sol.

1.5 Application des éoliennes

L'utilisation des aérogénérateurs et même des puits de pétrole s'est accrue du fait qu'ils constituent une source d'énergie gratuite et inépuisable pour les nations. Ils ont également la

Références Bibliographiques

propriété unique que l'énergie éolienne, une fois transformée mécaniquement à partir de l'énergie cinétique, peut être utilisée principalement de deux manières : soit directement, soit pour entraîner un générateur électrique. L'électricité est produite à l'aide de deux technologies différentes. Soit l'énergie est utilisée directement par injection sur un réseau de distribution, soit elle est stockée dans des accumulateurs pour une utilisation ultérieure [3].

Il existe des éoliennes dont la puissance varie de 100 watts à 20 kilowatts, et elles peuvent être utilisées pour diverses choses.

- Une maison.
- Un logement urbain.
- Une maison de vacances.
- Un logement mobile (bateau, caravane, camping-car...).
- Une maison située en site d'électrification isolée, et les moulins à vent.



Figure 3 - Une éolienne domestique pour votre maison.

1.6 Production d'hydrogène

L'hydrogène n'est pas une énergie primaire, comme le pétrole ou le charbon, mais un vecteur énergétique. Cela signifie qu'il doit être, comme l'électricité, produit à partir d'une source d'énergie. Une combinaison des mots « hydro=eau et gène=générateur électrique, ce

Références Bibliographiques

qui signifie l'hydrogène signifie générateur d'eau et c'est l'élément le plus abondant dans l'univers. L'hydrogène (H) est en tête du tableau de Mendeleïev [4].

On peut avoir l'hydrogène juste par la séparation des éléments chimiques puisqu'il n'existe pas à l'état naturel, ou bien il existe mais il n'est pas exploité industriellement dont l'atome H est un composant et par la mobilisation d'une source d'énergie, il n'y a pas de mine d'hydrogène. Celui-ci doit être fabriqué.

Plusieurs techniques de production existent. Certaines sont arrivées à maturité de production commerciale, d'autres sont encore à l'échelle expérimentale. La décomposition catalytique du gaz naturel, l'oxydation partielle des huiles lourdes, la gazéification du charbon et l'électrolyse de l'eau sont parmi les procédés de production d'hydrogène industrialisés ou en phase d'industrialisation.

- Production par les combustibles fossiles (hydrocarbures).
- Production d'hydrogène à partir du charbon.
- Production par l'électrolyse de l'eau.

1.7 L'Électrolyse de l'Eau

L'électrolyse de l'eau consiste à séparer l'eau H_2O en hydrogène H_2 et oxygène O_2 lors d'une réaction d'oxydo-réduction. Le procédé industriellement disponible à l'heure actuelle consiste à réaliser cette électrolyse à l'aide d'électricité. Au regard du coût de la production par électrolyse, seul 4% de l'hydrogène est actuellement produit par électrolyse dans les cas où l'électricité est bon marché ou lorsqu'une haute pureté d'hydrogène est nécessaire.

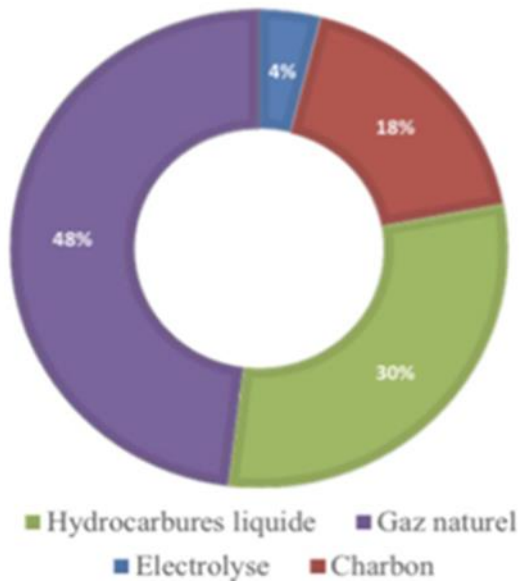


Figure 4 - Principales origines de l'hydrogène.

1.8 Principe de l'électrolyse de l'eau

L'électrolyse de l'eau consiste en deux réactions chimiques ayant lieu séparément sur deux électrodes. A la cathode se produit la réduction de l'eau suivant l'équation (1.1) et à l'anode l'oxydation des ions hydroxydes selon l'équation (1.2).



Les électrons (e-) intervenant dans les réactions sont apportés par le circuit électrique.

1.9 Technologies des électrolyseurs d'eau

Il existe actuellement trois types d'électrolyseur d'eau classés selon la nature de leur électrolyte dont résulte leur température de fonctionnement :

1.9.1 Les électrolyseurs Alcalins

Commercialisés et représentant la quasi-totalité des ventes d'électrolyseurs. L'électrolyse est réalisée à partir d'une solution aqueuse d'hydroxyde de potassium (KOH) dont la concentration varie en fonction de la température de fonctionnement.

1.9.2 Les électrolyseurs SOE (Solid Oxide Electrolyser) à oxyde solide

Un électrolyte en céramique, conducteur à haute température sont encore au stade de la recherche [5]. Cette technologie est directement issue des développements de piles à combustible de type SOFC, fonctionnant entre 600 et 1100°C et cet électrolyse à haute température (EHT) est un des procédés de production d'hydrogène à grande échelle les plus prometteurs pour le futur [6].

1.9.3 Les électrolyseurs PEM

À membrane échangeuse de protons, sont encore cours de développement mais proches de la commercialisation. Cette technologie se distingue par un électrolyte solide à membrane polymère conductrice de protons PEM à basse température.

1.10 Production d'hydrogène dans la centrale éolienne locale

1.10.1 Description du système

Le système que nous avons étudié dans cette étude est une installation de production massive d'hydrogène à partir du vent. Puissance. Il se compose d'une turbine éolienne, d'un convertisseur AC/DC et d'un électrolyseur alcalin Fig.4. Dans ce cas, l'AC. La sortie de la turbine éolienne est convertie en tension DC appropriée pour le fonctionnement de l'électrolyseur par un AC/DC Le convertisseur.

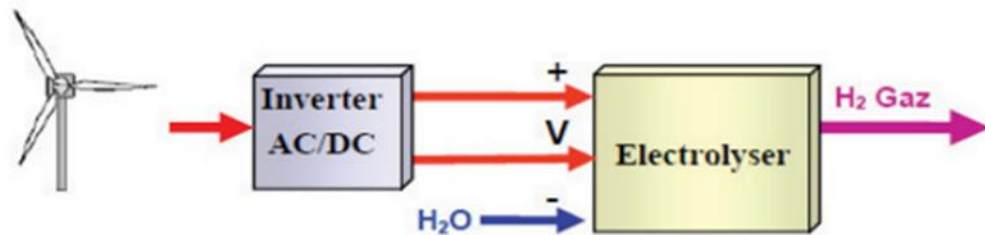


Figure 5 - Production de systèmes éoliens à hydrogène.

1.11 Stockage d'hydrogène

Le terme "stockage d'hydrogène" fait référence à toute méthode de stockage d'hydrogène gazeux en vue de son utilisation éventuelle comme source chimique ou énergétique. Plusieurs options de stockage, chacune avec ses propres avantages et inconvénients.

1.11.1 Stockage à haute pression sous forme gazeuse

Le conditionnement de l'hydrogène sous forme gazeuse est une option prometteuse. Les contraintes sont toutefois nombreuses. Léger et volumineux, l'hydrogène doit être comprimé au maximum pour réduire l'encombrement des réservoirs. Des progrès ont été faits : de 200 bars, pression des bouteilles distribuées dans l'industrie, la pression est passée à 350 bars aujourd'hui et les développements concernent maintenant des réservoirs pouvant résister à des pressions de 700 bars. De plus, l'hydrogène est l'élément le plus petit de l'univers, il faut donc trouver des matériaux pouvant contenir l'hydrogène sans risque de fuite [7].

1.11.2 Stockage de l'hydrogène dans des hydrures métalliques

Dans cette méthode, l'hydrogène est « capturer » dans les interstices d'une poudre d'alliage métallique comprimée, un peu comme une éponge absorbe de l'eau. Cette technique est très avantageuse notamment une construction simple et un niveau élevé de sécurité. L'automobile reste pour l'instant hors de portée des hydrures existant actuellement, à cause du poids

1.11.3 Stockage de l'hydrogène à basse température sous forme liquide

Pour cette technique, beaucoup d'énergie est utilisée pour le refroidissement aux températures qu'exige l'opération : -253°C . Stocker l'hydrogène sous cette forme est possible mais nécessite un développement plus poussé. En effet, cette méthode est déjà utilisée dans le domaine spatial. Mais l'hydrogène est le gaz le plus difficile à liquéfier juste après l'hélium. Il est donc possible d'utiliser de l'hydrogène sous forme liquide pour le stocker mais cela revient très cher, ce qui rend son application impossible aux particuliers pour le moment. Il faut aussi ajouter le fait que près de 3 à 4% de l'hydrogène s'évapore chaque jour [8].

1.11.4 . Le stockage sous basse pression

Cette technique serait une alternative au stockage sous pression gazeuse. Elle consisterait à stocker l'hydrogène dans des matériaux capables d'absorber l'hydrogène et de le restituer lorsque cela est nécessaire. Il pourrait s'agir de matériaux carbonés ou encore certains alliages métalliques. Nous utilisons le conditionnel car ce mode de stockage n'est encore qu'un objet d'étude, il n'est pas encore au point

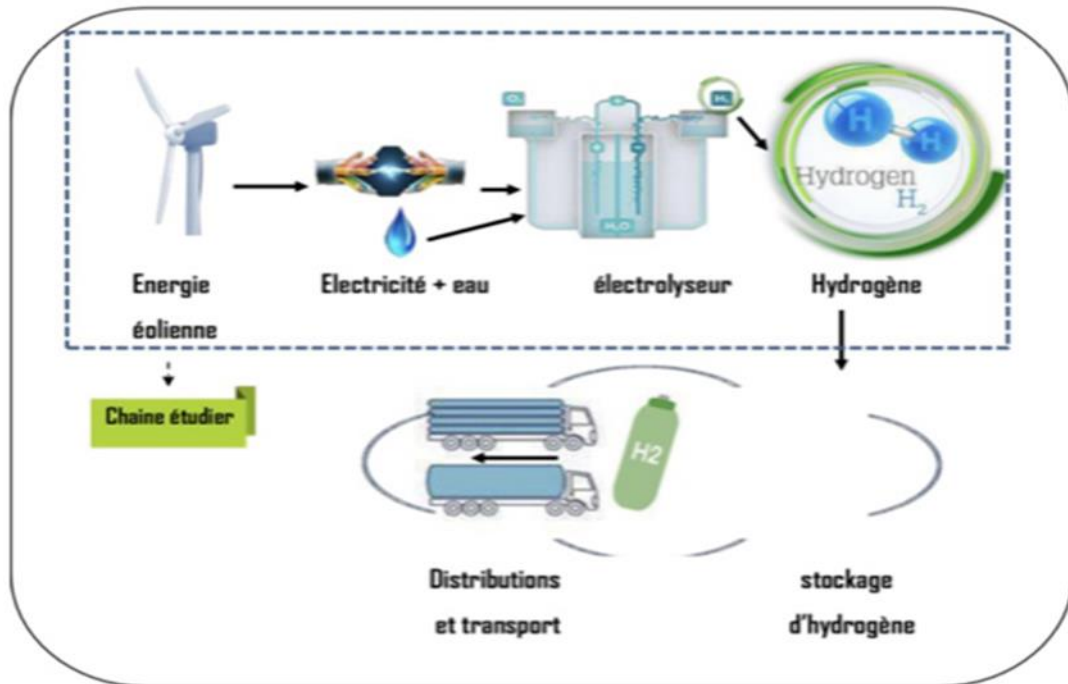


Figure 6 - système de production d'Hydrogène.

1.12 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté quelque généralité sur le gisement éolienne et l'hydrogène pour l'utilisation de l'énergie éolienne, Puis nous avons donné un bref définition sur l'énergie éolienne et le parcours de l'énergie éolienne en Algérie, aussi les applications des éoliennes en général. Par la suite, nous avons présenté la production d'Hydrogène et l'électrolyseur, et pour finir ce chapitre nous avons présenté en bref les différents types de l'électrolyseur et le stockage d'hydrogène.

Chapitre 2

Modélisation du Système éolien- Hydrogéné

2.1 Introduction

Le choix du site et la caractérisation temporelle et spatiale de la vitesse du vent de site Représentent les facteurs les plus importants dans le processus d'implantation d'une centrale Éolien. En effet, la valeur moyenne de la vitesse du vent sur une année ou une période étudiée et sa variation dans le temps sont les facteurs qui ont le plus grand impact sur la rentabilité économique d'une centrale éolienne. Ainsi l'analyse de la vitesse du vent sur un site représente la première étape de tout projet éolien permettant d'estimer la capacité de production de ce dernier.

2.2 Modélisation du vent

L'analyse fréquentielle de la vitesse du vent met en évidence les classes de vitesse prédominantes. Par conséquent, facilite la tâche du choix des aérogénérateurs qui fournissent le meilleur rendement.

2.3 Variabilité temporelle du vent

La variabilité temporelle des vitesses du vent sera analysée à l'aide des paramètres de la loi de Weibull et hybride Weibull.

2.3.1 Distribution de Weibull

La distribution du vent se fait en fonction de la loi de Weibull utilisée sur des séries de mesure du vent (d'au moins une année). La loi de distribution de vitesses de Weibull s'exprime par la relation. [9]

$$f(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \times \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \times \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right) \quad (1.3)$$

Où :

$f(v)$: est la fréquence d'occurrence de la vitesse du vent ; k et C : sont les paramètres de Weibull.

Références Bibliographiques

Le paramètre k est sans dimension et caractérise la forme de la distribution de fréquence, alors que C, est le facteur d'échelle mesuré en m/s qui détermine la qualité du vent, il est lié à la vitesse moyenne du vent par l'équation (2.3).

2.3.2 Distribution hybride Wei bull

La loi de Wei bull modifiée est utilisée pour caractériser les stations pour lesquelles la proportion de vents nuls est très importante. En effet, la loi de Wei bull classique ne permet pas de considérer les vents nuls la loi modifiée [10, 11] est défini par l'équation (2.2)

$$f(v) = \left\{ \begin{array}{l} ff_0 \dots \dots \dots \text{pour } v = 0 \\ (1 - ff_0) \times \left(\frac{k}{c}\right) \times \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \times \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right) ; \text{pour } v \neq 0 \end{array} \right\} \tag{2.2}$$

Où :

*ff*₀: Étant le pourcentage de vitesses de vent nulles.

Les deux distributions sont employées pour déterminer les vitesses caractéristiques du site [12,13]

2.3.3 Distribution de Rayleigh

La distribution de Rayleigh est un cas particulier de la distribution de Wei bull pour le cas où le facteur de forme k est égal à 2. Sa densité de probabilité est donnée par :

$$f(v) = 2\left(\frac{v}{c^2}\right) \times \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^2\right] \tag{2.3}$$

2.4 Paramètres du vent

Toutefois la distribution de Wei bull classique (fonction de deux paramètres) est la plus indiquée. L'utilisation de ces deux paramètres permet l'évaluation d'un nombre important de propriétés de la distribution, d'où une meilleure caractérisation des sites. Lois utilisées pour la détermination des facteurs éoliens caractérisant un site, à savoir :

- la vitesse moyenne du vent.
- La vitesse la plus fréquente
- La vitesse du vent transportant le maximum d'énergie
- la vitesse cubique moyenne du vent.
- La variance et l'écart type de la distribution des vitesses
- La vitesse max du vent.
- Le facteur de puissance.
- l'indice de variation.

2.4.1. Vitesse moyenne

Partant des mesures de vent (vitesse et direction), la vitesse moyenne pondérée s'écrit :

$$\langle V \rangle = \int_0^{\infty} f(v) dV \quad (2.4)$$

Si le calme ff_0 est inférieur ou égale à 15% :

$$\langle V \rangle = (1 - ff_0) \cdot C \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (2.5)$$

Si le calme ff_0 est supérieur à 15% ;

$$\langle V \rangle = (1 - ff_0) \cdot C \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (2.6)$$

2.4.2. La vitesse du vent transportant le maximum d'énergie

$$V_{EM} = C \cdot \left(\frac{K+1}{K}\right)^{\frac{1}{k}} \quad (2.7)$$

2.4.3. La vitesse la plus fréquente

$$V_F = C \cdot \left(\frac{K-1}{K}\right)^{\frac{1}{k}} \quad (2.8)$$

Tableau 1 - les expressions des vitesses moyennes, cubiques moyennes et la variance.

Distributions	$\langle V \rangle$	$\langle V^3 \rangle$	$\langle V^2 \rangle$
Wei bull	$C \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)$	$C^3 \cdot \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right)$	$C^2 \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right) \right]$
Hybride Wei bull	$(1 - ff_0) \cdot C \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)$	$(1 - ff_0) C^3 \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right)$	$(1 - ff_0) C^2 \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right) \right]$
Rayleigh	0.866 C	1.32 C ³	0.214 C ²

2.5 Variabilité spatial du vent

En utilisant les lois de cisaillement du vent, permettant de calculer à partir d'une donnée de vitesse du vent connue, la vitesse du vent à une altitude différente.

Il existe plusieurs lois de cisaillement possédant chacune des paramètres caractéristiques reliés au site étudié.

2.5.1 Loi de cisaillement du vent

Cette loi est utilisée dans certaines études [14, 15] et a pour principale avantage la prise en compte d'un paramètre physique z_0 , définissant la rugosité du terrain. Elle est loi est définie par

$$\frac{V(Z)}{V(Z_R)} = \frac{\ln\left(\frac{Z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{Z}{Z_R}\right)} \quad (2.9)$$

Où :

Z : est l'altitude en m à laquelle on désire calculer la vitesse du vent ;

V(z) : est la vitesse en m/s à calculer ;

ZR : est l'altitude de référence en m;

V(ZR) : est la vitesse connue à l'altitude de référence en m/s;

Z0 : est la rugosité en m.

2.5.2 Extrapolation verticale des paramètres de Wei bull

L'estimation des paramètres de Wei bull k_2 et C_2 au niveau de l'éolienne permet l'estimation du potentiel éolien au niveau de l'hélice. [16, 17,18] :

$$k_2 = \frac{k_1 \left[1 - 0.881 \ln\left(\frac{z_1}{10}\right) \right]}{1 - 0.881 \ln\left(\frac{z_2}{10}\right)} \quad (2.10)$$

$$C_2 = C_1 \left(\frac{z_2}{z_1} \right)^n \quad (2.11)$$

$$n = \left[\frac{0.37 - 0.881 \ln(C_2)}{1 - 0.881 \ln\left(\frac{z_1}{10}\right)} \right] \quad (2.12)$$

2.6 Modélisation du potentiel énergétique éolien

2.6.1 Densité de puissance disponible

La densité de puissance éolienne disponible WPD [19, 20, 21] est un moyen utile d'évaluer le potentiel éolien dans un site sans tenir compte d'une éolienne particulière. La densité d'énergie éolienne, mesurée en watts par mètre carré, indique la quantité de puissance éolienne disponible pour la conversion éolienne dans un site est exprimée par l'équation (2.13).

$$\frac{P_{dis}}{A} = \frac{1}{2} \rho \cdot C^3 \cdot \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right) \quad (2.13)$$

Où :

A : est la surface en [m²] ;

ρ : est la masse volumique de l'air;

C : est le facteur d'échelle.

2.6.2 Densité d'énergie annuelle récupérable maximale

La densité d'énergie maximale récupérable dans un site par un système de conversion éolienne en kWh/m² /an est exprimé par l'équation (2.14). [22]

$$\frac{E_m}{A} = 3.25 C^3 \cdot \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right) \quad (2.14)$$

2.6.3 Productivité éolienne(WPP)

Le WPP (Wind power plant) est un paramètre très important, il permet de quantifier l'énergie produite pendant un temps T par les éoliennes ou le parc éolien.[18, 19]

$$E_{out} = T \cdot \int_0^{\infty} P(V) \cdot f(V) \cdot dV = T \cdot \sum_0^{\infty} P(V_i) \cdot f(V_i) \quad (2.15)$$

Où :

$f(v)$: est la densité de probabilité de présence de la vitesse du vent ;

$Pe(V)$: est la puissance caractéristique de la courbe de puissance de l'éolienne ;

T : est le temps de la période de calcul

2.6.4 Évaluation des performances des éoliennes

$$P_{out} = P_n \cdot \left\{ A - \exp \left[- \left(\frac{V_f}{c(h)} \right)^{k(h)} \right] \right\} \quad (2.16)$$

$$A = \frac{\exp \left[- \left(\frac{V_C}{c(h)} \right)^{k(h)} \right] - \exp \left[- \left(\frac{V_R}{c(h)} \right)^{k(h)} \right]}{\left(\frac{V_R}{c(h)} \right)^{k(h)} - \left(\frac{V_C}{c(h)} \right)^{k(h)}} \quad (2.17)$$

Avec :

P_n : est la puissance nominale de l'éolienne.

V_c : est la vitesse de démarrage de l'éolienne.

V_f : est la vitesse d'arrêt de l'éolienne.

V_R : est la vitesse nominale de l'éolienne.

$k(h)$: est le facteur de forme de Wei bull à la hauteur du moyeu de l'éolienne.

$c(h)$: est le facteur d'échelle de Wei bull à la hauteur du moyeu de l'éolienne.

2.6.5 Facteur de capacité

Le facteur de capacité (CF), est un élément qui permet de mesurer la productivité d'une centrale éolienne, ou de toute autre installation de production d'énergie. Il compare la production réelle de la centrale sur une période de temps donnée E_{out} à la quantité, de puissance que la centrale aurait produite si elle avait fonctionné à pleine capacité.

$$Er = 8760 \cdot P_n \quad (2.18)$$

Dans le même laps de temps. IL est calculé par l'équation suivante exprimée en pourcentage.
[19,20]

$$C_F = \frac{E_{out}}{E_r} \quad (2.19)$$

Où :

Pn : est la puissance nominale de WCS.

2.6.6 Taux de fonctionnement

Le taux de fonctionnement Eh est un paramètre utilisé pour exprimer l'exploitation des parcs éoliens il est exprimé tel que :

$$E_h = 8760.C_F \quad (2.20)$$

2.6.7 Productivité d'hydrogène

L'objectif de cette étape est d'estimer la quantité et le coût unitaire de l'hydrogène l'énergie éolienne de la centrale.

- **Masse d'hydrogène**

La quantité d'énergie produite par l'énergie éolienne peut être convertie en masse d'hydrogène à l'aide d'un électrolyseur, comme suit (Douak et Settou, 2015)

$$M_{H_2} = \frac{n_{ele} \cdot E_{out}}{LHV_{H_2}} \quad (2.21)$$

Où :

MH2 :(kg/an) est la quantité d'hydrogène.

n_{ele} : le rendement de l'électrolyseur.

LHVH2: une faible valeur thermique de l'hydrogène (33,3 kWh/kg) (Douak et Settou, 2015).

2.7 Etude économique

Étant donné que la viabilité économique des projets éoliens dépend de leur capacité à produire de l'électricité à un faible coût d'exploitation par unité d'énergie, une estimation précise de tous les coûts liés à la production d'électricité pendant toute la durée de vie du système, est essentiel. Différentes méthodes sont généralement utilisées pour estimer coût d'exploitation d'une unité d'énergie produite par le système de conversion de l'énergie

Références Bibliographiques

éolienne. Le coût actualisé de l'électricité (LCOE) [23] est l'une des méthodes les plus couramment utilisées. Le LCOE du système de conversion de l'énergie éolienne peut être décrit comme le rapport du coût total actualisé du système de conversion de l'énergie éolienne à l'électricité annuelle produite par ce système [23].

La détermination du coût unitaire de l'énergie comporte deux grandes étapes : Dans une première étape, en prenant en considérations le coût d'investissement initial du système et la valeur actuelle des opérations et coût de maintenance (O&M) tout au long de la durée de vie du système, la valeur actuelle des coûts (PVC) est calculée ; la deuxième étape consiste à déterminer le coût unitaire de l'énergie (par kWh).éolienne [23-24].

2.7.1 La valeur actuelle des coûts

La valeur actualisée des coûts (PVC) peut être calculée comme suit :

$$PVC = I_c + C_{om(p)} \quad (2.25)$$

Où

I_c est le coût d'investissement initial, $C_{om(p)}$ est la valeur actualisée des coûts d'exploitation et de maintenance pour la durée de vie du système

Le coût d'investissement initial de l'IC comprend le coût de l'éolienne et tous les autres coûts initiaux, y compris les coûts des travaux de génie civil, de l'installation, des câbles de connexion au réseau et du conditionnement de l'énergie. Le coût de l'éolienne peut être déterminé comme suit

$$C_{wt} = C_{spé} \times P_n \quad (2.26)$$

Où :

$C_{spé}$ et P_n sont respectivement le coût spécifique et la puissance nominale de l'éolienne. La valeur actuelle des coûts O&M (20 ans de maintenance) est exprimée comme [24,25]

$$C_{om} = C_{om(a)} \left[\left(\frac{(1-i)}{(1+d)} \right)^t \right] \times \left[1 - \left(\frac{(1+i)}{(1+d)} \right)^t \right]; d \neq i \quad (2.27)$$

Où

i , d et T sont le taux d'inflation pour le fonctionnement, le taux d'intérêt et la durée de vie utile de la turbine en années (20 ans), respectivement.

Références Bibliographiques

Com(a): est le coût d'exploitation et d'entretien pour la première année. Ce coût est exprimé en fraction du coût du composant. Dans cette étude, il est supposé être de 15% du coût annuel de la turbine (prix machine/durée de vie) [26, 27].

2.7.2 Le coût actualisé de l'énergie

Le coût unitaire de l'énergie (LCOE) : est déterminé par :

$$LCOE = TAC / E_{wgt} \quad (2.28)$$

Où :

TAC et Ewgt représentent respectivement le coût total annualisé et l'énergie totale annuelle.

Le TAC est calculé en utilisant la valeur actualisée des coûts (PVC) et le facteur de récupération du capital (CRF) :

$$TAC = PVC \times CRF \quad (2.29)$$

Pour un taux d'actualisation d et une durée de vie utile du système t donnés, le facteur de récupération du capital est défini comme [25] :

$$CRF = \frac{d(1+d)^t}{(1+d)^{t+1}-1} \quad (2.30)$$

2.7.3 Coût unitaire de l'hydrogène

Le coût unitaire de la production d'hydrogène en CUH_2 (\$/kg) est exprimé par :

$$CUH_2 = \frac{C_{ele} + C_{wt}}{M_{H_2} \cdot T} \quad (2.31)$$

$$C_{ele} = C_{ele-u} \times \frac{M_{H_2} \times K_{ele-th}}{8760 \times n_{ele}} \quad (2.32)$$

Où :

C_{ele} est le coût d'exploitation et d'entretien de l'électrolyseur; C_{wt} est le coût de l'énergie (\$); M_{H_2} (kg/an) est la production annuelle d'hydrogène; T est la durée de vie du projet et est fixé à 20 ans, K_{ele-th} est l'énergie théorique spécifique requise pour l'électrolyseur et le C_{ele-u} est

le coût unitaire de l'électrolyseur. Dans ce cas, (Kel-th) et (Cele-u) ont été considérés comme étant de 39,7 kWh/kg H₂, respectivement 368 \$/kW (Meziane et coll., 2021).

2.8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté quelques modèles utilisées pour l'évaluation du potentiel énergétique éolien. Dans un premier temps, nous avons présenté les distributions de Wei bull et hybride Wei bull et Rayleigh. Nous avons par la suite présenté les paramètres du vent et les deux lois utilisées pour l'extrapolation verticale de la vitesse du vent. Par ailleurs, nous avons présenté la Modélisation du potentiel énergétique de l'hydrogène A la fin de cette partie nous avons présenté une analyse économique des projets d'énergie éolienne et pour l'hydrogène.

Chapitre 3

Productivité et étude économique

3.1 Introduction

Ce chapitre présente les résultats d'une étude spatiotemporelle sur le régime du vent dans la région de sidi Makhloof, nord de Laghouat, à partir des données journalières prise à 10m d'altitude. En utilisant les lois statistiques pour la caractérisation temporelle des paramètres du vent et les lois d'extrapolation pour la caractérisation spatiale de la vitesse du vent. Ensuite, l'évaluation de la prédiction de l'énergie électrique produite est faite tout en nous appuyant sur la prise en compte des choix des aérogénérateurs de leurs facteurs de charge. Enfin, nous avons calculé la quantité de la masse d'hydrogène verts pour l'aérogénérateurs sélectionnées dans chaque région (zone) et les couts unitaires de kilowattheure éolien et de chaque kilogramme de masse d'hydrogène.

3.2 Présentation des sites d'étude

Le site étudié est situé dans un endroit quelque stratégique car il est situé à proximité de la zone de production d'électricité.(fig.3.1).



Figure 7 - site étudié, région de Laghouat

- ✓ Zone I : Nord (sidi makhloof)
- ✓ Zone II :Est

- ✓ Zone III :Sud (hassi R'mell)
- ✓ Zone VI :Sud-Ouest (el kheneg)

3.3 Résultats de la simulation

La vitesse moyenne du vent est l'indicateur le plus simple de la qualité des ressources éoliennes d'une région. La vitesse moyenne du vent va permettre d'avoir des informations non seulement sur l'importance mais aussi sur l'évolution de cette source d'énergie tout au long de l'année Tableau.(2). En effet, il est indispensable lorsqu'il s'agit d'installer des systèmes de conversion de l'énergie éolienne de connaître les périodes pour lesquelles ces systèmes seront plus ou moins productifs.

Tableau 2 - les paramètres du vent de la région de Laghouat à 10m.

Les régions	Facteur de forme k	Facteur d'échelle c[m/s]	Vitesse moyenne [m/s]	Calme [%]
Est	2.1471	6.5424	3.8503	33.5
Sud-Ouest	1.513	8.923	6.501	8.69
Sud	1.9714	6.91385	6.1290	2.03
Nord	1.9762	5.1003	4.5211	0.6

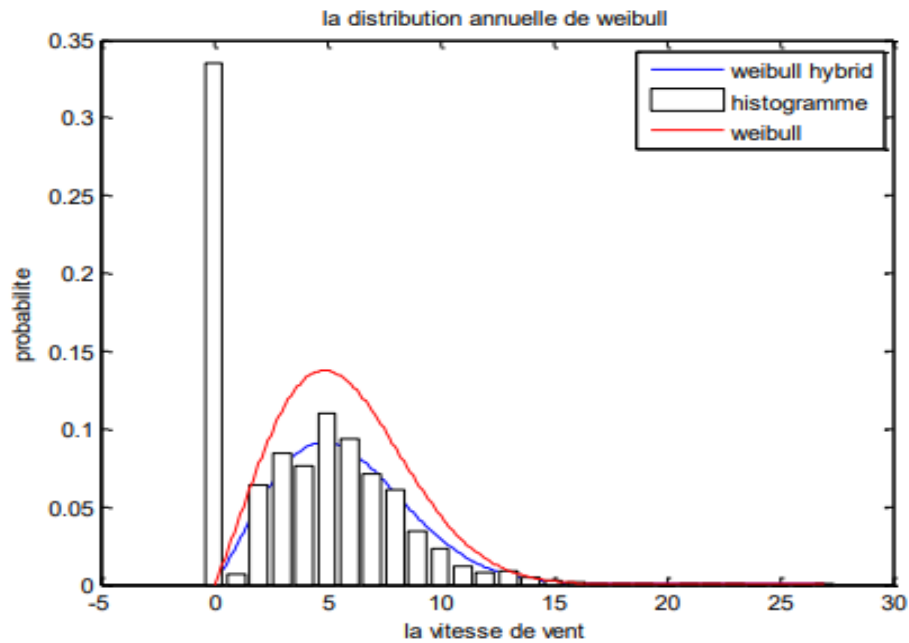


Figure 8 - Distribution annuelle de Wei bull à la région L'Est

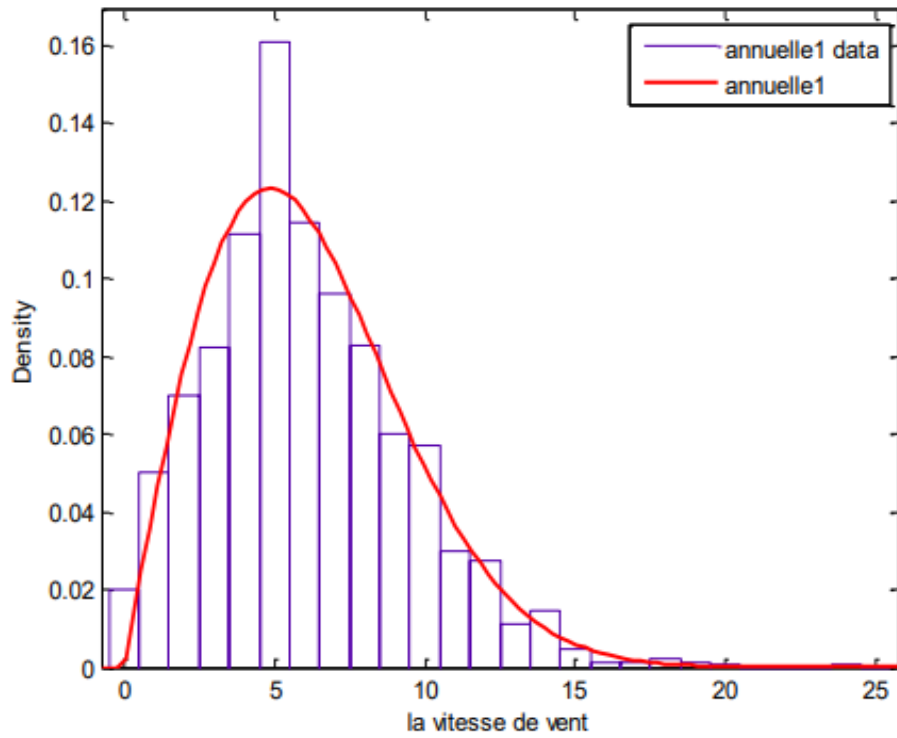


Figure 9 - Distribution annuelle de Wei bull à la région sud

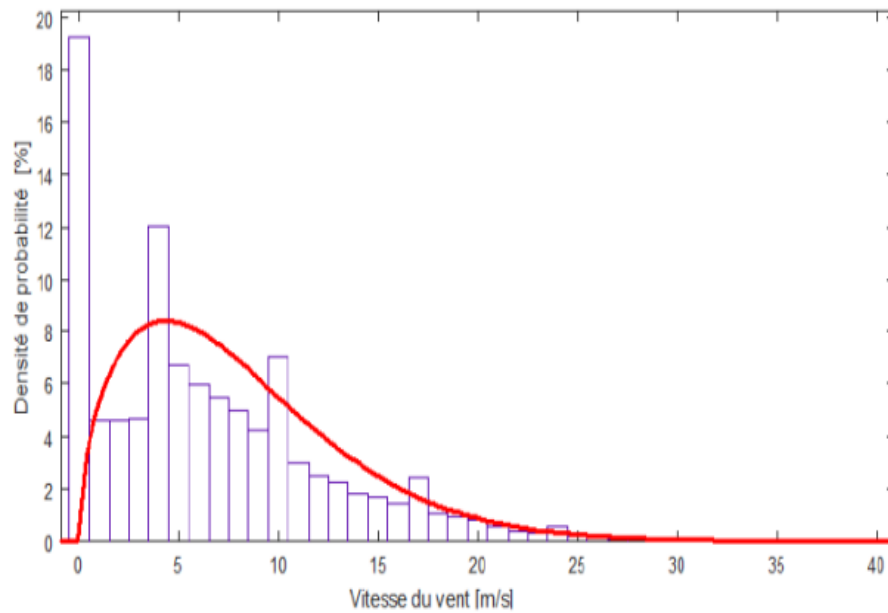


Figure 10 - Distribution annuelle de Wei bull à la région sud-ouest

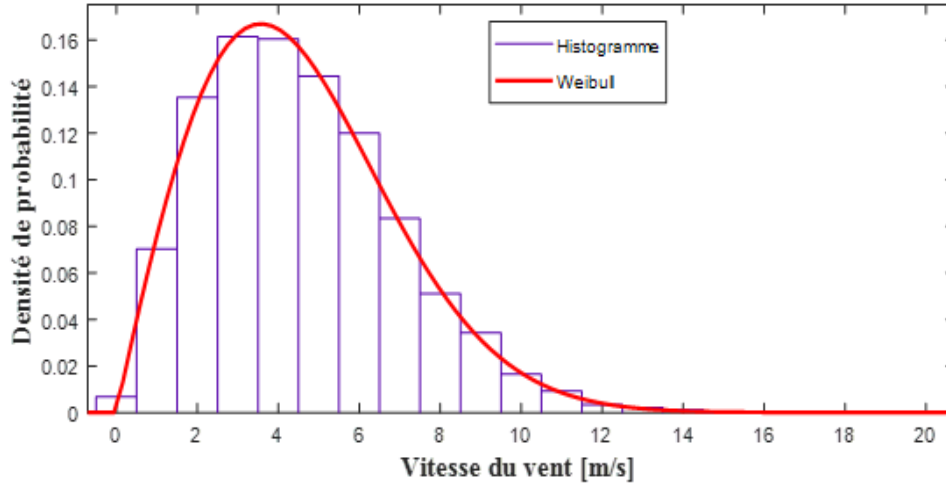


Figure 11 - Distribution annuelle de Weibull à la région nord.

3.4 Adaptation et choix des aérogénérateurs

L'analyse suivante vise à aider les concepteurs et les utilisateurs à choisir l'éolienne la plus appropriée pour un parc éolien pouvant être installé à cette région comme indiqué à la section. Dans ce contexte, cinq éoliennes commerciales (AN Bonus 1MW, GE1.5 sL, Vesta V90 2MW, G114-2.5MW, V90-3MW) avec des puissances nominales différentes ont été sélectionnés. Les données techniques des modèles d'éoliennes choisies sont résumées dans le tableau (3).

Tableau 3 - Données techniques des différentes éoliennes commerciales utilisées.

Type d'éolienne	Vitesse de démarrage [m/s]	Vitesse de coupure [m/s]	Vitesse de nominale [m/s]	Puissance nominale [Kw]	Densité de Puissance [W/ m ²]	Hauteur de la nacelle [m]
AN Bonus 1MW	3	25	15	1000	434.8	55
GE1.5 sL	3.5	25	12	1500	322.1	61.4/64.7/80/85/100
Vesta V90 2MW	4	25	13	2000	314.4	80/95/105
G114-2.5MW	2	25	10	2500	244.9	64/80/93/120
V90-3MW	4	25	15	3000	471.5	80/95/105

L'énergie annuelle a été obtenue en utilisant la courbe de puissance fournie par le constructeur et les données de vent du site. La figure (12) montre la production d'énergie annuelle et la figure (13) montre le facteur de capacité des éoliennes choisies et le tableau (4) représente la production annuelle, le tableau (5), (6) représente le facteur de capacité et le taux de fonctionnement des éoliennes Installées.

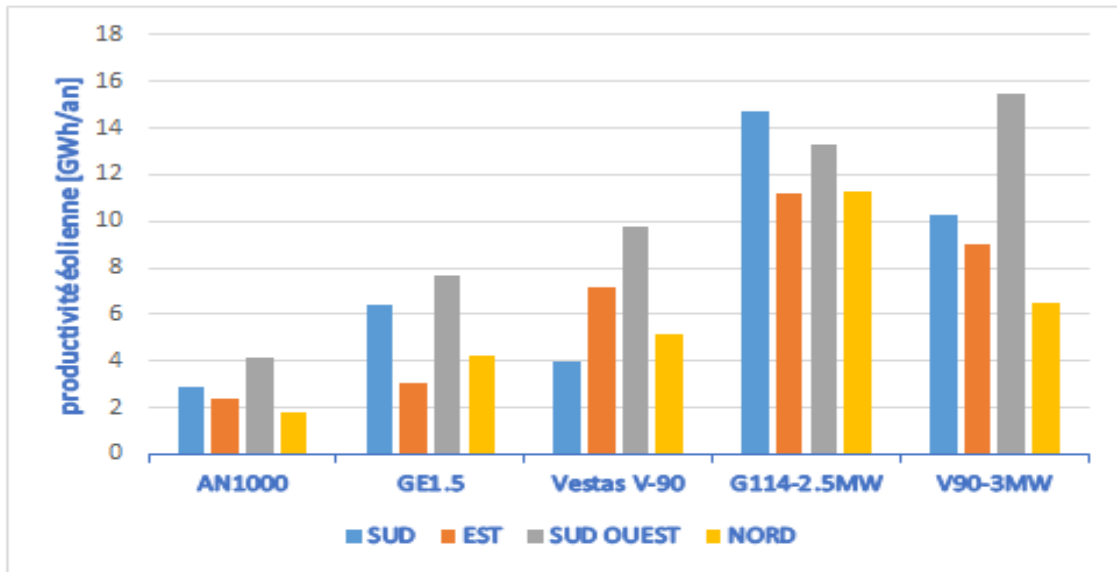


Figure 12 - Productivité d'énergie éolienne annuelle

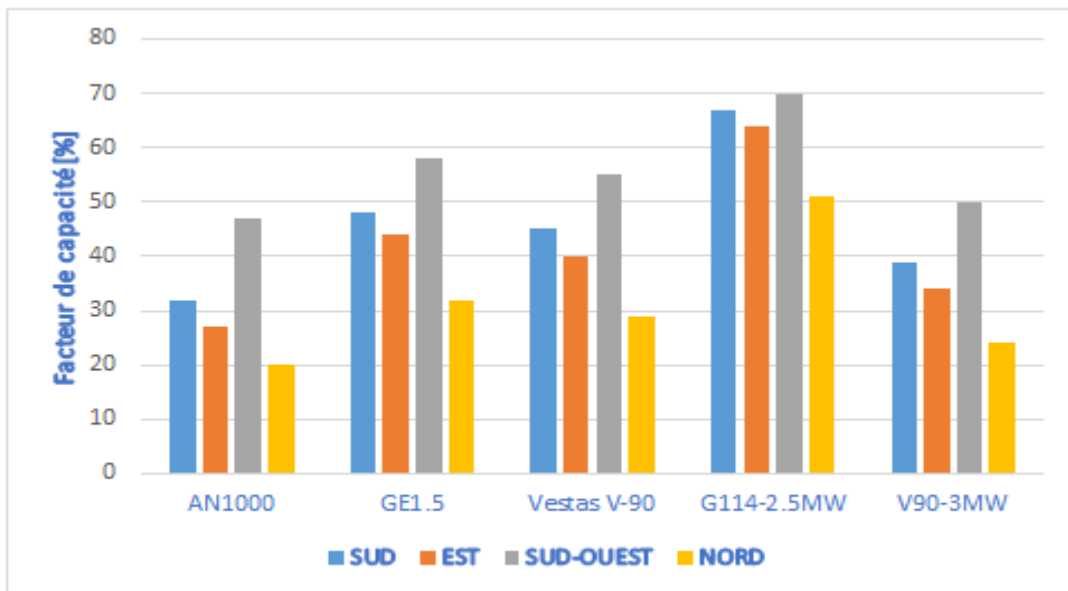


Figure 13 – Facteur de capacité de chaque région

Références Bibliographiques

Le facteur de capacité de la zone sud-ouest est le plus parrapport au utres zones. Cela fait suite à l'observation précédente selon laquelle l'emplacement de la region sud-ouest est un excellent site pour le développement de l'énergie éolienne. Sur la base du facteur de capacité des modèles d'éoliennes, le modèle G114-2.5 MW sera le meilleur choix.

Tableau 4 – factures des capacités de chaque région.

Régions Type Eolienne	SUD	EST	SUD-OUEST	NORD
AN1000 MW	0.32	0.27	0.47	0.20
GE1.5 MW	0.48	0.44	0.58	0.32
Vesta V-90	0.45	0.40	0.55	0.29
G114-2.5MW	0.67	0.64	0.70	0.51
V90-3MW	0.39	0.34	0.50	0.24

Tableau 5 – Productivité annuelle de chaque région

Région Type d'éoliennes	SUD	EST	SUD-OUEST	NORD
AN1000 MW	2,8589	2,4056	4,1289	1,788
GE1.5 MW	6,4144	3,0456	7,6707	4,2298
Vesta V-90	3,9807	7,1787	9,7246	5,1154
G114-2.5MW	14,746	11,23	13,303	11,256
V90-3MW	10,29	8,9878	15,494	6,5032

Tableau 6 - Taux de fonctionnement de chaque région.

Région Type Eolienne	SUD	EST	SUD-OUEST	NORD
AN1000 MW	2858	2405	4128	1788
GE1.5 MW	4276	3086	5113	2819
Vesta V-90	3980	3589	4862	2557
G114-2.5MW	5898	5691	6197	4502
V90-3MW	3429	2995	4434	2167

Après avoir sélectionné le meilleur modèle d'éolienne G114-2.5MW, et sur cette base, nous avons calculé la masse d'hydrogène en (tonne) dans chaque région, qui est indiquée dans le tableau suivant.

Tableau 7 – Mass d'hydrogène de chaque région

Région Type Eolienne	SUD	EST	SUD-OUEST	NORD
G114-3MW	3321	2529	5020	2535

La meilleure région et aussi pour meilleur éolien à installer d'après l'énergie annuelle produite est le type G114-2.5MW, non seulement à cause de son mât qui est de **93** mètres, mais présentant également le facteur de capacité et masse d'hydrogène très important.

3.5 Analyse des coûts énergétiques

La viabilité économique des projets éoliens dépend de leur capacité à produire de l'électricité à bon prix, faible coût par unité d'opération de puissance, et il est nécessaire de faire une estimation précise de tous les coûts Il participe à la production d'électricité pendant la durée de vie du système. Généralement différentes manières utilisé pour estimer le coût d'exploitation d'une unité d'énergie produite par un système de conversion éolienne. Le coût spécifique de l'éolienne dépend de la puissance nominale et varie selon les fabricants. Ainsi, nous considérons un intervalle de bande (valeurs maximales et minimales). Le tableau (III.8) montre le coût spécifique des éoliennes pour différentes gammes de taille [40, 44, 45]. Le coût par kW diminue avec l'augmentation de la taille de l'éolienne. Pour les éoliennes de plus de 200 kW, le coût de l'éolienne peut être fixé à 1150 \$/kW (moyenne entre le minimum de 700 \$/kW et le maximum de 1600 \$/kW).

Tableau 8 - Gamme de coût spécifique des éoliennes

Taille de l'éolienne (kW)	Coût spécifique (\$/kW)	Coût spécifique moyen (\$/kW)
<20	2200-3000	2600
20-200	1250-2300	1775
200>	700-1600	1150

L'estimation des coûts a été faite sous les hypothèses suivantes [27] :

- Le coût d'O&M et de réparation est considéré comme représentant 15 % du coût annuel de l'éolienne (prix de la machine/durée de vie).
- Le taux d'intérêt (d) et le taux d'inflation (i) ont été respectivement de 8% et 6%.
- La durée de vie de l'éolienne (T) a été supposée être de 20 ans
- Les autres coûts initiaux, y compris les travaux de génie civil, l'installation, les Câbles de connexion au réseau et l'alimentation conditionnement sont supposés Représenter 30 % du coût de l'éolienne.

Les résultats de l'analyse des coûts sont présentés dans le tableau (9).

Tableau 9 - Coût unitaire (\$/kW ;\$/kg) de chaque région.

Région Coût (\$/kW) (\$/kg)	SUD	EST	SUD-OUEST	NORD
CUE	0.014	0.018	0.015	0.018
CUH ₂	0.62	0.82	0.69	0.82

Le coût du kilowatt d'énergie produit et le coût unitaire du kilogramme d'hydrogène dépendent de type d'éolienne et caractéristiques du vent de site de l'implémentation des aérogénérateurs. Résultats de coût énergétique et de coût unitaire de l'analyse de l'hydrogène effectuée dans cette étude pour chaque région sont présentés à la figure.

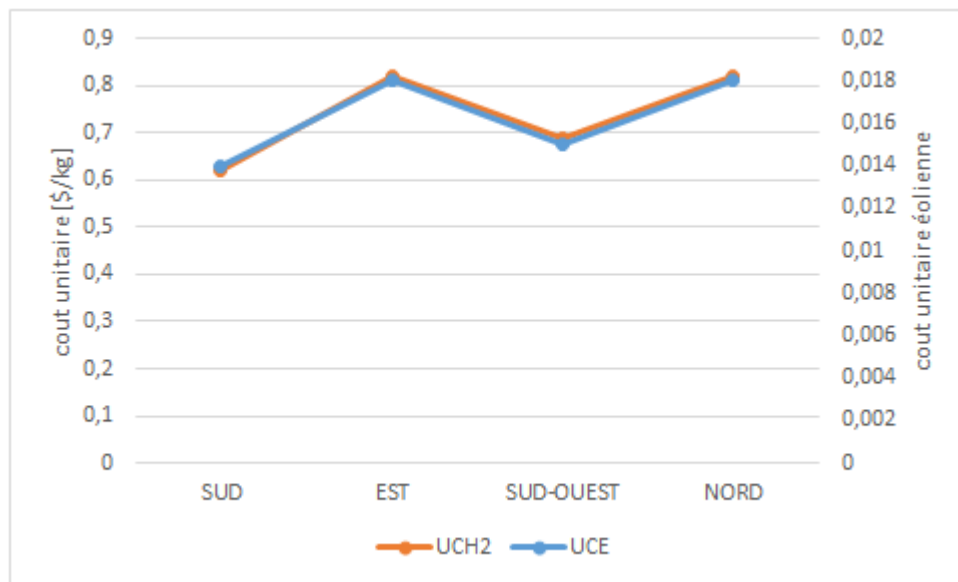


Figure 14 – Coût unitaire énergie et hydrogène de la centrale éolienne.

La Meilleure éolienne à monter sur la base énergie annuelle produite, coût énergétique unitaire et coût unitaire d'un kilogramme d'hydrogène est l'éolienne de type G114-2,5 MW proposé, non seulement parce qu'il a un facteur de capacité important 70%, mais aussi pour sa production annuelle élevée d'hydrogène vert de 5020 tonnes par an.

3.6 Conclusion

Ce travail vise à étudier le potentiel éolien et à évaluer la production d'énergie, la production d'hydrogène et la faisabilité économique de la centrale éolienne dans la région de Laghouat. Cette étude prédit la puissance éolienne dans le parc étudié, sur la base d'une sélection judicieuse discrète. Si l'éolienne de type G114-2.5MW est choisie, le potentiel éolien de ce site est en altitude, et il peut produire une grande quantité d'hydrogène.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire porte sur l'étude techno-économique pour l'estimation de la production d'hydrogène par l'énergie éolienne et le calcul des couts unitaire éolien et d'hydrogène à la région de Laghouat. Dans un premier temps nous avons établi la description de la source énergétique primaire qui est défini par le vent et ses caractéristiques. Afin d'atteindre ces objectifs, on a présenté brièvement l'état de l'art sur les différents types distributions fréquentielle des vitesses de vent sur une période donnée (celle de Weibull, hybride de Wei bull et de Rayleigh) et exposé les calculs des paramètres de ces distributions, afin de définir les paramètres du vent de la zone étudiée.

Ensuite, nous avons présenté et identifié les formulations mathématiques pour calculer la productivité éolienne et d'hydrogène et les couts unitaires de chaque production.

Enfin, nous avons présenté les résultats de notre travail qui a compris une étude techno-économique de la production énergétique éolienne et d'hydrogène vert a la région de Laghouat.

Les résultats obtenus confirment la faisabilité de ce travail, cette région ayant un énorme potentiel éolien de $691\text{W}/\text{m}^2$ a 1m de hauteur, ce qui est très élevé par rapport à celui estimé à Adrar de $281\text{W}/\text{m}^2$. Le coût unitaire de production d'un kg d'hydrogène est de $0,87 \text{ \$/kg}$.

Référence Bibliographiques

- [1] <http://www.univbejaia.dz/xmlui/bitstream/handle/> 13/02/2023.
- [2] CREG. Programme de Développement des Energies Renouvelables 2015–2030. <http://www.creg.gov.dz/images/stories/PDF/creg15mars.pdf>. 2023.02.15
- [3] K. Eftichios, K. Kostas, “Design of a maximum power tracking system for wind energy conversion applications”, IEEE transaction on Industriel electronics, 53. (2006).
- [4] P. Giguere, M.Selig, .1998. New Airfoils for Small Horizontal-Axis Wind turbines, Transactions A.S.M.E., Journal of Solar Energy Engineering, 120 (1998), pp 108 – 114.
- [5] A. Demina, Elena Gorbova, Panagiotis Tsiakaras, « High temperature electrolyzerbased on solid oxide co-ionic electrolyte: A theoretical model ». Journal of Power Sources 171 (2007) pp 205–211.
- [6] R. Samer « Contribution à la modélisation de systèmes réversibles de types électrolyseur et pile à hydrogène en vue de leur couplage aux générateurs Photovoltaïques» thèse de doctorat Univ de Toulouse 03/10/2008.
- [7] M. Addour , I. Allouti, « étude de maximisation d’un système éolien » mémoire de Master ». Université de Bejaia, 2013
- [8] J.P. Jonchère « production d’hydrogène à partir des combustibles fossiles » mémento de l’hydrogène 1ère émission : 2001
- [9] F. Boukli Hacène, N. Kasbadji Merzouk et L. Loukarfi, « Analyse Statistique et Elaboration d’un Atlas Eolien de la Vallée du Cheliff’ », Revue des Energies Renouvelables, Vol. 10, N°4, pp. 583 – 588, 2007
- [10] S.Bivona, R. Burlon, and C.Leone, « Hourly wind speed analysis in Sicily»Renewable Energy.2003 Jul; 28(9):1371-1385.

Références Bibliographiques

- [11] Karen Rosen; Robert Van Buskirk , and Karina Garbesi « Wind Energy Potential of Coastal Eritrea: an Analysis of Sparse Wind Data», *Solar Energy*. 1999 Jun; 66(3):201-213.
- [12] M. Elamouri, F. Ben Amar, «Wind energy potential in Tunisia», *Renewable Energy* 33 (2008) 758–768.
- [13] M. Azagnandji, & al, « Wind Energy Potential Assessment and Wind Turbine Performance Investigation in the Cotonou Coast (Benin Republic) », *International Journal of Engineering Research in Africa*, 2019 November; Vol. 45, pp89-98
- [14] F. Chellali, A. Khellaf, A. Belouchrani, & A. Reoui, « A contribution in the actualization of wind map of Algeria » *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, (2011)15, 993-1002
- [15] M. Sathyajith & al «Analysis of Wind Regimes for Energy Estimation», *Renewable Energy* Volume 25, Issue 3, March 2002, Pages 381-399
- [16] A.S. Ahmed Shata, R. Hanitsch, « Electricity generation and wind potential assessment at Hurghada, Egypt », *Renewable Energy* 33 (2008) 141–148
- [18] Bonfils Safari*, Jimmy Gasore, « A statistical investigation of wind characteristics and wind energy potential based on the Weibull and Rayleigh models in Rwanda», *Renewable Energy* 35 (2010) 2874-2880
- [19] F. Meziane, F. Chellali, K. Mohammedi, I. Nouicer, K. Kabouche,. “ Wind flow simulation and characteristics prediction using WAsP software for energy planning over the region of Hassi R'mel” *International Journal of Green Energy*, 18(6), 634-644, 2021. <https://doi.org/10.1080/15435075.2021.1875470>.
- [20] M. Al-Ghriyah, & al, «wind energy assessment for the capital city of Jordan, Amman », *Journal of Applied Engineering Science*, 17(2019)3, 611, 310 – 319
- [21] S. Bonfils , G. Jimmy «A statistical investigation of wind characteristics and wind energy potential based on the Weibull and Rayleigh models in Rwanda» *Renewable Energy* 35 (2010) 2874-2880

Références Bibliographiques

- [22] Laerte de Araujo Lima, Celso Rosendo Bezerra Filho, «Wind energy assessment and wind farm simulation in Triunfo-Pernambuco, Brazil», *Renewable Energy* 35 (2010)2705-2713
- [23] Merzouk, N. K. (2000). «Wind energy potential of Algeria. *Renewable Energy*», 21(3-4), 553-562
- [24] Gökçek M, Genç MS. Evaluation of electricity generation and energy cost of wind energy conversion systems (WECS) in Central Turkey. *Appl Energy* 2009; 86:2731–9.
- [25] Diaf S, Belhamel M, Haddadi M, Louche A. Technical and economic assessment of hybrid photovoltaic/wind system with battery storage in Corsica island. *Energy Policy* 2008; 36: 743–754
- [26] Diaf S. Intégration des systèmes à sources renouvelables d'énergie pour la production décentralisée d'électricité en site isolé. PhD Sciences 2009, Ecole Nationale Supérieure Polytechnique Algérie.
- [27] Shata AS, Hanitsch R. Evaluation of wind energy potential and electricity generation on the coast of Mediterranean Sea in Egypt. *Renew Energy* 2006; 31: 1183–1202.
- [28] Adaramola MS, Paul SS, Oyedepo SO. Assessment of electricity generation and energy cost of wind energy conversion systems in north-central Nigeria. *Energy Convers Manage.* 2011; 52: 3363–3368.
- [29] Mathew S. *Wind energy: fundamentals, resource analysis and economics.* Berlin Heidelberg: Springer; 2006
- [30] Kasbadji, N., Merzouk, N. (2000). Wind energy potential of Algeria. *Renewable Energy*, 21,553-562. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(00\)00090-2](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(00)00090-2)
- [31] Merzouk, N. K., Merzouk. M. (2012). Efficiency of Three Wind Turbines Installed on High Plains Region of Algeria. *Procedia Engineering*, 33, 450–45, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.01.1224>

ملخص

هذا العمل هو مساهمة في دراسة تقدير إنتاج الهيدروجين بواسطة طاقة الرياح والإحصائية لاقتصادية الطاقة لرواسب الرياح في منطقة الأغواط، مما سيسمح لمن لديهم قرار لانطلاق مشاريع الطاقة على أساس البيانات الحقيقية وبناء مزارع الرياح في المناطق الأكثر قدرة رياح في المنطقة على وضع ذلك في الاعتبار، كان جمع بيانات الرياح الحقيقية ضروريًا ل تحديد العوامل المختلفة المتعلقة بالرياح واستخدام النمذجة رياضيات توزيع تردد الرياح باستخدام وبيول وبيول هجين. سمحت لنا المحاكاة بتحديد متوسط سرعة الرياح كذلك تقييم إمكانات الرياح وذلك باختيار نوع التوربين وبالتالي توقع الطاقة الكهربائية التي سيتم إنتاجها ومنه نستطيع إنتاج الهيدروجين .

. **الكلمات المفتاحية** : وبيول ،طاقة الرياح , إنتاج الهيدروجين , بيانات الرياح , دراسة اقتصادية

Abstract

This work is a contribution to the study of the estimation of hydrogen production by wind energy, and the statistical energy economy of wind deposits in the Laghouat region, which will allow those who have the decision to launch energy projects based on real data and build wind farms in the windiest areas of the region. The collection of true wind data was necessary to determine the various wind-related factors and to use mathematical modelling of the wind frequency distribution using a hybrid Wei bubble and Wei bull. The simulation allowed us to determine the average wind speed as well as to evaluate the wind potential by choosing the type of turbine and thus predict the electrical energy that will be produced and from which we can produce hydrogen.

Keywords: Weibull, wind energy, wind productivity, hydrogen production, economic study

Résumé

Ce travail est une contribution à l'étude de l'estimation de la production d'hydrogène par l'énergie éolienne, et de l'économie énergétique statistique des gisements éoliens de la région de Laghouat, qui permettra à ceux qui ont la décision de lancer des projets énergétiques basés sur des données réelles et de construire des parcs éoliens dans les zones les plus ventées de la région. La collecte de données de vent réel était nécessaire pour déterminer les différents facteurs liés au vent et pour utiliser la modélisation mathématique de la distribution de fréquence du vent à l'aide d'un hybride Wei bulle et Wei bull. La simulation nous a permis de déterminer la vitesse moyenne du vent ainsi que d'évaluer le potentiel éolien en choisissant le type de turbine et ainsi prédire l'énergie électrique qui sera produite et à partir de laquelle on pourra produire de l'hydrogène.

Mots clé : Wei bull, l'énergie éolienne, productivité éolienne, production d'hydrogène, étude économique.

Références Bibliographiques