

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



Université Kasdi Merbah Ouargla
Faculté des Sciences Appliquées
Département de Génie mécanique



Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de Master

Spécialité : Energétique

Présentée par : HAMICHI Anissa

Intitulé :

Potentiel de production d'hydrogène à partir de l'énergie éolienne en
Algérie : Approche basée sur le SIG

Soutenu le : 22 /06/2019

Devant le Jury

Mme. GHEDAMSI Rébha	Présidente	Univ KMO	MCB
Mr. GOUARAH Abderrahmane	Examineur	Univ KMO	MCB
Mme. RAHMOUNI Soumia	Encadreurante	Univ KMO	MAA

Année Universitaire : 2018 /2019

Remerciements

En tout premier lieu, je remercie le bon Dieu, tout puissant, de m'avoir donné la force pour survivre, ainsi que l'audace pour dépasser toutes les difficultés, et le courage et la volonté pour accomplir ce travail de recherche.

Ma plus grande gratitude va à mon encadrante **Madame RAHMOUNI Soumia**, pour sa disponibilité et la confiance qu'elle m'a accordée. J'ai profité pendant longtemps du savoir et du savoir-faire dont j'ai pu bénéficier au cours de nombreuses discussions.

J'exprime toute ma reconnaissance à **Mme. GHEDAMSI Rébha** pour avoir bien voulu accepter de présider le jury de ce mémoire. Que **Mr. GOUARAH Abderrahmane** docteur à l'université Kasdi Merbah Ouargla, trouve ici l'expression de mes vifs remerciements pour avoir bien voulu juger ce travail.

Afin de n'oublier personne, mes sincères remerciements s'adressent à tous ceux qui m'ont aidée à la réalisation de ce modeste mémoire. Je tiens à remercier enfin tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin et en particulier le doctorant **SETTOU Belkhir**.

Dédicaces

Au nom du dieu le clément et le miséricordieux louange à **ALLAH** le tout Puissant.

Je dédie ce modeste travail en signe de *respect, reconnaissance* et de *Remerciement* :

A mes **chers parents** A mes **chères sœurs**

Saliha, Nassima,

Mon frère Abdelghani

Et **mon petit Neveu** Djawad

Et **Mon beau-frère** Yazid

à tous **mes chers amis**, à :

Rima, Tiziri, Djouhaina, Maria, Safaa, Hanen

Ainsi que tous les membres du **club mécanique de l'UKMO**.

Les membres du groupe **YCDA Ouargla**

Les membres du Groupe Educate **Me**

Liste des abréviations.....	i
Liste des figures.....	ii
Liste des tableaux.....	iii
Introduction générale.....	1

Chapitre I : Les aérogénérateurs.

I.1 Introduction.....	4
I.2 Historique.....	4
I.4 Représentation d'une éolienne	8
I.4.1 Types d'éoliennes.....	9
I.4.1.1 Eoliennes à axe vertical	10
I.4.1.2 Eoliennes à axe Horizontal	10
I.4.2 Composantes des éoliennes horizontales	11
I.4.2.1 Les pales et le rotor.....	12
I.4.2.2 Les nacelles	12
I.4.2.3 La tour	12
I.4.3 Classification des éoliennes.....	12
I.4.3.1 classification des éoliennes ce fait selon la puissance nominale	12
I.4.3.2 Classification selon le nombre de pales	13
I.4.4 Les application des éoliennes	13
I.4.5 principe de fonctionnement d'une éolienne	14
I.4.5.1 Au niveau des pales	14
I.4.5.2 Au niveau du multiplicateur	14
I.4.5.3 Au niveau de générateur	14
I.4.5.4 Au niveau du transformateur	15
I.4.6 Avantages et les inconvénients des éoliennes	15
I-5 Potentiel des Energies Renouvelables en Algérie	15

I-5-1 Potentiel solaire	15
I-5-2 Potentiel éolien	16
I-5-3 Potentiel Géothermique	16
I-5-4 Potentiel Hydraulique	16
I-5-5 Potentiel de Biomasse.....	16
I-6 Le programme national des énergies renouvelables en Algérie PNER.....	17
I-7 Consistance du programme de développement des énergies renouvelables	18
I.8 L'énergie éolienne en Algérie.....	18
I.9 Conclusion	19

Chapitre II : Le vecteur énergétique du futur : l'hydrogène.

II.1 Introduction	21
II.3 L'hydrogène le vecteur énergétique du futur.....	23
II.4 Production d'hydrogène	25
II.4.1 Vaporeformage.....	26
II.4.2 Électrolyse.....	26
II.4.3 Procédé thermochimiques de gazéification.....	27
II.4.4 Par photosynthèse	27
II.5 Stockage d'hydrogène	27
II.5.1 Stockage à haute pression sous forme gazeuse.....	27
II.5.2 Stockage de l'hydrogène dans des hydrures.....	28
II.5.3 Stockage de l'hydrogène à basse température sous forme liquide.....	29
II.6 transport et distribution.....	29
II.6.1Transport par canalisation	29
II.6.2 Transport par ferroviaire	29
II.6.3 Transport maritime.....	29
II.6.4 Transport routier	29
II.7 Risques associée à l'hydrogène	30

II.8 Applications.....	32
II.8 Conclusion	34

Chapitre III : Estimation du potentiel de production d'hydrogène en Algérie.

III-1 Introduction.....	36
III-2 Description de la zone d'étude.....	36
III-3 Système de production d'hydrogène AeroH ₂	37
III-4 Méthodologie et outils	38
III-5-1 modélisation mathématique de la vitesse du vent (Weibull) et production d'énergie électrique	41
III-5-2 Modélisation de la production d'hydrogène	43
III-6 L'estimation du potentiel technique.....	48
III 6-1 Cartes thématique de critères	49
III.6.2 Résultats et discussions	54
III-7 Conclusion	58
Conclusion générale	60
Bibliographie.....	63
Annexe	68
Rèsumé.....	74

Résumé

En cette période de crise où les préoccupations environnementales prennent une ampleur considérable, l'hydrogène présente comme les technologies apportant l'une des solutions, voire la solution, aux problématiques des gaz à effet de serre et d'approvisionnement énergétique.

Ce mémoire a pour objectif l'étude du potentiel d'hydrogène en Algérie à partir de l'énergie éolienne et de spécifier les zones favorables pour l'installation des centrales éolienne. Après avoir présenté des généralités sur les aérogénérateurs et l'hydrogène, nous avons opté pour notre étude une combinaison de deux outils informatiques, le premier outil est le code fortran, là où on a introduit la modélisation mathématique de weibull, l'intégration de la modélisation mathématique de weibull nous a permis de calculer la distribution des vitesses du vent, le rendement de l'énergie électrique, puis, déduire le potentiel d'hydrogène net. Le second outil est un système informatique géographique (SIG), grâce à ce dernier nous avons pu représenter tous nos résultats en carte thématique, faire le calcul du potentiel technique d'hydrogène, exclure les zones interdites et représenter sur une carte ultime les zones favorables pour l'installation de notre système. Nous sommes arrivés à estimer un potentiel net d'hydrogène avec 3.13 tonne par an, et une valeur de 2.75 tonne par an pour le potentiel d'hydrogène technique, des valeurs qui promettent que l'hydrogène aura de plus en plus sa place, une place de choix dans le panel des vecteurs d'énergie mais il n'est pas l'énergie miracle qui remplacera intégralement les combustibles fossiles. D'ailleurs, de nombreuses actions sont encore à mener pour que l'hydrogène entre dans notre vie quotidienne.

MOTS-CLÉS : Production d'hydrogène, hydrogène, électrolyse, potentiel technique, potentiel net.

Abstract

In this time of crisis, where environmental concerns are of paramount importance, hydrogen is one of the technologies that provides one of the solutions, if not the solution, to greenhouse gas and energy supply issues.

The aim of this thesis is to study the potential of hydrogen in Algeria from wind power and to specify the areas favorable to the installation of wind power plants. After presenting the generalities on wind turbines and hydrogen, we opted for our study of combinations of two computer tools. The first tool is the FORTRAN code, where we introduced the mathematical modeling of Weibull, the integration of Weibull's modeling allowed us to: calculate the wind

speed distribution, the electrical energy yield, and then deduce the net potential in hydrogen. The second tool is a Geographic Information System (GIS); because of this latter, we were able to represent all our results on thematic maps, calculate the potential of hydrogen, exclude the zones of interest and represent on a final map the favorable zones. For the installation of our system. We have been able to estimate a net hydrogen potential of 3.13 tons per year and a value of 2.75 tons per year for the technical hydrogen potential, values that promise that hydrogen will become more and more important. A place of choice in the panel of energy vectors, but it is not the miracle energy that will completely replace fossil fuels. In addition, many studies remain to be carried out so that hydrogen enters our daily life.

KEYWORDS:

Hydrogen production, Hydrogen, Electrolysis, technical potential , net potential.

Abréviations	
AéroH ₂	Nom choisi pour le système de production d'hydrogène.
CDER	Centre de Développement des Energies Renouvelables.
GW	Gigawatt.
GWEC	The Global Wind Energy Council.
HAWT	(Horizontal axis wind turbine) Eolienne à axe Horizontal
Tep	Tonnes Equivalent Pétrole.
VAWT	(Vertical axis wind turbine) Eolienne à axe vertical.
Nomenclature	
C	Le facteur d'échelle de la courbe en m/s.
C _i	Le critère utilisé dans cette analyse.
Eel	Energie absorbée par l'électrolyseur (kWh)
FC	Facteur de puissance électrique annuelle.
HHV	(Higher Heating value) Pouvoir calorifique supérieure de la combustion d'hydrogène qui est égale à : 39.4 [kWh/kg].
P _n	puissance nominal (kW).
K	Paramètre de forme
T _t	le temps (heure/an).
η	Le rendement de l'électrolyseur η= 0.75.

Liste des abréviations

$Q(H_2)$	Quantité d'hydrogène produite [tonne/an/km ²].
$P(V)$	est la densité de probabilité de la vitesse V .
v_m	vitesse moyenne annuelle.
W_i	Le poids de chaque critère.
η_{el}	Rendement d'électrolyseur (%)
η_p	Rendement supplémentaire inclus pour tenir compte les pertes d'énergie dans l'électrolyseur (%)

Chapitre I : les Aéro-générateurs

Figure I.1 Eoliennes rudimentaire à axe vertical	5
Figure I.2 Evolution des dispositifs éoliens de l'Antiquité à nos jours	5
Figure I.3 Tyer wind.....	6
Figure I.4 Eoliennes à axe horizontal (HAWT) ou à axe vertical (VAWT)	9
Figure I.5 Composantes d'une éolienne horizontale	11
Figure I.6 Types de tour	12
Figure I.7 Classification des éoliennes par nombre de pales	13
Figure I.8 Une éolienne domestique pour votre maison	4
Figure I.9 Atlas vent de l'Algérie à 10 m du sol réalisée par	19

Chapitre II : Le vecteur énergétique du futur : L'hydrogène

Figure II-1 La représentation d'hydrogène pour l'Algérie.....	23
Figure II-2 Cycle d'hydrogène.....	24
Figure II-3 Principales origines de l'hydrogène produit aujourd'hui dans le monde.....	26
Figure II-4 Les différents types de réservoirs gazeux	28
Figure II-5 Principe du stockage de l'hydrogène dans les matériaux Hydrure.....	28
Figure II-6 L'explosion du Zeppelin.	30
Figure II-7 Fusée ariane5.....	31
Figure II-8 La première station à hydrogène.....	33

Chapitre III : Potentiel de production d'hydrogène en Algérie

Figure III.1 Zone d'étude.	38
Figure III-2 Système de production d'Hydrogène.....	39
Figure III-3 Organigramme-méthodologie de la combinaison des deux systèmes d'approche.....	40
Figure III-4 Organigramme-méthodologie de l'obtention du potentiel net d'H ₂	41
Figure III-5 La distribution de la vitesse moyenne annuelle (m/s) du vent en Algérie.....	44
Figure III-6 L'électrolyse PEM.....	45
Figure III.7 Station de mesure.....	46

Figure III-8 Vitesse moyenne annuel (potentiel du vent) en 48 stations (calculs de l'auteur).....	47
Figure III-9 Potentiel d'hydrogène net.....	48
Figure III-10 Organigramme-méthodologique du potentiel technique sur ArcGIS.....	49
Figure III-11 Cartes thématique de critères.....	50
Figure III-12 Zones urbains.....	52
Figure III-13 Zones protégée.....	52
Figure III-14 Routes nationaux.....	53
Figure III-15 Aéroports.....	53
Figure III-16 Les élévations.....	54
Figure III-17 Les pentes.....	54
Figure III-18 Zones favorables.....	56
Figure III-19 Potentiel technique d'hydrogène.....	57
Figure III-20 Superficies des zones exclus.....	58

Annexe B

Figure III-1 Schéma général d'un SIG	62
Figure III-2 Les application de L'ArcGis.....	64
Figure III-3 Représentation de l'information en mode vectoriel.....	64
Figure III-4 Projections des données.....	65
Figure III-5 Les étapes de l'outil de reclassification.....	65
Figure III-6 Image descriptive des outils Buffer et distance euclidien.....	66

Chapitre I : les aérogénérateurs.

Tableau I-1 Echelle de beaufort.....	7
Tableau I-2 Puissance installée d’origine éolienne dans les principaux pays	8
Tableau I-3 Composantes d’une éolienne horizontal.....	11
Tableau I-4 Avantages et inconvénients des éoliennes.....	15
Tableau I-5 Consistance du programme de développement des énergies renouvelables	18

Chapitre II :le vecteur énergétique du futur : l'hydrogène.

Tableau II-1 Bref historique d’hydrogène.....	22
Tableau II-2 Propriété d’hydrogène.....	5

Chapitre III : l’estimation du potentiel de production d'hydrogène.

Tableau III-1 Caractéristique de l'aérogénérateur.....	5
Tableau III-2 Définition des classes des vitesse moyenne annuel (calculs de l'auteur).....	7
Tableau III-3 Tableau des critères.....	1
Tableau III-4 Potentiel d’hydrogène en Algérie.....	8

Annexe A

Tableau III-1 Données climatique.....	67
Tableau III-2 Résultats des vitesses moyenne annuelle ,quantités d’hydrogène et énergie électrique	68

Introduction générale

Introduction générale

Résiper de l'aire 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 provoqueun grand impact sur notre environnement, la pollution atmosphérique,les émissions des gaz à effets de serre et biensur 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 biomass.

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.

En 2011, l'Algérie a entamé des projets de réalisation de fermes pour la production d'électricité toute en introduisant les énergies renouvelables comme source d'énergie, parmi ces projets, la centrale éolienne à Adrar. Cependant, pour voir plus grand et haut plusieurs études se font sur la combinaison de la production des vecteurs énergétique à base de source d'énergie renouvelable. La production d'hydrogène par énergie du vent, est un projet prometteur à l'avenir pour l'Algérie. La réalisation d'un tel projet nécessite premièrement le choix des sites basés sur des paramètres techniques et énergétiques pour achever un projet bien fiable et durable mais aussi l'étude du potentiel d'hydrogène répartie sur notre zone d'étude. Dans ce cadre, cette étude consiste à la combainison de deux méthodes permmentant d'obtenir le potentiel d'hydrogène net et technique à l'échelle du territoire algérien, ainsi que le développement d'une méthode d'aide à la décision afin de cerner les sites d'installation des centrales de production d'hydrogène à partir de l'énergie du vent (AéroH₂), qui doit être établie en quelques éléments de connaissance du territoire élaboré qui est à son tour sous forme des critères d'analyse spatiale.

Ce travail se développe comme suit :

Chapitre I : *Les aérogénérateurs.*

Dans ce chapitre, représenterons des généralités sur l'énergie éolienne, Nous entamerons avec un passage de l'histoire des éoliennes, les technologies les plus récents, cela, avant de passer à ses propriétés, types et composantes, ses avantages et inconvénients, et propriétés. Ensuite, nous donnerons allons finir cette partie avec une représentation des énergie renouvelables en Algérie.

ChapitreII : *Le vecteur énergétique du futur : L'hydrogène.*

Ce chapitre est dédié à la présentation générale de l'hydrogène qui est de nos jours l'un des vecteurs énergétique le plus prometteur. Nous aborderons dans cette partie toutes caractéristiques et propriétés mises en jeu afin d'adopter une méthodologie de production.

Chapitre III : *Potentiel de production d'hydrogène en Algérie.*

Le dernier chapitre est consacré à l'estimation du potentiel de production d'hydrogène en appliquant la modélisation de weibull qui va nous permettre d'avoir une analyse du potentiel net d'hydrogène, à partir de la distribution de la vitesse du vent en Algérie, en combinaison avec le programme SIG (système informatique géographique), qui lui a son tour vas nous aider à faire le traitement des cartes thématique pour, représenter les résultats en cartes, conclure le potentiel d'hydrogène technique et spécifier le choix des zones favorables.

Et nous clôturons ce travail par une conclusion générale.

Chapitre I :

Les Aérogénérateurs.

I.1 Introduction

Les sources renouvelables d'énergie permettent une production décentralisée de l'électricité, peuvent contribuer à résoudre le problème de l'électrification des sites isolés, où un grand nombre d'individu est dépourvu de tout apport énergétique. Faisant appel à des sources d'énergie universellement répandues, nécessitant un minimum de maintenance ; la solution éolienne représente le plus souvent le choix économique et technologique idéal pour les régions ou les installations isolées.

Dans ce premier chapitre, des généralités sur les aérogénérateurs seront présentés, en premier lieu, nous allons faire un petit détour en arrière voire l'historique de l'énergie éolienne, par la suite, nous mettons la lumière sur la vitesse du vent, puis dans la troisième partie, nous aborderons la représentation d'une éolienne (types, classifications, composantes d'une éolienne, fonctionnement et les avantages et inconvénients) et au final l'énergie éolienne en Algérie.

I.2 Historique

L'énergie éolienne est l'une des énergies la plus répandue de nos jours, elle se considère aussi comme la plus anciennement exploitée. Evidemment, c'est une énergie propre et renouvelable qui contribue depuis toujours à résoudre des problèmes de l'électrification des sites isolés, où un grand nombre d'individus est dépourvu de tout apport énergétique.

Très tôt, dans l'histoire des techniques, le vent a été exploité afin d'en extraire de l'énergie mécanique : pour la propulsion des navires dès l'antiquité (3000 ans Av.JC), pour les moulins (à céréales, olives), le pompage ou, au Moyen Age, pour l'industrie (forges...). La conversion de l'énergie du vent en énergie mécanique est en effet relativement aisée, il faut « seulement » disposer d'un potentiel satisfaisant et résister aux caprices des vents excessifs. Parallèlement, les progrès technologiques, tant dans les domaines de l'électrotechnique, de l'électronique que dans celui des matériaux, font que l'on peut désormais disposer de machines aux performances étonnantes en terme de puissance produite, tout en limitant les impacts sur l'environnement [1].

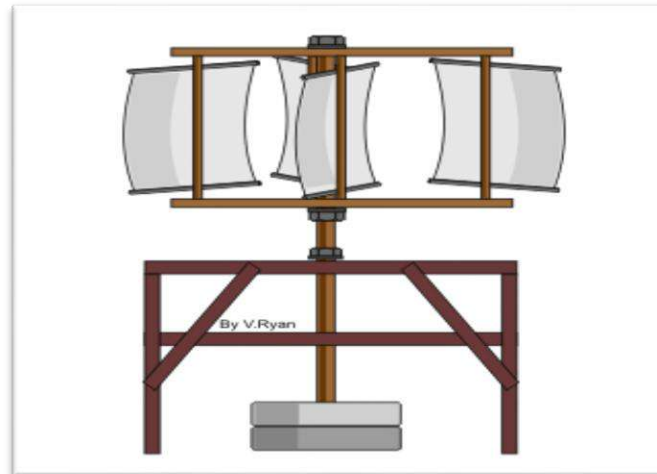


Figure I.1: Eolienne rudimentaire à axe vertical [2].

Par la suite, les croisées les ramenèrent en Orient. D’abord le système éolien est utilisé pour le pompage d’eau POLDER ; une étendue de terre basse entourée de digues qui forment une entité hydrologique artificielle, elles servirent par la suite au seizième siècle à d’autres fonctions, tel que couper le bois. Ce n’est qu’en 1890 au Danemark que les éoliennes étaient utilisées pour créer de l’énergie électrique [1].

Actuellement, les progrès technologiques, tant que dans les domaines de l’électrotechnique et de l’électronique que dans celui des matériaux, font que l’on peut désormais disposer des dispositifs d’éoliens plus performant en termes de puissance produite, tout en utilisant des cycles combinés et limitant les pertes d’énergie et assurant un avenir énergétique aux autres générations du futur.

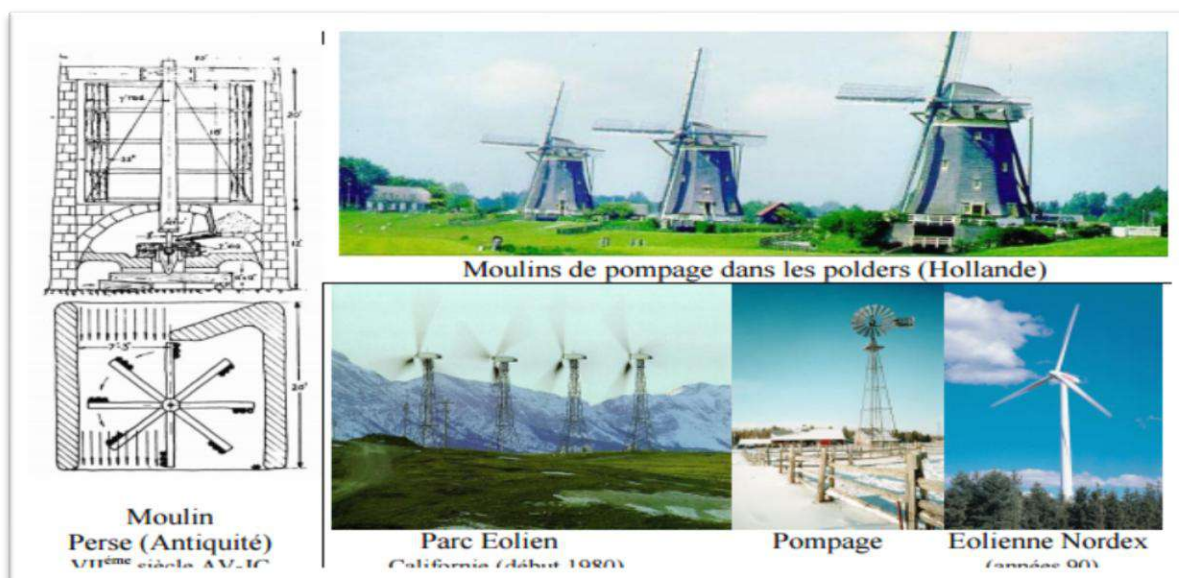


Figure I.2 Evolution des dispositifs éoliens de l’Antiquité à nos jours [2].

➤ **Dérnière technologie éoliennes développées**

Tyer Wind, l'éolienne qui imite le battement d'ailes du colibri pour produire de l'énergie. En 2017, une entreprise tunisienne innove avec un nouveau type d'éolienne inspirée du battement d'ailes des oiseaux. Un design en forme d'aile qui permettrait une plus grande efficacité comparée aux éoliennes classiques, l'invention de cette société démontre une nouvelle fois que la nature est une excellente source d'inspiration. En effet, cette jeune startup a inventé un tout nouveau type d'éolienne avec des ailes, la Tyer Wind [3],

D'après l'entreprise, les éoliennes « classiques » à trois pales pourraient être bien plus performantes. Ils ont donc décidé de repenser totalement le concept en s'inspirant du battement des ailes du colibri. Un oiseau notamment connu pour sa capacité à faire du sur place en battant ses ailes très rapidement [3].

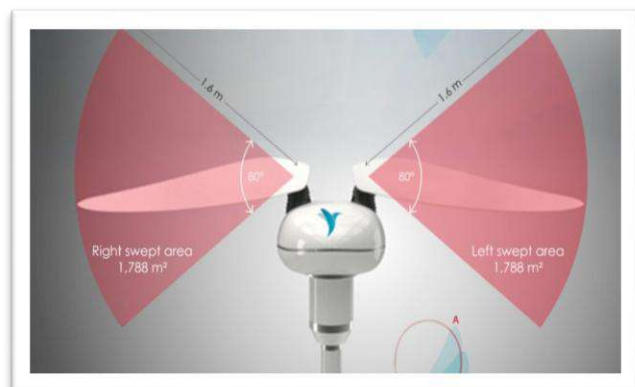
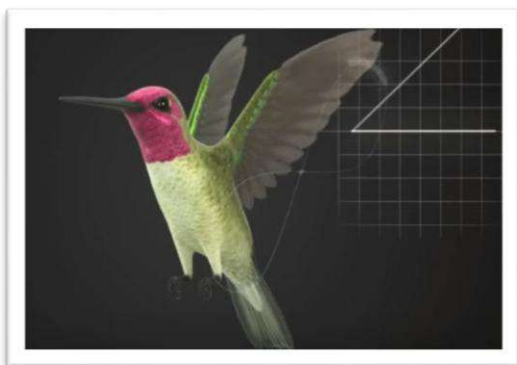


Figure I.3 Tyer wind.

I.3 Présentation de la vitesse du vent et ses caractéristiques

L'air qui constitue l'atmosphère est un mélange de gaz et de particules de forme solides ou liquides. Sa composition est relativement constante jusqu'à une altitude inférieure à 100km et est majoritairement composée d'azote et d'oxygène. La quasi-totalité de sa masse est située à une altitude de moins de 16 km, dans les basses couches atmosphériques [4].

La vitesse du vent est mesurée avec des anémomètres, se sont des instruments qui permettent de mesurer les vitesses et les pressions du vent. Il en existe plusieurs types classés en deux catégories principales (les anémomètres à rotation et les anémomètres à pression), la pression du vent reste constante à chaque instant pour l'ensemble du globe, mais ce n'est pas le cas pour la vitesse du vent qui est très variable en fonction des jours et des lieux.

Le **Tableau I.1** donne la classification des vents avec l'échelle de Beaufort qui décrit les différentes natures du vent en fonction de leurs vitesses.

Tableau I.1 Echelle Beaufort [5]

Force	Appellation	Vitesse de vent		Effets à terre
0	Calme	1	1	La fumée monte droit
1	Très légère brise	1 à 3	1 à 5	La fumée indique la direction du vent
2	Légère brise	4 à 6	6 à 11	On sent le vent au visage
3	Petite brise	7 à 10	12 à 19	Les drapeaux flottent
	Jolie brise	11 à 16	20 à 28	Le sable s'envole
5	Bonne brise	17 à 21	29 à 38	Les branches des pins s'agitent
6	Vent frais	22 à 27	39 à 49	Les fils électriques sifflent
7	Grand frais	28 à 33	50 à 61	On peine à marcher contre le vent
8	Coup de vent	34 à 40	62 à 74	On ne marche plus contre le vent
9	Fort coup de vent	41 à 47	75 à 88	
10	Tempête	48 à 55	89 à 102	Les enfants de moins de 12 ans volent
12	Ouragan	64 et plus	118 et plus	

I.4 Représentation d'une éolienne

L'énergie éolienne est l'une des plus anciennes ressources naturelles exploitées par des systèmes mécaniques, **qui tire son nom d'Éole (en grec ancien Aiolis), le Dieu du vent.** Une éolienne est un dispositif qui permet à convertir l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique. Puis cette énergie en énergie électrique. Elles sont généralement utilisées pour produire de l'énergie électrique, elles sont classées parmi la catégorie des énergies renouvelables. L'énergie éolienne subit un grand développement en termes de puissance installée dans le monde. Cette énergie est devenue une réalité.

Tableau I.2: Puissance installée d'origine éolienne dans les principaux pays [6].

Pays	2000	2005	2013
Allemagne	6.113 GW	18.423 GW	34.2 GW
Espagne	2.502 GW	10.027 W	22.9 GW
U.S. A	2.566 GW	9.149 GW	61 GW
Inde	1.167 GW	4.430 GW	20.1 GW
Danemark	2.300 GW	3.122 GW	4.7 GW

Dans ce tableau nous pouvons voir l'évolution durant ces années 2000-2005 et 2013 de la puissance éolienne installée dans les principaux pays. Au totale 47320GW étaient installées début 2005, dont plus de 70% étai en Europ. En 2009 il avait mis comme objectif de subvenir aux besoins de 75 millions de foyers et c'était le cas du coup elle couvre 16% de la consommation d'énergie danoise actuellement. Selon le dernier rapport annuel du GWEC (The Global Wind Energy Council), la capacité éolienne mondiale était de 318,137 (GW) au 31 décembre 2013 En terme puissance installé il espère atteindre les 150 GW en 2020 dans le monde [6].

Pourquoi tant d'espoir en cette énergie ? La réponse est claire plusieurs facteurs ont contribué et contribue encore à son essor. Energie inépuisable renouvelable, propre et prometteuse.

I.4.1 Types d'éoliennes

On distingue les éoliennes on shore (terme américain signifiant sur le sol c'est-à-dire sur les continents), et les éoliennes off-shore (sur la mer). Ces dernières présentent des avantages au niveau des nuisances sonores puisqu'elles sont éloignées des habitations et au niveau des vents car les vents marins sont plus nombreux et plus forts que les vents continentaux. En revanche, elles sont beaucoup plus difficiles à installer et donc beaucoup plus coûteuses[8].

- ✓ Les éoliennes à axe horizontal
- ✓ Les éoliennes domestiques
- ✓ Les éoliennes à axes verticaux
- ✓ Les hydroliennes
- ✓ Eolienne de pompage

On distingue deux grands types d'éoliennes :

- Les éoliennes à axe vertical
- Les éoliennes à axe horizontal

Il existe de nos jours plusieurs sortes d'éoliennes parmi ces deux grandes catégories.



Figure I.3Eoliennes à axe horizontal (HAWT) ou à axe vertical (VAWT) [9].

I.4.1.1 Eoliennes à axe vertical

Ces éoliennes ont un axe de rotation verticale du sol presque perpendiculaire à la direction du vent, chacune des faces d'un corps creux sont d'intensités différentes. Parmi les avantages des éoliennes à axe vertical c'est qu'elle fonctionne peut import la direction d'où souffle le vent, moins couteuse elle ne nécessite pas l'édification d'une tour et sont générateur repose sur le sol [8].

Les éoliennes à axe verticale ont connu quelques grands investissements et projet industriels qui ont été réalisé, celle à variation cyclique d'incidence dont la structure la plus répandue est celle de Darrieus. Hélas mise par terre peut oui diminuer du cout mais son efficacité est aussi réduite car le capteur d'énergie se situe dans la zone peu favorable par rapport au gradient du vent [8].

I.4.1.2 Eoliennes à axe Horizontal

Ces éoliennes ont leur axe de rotation à l'horizontale du terrain mais aussi presque parallèle à la direction du vent. Elles sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent. Elles sont les plus présentes dans le marché, même si leur coût est plus élevé que les éoliennes à axe vertical, mais elles présentent néanmoins une efficacité et un rendement plus élevé car elle est privilégiée de la position du récepteur à plusieurs dizaines de mètres du sol [10].

➤ Les éoliennes à axe Horizontal rapide

Elles ont un nombre de pales qui vari en général entre 2 et 4 pales. Leurs poids moins lourds comparés à une éolienne lente de même puissance et de leur rendement est plus élevé. L'inconvénient de démarrer difficilement, et pour les éoliennes rapides sont le plus utilisée dans la production d'électricité en raison de leur efficacité [11].

➤ Les éoliennes à axe Horizontal lentes

Les éoliennes lentes ou à marche lente elles ont la particularité d'avoir généralement de (20 à 40 pales), ce genre d'éolienne sont adapté à aux vents à faible vitesse, leur coefficient de puissance atteint rapidement sa valeur maximale mais décroît plus rapidement par la suite, c'est pour cela qu'elle leurs efficacités et réduit par rapport aux éolienne rapide. Elles sont utilisées généralement pour le pompage d'eau [11].

I.4.2 Composantes des éoliennes horizontales

Les éoliennes à axe horizontal constituent trois composantes les plus importantes comme on peut voir sur la (figure I.4) et le (tableau I.3)[12].

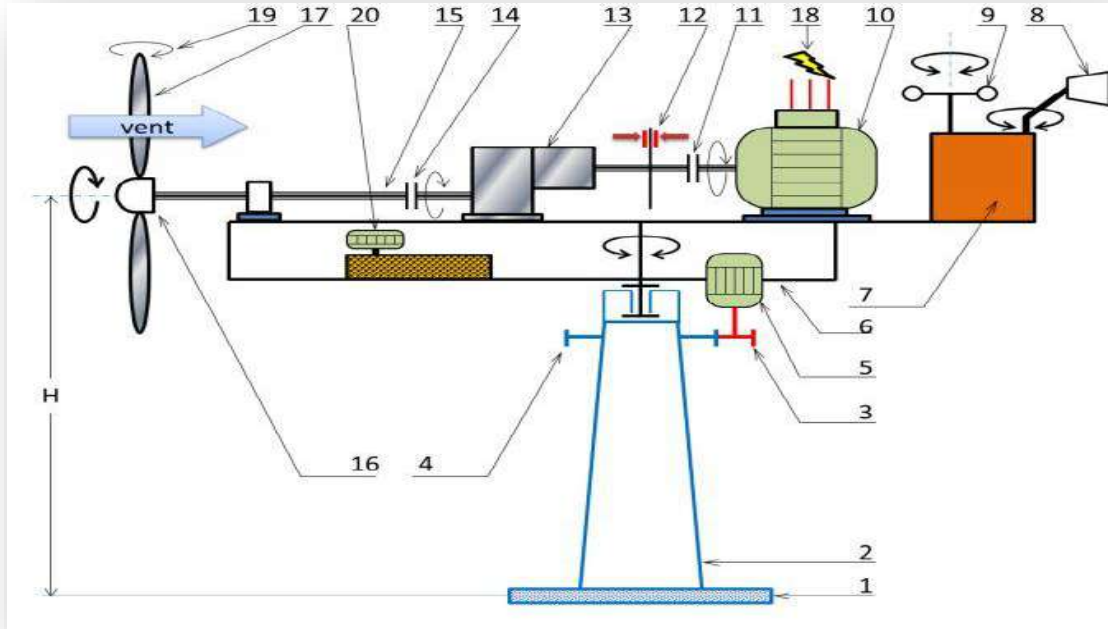


Figure I.4 Composantes d'une éolienne horizontal [13].

Ce tableau représente les significations des chiffres sur la figure (I.4).

Tableau I.3 Composantes d'une éolienne horizontal [13].

Repère	Désignation	Repère	Désignation
1	Fondation	11	Accouplement à la haute fréquence de rotation
2	Tour	12	Frein à disque
3	Pignon d'entraînement de la nacelle	13	Multiplicateur de vitesse
4	Roue dentée liée à la tour	14	Accouplement à basse fréquence de rotation
5	Moteur d'orientable de la nacelle	15	Arbre lent
6	Nacelle Orientable	16	Moyeu du rotor à 3 pales
7	Unité centrale	17	Pale à pas variable
8	Girouette	18	Réseau électrique
9	Anémomètre	19	Système de régulation du pas des pales
10	Générateur	20	Groupe hydraulique

I.4.2.1 Les pales et le rotor : elles représentent un capteur de l'énergie du vent, à son tour elle va passer cette énergie au rotor qui va convertir cette énergie cinétique du mouvement de fluide (le vent) en énergie mécanique [14].

I.4.2.2 Les nacelles : C'est l'ensemble des équipements les plus importants de toute l'installation de production d'électricité [14].

- **Le multiplicateur** : Son rôle est d'adapter la vitesse de la turbine éolienne à celle du générateur électrique .
- **Le générateur** : Il convertit l'énergie mécanique en énergie électrique Mais aussi d'autres équipements comme les systèmes d'orientation de l'éolienne et systèmes de frein.

I.4.2.3 La tour : c'est un support de l'ensemble (pales + nacelle) pour éviter que les pales ne touchent le sol, la hauteur de la tour doit être la plus longue possible de manière à sortir le plus de gradient de vent possible qui existe à proximité du vent [15].



Figure I.5: types de tour [16].

I.4.3 Classification des éoliennes

I.4.3.1 classification des éoliennes ce fait selon la puissance nominale :

Les éoliennes peuvent être classées selon plusieurs paramètres, on abordera ce classement avec le classement par puissance nominale [16].

- Eoliennes de petite puissance : inférieure à 40 kW
- Eoliennes de moyenne puissance : de 40 à quelques centaines de kW.

- Eoliennes de forte puissance : supérieure à 1 MW.

I.4.3.2 Classification selon le nombre de pales :

Le nombre de pales, que l'éolienne possède influence sur l'efficacité et le rendement de la machine.

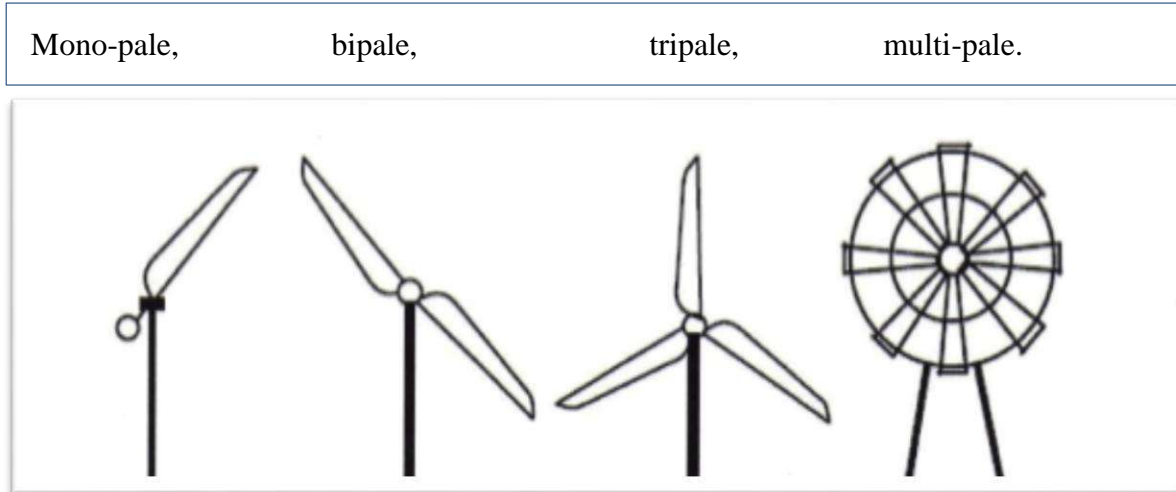


Figure I.6:classification des éoliennes par nombre de pales [17].

I.4.4 Les application des éoliennes

Les aérogénérateurs ou bien les éoliennes sont devenues un réel investissement pour les pays vu la source est le vent gratuit et inépuisables elles sont de plus en plus utilisées. Elles ont une autre particularité c'est que l'énergie apportée par le vent comme cinétique après avoir été convertie en énergie mécanique, elle peut être utilisée principalement de deux manières : soit directement ou pour entraîner une génératrice électrique deux types de technologies sont utilisés pour la production d'électricité, □ □ l'énergie est stockée dans des accumulateurs en vue de son utilisation ultérieure ou bien elle est utilisée directement par injection sur un réseau de distribution [18].

Celons la capacité de l'éolienne il y a celles qui ont une capacité de 100w à 20 kilowatts, elles peuvent être utilisées comme source alimentatrice dans une :

- 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 I.7 Une éolienne domestique pour votre maison.

I.4.5 principe de fonctionnement d'une éolienne

I.4.5.1 Au niveau des pales

Les pales fonctionnent sur le principe d'une aile d'avion, la différence de pression entre deux faces crée une force aérodynamique, mettant en mouvement le rotor par la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique [19].

I.4.5.2 Au niveau du multiplicateur

Les pales tournent à une vitesse relativement lente, de l'ordre de 5 à 15 tours par minute, les générateurs ont besoin généralement 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 [19].

I.4.5.3 Au niveau de générateur

Transmise par le multiplicateur l'énergie mécanique se transforme en énergie électrique par le générateur, le rotor du générateur tourne à grande vitesse et produit de l'électricité à une tension d'environ 960 volts [19].

I.4.5.4 Au niveau du transformateur

L'électricité ne peut pas être utilisée directement ; elle est traitée grâce à un convertisseur, puis sa tension est élevée à 20 000Volts par un transformateur. Puis acheminée à travers un câble enterrée jusqu'à un poste de transformation, pour être injectée sur le réseau électrique [8].

I.4.6 Avantages et les inconvénients des éoliennes

Chacune des technologies récentes ont des avantages et des inconvénients, nous allons voir sur le (Tableau I.3) les avantages et inconvénients des éoliennes.

Tableau I.3Avantages et inconvénients des éoliennes[12].

Avantages	Inconvénients
Le vent est une source d'énergie propre.	Variations intermittentes et imprévisibles de la vitesse et de la direction du vent. L'éolienne ne produit pas d'électricité lorsque $v < 15 \text{ km/h}$ et $v > 80 \text{ km/h}$.
Éolienne : une des sources d'énergie renouvelable qui présente le moins de problèmes techniques, économiques et environnementaux.	Maintenance constante, durée de vie limitée (~15 ans)
Coûts d'investissements modestes comparés à ceux des centrales hydrauliques, thermiques et nucléaires.	Masse volumique de l'air petite (air~ 1kg/m^3 ; eau~ 1000kg/m^3) Nuisance sonore, Oiseaux.

I-5 Potentiel des Energies Renouvelables en Algérie

L'Algérie en particulier et les pays du Maghreb ont un potentiel des énergies renouvelables élevé, alors que le sud de l'Algérie se caractérise par son énorme potentiel d'énergie éolienne et solaire, qui est la partie principale du programme national de développement des énergies renouvelables.

I-5-1 Potentiel solaire

Le gisement solaire est parmi les gisement les plus élevé dans le monde, la durée d'ensoleillement annuel moyen dans le Sahara algérien est de l'ordre de 3500 h/an et un territoire composé à 86% de désert saharien, de très importante valeurs sont mis pour les projets des

énergies renouvelables, comme illustre dans, ce potentiel peut constituer un facteur important de développement durable dans cette région, s'il est exploité de manière économique[13].

I-5-2 Potentiel éolien

La topographie et un climat de l'Algérie qui est très diversifié à donner un grand pas à l'énergie renouvelable surtout l'éolienne. Le Nord de l'Algérie possède un terrain montagneux, représenté par l'Atlas de Tellien et l'Atlas saharien. Parmi eux, les plaines et les climats continentaux sont pénétrés. Le Sud, caractérisé par le climat désertique. Le Sud est caractérisé par des vents plus forts que le Nord, avec des vitesses supérieures à 6 m / s et inférieures à 8 m / s dans la région d'Adrar[13].

I-5-3 Potentiel Géothermique

La compilation de données géochimiques, géologiques et géophysiques dans le Nord de l'Algérie a identifié de grands réservoirs géothermiques plus de 200 sources d'eau chaude, situées dans le Nord du pays, Ces sources ont souvent des températures allant de 40°C à 45°C, il y a aussi des ressources à haute température jusqu'à 118 °C à Biskra [13].

I-5-4 Potentiel Hydraulique

Les quantités globales tombant sur le territoire et estimées à 65 milliards de m³, mais il n'est pas largement exploité dans notre pays pour plusieurs raisons, nous les mentionnons : Forte évaporation de l'eau du barrage, évacuation rapide vers la mer, Évacuation rapide vers la mer pour éviter les inondations, concentration sur des espaces limités, concentration sur des espaces limités, au total, 103 sites de barrage ont été identifiés et plus de 50 barrages sont actuellement en activité [13].

I-5-5 Potentiel de Biomasse

Divisé en deux parties principales sont :

- Potentiel de la forêt.
- Potentiel des déchets organiques. Cinq millions de tonnes de déchets urbains et agricoles ne sont pas recyclés, ce potentiel représente un gisement de l'ordre de millions de TEP/an [13].

I-6 Le programme national des énergies renouvelables en Algérie PNER

Le programme que l'Algérie s'est tournée vers, le domaine des énergies renouvelables pour répondre aux défis environnementaux. L'efficacité énergétique permettra de réduire les émissions de CO₂ de 200 millions de tonnes [13]. Et la conservation et la réduction de la consommation de combustibles fossiles en lançant un programme ambitieux de développement des énergies renouvelables adopté par le gouvernement en février 2011 et révisé en mai 2015.

Le programme des énergies renouvelables actualisé sert à installer une puissance d'origine renouvelable de l'ordre de 22 GW (2 GW éolienne, 2,8 GW de PV et 7,2 GW des centrales (thermiques) avec un nombre total estimé de 12 GW en 2011 et 22 GW après l'actualisation de ce programme en 2015 pour le marché national à l'horizon 2030, avec le maintien de l'option de l'exportation comme objectif stratégique[13].

Les sites à haut potentiel solaire ont été identifiés et ces projets seront distribués dans environ 21 wilayas pouvant installer des centrales des énergies solaires, il a compris que les wilayas du sud (en particulier les panneaux solaires), les hauts plateaux et le nord (énergie éolienne et CSP). Il comprendra trois technologies différentes : photo-voltaïque, éolienne et CSP hybride. Il s'agit de : 01) Adrar ; 02) Batna ; 03) Bechar ; 04) Biskra ; 05) Djelfa ; 06) El-Bayadh ; 07) El-Oued ; 08) Ghardaïa ; 09) Illizi ; 10) Khenchela ; 11) Laghouat ; 12) M'Sila ; 13) Nâama ; 14) Ouargla ; 15) Saida ; 16) Sidi Bel Abbès ; 17) Tébessa ; 18) Tiaret ; 19) Tindouf ; 20) Tlemcen ; 21) Tamanrasset [13].

L'Algérie compte se positionner comme un acteur majeur dans la production de l'électricité à travers ce programme d'énergies renouvelables, cette production se fera à travers les filières photo-voltaïque et éolienne à travers l'intégration de la biomasse, la co-génération d'énergie, l'énergie géothermique et au-delà de 2021, et l'énergie solaire thermique.

Ces filières énergétiques principale serviront de moteurs pour un développement économique et durable en Algérie, 37 % de la capacité installée d'ici 2030 et 27 % de la production d'électricité destinée à la consommation nationale, seront d'origine renouvelable [14].

I-7 Consistance du programme de développement des énergies renouvelables

La consistance du programme en énergie renouvelables à réaliser pour le marché national sur la période 2015-2030 est de 22 000 MW, répartie par filière dans (Tab I.4)[13] comme suit :

Tableau I.4 Consistance du programme de développement des énergies renouvelables [13]

Technologie	1ère phase 2015-2020	2ème phase 2021-2030	TOTAL[MW]
Photovoltaïque	3 000	10 575	13 575
Eolien	1 010	4 000	5 010
CSP	-	2 000	2 000
Cogénération	150	250	400
Biomasse	360	640	1 000

I.8 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 1^{er} 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 [15].

Pour but d'alimenter les localités isolées ou d'accès difficiles tels que les installations de relais de télécommunications de nombreux aérogénérateurs ont été installés sur différents sites. C'est juste après le choc pétrolier que d'importants investissements ont été consacrés à la recherche et au développement des éoliennes pour la production d'électricité.

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 répartition 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.

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 à 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 Gamesa de 850 kW de puissance [15].

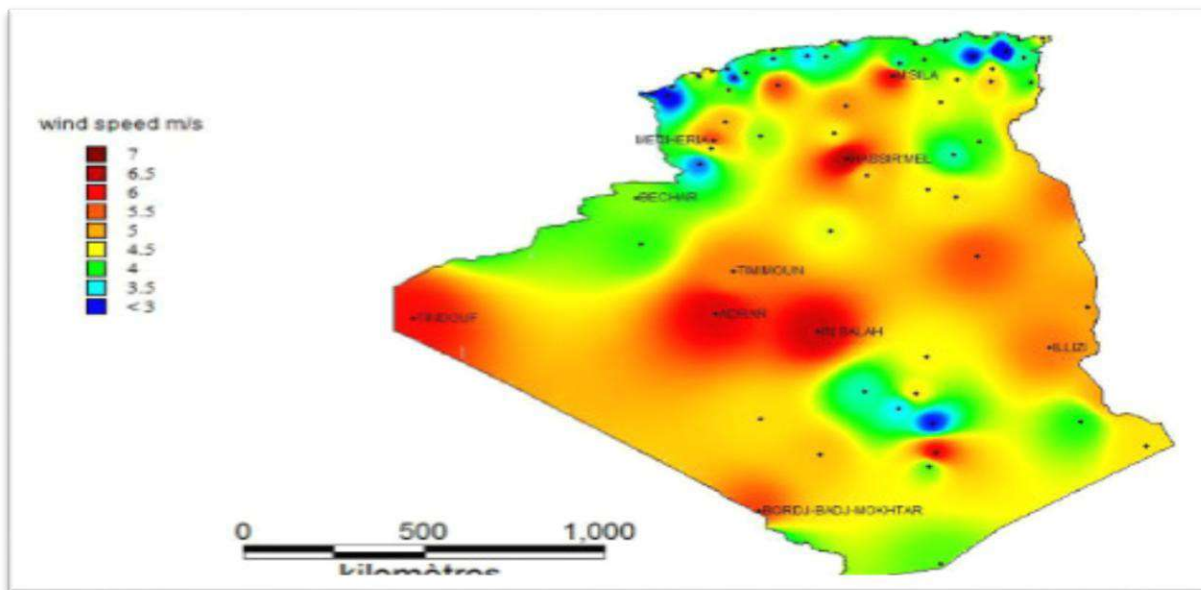


Figure I.8 Atlas vent de l'Algérie à 10 m du sol réalisée par [17].

I.9 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre quelques généralités sur les éoliennes où on a donné un bref historique sur l'utilisation de l'énergie éolienne, la représentation de la vitesse du vent, puis la représentation d'une éolienne, les différents types d'éoliennes et leurs composantes principales (les pales, la tour, nacelle), la classification des éoliennes en fonction de leurs puissances et du nombre des pales, mais aussi les applications des éoliennes en général qui se distinguent en deux parties : stockées ou utilisées directement, ensuite les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne, et pour finir ce chapitre nous avons présenté en bref le parcours de l'énergie éolienne en Algérie.

CHAPITRE II

Le vecteur énergétique du
future : L'hydrogène.

II.1 Introduction

L'abondance de la matière première pour la production, la propreté et le recyclage naturel sont les propriétés qui feront que l'hydrogène sera amené à jouer un rôle de premier plan dans le futur ; Ce vecteur d'énergie (l'hydrogène) est le seul qui peut être produit à partir du composé le plus abondant sur Terre, l'eau [19].

Dans ce 2ème chapitre, nous donnerons une présentation générale sur l'hydrogène appelé aussi de nos jours le vecteur énergétique du futur. En premier lieu, nous nous concentrerons sur le vecteur d'énergie du futur, l'hydrogène. Tout d'abord, nous verrons le potentiel d'hydrogène renouvelable à travers le monde avec une petite précision du cas de l'Algérie, ensuite sa définition complète, ses caractéristiques, ensuite, la deuxième partie sera consacrée aux méthodes de productions d'hydrogène, stockage, transport et la distribution. Dans la troisième, partie nous aborderons les risques de production et consommations d'hydrogène, son utilisation dans différents domaines à travers le monde.

➤ **Bref historique [19, 20, 21]**

Tableau II.1 Bref historique d'hydrogène [19, 20,21]

Année	Historique
1671	Robert Boyle dissout des tournures de fer dans de l'acide chlorhydrique dilué et rapporte que les 'vapeurs' dégagées sont hautement inflammables.
1766	Le chimiste britannique Henry Cavendish parvient à isoler une étrange substance gazeuse qui en brûlant dans l'air, donne de l'eau: "L'Hydrogène".
1781	Appelé jusqu'alors "gaz inflammable", ce gaz fut nommé "Hydrogène" en 1783 par le grand chimiste français Antoine Lavoisier qui effectua la synthèse de l'eau
1782	Les frères de Montgolfier gonflèrent des petits ballons avec de l'hydrogène pour les voir s'envoler
1er décembre 1783	Jacques Charles poursuivit ces travaux et découla avec un ballon gonflé à l'hydrogène et parcourut 35 Km.
1804	Le français Louis Joseph Gay-Lussac et l'allemand Alexander Von Humboldt démontrent conjointement que l'eau est composée d'un volume d'oxygène pour deux volumes d'hydrogène.
1839	L'anglais William R. Grove découvre le principe de la pile à combustible : il s'agit d'une réaction chimique entre l'hydrogène et l'oxygène avec production simultanée d'électricité, de chaleur et d'eau en utilisant des électrodes de platine poreuses et de l'acide sulfurique comme électrolyte.
1898	James Dewar produit pour la première fois de l'hydrogène liquide.

Chapitre II : vecteur énergétique du futur : l'hydrogène.

1900	Le premier "Zeppelin" effectue son vol inaugural, rempli d'hydrogène.
1931	Harold Urey découvre le deutérium.
1939 – 1953	L'anglais Francis T. Bacon fait progresser les générateurs chimiques d'électricité qui permettent la réalisation du premier prototype industriel de puissance. · Au début des années 1950, l'idée d'utiliser de l'hydrogène dans un réacteur pour la propulsion d'avion.
1960	À partir de cette date, la NASA utilise la pile à combustible pour alimenter en électricité ses véhicules spatiaux (capsules Apollo et Gemini)

II.2 L'hydrogène en Algérie

Plusieurs recherches et études expérimentales dans le monde entier sont entamées au sujet de la production d'hydrogène, autant en profiter de ce vecteur énergétique vu sa disponibilité débordante. En Algérie des chercheurs du Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER) ont lancé plusieurs recherches sur la production de l'hydrogène [21]. Afin de déterminer l'effet des conditions climatiques sur le coût de la production d'hydrogène, deux sites différents ont été retenus : l'un dans le nord de l'Algérie et l'autre dans le sud de l'Algérie [22]. D'autres chercheurs du même centre, ont été intéressés à l'électrolyse au méthanol pour produire de l'hydrogène. L'électrolyse au méthanol aqueux se déroule à une tension beaucoup plus faible que celle obtenue avec l'électrolyse de l'eau. En raison de la tension de fonctionnement sensiblement inférieure, l'efficacité énergétique pour l'électrolyse au méthanol peut être supérieure à celle pour l'électrolyse de l'eau. L'influence des conditions de fonctionnement de l'électrolyseur alcalin alimenté par une source renouvelable dans un système énergétique hybride (générateur photovoltaïque, éolienne et un groupe électrogène) sur les taux de production et leur niveau de pureté dans la région de l'Adrar a été étudiée [23]. Des méthodologies simplifiées pour évaluer la production d'hydrogène à partir de l'énergie éolienne ont été proposées, pour différentes régions telles que Ghardaïa[24] , Adrar, Tindouf et Hassi-R'Mel [25].

En Algérie, ce créneau d'avenir qu'est l'hydrogène renouvelable est au stade de la recherche. Conscient que l'hydrogène est au cœur de la transition énergétique, le CDER (centre de recherche et développement des énergies renouvelables) a engagé des projets de recherche, le stockage et la mobilité propre. L'avantage de l'hydrogène est aussi la possibilité de l'utiliser comme énergie transitoire en cas de déséquilibre entre l'offre et la demande pour les énergies renouvelables provenant du solaire et de l'éolien. L'Algérie se trouve actuellement devant un

besoin réel pour développer la filière hydrogène, non pas en termes de moyens financiers mais surtout en termes de compétences, de savoir-faire et de transfert technologique.

Ce que l'hydrogène représente pour l'Algérie :

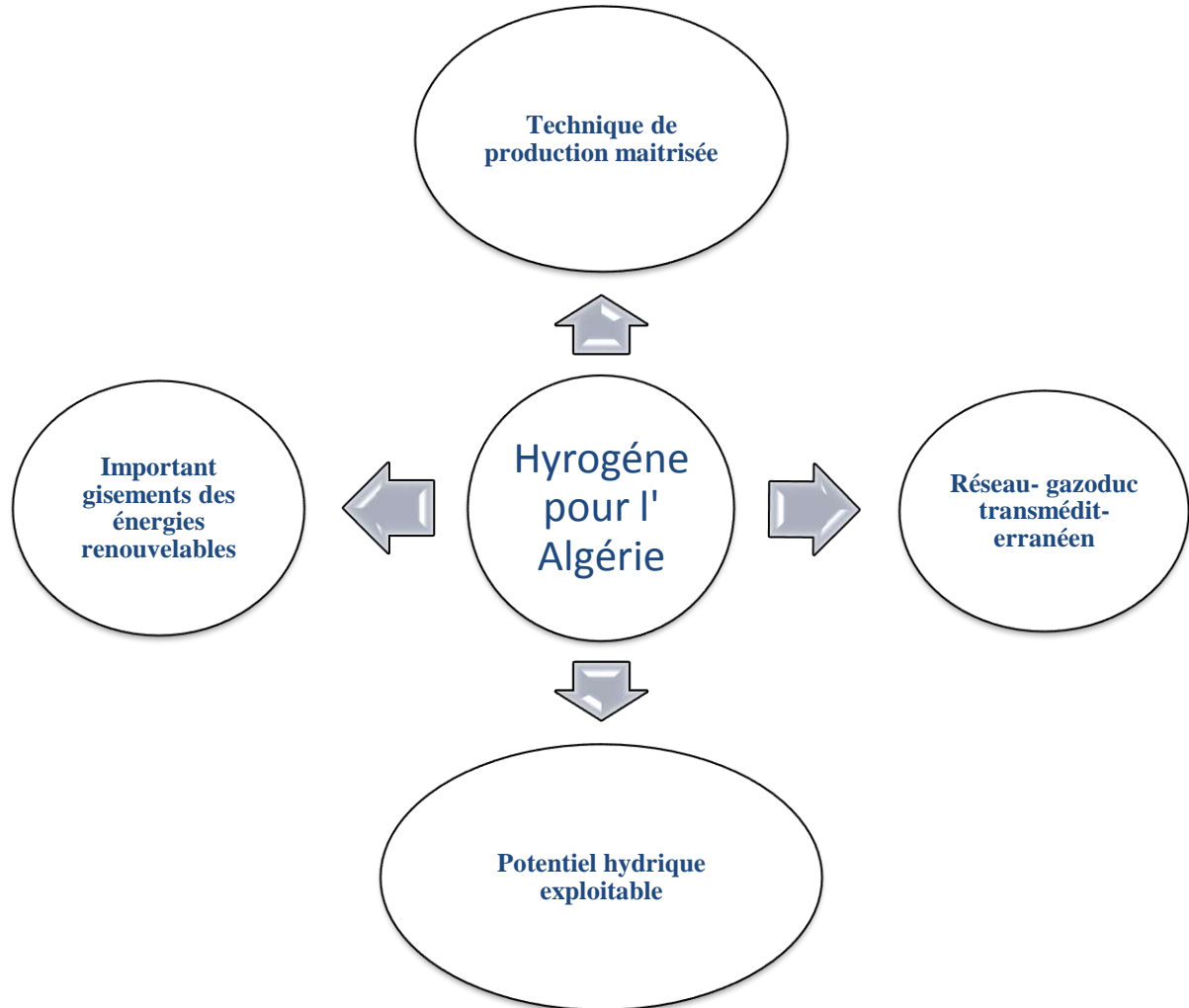


Figure II.1 L'hydrogène pour l'Algérie.

II.3 L'hydrogène le vecteur énergétique du futur

L'assemblage des deux mots hydro= eau, et *gène* = générateur, ce qui fait que l'hydrogène signifie **générateur d'eau**, c'est l'élément le plus abondant dans l'univers. L'hydrogène (H) est classé en première place du tableau de Mendeleïev. Il s'agit de l'atome le plus simple et le plus léger : il est constitué d'un noyau contenant un proton et d'un électron périphérique. La molécule H₂ de dihydrogène, constituée de deux atomes d'hydrogène [42]. Près de 96% de la production mondiale d'hydrogène est encore issue d'énergies fossiles. En utilisant une large variété de sources d'énergies renouvelables et différentes

technologies ;thermochimique, électrolytique. Il est susceptible d'être utilisé avec des dommages négligeables pour l'environnement suivant un cycle qui peut se répéter indéfiniment[26].

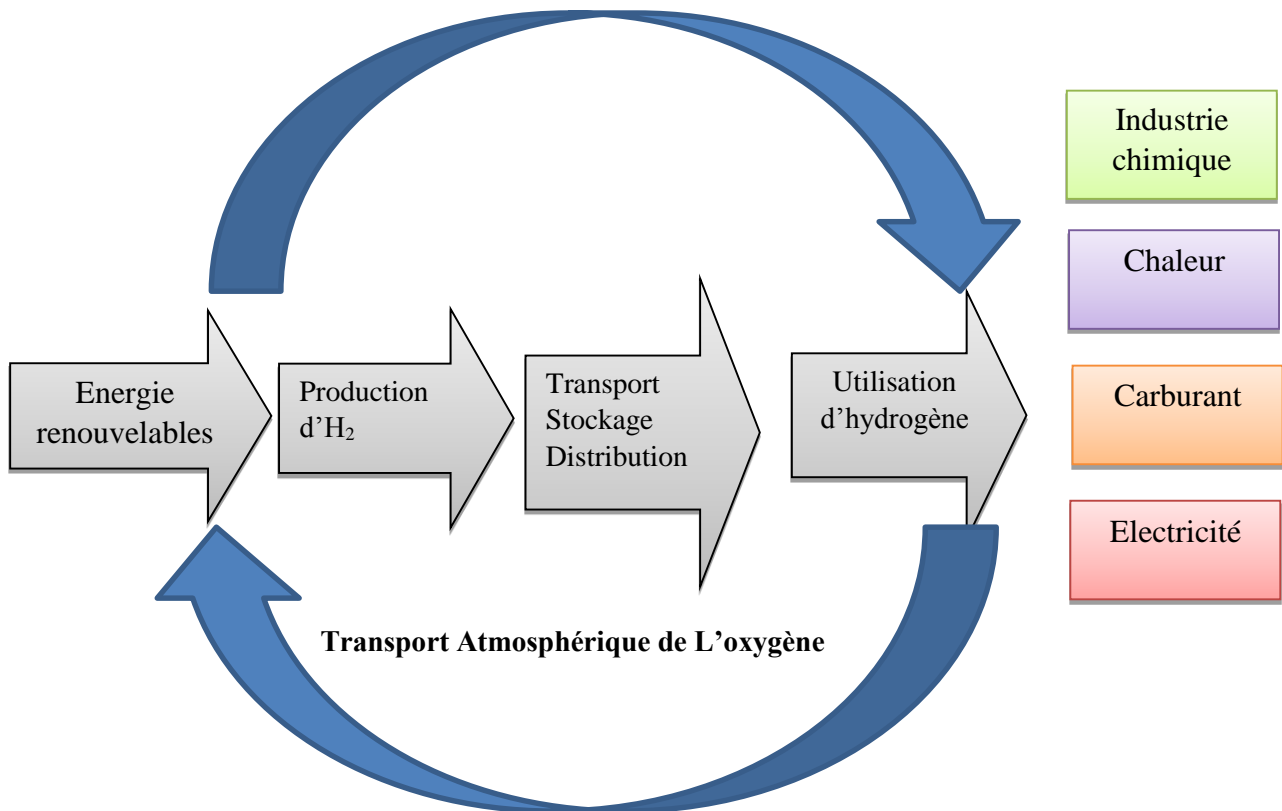


Figure II.9 Cycle d'hydrogène.

➤ Les propriétés de l'hydrogène

L'hydrogène est en effet un gaz non toxique et très énergétique, capable de produire de la chaleur et de faire fonctionner des moteurs par combustion directe (moteurs à combustion interne) avec de l'eau pure comme résidu. Il peut même produire directement de l'électricité dans les piles à combustible avec, là encore, comme seul résidu, l'eau. Mais l'hydrogène ne se trouve dans la nature qu'à l'état combiné, surtout au niveau de l'eau et des hydrocarbures, d'où nécessité de le produire, L'hydrogène n'est pas une énergie mais un vecteur d'énergie, comme c'est le cas de l'électricité [27]

Sur le tableau (II.2) nous allons voir les propriétés qui ont fait que ce nouveau vecteur est devenu de nos jours l'espoir d'un futur énergétiquement sain et propre.

L'hydrogène est :

Tableau II.2 Propriété d'hydrogène[28]

Propriété	Valeur numérique
PCI (Pouvoir calorifique inférieur)	
	119 930 kJ/kg
	33.33 kWh/kg
Densité gazeuse à 20,3K	1.34 kg/m ³
Densité gazeuse à 273K	0.08988 kg/Nm ³
Chaleur spécifique (Cp) 14 266 J/kg.K (293K)	
Chaleur spécifique (Cv) 10 300 J/kg.K	
Masse atomique	1.0079
Température de solidification	14.01K
Température d'ébullition (à 1013 mbar abs.)	20.268K

II.4 Production d'hydrogène

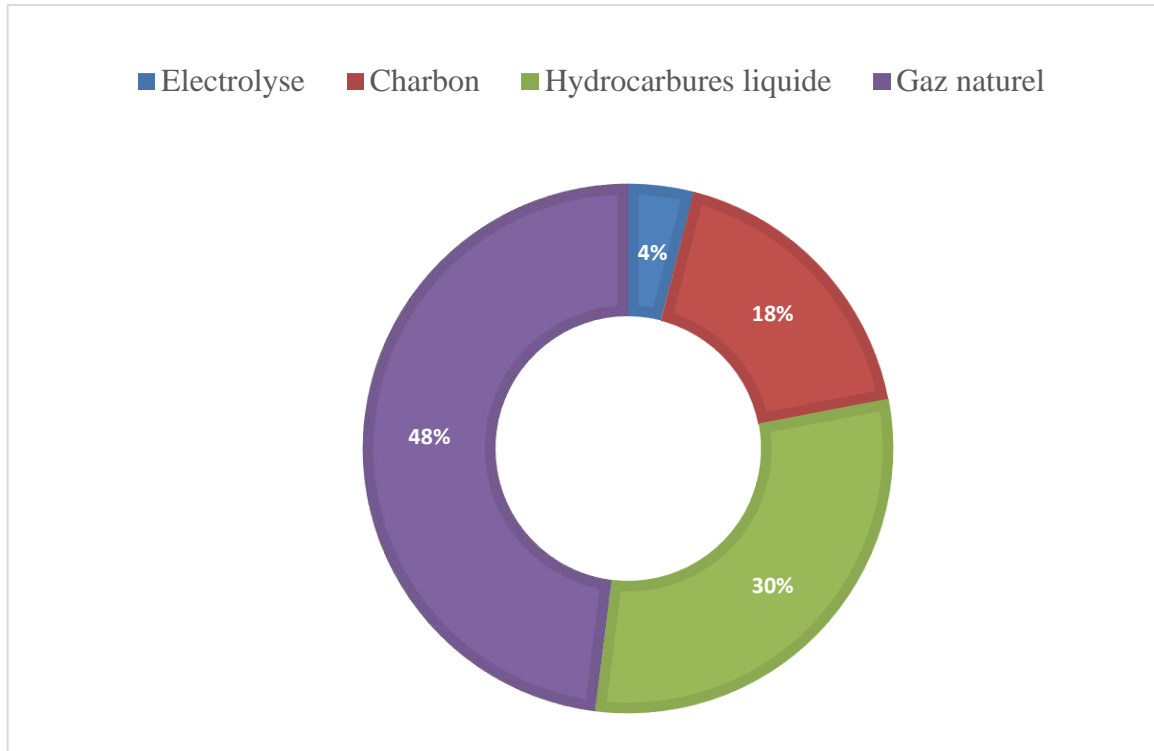
On peut avoir l'hydrogène juste par la séparation des éléments chimique puisqu'il n'existe pas à l'état naturel, ou bien il existe mais il n'est pas exploité industriellement dont l'atome H est un composant et par la mobilisation d'une source d'énergie, Il n'y a pas de mine d'hydrogène : celui-ci doit être fabriqué. Deux voies traditionnelles de production existent : une très large production à partir d'hydrocarbures (houille ;une roche carbonée sédimentaire correspondant à une qualité spécifique de charbon,, pétrole ou gaz naturel, voire biogaz) et d'eau, l'énergie étant fournie par les hydrocarbures, et l'électrolyse de l'eau, sous forme d'électricité.

De nos jours il existe plusieurs filières technologiques de production de l'hydrogène à partir de diverses sources. Certaines de ces techniques sont arrivées à maturité de production commerciale, d'autres sont encore à l'échelle expérimentale.

Chapitre II : vecteur énergétique du futur : l'hydrogène.

De nos jours, l'hydrogène est produit pour près de 96 % à partir d'énergie fossile, et le gaz naturel est la matière première la plus utilisée figure 1.3. Le reformage du gaz naturel à la vapeur d'eau constitue le procédé le plus économique[27].

FigureII.2 Principales origines de l'hydrogène [27].



II.4.1 Vaporeformage

En anglais : **Steam Méthane Reforming ou SMR** Si l'on part de méthane, celui-ci réagit à haute température (700-1100 °C) avec de l'eau en présence d'un catalyseur à base de nickel pour donner de l'hydrogène et du monoxyde de carbone (réaction consommant de l'énergie, 206 kJ/mole de méthane) qui lui-même au contact de l'eau produit du dioxyde de carbone et à nouveau de l'hydrogène [28].



II.4.2 Électrolyse

Ce mode de production consiste à décomposer les composants de la molécule d'eau en hydrogène et en oxygène par le passage d'un courant électrique entre deux électrodes

immergées dans un électrolyte aqueux. L'hydrogène produit par ce mode de production est plus pure que celui de la vaporeformage.

- a) **Électrolyse alcaline** : Une solution alcaline à base de potasse est utilisée. Cette technique est robuste, mature et éprouvée.
- b) **Électrolyse PEM** : L'électrolyte est une membrane à échange d'ions de type Nafion.
- c) **Électrolyse SOEC haute température** : Ce système présente l'intérêt d'être réversible et de pouvoir fonctionner soit comme électrolyseur, soit comme pile à combustible à oxyde solide (SOFC). Il est ainsi possible de fonctionner en mode électrolyseur lorsque la demande d'électricité est faible[28].

II.4.3 Procédé thermochimiques de gazéification

Ils produisent un mélange de gaze (monoxyde de carbone et hydrogène) dont nous pouvons extraire l'hydrogène [29].

II.4.4 Par photosynthèse

Grace à la lumière lors de la photosynthèse il est possible que différent micro-organisme produise de l'hydrogène naturellement c'est le cas de certaines Algue vertes unicellulaires ou de certaines cyanobactéries [29].

II.5 Stockage d'hydrogène

Le concept de stockage de l'hydrogène désigne toutes les formes de mise en réserve du dihydrogène en vue de sa mise à disposition ultérieure comme produit chimique ou vecteur énergétique. Plusieurs possibilités de stockage existent, chacun d'eux a ses propres avantages et des inconvénients.

Sous forme de gaz, le dihydrogène doit être fortement comprimé quant au dihydrogène liquide il nécessite une très basse température et au final pour l'hydrogène solide il nécessite d'être lié à d'autres composants, notamment sous la forme d'hydrure [29].

II.5.1 Stockage à haute pression sous forme gazeuse

La voie gazeuse est la plus simple et la plus répandue des technologies de stockage. De nos jours la plupart des constructeurs automobile ont opté pour le stockage de l'hydrogène sous forme gazeux à haute pression car ça permet de stocker la quantité nécessaire pour alimenter des piles à combustible pour les voitures qui peuvent parcourir jusqu'à 500 à 600 km [30].

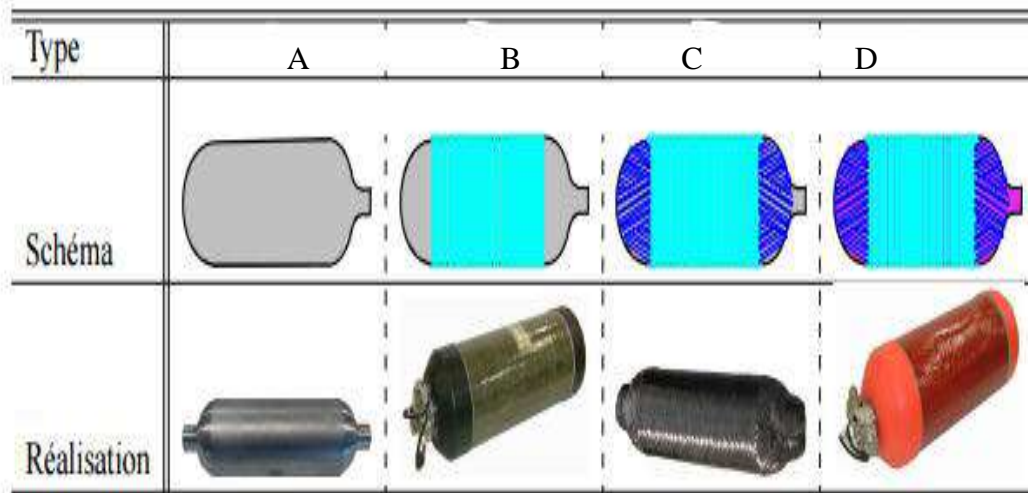


Figure II.10 Les différents types de réservoirs gazeux .

- A. Réservoir cylindrique en métal.
- B. Réservoir contenant une enveloppe de métal pour la tenue mécanique, frettée par des fibres continues imprégnées de résine.
- C. Réservoir constitué d'une enveloppe de métal pour contenir l'hydrogène et d'une enveloppe de fibres continues imprégnées de résine pour la tenue mécanique.
- D. Réservoir constitué d'une enveloppe non métallique pour contenir l'hydrogène et d'une enveloppe de fibres continues imprégnées de résine pour la tenue mécanique.

II.5.2 Stockage de l'hydrogène dans des hydrures

Ce type de stockage est très efficace mais aussi réalisable à basse pression et à température ambiante, c'est des métaux comme le nickel, des minéraux comme les charbons actifs ou le salpêtre sous forme d'azote pour faire l'ammoniac, et le titane aussi le magnésium ils peuvent absorber les atomes du dihydrogène gazeux et on les appelle Hydrures[30].

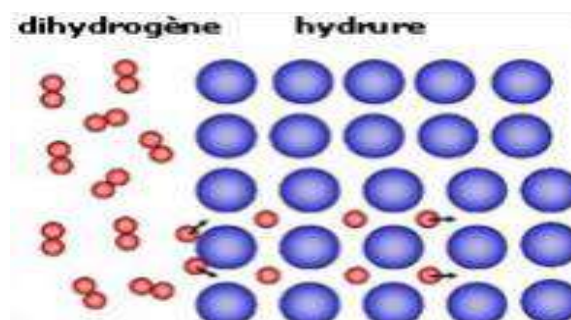


Figure II. 11 Principe du stockage de l'hydrogène dans les matériaux Hydrure.

II.5.3 Stockage de l'hydrogène à basse température sous forme liquide

C'est une technique qui permet de stocker un maximum d'hydrogène dans un volume restreint consiste à transformer de l'hydrogène gazeux en liquide en refroidissant à très basse température, il se liquéfie lorsqu'on le refroidit à température inférieure à **-252.87°C** [31].

II.6 transport et distribution

Comme dans chaque domaine commercial ou industrielle le transport et la distribution entre le centre de production aux consommateurs ou bien l'utilisateur est une étape très importante mais aussi avec le développement des techniques et du secteur de transports il y a plusieurs manières [32].

II.6.1 Transport par canalisation

Ce type de transport peut permettre de fournir de l'hydrogène via un réseau de distribution par pipe auquel sont connectés plusieurs consommateurs, et cela les deux formes de l'hydrogène liquide et gazeuse mais le système de canalisation d'hydrogène gazeuses implique un investissement plus faible que celui des systèmes de conduites d'hydrogène liquide [32].

II.6.2 Transport par ferroviaire

Les chemins de fer peuvent aussi être une option pour la distribution de l'hydrogène en effet c'est une très bonne option vue la capacité de transporter jusqu'à 9100Kg d'hydrogène, avec des taux d'évaporation de 0.2% par jour, C'est dommage que pour des raisons d'écart entre l'infrastructure ferroviaire et les stations-services et des coûts de transport très élevé lié au train, c'est peu probable qu'elle devienne une parmi les options les plus utilisées pour la distribution de l'hydrogène [33].

II.6.3 Transport maritime

Dans le cadre du programme de recherche World Energy Network, certains navires-citernes d'hydrogène à grande échelle ont été étudiés en détail pour que cette option de transport qui permet de transporter de l'hydrogène liquide ou gazeux par bateau doté d'installation citernes spéciale devienne plus réalisable économiquement avec de grande quantité transportée [32].

II.6.4 Transport routier

Comme dans plusieurs autres domaines le transport et la distribution de l'hydrogène se fait plus souvent par la méthode de transport routier autrement dit celle des camions, il peut être transporté sous forme gazeuse et il doit être comprimé à de très hautes pressions pour assurer

les capacités des réservoirs à l'aide de cylindre haute pression de remorque tubulaire, mais aussi sous forme liquide dans des récipients cryogéniques [33].

Le transport et la distribution d'hydrogène par un système de pipelines est à l'heure actuelle la solution la plus compétitive d'un point de vue économique pour les gros volumes. Des réseaux de pipelines transportant de l'hydrogène gazeux existent d'ores et déjà en Europe et en Amérique du Nord, et s'étendent respectivement sur 1500 et 420 km. La France compte quant à elle plusieurs réseaux qui totalisent 303 km. Ils acheminent de l'hydrogène gazeux depuis le lieu de production jusqu'aux différents sites [32].

II.7 Risques associée à l'hydrogène

Souvent présenté comme le vecteur énergétique du future grâce a son potentiel important et sa combustion non émettrice de gaz à effet de serre, le dihydrogène suscite l'espoir Mais aussi la crainte.

Depuis la catastrophe du Hindenburg, le 6 mai 1937, l'hydrogène est souvent synonyme de danger, Ce jour-là, le Zeppelin gonflé avec 200 000 m³ de H₂ s'embrase en moins d'une minute et cause la mort de 35 des 97 passagers qui, pris de panique, ont sauté de l'engin. Si l'origine de l'ignition reste inconnue, la combustion combinée de l'hydrogène et du revêtement de l'enveloppe (butyrate, oxydes de fer et d'aluminium) est en cause. Cela provoquera une telle peur de l'hydrogène, appelée syndromedu Hindenburg [32].

✚ Parmi les risques de stockage d'hydrogène :

Pour toutes ces technologies de stockage, une fuite d'hydrogène gazeux, avec des conséquences qui varient en fonction de la pression à laquelle l'hydrogène est stocké. Dans un milieu confiné et mal ventilé, une atmosphère dangereuse peut être générée ;

- pour le stockage d'hydrogène par compression, l'éclatement du réservoir et les effets associés (surpressions aériennes et projection de fragments).

- pour le stockage cryogénique, les risques associés aux basses températures.

- pour le stockage dans les solides, la mise en contact accidentelle des composés hydrures avec l'air, l'eau ou encore d'autres agents incompatibles peut induire des risques d'incendie violents. Les hautes températures, la toxicité des hydrures ou des catalyseurs utilisés sont aussi des risques à considérer.



Figure II.12 l'explosion du Zeppelin.

L'accidentologie de l'hydrogène met en évidence deux causes principales d'accidents liées au facteur organisationnel et humain : les interventions pour maintenance ou entretien et les défauts de maîtrise de procédé.

Parmi les accidents dont les causes sont liées à la maintenance, on trouve notamment des[33] :

- interventions par point chaud sans vérification préalable suffisante de l'absence d'atmosphère explosive.
- défauts ou mauvaises consignations des ouvrages en maintenance.
- lavages d'équipements sans analyse des risques suffisante.
- interventions mal menées (défaut de montage de joint ou de serrage de boulonnerie...) entraînant des fuites d'hydrogène.
- défaillances électriques ou d'automatismes faisant suite à des opérations de maintenance.

Les défauts de maîtrise de procédé concernent quant à eux plus particulièrement :

- les installations d'électrolyse.
- les emballements de réactions.
- les mauvaises gestions des déchets.

II.8 Applications

L'hydrogène produit aujourd'hui sert à plus de 80 % à la fabrication d'ammoniac, indispensable à l'industrie des engrais, et au raffinage des produits pétroliers, afin de désulfurer les carburants. Le reste est utilisé pour d'autres productions chimiques, pour la synthèse de matières plastiques, pour certains processus de l'industrie du verre et pour la fabrication de circuits imprimés électroniques[35].

Dans le monde, près de 60 millions de tonnes d'hydrogène sont produites par an. Son utilisation comme vecteur d'énergie – 1 % seulement – est aujourd'hui limitée au domaine spatial, pour la propulsion de satellites et de fusées. C'est le carburant qui concentre le plus d'énergie : 1 kg d'hydrogène contient 3 fois plus d'énergie qu'1 kg d'essence. Actuellement, l'association hydrogène liquide et oxygène liquide est toujours utilisée pour lancer la fusée européenne Ariane 5 [35].

Dans l'étage principal cryotechnique d'Ariane 5, la combustion de l'hydrogène produit une énorme quantité de vapeur d'eau qui est détendue à très grande vitesse à travers la tuyère du moteur Vulcain. C'est l'éjection de gaz à grande vitesse qui va propulser la fusée, selon le principe d'action réaction. L'hydrogène brûle au contact de l'oxygène, mais ce dernier n'est pas présent dans l'espace, c'est pourquoi Ariane 5 emporte dans son immense réservoir central 162 tonnes d'oxygène liquide à -183°C et 28 tonnes d'hydrogène liquide à $-252,87^{\circ}\text{C}$ [35].



Figure II. 13Fusée ariane 5.

Chapitre II : vecteur énergétique du futur : l'hydrogène.

Des centaines de véhicules alimentés à l'hydrogène sont sur les routes du monde entier, et au moins trois fabricants - BMW, Honda et General Motors - sont en train de sortir leurs premiers modèles. Certains fabricants confient des automobiles à hydrogène à des consommateurs pour de longs essais de conduite. Ces voitures sont équipées de moteurs à hydrogène ou de piles à combustible. Aux États-Unis, la National Hydrogène Learning Démonstration du ministère de l'énergie, qui dispose de 70 voitures alimentées à l'hydrogène, est un partenariat entre le secteur privé et le gouvernement créé afin de tester et de démontrer la validité des véhicules à hydrogène [35].

De nombreux pays ont des programmes intensifs dans ce domaine, notamment les États-Unis, le Canada et divers pays d'Asie et d'Europe.



Figure II.14 La première station à hydrogène.

Un cas spécial des moteurs thermique adapté à l'hydrogène est la turbine à gaz utilisée en aéronautique ; La compagnie pétrolière BP et le groupe Edison International viennent d'annoncer leur alliance pour la construction d'une centrale électrique de 500 MW utilisant des turbines à hydrogène. La nouvelle installation, représentant un investissement d'un milliard de dollars, sera implantée à proximité de la raffinerie BP de Carson, au sud de Los Angeles. Le projet devrait être finalisé en 2008, pour un couplage au réseau en 2011 [36].

II.8 Conclusion

Basée sur tous les propos présentés précédemment on terminera ce chapitre en tentant d'apporter les informations que l'on a citées dans cette introduction les différentes applications de l'hydrogène, les méthodes de transport et de distributions, les types de stockage d'hydrogène en tenant en compte l'état d'hydrogène gazeux ou liquide. On a vu aussi les différentes manières de production de dihydrogène sa définition Mais aussi l'état de l'art de l'hydrogène sur l'échelle mondiale et en Algérie.

CHAPITRE III :

Estimation du potentiel de
production d'hydrogène en
Algérie.

III-1 Introduction

De nos jours et avec les risques d'épuisement des ressources d'énergie fossiles, et la croissance continue de la demande en énergie, c'est devenu une nécessité de s'engager vers un modèle basé sur l'économie de l'hydrogène. L'intégration d'un tel modèle énergétique doit se baser sur une étude du potentiel qui va nous permettre d'avoir une estimation approximative du potentiel net et technique.

Cette partie de notre étude consiste à l'application d'une combinaison entre une modélisation mathématiques et un programme géographique, en utilisant les données météorologiques collectées, sur les 48 sites présents en Algérie par Wilayas. en premier lieu, ce chapitre prendra en considération la présentation du territoire Algérien, avec coordonnées géographiques, ensuite nous allons décrire notre Système AéroH₂ voire la chaîne étudiée, pour en pouvoir donner une approche de donnée munie d'un organigramme explicatif de la combinaison d'un système géographique et un langage informatique, pour enfin pouvoir conclure l'estimation du potentiel net dans chaque site.

Nous allons entamer cette seconde partie avec des généralités sur le programme utilisé SIG (système d'informatique géographique) ses fonctions et outils que nous avons adapté dans cette partie, et juste avant d'entamer la représentation des cartes thématiques de vent et potentiel d'hydrogène net sur, un organigramme explicatif de la méthodologie de L'ArcGIS est mis en place afin d'expliquer la réalisation de la dernière étape qui va nous permettre d'obtenir le potentiel technique d'H₂ et spécifier les zones favorables pour l'installation de notre système AéroH₂.

III-2 Description de la zone d'étude

L'Algérie est un pays nord-africain doté d'un littoral sur la mer méditerranée et d'un intérieur désertique, le Sahara. En 2018 la population algérienne est estimée à 42,2 millions d'habitants, avec une surface de 2 381 741 km², c'est à la fois le plus grand pays d'Afrique, du monde Arabe et du bassin méditerranéen, il partage au total plus de 6 385 Km de frontières terrestres avec la Tunisie au nord-est et la Libye à l'est, le Niger au sud-est, la Mali au sud-ouest, la Mauritanie et le Sahara occidental à l'ouest, et enfin le Maroc au nord-ouest[36].

La partie Saharienne représente 80% de la superficie de l'Algérie (environ deux millions de kilomètres carrés) ; le centre de climatologie de l'Algérie est sous responsabilité de l'Office

Chapitre III : Estimation du potentiel de production d'hydrogène en Algérie.

national de métrologie, un climat désertique règne sur le sud, le Sahara est une région très ventée et aride, autant dans le nord que dans le sud, les forces éoliennes ne dépassent pas les 120 Km/h. dans le sud, elles se déplacent chaque année entre soixante et deux cents millions de tonnes de poussières, le vent soulève plus de vingt millions de tonne sable, en été le Sirocco est un vent très sec et très chaud qui se dirige du sud vers le nord[36].

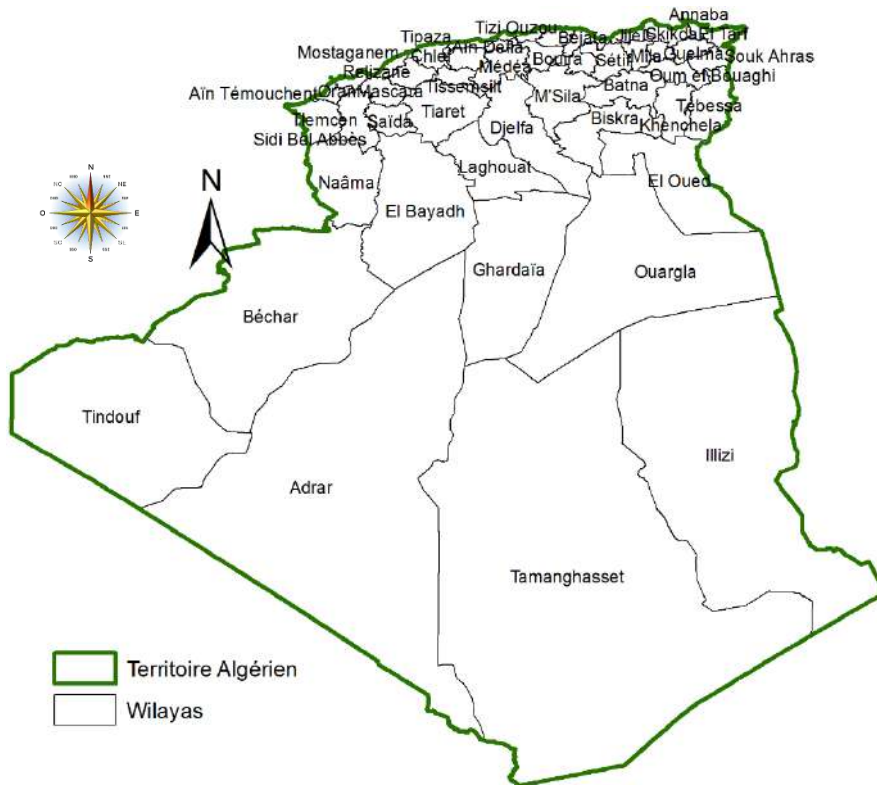


Figure I.15 Zone d'étude.

III-3 Système de production d'hydrogène AeroH₂

Dans cette étude, nous proposons l'étude d'un système de production d'hydrogène, l'alimentation en électricité de ce système consiste en une énergie renouvelable et propre qui est l'énergie du vent. D'abord, la force du vent fait tourner le rotor de l'éolienne, ce qui actionne un générateur placé à proximité. Lorsque le vent est suffisamment fort, le générateur se met à produire de l'électricité qui est ensuite injectée dans un électrolyseur polymère (Électrolyseur à membrane (PEM)) Avec de l'eau liquide, pour que l'on récupère en sortie de l'hydrogène et de l'oxygène gazeux ; c'est-à-dire qu'on transforme un composé chimique (l'eau) en d'autres composés chimiques (H₂ et O₂), avec de l'électricité.

Le Principe de fonctionnement du système de production d'hydrogène à partir de l'énergie éolienne est présenté sur la (figure III.2)

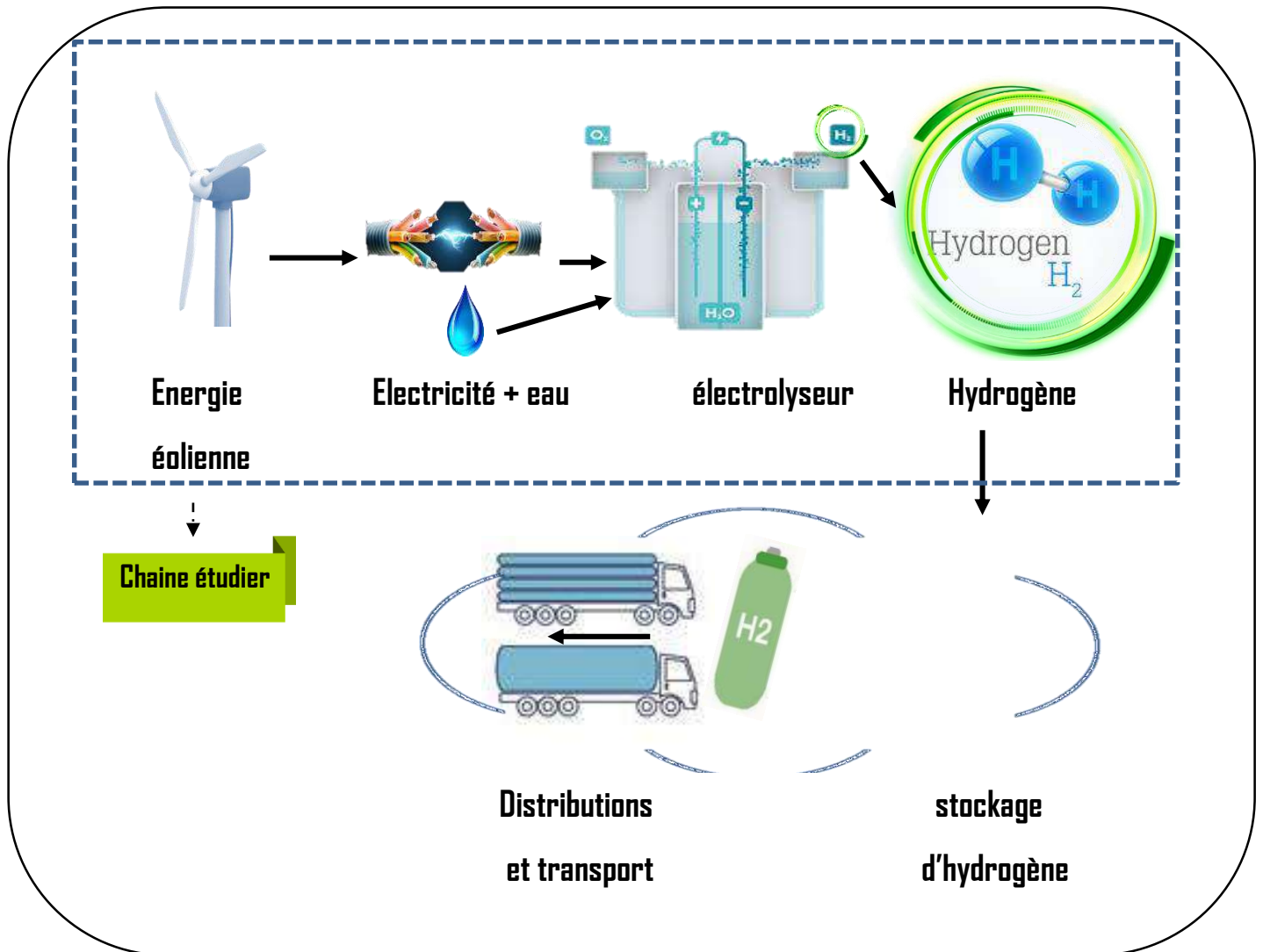


Figure III.2 système de production d'Hydrogène.

III-4 Méthodologie et outils

Pour l'estimation de la production d'hydrogène par énergie du vent nous avons devisé cette étude en deux parties. L'estimation du potentiel d'hydrogène net tout en introduisant une modélisation mathématique dans un programme Fortran, 2ème partie nous passons à l'estimation du potentiel technique de l'hydrogène en utilisant un système d'information géographique (ArcGis version 10.2) avec sa capacité d'analyse spatiale, nous permettrons de présenter nos résultats sur des cartographies géo-numérisées des données climatiques, et des différents potentiels. Cependant, le cheminement de la méthodologie appliquée dans cette étude est illustrée dans l'organigramme figure (III.3).

Notre démarche relative à l'utilisation de l'énergie du vent pour la production d'hydrogène se déroule comme suit :

- ✓ **Etape1** : Choix de l'aérogénérateur et d'électrolyseur.

Chapitre III : Estimation du potentiel de production d'hydrogène en Algérie.

- ✓ **Etape 2:** Entrée de données des paramètres de weibull sur le code FORTRAN.
- ✓ **Etape 3:** Evaluation du potentiel d'énergie électrique.
- ✓ **Etape 4:** Estimation des quantités d'hydrogène.
- ✓ **Etapes 5 :** Choix de critères contradictoires.
- ✓ **Etapes 7 :** Importations des données sur l'ArcGis.
- ✓ **Etape 6 :** Superposition des cartes thématique de critères.
- ✓ **Etapes 7 :** représentation et Estimation du potentiel d'hydrogène net et technique.
- ✓ **Etape 8 :** Spécification des zones favorables.

Comme le montre l'organigramme (FigIII.3), les données (caractéristiques) de la vitesse du vent journalières à 10m. Étant donné que les mesures de la vitesse du vent sont effectuées à 10m et que la hauteur du moyeu des éoliennes proposées est de 10m, il est nécessaire d'extrapoler correctement la vitesse du vent.

Comme la vitesse du vent ne suffit pas à décrire l'énergie potentielle du site, un autre paramètre important déterminant le rendement d'un parc éolien est introduit qui est la distribution de la vitesse du vent. Cette distribution décrit la durée sur un site particulier pendant laquelle la vitesse du vent se situe entre différents niveaux [4]. Ainsi, nous pouvons obtenir la puissance électrique générée des aérogénérateurs, ce qui nous permet de déduire la quantité d'hydrogène net dans chaque site.

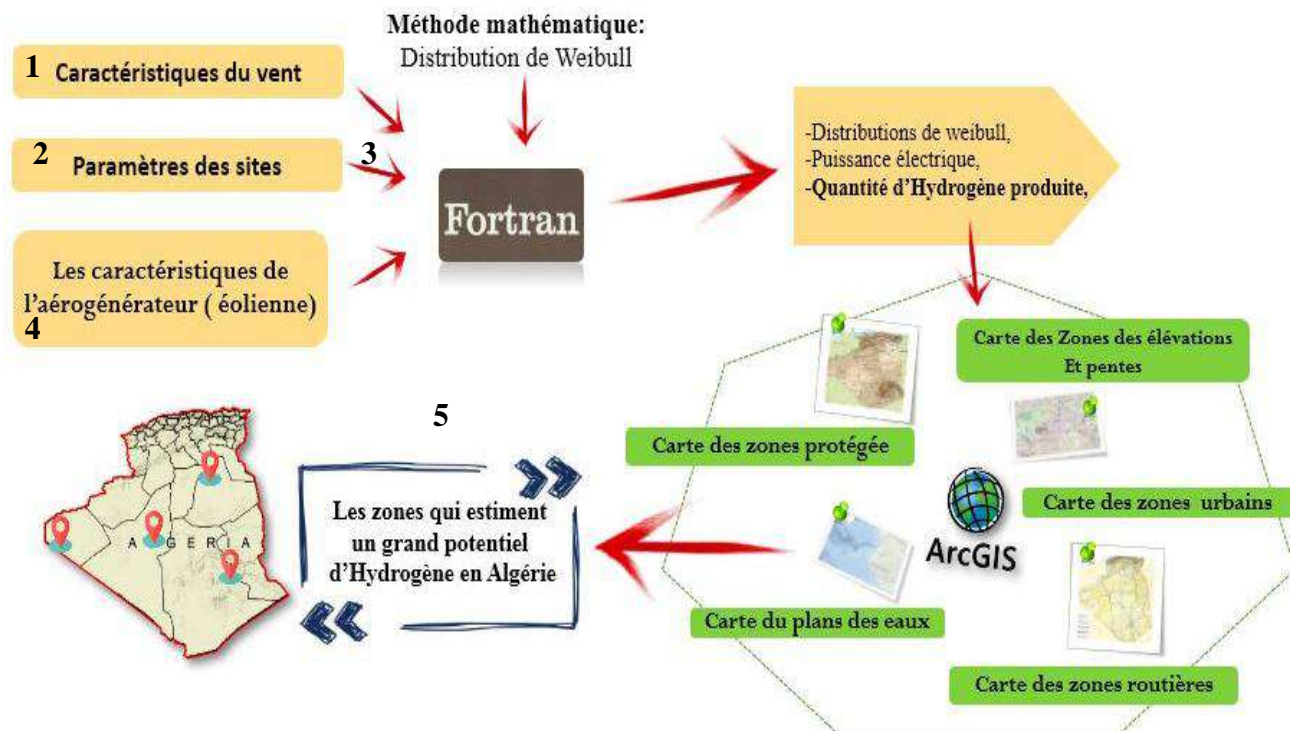


Figure III.3 Organigramme-méthodologie de la combinaison des deux systèmes d'approche.

III-5 Estimation du potentiel Théorique

Le Potentiel Net : est le contenu énergétique total d'hydrogène (Tonne/an.km²) [37].

En utilisant le code FORTRAN90, nous avons programmé toutes les étapes de la modélisation mathématique de Weibull qui nous permettent de calculer la vitesse moyenne du vent, d'obtenir la puissance électrique produite pour en fin, pouvoir conclure la quantité net d'hydrogène produite dans chaque station de mesure.

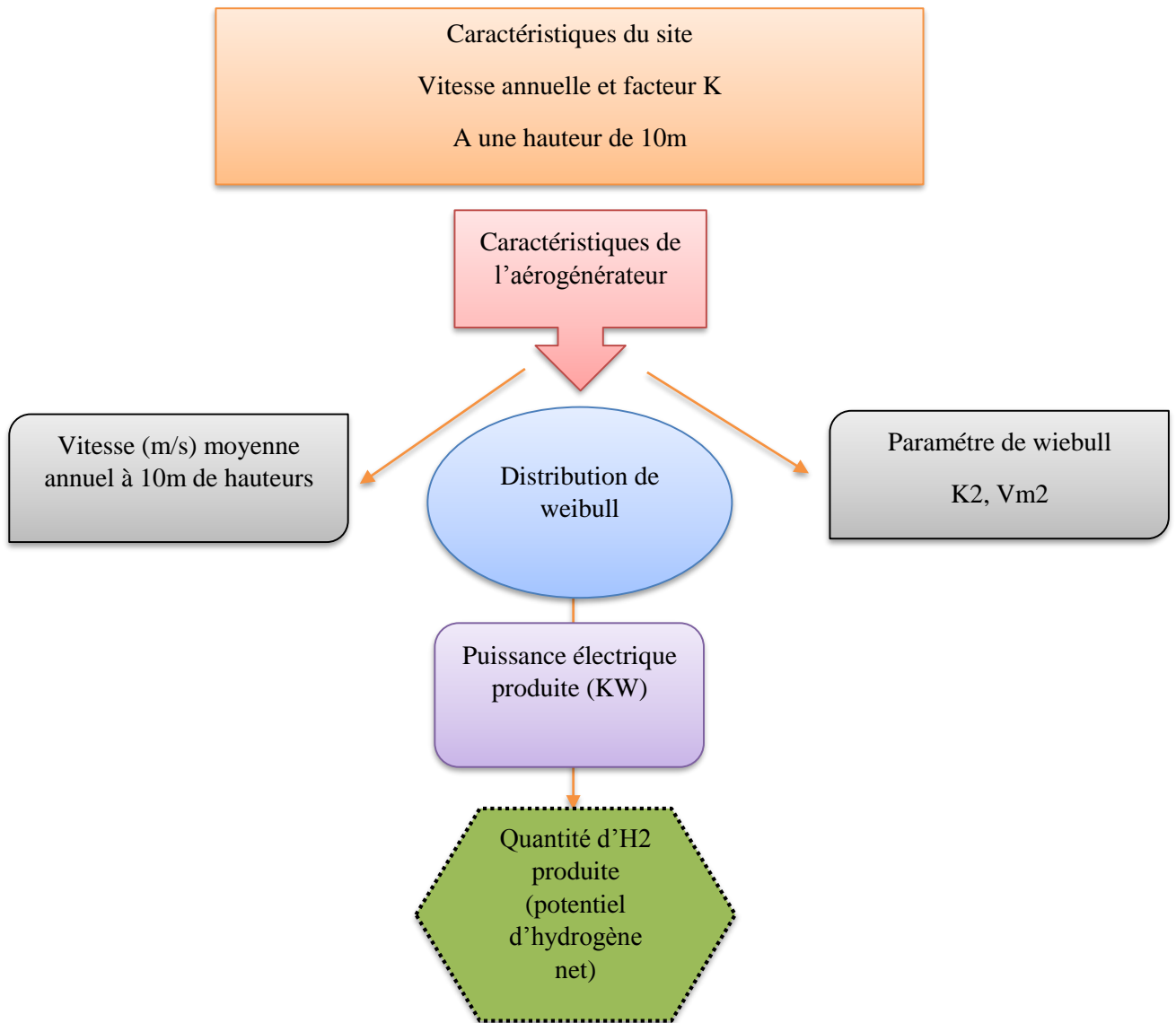


Figure III.4 Organigramme-méthodologique de l'obtention du potentiel net d'H2.

III-5-1 modélisation mathématique de la vitesse du vent (Weibull) et production d'énergie électrique

Potentiel éolien

Toute étude sur le potentiel éolien d'un site ou plusieurs se calcule à partir des distributions de la vitesse moyenne annuelle. Lorsqu'on dispose les mesures du vent, on peut illustrer la variation de la fréquence relative des vitesses de vent.

La modélisation de la distribution de la vitesse du vent se fait à partir de plusieurs modèles présents dans la littérature, qui sont utilisées pour ajuster les distributions de la vitesse du vent sur une période de temps. Le modèle le plus utilisé pour caractériser la distribution des vitesses du vent est la distribution de probabilité de Weibull. Les avantages de l'utilisation de la fonction de Weibull à deux paramètres ont été mis en évidence par Justus et al. Comme c'est difficile de manipuler l'ensemble des données relatives à une distribution de la fréquence du vent, il est plus convenable de les considérer théoriquement, d'une manière à modéliser l'histogramme des fréquences des vitesses du vent par une fonction mathématique continue. On peut donc opter pour le modèle de Weibull. En effet, pour des périodes allant de quelques semaines jusqu'à une année, la fonction de Weibull représente raisonnablement les vitesses observées. Il s'agit d'une fonction de densité et de probabilité, s'exprimant sous la forme [4]:

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

Avec :

$f(v)$: est la densité de probabilité de la vitesse V .

K : le facteur de forme de la courbe (sans dimension).

C : le facteur d'échelle de la courbe en m/s.

La vitesse moyenne du vent $m V$ peut être calculée en fonction des paramètres de Weibull comme suit :

$$v_m = \int_0^{\infty} v f(v) dv \quad (\text{III-2})$$

Chapitre III : Estimation du potentiel de production d'hydrogène en Algérie.

Avec le remplacement de $f(v)$ par sa formule, $x(\frac{v}{A})^k$ et dv dans l'équation obtenu après avoir fait l'arrangement on obtient :

$$v_m = A \int_0^{\infty} e^{-x} x^{1/k} dx \quad (\text{III-3})$$

Et sachant que l'on peut noter Gamma (Γn) comme $\int_0^{\infty} e^{-x} x^{n-1} dx$ et en posant :

$$n = \frac{1}{k} + 1 \quad (\text{III-4})$$

La vitesse moyenne du vent peut s'écrire sous la forme suivante (m/s) :

$$v_m = A \cdot \Gamma \left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (\text{III-5})$$

Facteur de puissance électrique annuelle :

$$F_c = \left(\frac{e^{-\left(\frac{vd}{c}\right)^k} - e^{-\left(\frac{vn}{c}\right)^k}}{-\left(\frac{vn}{c}\right)^k - \left(\frac{vd}{c}\right)^k} \right) - e^{-\left(\frac{vn}{c}\right)^k} \quad (\text{III-6})$$

L'énergie électrique produite en (kWh/an)

$$W = P_n \times F_c \times T_t \quad (\text{III-7})$$

P_n : puissance nominal (kW).

F_c : Facteur de puissance électrique annuelle.

T_t : le temps.

Par conséquent, la production annuelle d'hydrogène d'une telle turbine est donnée par [41] :

$$Q(H_2) = \eta_{elec} \times W / HHV(H_2) \quad (\text{III-8})$$

HHV : (Higher Heating value) Pouvoir calorifique supérieure de la combustion d'hydrogène qui est égale à : 39.4 [kWh/kg].

η : Le rendement de l'électrolyseur $\eta = 0.75$.

$Q(H_2)$: quantité d'hydrogène produite [tonne/km²/an]

Chapitre III : Estimation du potentiel de production d'hydrogène en Algérie.

Les données (caractéristiques) de la vitesse du vent journalières à 10m de hauteur sont tout d'abord collectées à partir des stations de mesures météorologiques, Ces informations ont été recueillies selon l'étude de Mr.Boudia[4].

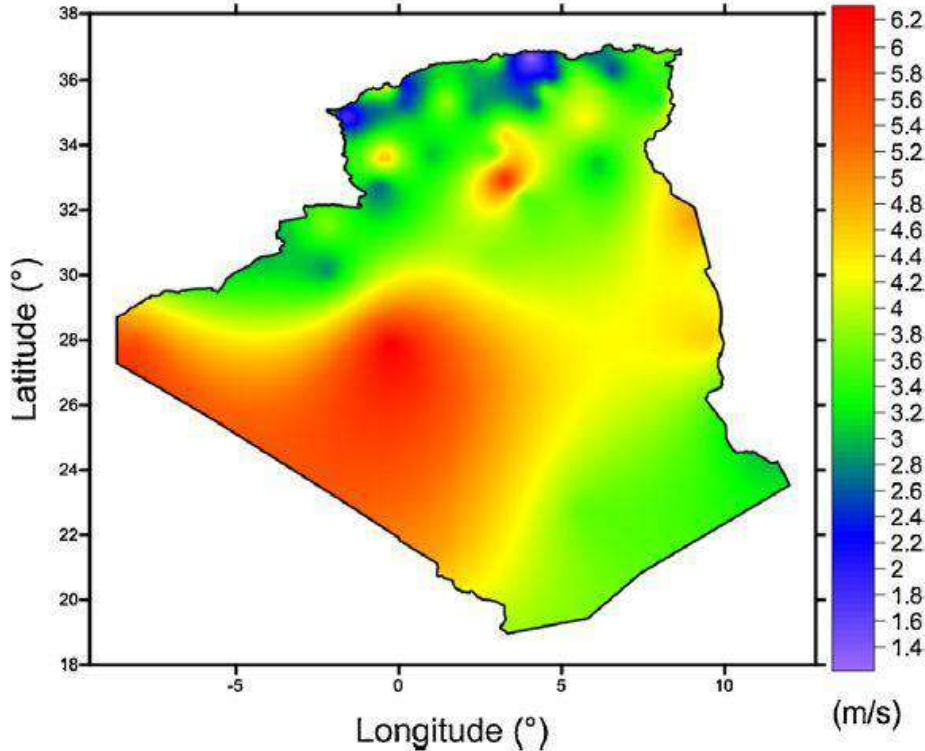


Figure III.5 La distribution de la vitesse moyenne annuelle (m/s) du vent en Algérie à 10m de hauteur [38].

III-5-2 Modélisation de la production d'hydrogène

Parmi les technologies développées des électrolyseurs nous avons choisi pour notre étude le type PEM. Le principe de fonctionnement d'un électrolyseur PEM (Proton Exchange Membrane) est fondé sur le même concept qu'une pile à combustible PEM. La principale caractéristique de l'électrolyseur PEM est son électrolyte solide, constitué d'une membrane polymère. Il assure ainsi la conduction des ions hydronium (H_3O^+) produits à l'anode et permet la séparation des gaz produits (H_2 et O_2) [56], selon les réactions ci-dessous : Par conséquent, l'énergie transférée à l'électrolyseur est définie comme suit [21] :

$$E_{el} = \eta_{el} \eta_p E_{source} \quad (III-9)$$

E_{el} : Energie absorbée par l'électrolyseur (kWh)

η_{el} : Rendement d'électrolyseur (%)

Chapitre III : Estimation du potentiel de production d'hydrogène en Algérie.

η_p : Rendement supplémentaire inclus pour tenir compte les pertes d'énergie dans l'électrolyseur (%).

E_{source} : Energie électrique délivrée par la source renouvelable (kWh)

Le principe de l'électrolyse PEM est décrit schématiquement par la figure (III.6)

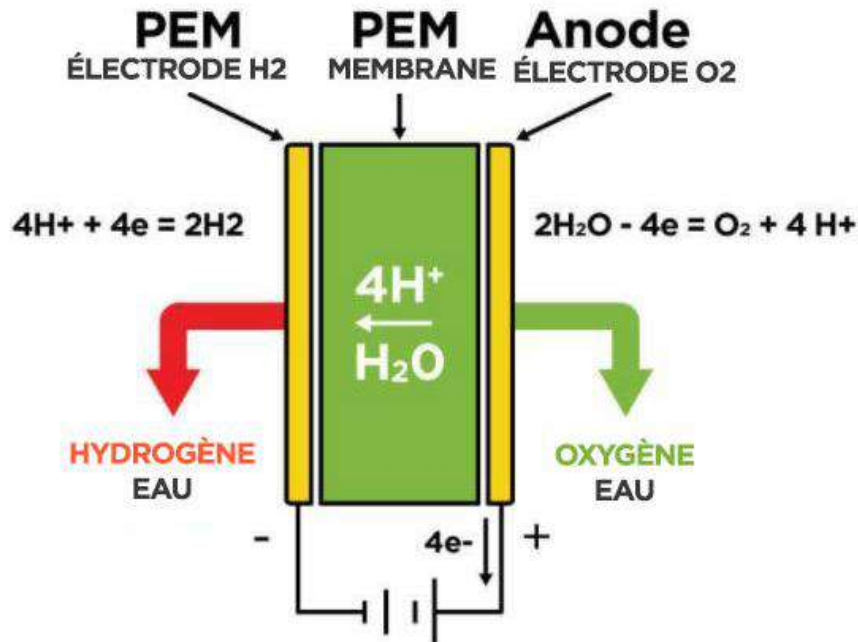


Figure III.6 L'électrolyse PEM.

Pour avoir un bon rendement et une très bonne estimation de production d'électricité, nous avons utilisé un aérogénérateur d'une puissance nominale de 2000kW normalisés, de 10m de hauteur avec un rayon égal à 10m. Les caractéristiques sont regroupées dans le tableau suivant :

Tableau III.5 Caractéristique de l'aérogénérateur [7].

Modèle	AéroH ₂
Puissance nominale (kW)	2000
Diamètre du rotor (m)	80
Surface de la voilure (m ²)	5027
Vitesse de démarrage (m/s)	3
Vitesse nominale (m/s)	13.5
Vitesse d'arrêt (m/s)	25

Chapitre III : Estimation du potentiel de production d'hydrogène en Algérie.

Pour la distribution de la vitesse du vent et le potentiel du H₂ obtenu à 10m, nous avons choisi 48 points comme station de mesure autant qu'un repère de chaque wilaya en Algérie. La carte des points ciblés est représentée sur la figure (Figure III.7).

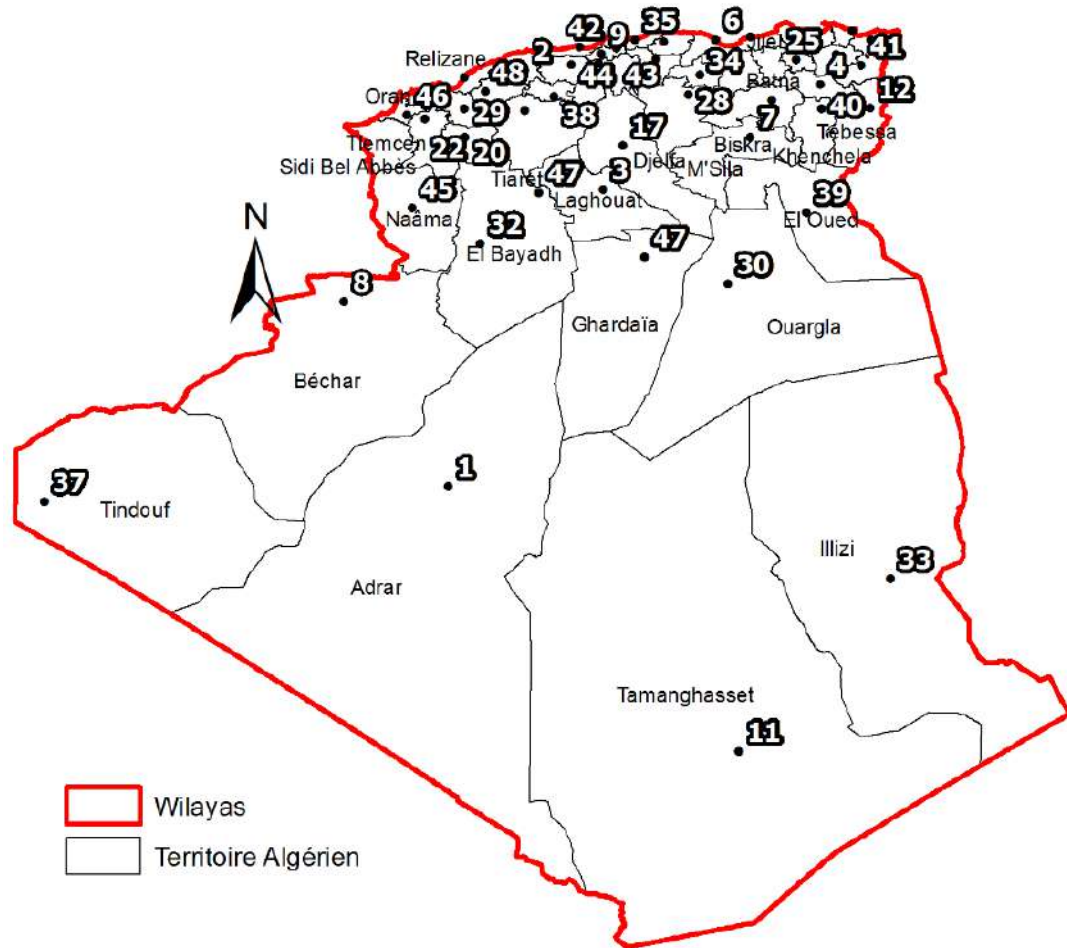


Figure III.16 Station de mesure.

A l'aide d'un code de calcul Fortran, nous avons pu obtenir les résultats qui sont illustrés sur le (Tableau.2, Annexe A). Puis, pour passer à la 2^{ème} étape et estimer le potentiel technique, nous avons insérée valeurs des quantités d'hydrogène dans chaque wilaya sur le système géographique SIG, sous forme de tableau. En utilisant la méthode d'interpolation (IDW) dans l'ArcGis (Annexe B) qui est nécessaire pour effectuer une étape de validation des points représentés sur la (Figure III.7), cela nous permettras de faire la représentation des vitesses moyennes annuelles et du potentiel net d'hydrogène sur les figures (Figure III.8) et (Figure III.9) respectivement.

Chapitre III : Estimation du potentiel de production d'hydrogène en Algérie.

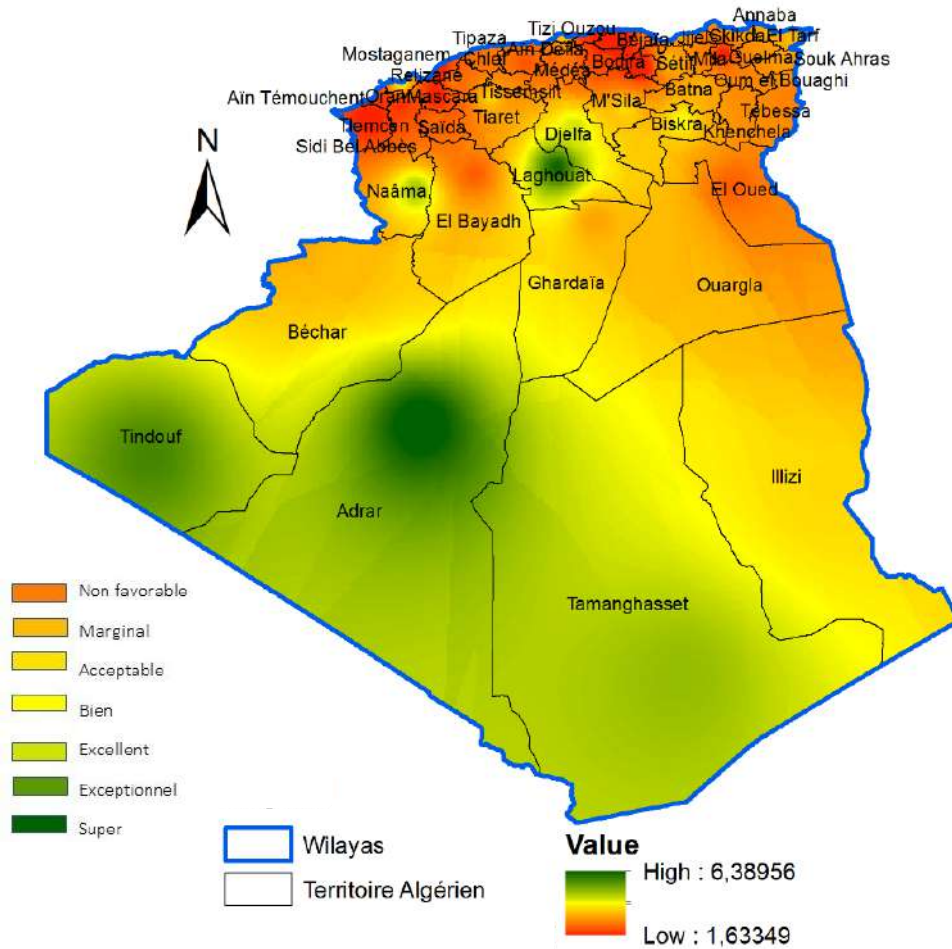


Figure III.8 Vitesse moyenne annuel (potentiel du vent) en 48 stations (calculs de l'auteur).

Tableau III. 6 Définition des classes des vitesse moyenne annuel (calculs de l'auteur).

Ressource potentiel	Non favorable	Marginal	Acceptable	Bien	Excellent	Exceptionnel	Favorable
Classe	1	2	3	4	5	6	7
Vitesse vent (m/s)	1.63-3.08	3.08-3.61	3.61-4.07	4.04-4.58	4.58-5.08	5.08-5.58	5.58-6.38

Comme on remarque sur la (Figure III-9) et du (tableau III-6), le potentiel éolien est relativement modéré, les vitesses du vent varient entre 1.6 et 6 m/s. Ce potentiel énergétique est idéal par exemple pour pomper l'eau, par contre, son efficacité reste limitée et restreintes pour les grands projets commerciaux. Les sites prometteurs sont situés au sud de l'Algérie, les régions principaux sont Adrar, Hassi R'mel et la région de Tindouf. Pour les régions qui disposent d'un potentiel moins prometteur sont les régions principalement situées au nord de l'Algérie, pareil pour Tizi-Ouzou, Annaba et Mostaganem.

la figure suivante (Figure III.9) représente la carte du potentiel d'hydrogène net.

Chapitre III : Estimation du potentiel de production d'hydrogène en Algérie.

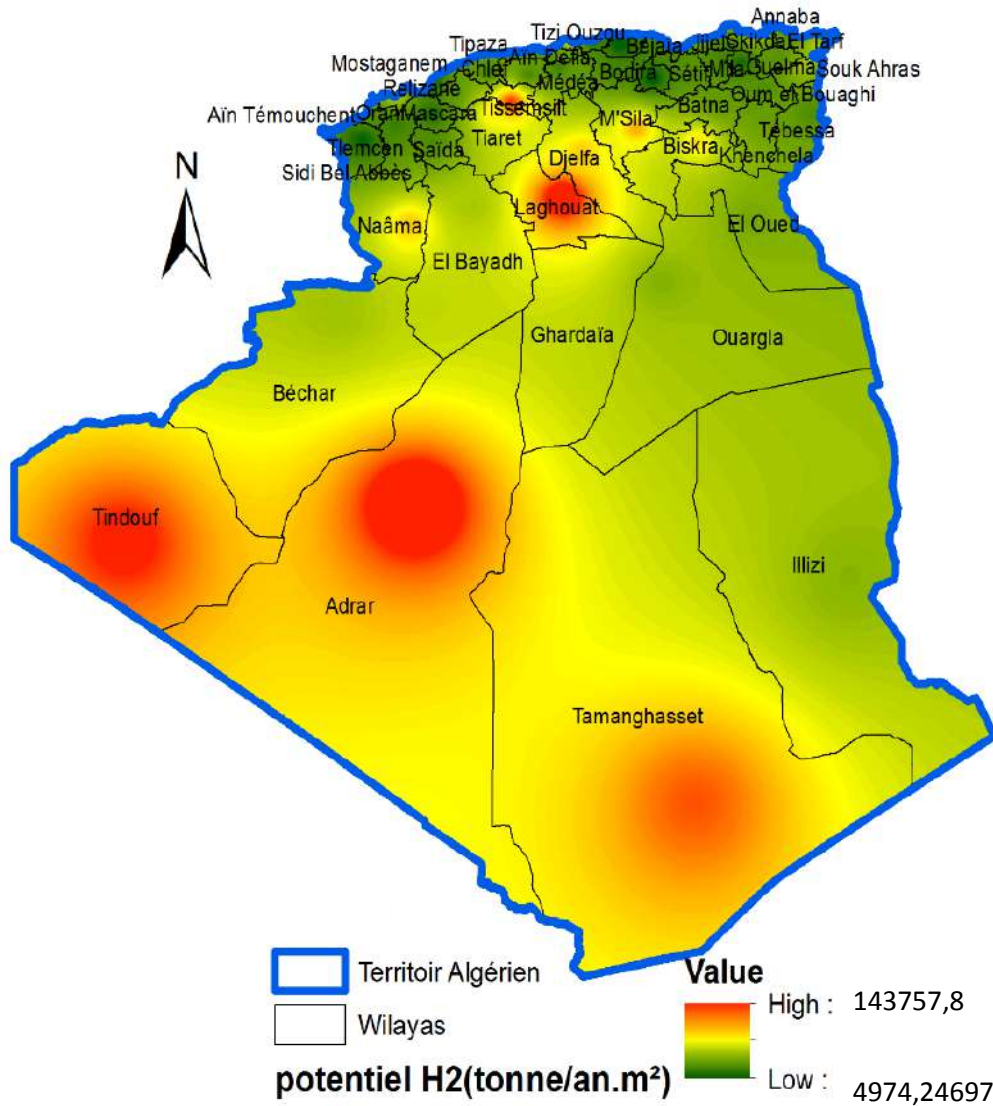


Figure III.9 Potentiel d'hydrogène net.

A partir de la (Figure III-9), nous pouvons voir que les régions d'Adrar, Hassi R'mel et Tindouf sont mises en évidence, avec une production supérieure, dont la valeur maximale est donnée au sud sur le site d'Adrar avec 0.14 (Tonnes/m²/an), 0.13 (Tonnes/m²/an) et 0.095(Tonnes/m²/an) respectivement, De l'autre côté, avec un potentiel annuel qui varie entre 0.040 à 0.27 et Tonnes/m²/an , nous trouvons les régions, Oran, Souk-Ahras, Tindouf, Tiaret, Biskra, Djelfa, Naama, et Tizi-Ouzou, Tlemcen et Mostaganem, ces régions dégagent les quantités les plus faible en masse d'hydrogène.

Nous avons envisagé aussi d'étudier le potentiel technique de l'hydrogène en tenant compte de plusieurs critères à l'échelle nationale, en utilisant une analyse détaillée des données spatiales basées sur un système d'information géographique (SIG).

III-6 L'estimation du potentiel technique

Le Potentiel technique est le contenu énergétique d'hydrogène dans une superficie totale des terres disponibles pour l'installation d'éoliennes en tenant compte des critères géographiques [38].

Dans cette partie nous utilisons le système informatique géographique (SIG) (Annex B), afin de modifier et traiter les zones à étudier pour pouvoir représenter les résultats en carte thématique. la méthode et les étapes Appliquées sur le logiciel ArcGIS sont présentées sur un organigramme explicatif (Fig. III.10).

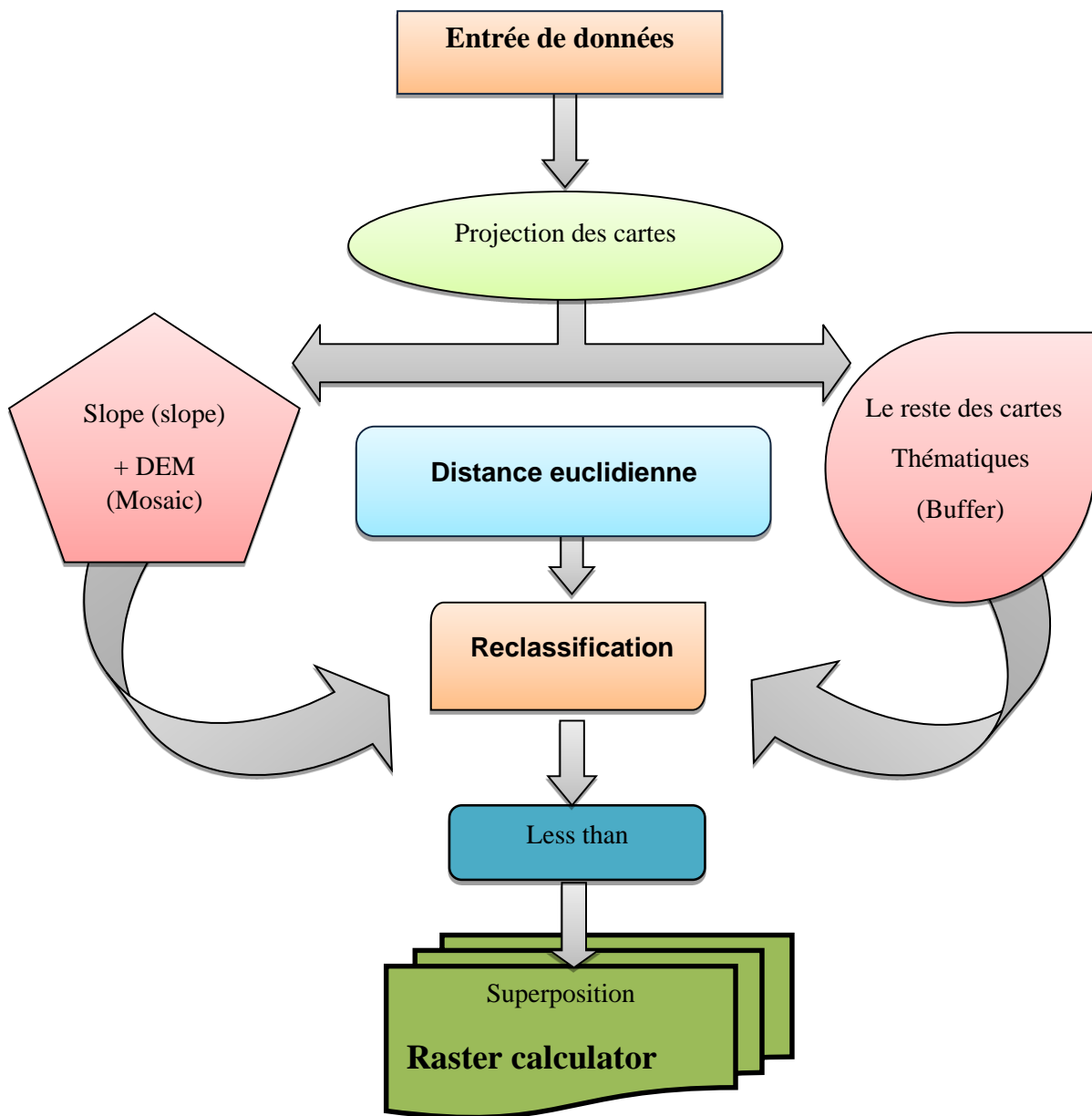


Figure III.17 Organigramme-méthodologique du potentiel technique sur ArcGIS.

III 6-1 Cartes thématique de critères

Concernant l'évaluation des emplacements appropriés pour notre système de production d'hydrogène AeroH₂, le SIG peut contribuer en tant qu'outil d'aide à la décision pour identifier des sites économiquement fiables et réalisables sur le plan environnemental [39], en utilisant une grande quantité de données spatiales liées à divers problèmes techniques, économiques, également, des critères sociaux et environnementaux. Pour faire face à ces critères contradictoires, ces cartes de critères ont été emportées d'une base de données géographique gratuite OpenStreetMap.

Les figures ci-dessous représentent des cartes thématique de critère avant traitement :

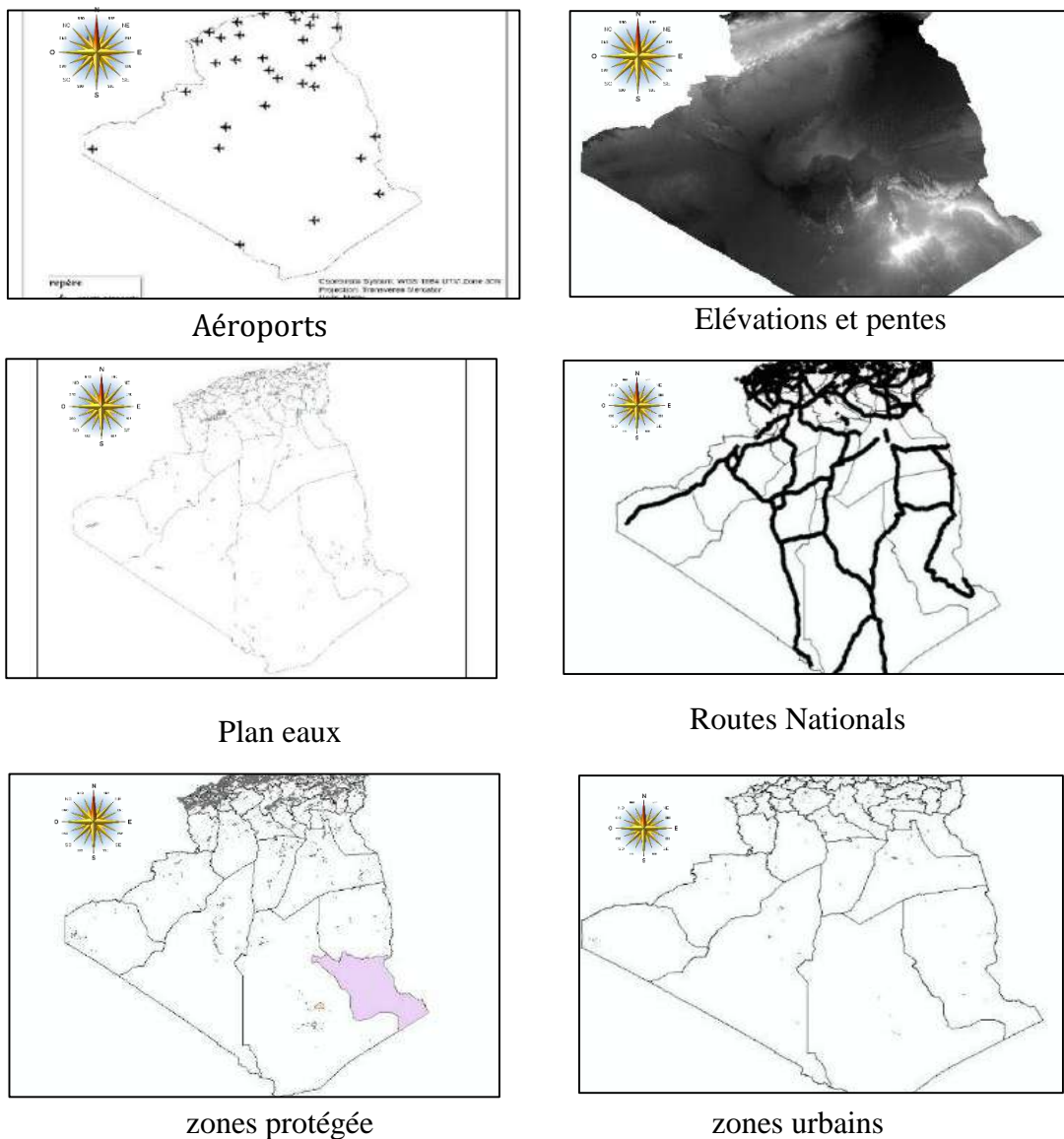


Figure III.11 Cartes thématique de critères.

Chapitre III : Estimation du potentiel de production d'hydrogène en Algérie.

Ce tableau représente les informations de critères recollter de divers études qui ont précédé, et ceux que nous avons choisi.

Tableau III.3Tableau des critères.

Critères	Limitations	Références
-Zone urbaines	-1000m	-Arnette, Andrew N et Zobel (2011) [40].
	-500m	-Watson et Hudson (2015)[41].
	{ -Populations>2000--1000m -Populations<200--500m	-Latinopoulos et K. Kechagia (2015)[42].
	-1000m	-Gilberto De Martino Jannuzzi, Amanda Lynn Bradshaw [43].
-Élévation.	-1500m	- Mohammad Satkin , YounesNoorollahi , MajidAbbaspour [44]
- Couverture terrestre : -forêts -terre arbustives plantes herbacées - terre cultivée	-500m	-Gilberto De Martino Jannuzzi, Amanda Lynn Bradshaw [43].
	-1000m	-Arnette, Andrew N et Zobel (2011) [40].
	-1000m	- Watson and Hudson (2015) [41].
	-1000m	- Latinopoulos et K. Kechagia (2015)[42].
	-2000m	-MohammadSatkin , YounesNoorollahi , MajidAbbaspour [44]
-Zones humide -Rivières	-600m	-Arnette, Andrew N et Zobel (2011) [40].
	-400m	- Watson and Hudson (2015)[42].
	-5000m	- Mohammad Satkin , YounesNoorollahi , MajidAbbaspour [44]
Route nationale	-600m	Latinopoulos et K. Kechagia (2015)[42].
	-1000m	- Mohammad Satkin , YounesNoorollahi , MajidAbbaspour [44]
-Aéroports	-5000m	- Mohammad Satkin , YounesNoorollahi , MajidAbbaspour [44]
	3000m	Latinopoulos et K. Kechagia (2015)[42].

III.6.1.1 Zones urbaines

Les régions fortement urbanisées ou densément peuplées sont sévèrement contraintes. De plus, en raison du bruit et des vibrations générées par les éoliennes, il est important de veiller à ce que les parcs éoliens soient situés en dehors de la zone résidentielle.

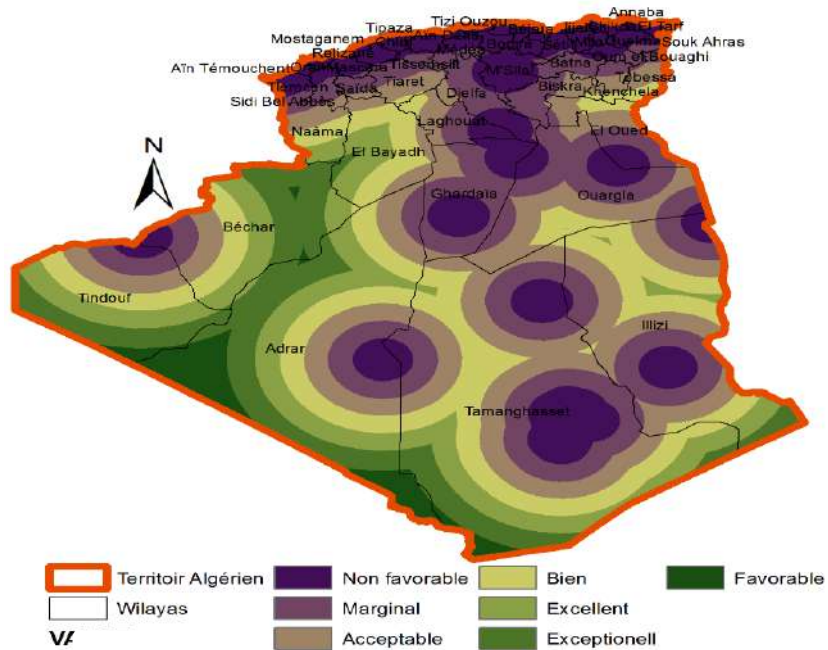


Figure III. 12 Zones urbains.

III.6.1.2 Zones protégées

il faut protéger les richesses naturelles du continent et préserver les valeurs de la biodiversité.

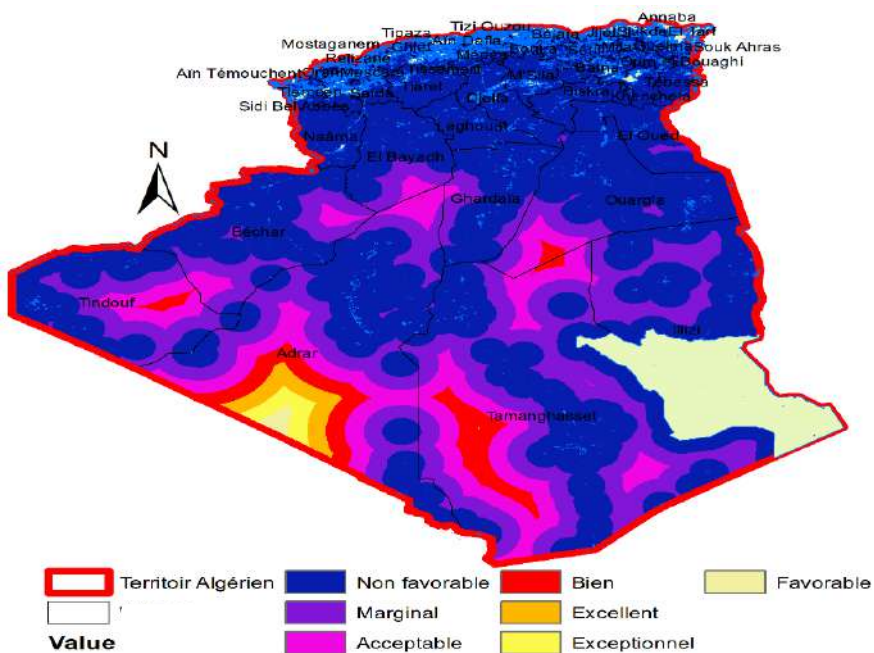


Figure III. 13 Zones protégée.

III.6.1.3 Routes nationales

Pour des raisons de maintenance et de ressource humaine pour un projet pareil les distances doivent être proches. (Figure III. 18)

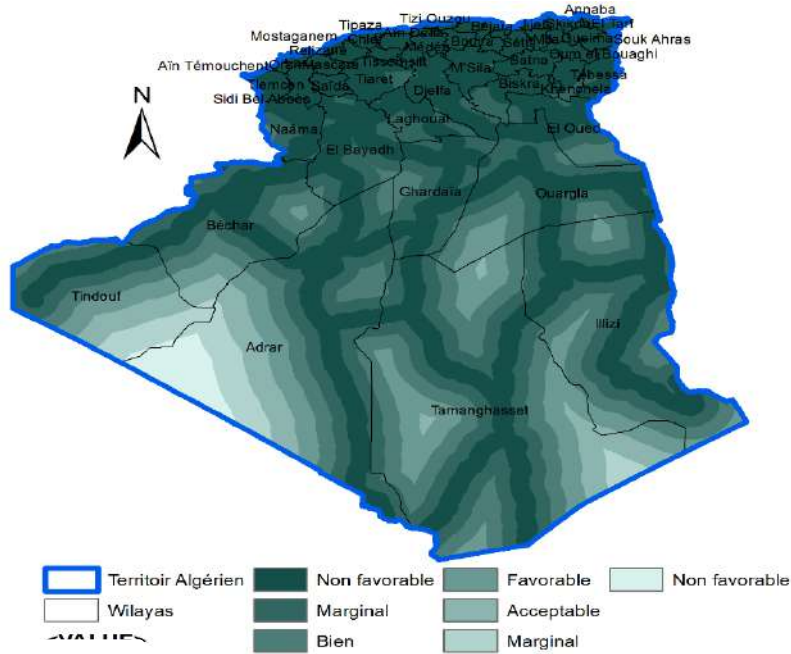


Figure III. 19 Routes nationales.

III.6.1.4 Aéroport

Par précaution des différents accident qui peuvent se produire a proximité des aéroports, il est judicieux de laisser un écart d'en moins 2500m. (Figure III.15)

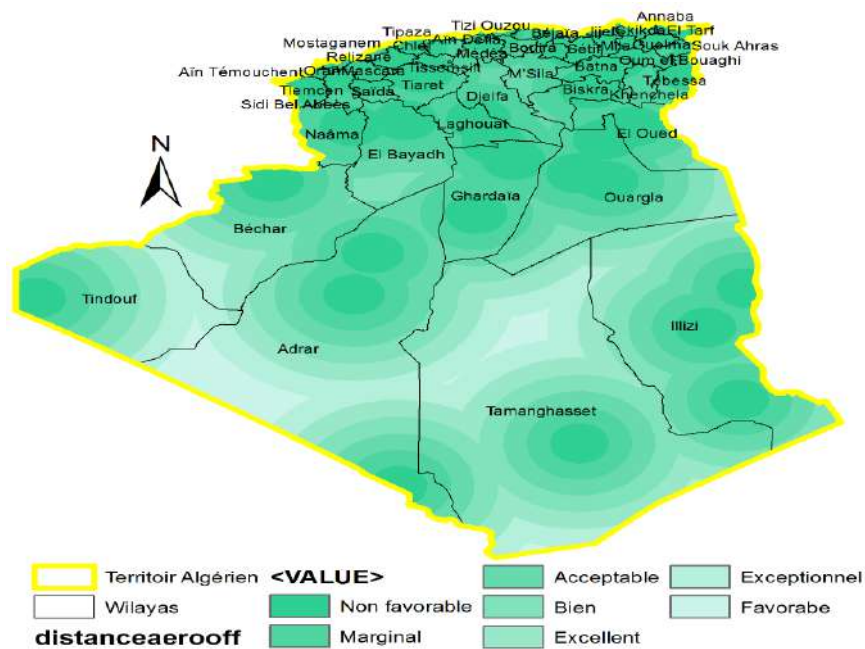


Figure III.15 Aéroports.

III.6.1.5 Les élévations (Zones d'altitude)

Les sites dont l'altitude est supérieure à 2 000m sont exclus de l'analyse car une altitude élevée entraîne des coûts de transport élevés, des coûts de transmission élevés et une densité de l'air plus faible. (Figure III.16)

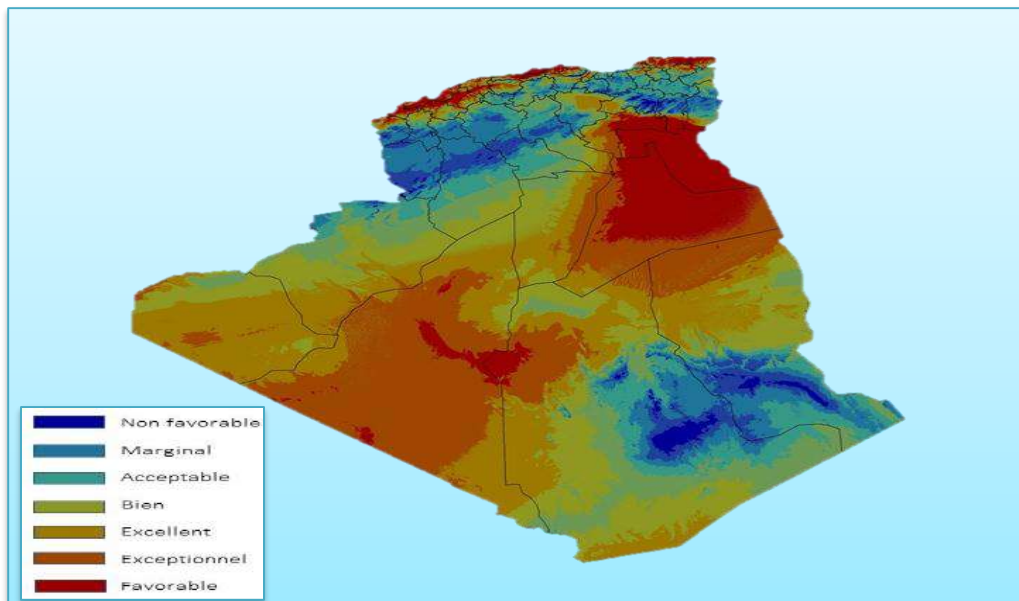


Figure III.16 Les élévations.

III.6.1.6 Zones en pente

les zones avec des pentes supérieures à 10 degrés sont exclues del'enquête.(Figure III.17).

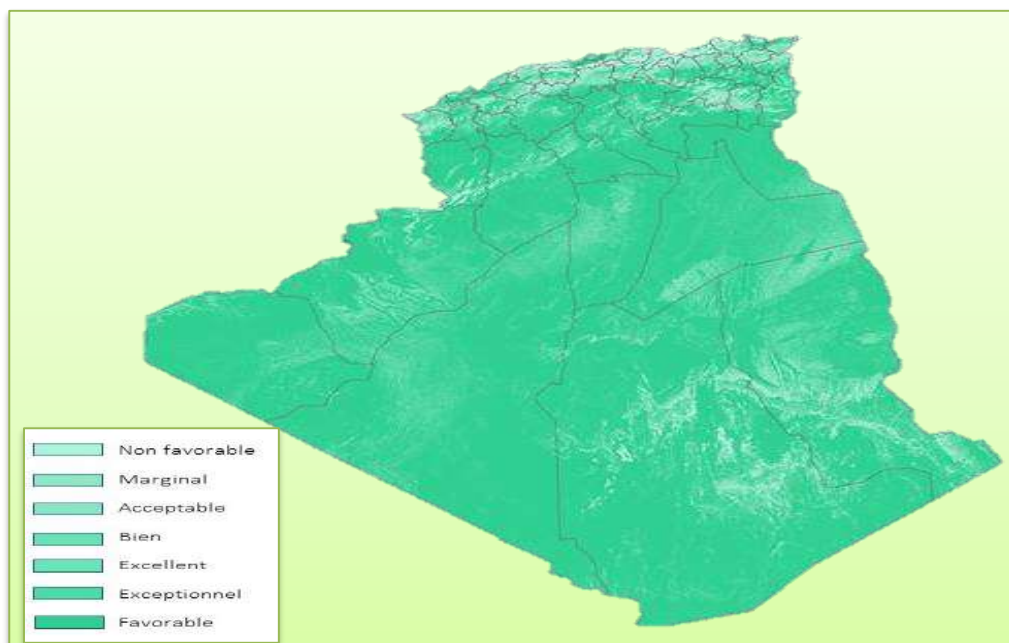


Figure III.17 Les pentes.

Chapitre III : Estimation du potentiel de production d'hydrogène en Algérie.

Pour la classification, nous avons choisi d'adapter le système des zones selon le potentiel de l'hydrogène obtenu à partir nos calculs, même chose pour la vitesse moyenne du vent. Nous résumons les données concernées réparties en 7 classes (1 : NON favorable ; 7 : zones favorables). Pour accueillir ce genre de projet et effectuer cette étape, nous avons utilisé l'outil de reclassification (**reclassfy**). Tout de même, nous avons toutes les cartes à disposition mais il y avait un problème de non homogénéité des unités, pour cet effet nous avons utilisé la reclassification qui est basée essentiellement sur une répartition homogène de 1 à 7.

III.6.2 Résultats et discussions

Au final et afin d'avoir la carte du potentiel technique (superpositions des cartes thématiques) nous avons opté pour l'outil de calculatrice raster, qui nous permet d'effectuer un croisement entre deux couches en mode RASTER qui se fait de pixel à pixel ou le pixel de la couche 1 est combiné au pixel de la couche 2 par une formule arithmétique en utilisant la calculatrice raster. La formulation générale de calcul de raster pour n couches est donnée comme suit :

$$F = \sum_{i=1}^n C_i * W_i \quad (\text{III-10})$$

C_i : Le critère utilisé dans cette analyse.

W_i : Le poids de chaque critère.

n : Nombre de critère.

En combinant toutes les cartes de critères précédemment cités, une carte d'aptitude ultime est construite à l'aide d'un calculateur raster SIG et d'un outil d'analyseur spatial permettant de spécifier des zones spécifiques, voire idéal pour l'implémentation de notre système de production d'hydrogène. (Figure III.18).

Chapitre III : Estimation du potentiel de production d'hydrogène en Algérie.

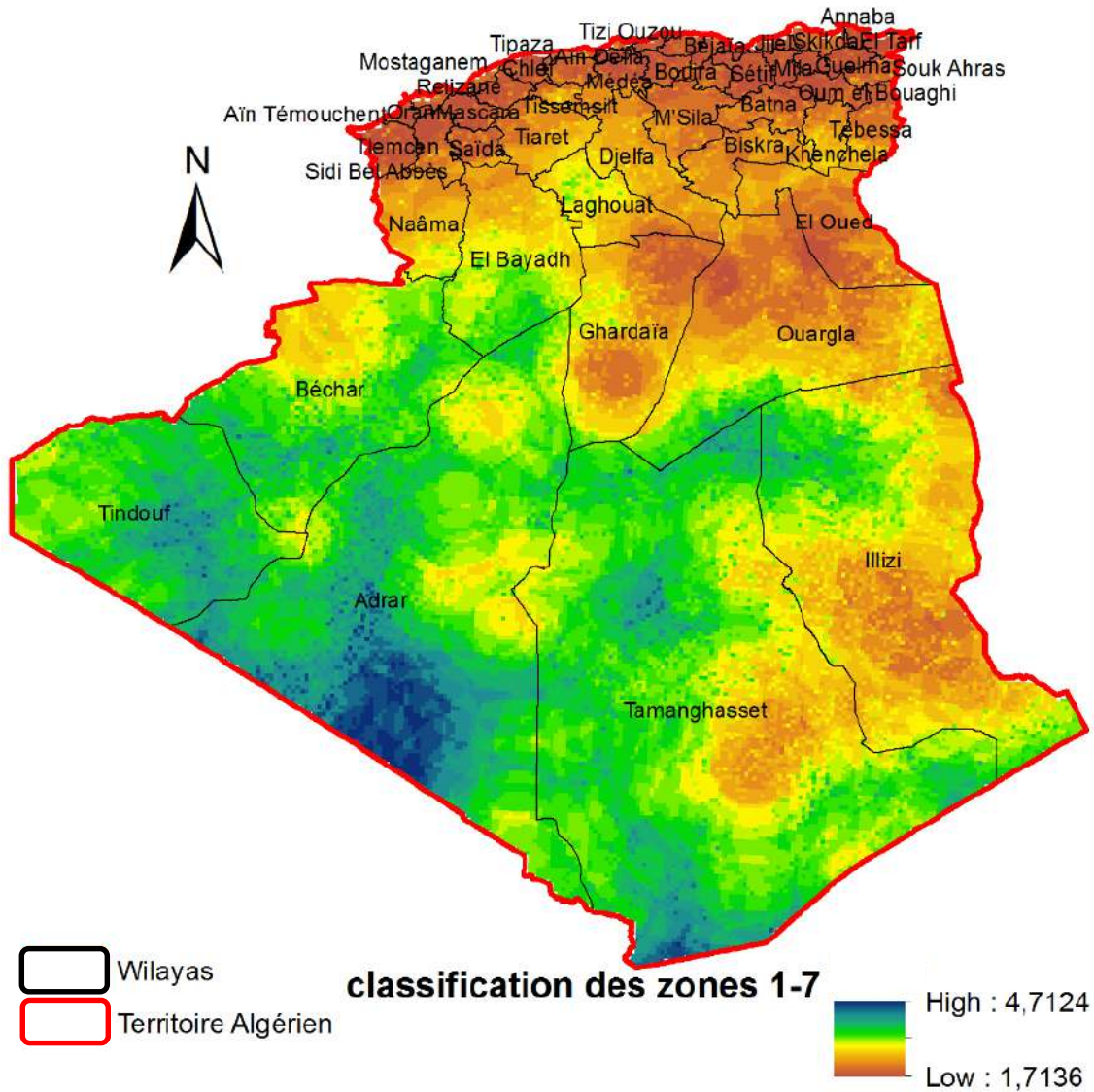


Figure III.18 : zones favorables.

Cette carte d'aptitude ultime est utilisée ultérieurement pour spécifier les zones favorable pour l'implémentation des parc éoliens pour la production d'hydrogène. Les zones en bleu et vert représentent les zones les plus appropriées pour la mise en place des parcs éoliens en tenant compte des contraintes géographiques. Les zones jaunes et oranges ne conviennent pas et sont donc des zones non favorables, En orange foncé ce sont les zones exclues pour l'analyse suivante. La dernière carte indique qu'Adrar, Tindouf, Tamenrasset, et Bechar sont des régions avec une disponibilité de zone favorable très élevée, concernant les régions de nord-est d'Illizi, le sud de la wilaya El Bayadh et quelques autres Wilayas plus petites indiquent une zone moyennement favorable, tandis que, pour les wilayas d'Oran, de Souk-Ahrass, de Tiaret, de Biskra, de El ouad, de Naama, Bordj-Bou-Arerij, à Tizi-Ouzo, Tlemcen et à Mestaganem et plusieurs autres wilaya du nord d'Algérie sont classifiées comme des zones non favorables.

Chapitre III : Estimation du potentiel de production d'hydrogène en Algérie.

Après avoir fait l'union des zones exclues, Nous avons fait appelle à l'outil LessThan du logiciel ArcGis (annex B) qui nous permet de faire l'exclusion de tous les zones précédemment citées qui représente des zones interdites. Une carte d'aptitude ultime est construite à l'aide d'un calculateur raster SIG et d'un outil d'analyseur spatial permettant de

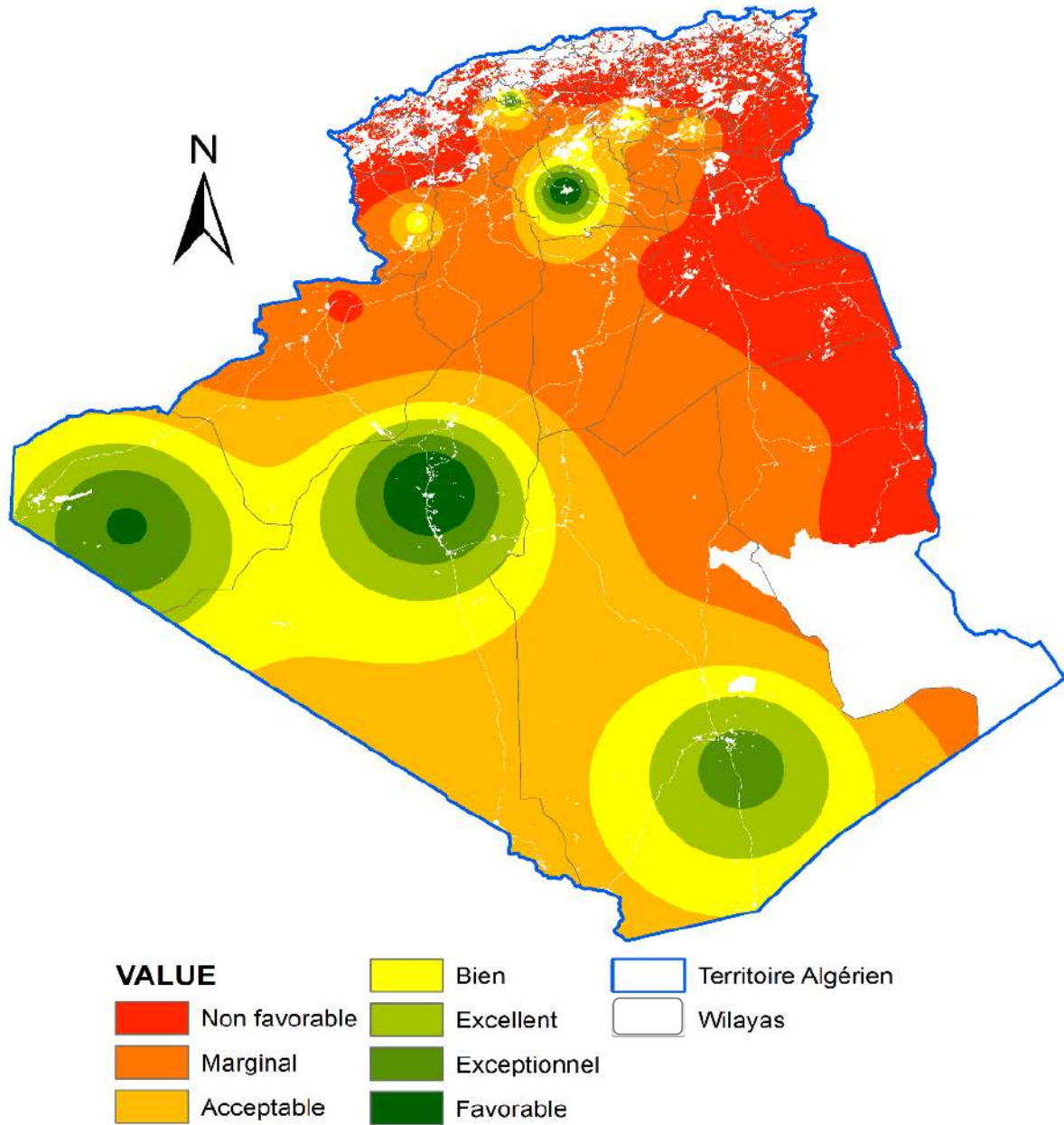


Figure III.19Potentiel technique d'hydrogène.

D'après la figure (III.19), on remarque qu'il y a eu une exclusion totale des zones interdites sur notre carte d'étude, ce qui nous a permis d'avoir une idée plus précise sur l'estimation du potentiel de production d'hydrogène en Algérie. Sur ce, on note d'ores et déjà que les zones exclues sont des sites situés beaucoup plus au nord de l'Algérie et qui ne disposent pas d'un grand potentiel d'hydrogène.



Fig.III-20 Superficies des zones exclus.

La somme des zones exclus est d'une superficie de 282 902 km², en 1^{ère} place, c'est les zones urbaines qui sont classées avec une superficie de 610755.99km², en suite les routes nationales avec 38402.2km², le plan des eaux, zones protégées et les aéroports sont de 22097.4 km², 10270.8 km², 933.05km² respectivement. (Figure III.20)

Tableau III.4 Potentiel d'hydrogène en Algérie.

Station de mesure	Superficie	Estimation du potentiel d'H ₂ en Algérie
Potentiel d'hydrogène net (ton/an/Km ²)	S_{Algérie} = 2,382,742 km²	P_n(H₂) = 3.13 M(tonne/an)
Potentiel d'hydrogène technique (ton/an/Km ²)	(S_{Algérie} – S_{exclus})	P_t(H₂) = 2.75 M(tonne/an)

Nous remarquons d'après (Tableau III.4) qu'une différence entre le potentiel technique et net. A priori, les zones que l'on a exclues ne disposent pas déjà d'un grand potentiel d'hydrogène, leurs exclusion nous a permis d'avoir le potentiel d'hydrogène sur les zones favorables pour l'implantation et le potentiel approximatif des zones favorables pour la production d'hydrogène.

III-7 Conclusion

La présente étude fournit une méthodologie simplifiée pour évaluer la production d'hydrogène à partir de l'énergie éolienne disponible sur chaque site, et aussi définir les zones favorables pour l'installation de notre système. Nous avons examiné Le potentiel net et technique de l'H₂ à partir de l'énergie du vent en 48 point du centre de chaque wilaya en Algérie.

A partir des résultats que l'on a réussi à obtenir à l'aide du code Fortran, nous avons pu conclure que les répartitions du potentiel d'hydrogène varient d'une station de mesure à une autre, cela nous a permis de conclure que pour les régions Adrar, Hassi R'mel, Tindouf situées au sud de l'Algérie comme des zones d'un très grand potentiel d'hydrogène avec une valeur de 0.14 (tonne/an.m²) comme un seuil maximal à la Wilaya d'Adrar, quant aux régions qui disposent le plus faible potentiel, elle se situent au nord de l'Algérie voir les régions du nord-est et nord-ouest, c'est ce que nous avons pu remarquer de la carte cartographique du potentiel net qu'on a représenté sur le logiciel ArcGIS.

Ensuite, nous avons établi l'étude du potentiel d'hydrogène technique avec une valeur de 2.75 M(tonne/an) comparant au potentiel net avec 3.13 M(tonne/an), le calcul du potentiel technique était en prenant référence aux cartes thématiques des critères qu'on a choisis on a conclu que pour Adrar, Tindouf, Tamanrasset et Bechar il y a eu un pourcentage de disponibilité de zone très élevé, pour les autres zones par exemple des régions nord-est d'Illizi le sud de la wilaya El Bayadhet quelques autres Wilayas plus petites, indiquent une zone moyennement favorable, Tandis pour les wilayas d'Oran, de Souk-Ahras, de Tiaret, de Biskra, de El oued, de Naama et Bordj-Bou-Argeridj, à Tizi-Ouzou, Tlemcen et à Mostaganem et plusieurs autres wilayas du nord d'Algérie, se sont classées comme des zones non favorables pour l'implantation du AéroH₂, sachant que les critères choisis étaient en rapport avec l'exclusion des zones urbaines, zones protégées, élévation, pentes, routes nationales et enfin les aéroports, et que la majorité de ces critères se situent sur les régions non favorables.

Conclusion générale

Conclusion générale

Les économies d'énergie constituent en effet le premier levier dans la lutte contre le réchauffement climatique. Mais en l'absence de politiques volontaristes, nous ne réaliserons qu'un tiers des améliorations possibles d'ici quelques années. Pourtant, elles permettraient non seulement d'augmenter la sécurité énergétique, mais aussi de réaliser des économies. Le secteur de l'énergie est confronté à un ensemble de plus en plus complexe de défis d'ordre économique, technologique, et en particulier environnemental, et c'est ce qui nous a incité à nous engager dans cette catégorie de sujet.

Dans la première partie de notre travail nous avons mis en application la modélisation de Weibull, une méthode mathématique appliquée afin d'effectuer des calculs de la distribution des vitesses à l'aide du code Fortran sur lequel nous avons écrit un programme contenant la modélisation de Weibull en reliant les résultats des vitesses à la formule de calcul de quantité d'hydrogène sur 48 sites, sur ce nous avons obtenu le potentiel net d'hydrogène, nous avons pu en conclure que la répartition du potentiel d'hydrogène varie d'une station de mesure à une autre ce qui nous permet d'en conclure les zones d'Adrar, Hassi R'mel, Tindouf situées au sud de l'Algérie qui disposent d'un potentiel d'hydrogène très élevé avec une valeur de 0.14 (tonne/m²/an).

Nous avons présenté une seconde partie des critères sous forme de carte développée, d'où on a collecté les informations nécessaires pour chaque carte et nous avons expliqué le choix de la décision de nos critères sur divers domaines environnementaux, énergétiques, et de sécurité et économiques correspond aux données disponibles, et nous avons adapté notre étude sur le Système d'Informations Géographiques ce qui facilite les opérations sur les cartes et donne des résultats précis.

Nous avons ensuite effectué des opérations géographiques sur les cartes de critères obtenues à l'aide du SIG (système d'information géographique), afin de recueillir les résultats de notre estimation du potentiel d'hydrogène technique nous avons utilisé la méthode de superposition des cartes (raster calculator) basée essentiellement sur l'équivalence des poids entre les critères, ce qui nous a permis de spécifier des zones de capacité de production d'hydrogène très élevée (petite espace et plus grande productivité), et des zones résultantes qui nous ont permis de dire que pour Adrar, Tindouf, Tamanrasset, Bechar il y a un pourcentage de disponibilité de zone très élevée, pour les autres zones par exemple les régions nord-est d'Illizi le sud de la wilaya El Bayadh, et quelques autres Wilayas plus petites indiquent une zone moyennement favorable, Tandis pour

Conclusion générale

les wilaya d'Oran, de Souk-Ahras, de Tiaret, de Biskra, de El oued, de Naama À Bordj-Bou-Argeridj, à Tizi-Ouzou, à Tlemcen et à Mostaganem et plusieurs autres wilaya du nord d'Algérie sont classifiées comme zone non favorable avec une surface d'exclusion des zones non favorable de 282 902 km², et un potentiel technique 2.75(tonne/an).

Bibliographie

Bibliographie

- [1] B. Multon, O. Gergaud, H. Ben Ahmed, 2002. 'Etat de l'art dans les aérogénérateurs électriques', Extrait du rapport de synthèse ECRIN. 'L'Electronique de Puissance Vecteur d'Optimisation Pour les Energies Renouvelables'. Paru mai en 2002.
- [2] Bernard Multon, Olivier Gergaud, Hamid Ben Ahmed, Xavier Roboam, StéphanAstier, et al., 2002. Etat de l'art des aérogénérateurs. L'électronique de puissance, vecteur d'optimisation pour les énergies Renouvelables, Ed. NOVELECT - ECRIN, ISBN 2-912154-8-1, pp.97-15.
- [3] Tyerwind. Home. [Enligne]. Disponible sur : < <http://www.tyerwind.com/>> (Consulté le 25-05-2019).
- [4] Boudia, S.M., 2013. Optimisation de l'Évaluation Temporelle du Gisement Énergétique Éolien par Simulation Numérique et Contribution à la Réactualisation de l'Atlas des Vents en Algérie, . Thèse doctorat : Physique Energies Renouvelables. Département de Physique, Université de Tlemcen Abou-Bakr Blekaïd. p-155.
- [5] Désiré Le GOURIERE, ., 1982. 'Energie éolienne', 'Théorie, Conception et calcul pratique des installations', édition Eyrolles
- [6] Suzanne Keignaert. Bruno Claessens, . 2014. ' Les éoliennes en région de Bruxelles capitale ', Extrait de la formation bâtiment durable, « Bruxelles environnement ».
- [7] M. JOURIEH, . 2007. 'Développement d'un modèle représentatif d'une éolienne afin d'étudier l'implantation de plusieurs machines sur un parc éolien'. Thèse de Doctorat Ecole Nationale .Supérieure d'Arts et Métiers.
- [8] GIGUERE, P. and SELIG, M. S., 1998. New Airfoils for Small Horizontal-Axis Wind turbines, Transactions A.S.M.E., *Journal of Solar Energy Engineering*, 120, 108 – 114.
- [9] T. Philippe, Th. Claude, projet technologique (étude d'une éolienne) université de Québec. (2007). TCH-090-095.
- [10] O. De Vries, "On the theory of the horizontal axis wind turbine", Ann. Rev. Fluid. Mech. 1983, 15, pp. 77-96.
- [11] G. Cuntly, 2001. 'Guide de l'énergie éolienne (Éolienne et aérogénérateurs)'. Edisud Ed.
- [12] M. Sathyajith, 2006 'Wind Energy ', Fundamentals, Resource Analysis and Economics, Inde,
- [13] Bouaraki Mouloud, 2012. 'Etude d'un entrainement à double alimentation pour turbine éolienne à vitesse variable : Application sur un site à TINDOUF ', thèse de magistère, Université M'hamedbougara-boumerdes.

- [14] C. Colliez, A. Tounzi, F. Piriou, 1997. "Vector Control of an Autonomous Induction Generator Connected to a PWM Rectifier", Proceedings of EPE 97, vol. 2, pp. 711-716, Trondheim, Norvège, 8-10 Septembre
- [15]CREG. Programme de Développement des Energies Renouvelables 2015–2030. <http://www.creg.gov.dz/images/stories/PDF/creg15mars.pdf>.
- [16] DAAOU NEDJARI Hafida, 'L'énergie éolienne en Algérie', Bulletin des Energies Renouvelables N°46-2018
- [17] K. Eftichios, K. Kostas, 2006. "Design of a maximum power tracking system for wind energy conversion applications", IEEE transaction on industrial electronics, vol. 53.
- [18] M M. Robert Galley et Claude Gatignol, 2003 ' Rapport sur les perspectives offertes par latechnologie de la pile à combustible ', 3 juillet.
- [19] Christian Bailleux et Pierre Clément, « L'hydrogène révolutionnaire », Direction des études et Recherches, EDF, 1989.
- [20] CEA (Commissariat à l'Energie Atomique), « L'hydrogène », ISSN 1637-5408, 2004.
- [21]Rahmouni, S. et al., 2017. Prospects of hydrogen production potential from renewable resources in Algeria. International Journal of Hydrogen Energy, 42(2), pp.1383–1395.
- [22]Boudries, R., 2017. Techno-economic study of hydrogen production using CSP technology. International Journal of Hydrogen Energy, pp.1–12.
- [23]Kirati, S.K., Hammoudi, M. &Mousli, I.M.A., 2017. Hybrid energy system for hydrogen production in the Adrar region (Algeria): Production rate and purity level. International Journal of Hydrogen Energy, pp.1–16.
- [24]Aiche-Hamane, L. et al., 2009. Feasibility study of hydrogen production from wind 36 power in the region of Ghardaia. International Journal of Hydrogen Energy, 34(11), pp.4947–4952.
- [25]Douak, M. &Settou, N., 2015. Estimation of Hydrogen Production Using Wind Energy in Algeria. Energy Procedia, 74, pp.981–990.
- [26] Bent Sorensen, 2005. ' Hydrogen and Fuel cells: Emerging technologies and applications ', Elsevier – Academic Press, ISBN: 0-12-655281-9.
- [27] S.Boucher, 2006. la révolution de l'hydrogène. Edition du Félin.
- [28] AFH2. Les données de base physico-chimiques sur l'hydrogène. Mémento de l'hydrogène, fiche 1.2, Avril 2011, 3p.

- [29] R. Kothari, D. Buddhi, R.L. Sawhney, 'Comparison of environmental and economic aspects of various hydrogen production methods', *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Volume 12, February 2008, p .553–563.
- [30] AFH2,,2014..Production d'hydrogène à partir des combustibles fossiles. Mémento de l'Hydrogène, Fiche 3.1.1.
- [31] Michel Latroche, J.-M. Joubert, F. Cuevas, V. Paul-Boncour et A. Percheron-Guégan,,2013. L'hydrogène dans tous ses états : du solide au gaz en passant par le liquide.
- [32] Gauthier Winé,,2009.'Ingénieur ALPHEA HYDROGENE', 'L'HYDROGÈNE de A à Z', France.
- [33] AFH2,,2016..'Le transport d'hydrogène'. 'Mémento de l'hydrogène'. Fiche 4.1.
- [34] H. Dagdougui. Système d'aide à la décision pour la durabilité des systèmes énergétiques renouvelables et des infrastructures d'hydrogène : modélisation.
- [35] Air Liquide. Ses applications. [Enligne].Disponible sur : <<http://www.planetehydrogene.com/fr/hydrogene/ses-applications-4.html> >. (Consulté le 23-04-2019).
- [36] Charles-Robert AGERON, Sid-Ahmed SOUIAH, Jean LECA, Benjamin STORA, «ALGÉRIE», *Encyclopædia Universalis* [enligne].URL: <<http://www.universalis.fr/encyclopedie/algerie/>>. (Consulté le 3 juin 2019)
- [37] Dimitrios Mentis,,2013.'Wind Energy Assessment in Africa; A GIS-based approach', memoir Master, Stockholm,
- [38] Boudia, S.M., Benmansour, A. & Tabet Hellal, M.A., 2016. Wind resource assessment in Algeria. *Sustainable Cities and Society*, 22, pp.171–183.
- [39] Hashimoto A and al,,2002. 'Development of PEM water electrolysis type for hydrogen production system for WE-NET', 'proceedings of 14th WHEC', Montreal,
- [40] Arnette, Andrew N. & Zobel, Christopher W., 2011. "Spatial analysis of renewable energy potential in the greater southern Appalachian mountains," *Renewable Energy*, Elsevier, vol. 36(11), pages 2785-2798.
- [41] Watson, Joss J W, and Malcolm D. Hudson. 2015. "Regional Scale wind farm and solar farm suitability assessment using GIS-assisted multi-criteria evaluation" *science directe*, Volume 138, pages 31. assessment using GIS-assisted multi-criteria evaluation." *Landscape and Urban Planning* 138. Elsevier B.V.:20–31. doi:10.1016/j.landurbplan.2015.02.001.
- [42] Latinopoulos, D. & Kechagia, K., 2015. "A GIS-based multi-criteria evaluation for wind farm site selection. A regional scale application in Greece," *Renewable Energy*, Elsevier, vol. 78(C), pages 550-560.

[43] Gilberto De Martino Jannuzzi, Amanda Lynn Bradshaw «A GIS-based decision support tool for renewable energy management and planning in semi-arid rural environments of northeast of Brazil »,Renewable Energy 35(12) pages 2921-2932.

[44] M Abbaspour, M Satkin, B Mohammadi-Ivatloo, FH Lotfi, Y Noorollahi Renewable Energy 51, pages 53-59.

[45] GOUAREH, A., 2017. Maîtrise et optimisation de la gestion énergétique en Algérie, Thèse Doctorat : Energétique et Environnement. Département Génie Mécanique, Université Djillali Liabès de Sidi Bel Abbès. P-246.

Annexe

Annexe

Annexe A :Représentation dess tableaux

- Le tableau suivant présente données climatiques utilisés dans notre étude [45].

Tableau A.1 : Données climatique [45].

Wilaya	k1	C (m/s)	Wilaya	K1	C (m/s)	Wilaya	K1	C (m/s)
1	2,5	7,2	21	1,76	4,1	45	2,12	5,6
2	1,82	3,58	22	1,41	2,89	46	1,16	2,77
3	1,82	6,88	23	2,96	4,18	47	1,72	4
4	1,7	3,65	24	1,88	3,83	48	1,67	3,57
5	2,17	4,24	25	1,55	2,7			
6	2,99	3,54	26	1,73	3,39			
7	1,61	4,85	27	1,5	2,33			
8	1,67	4,25	28	1,28	4,35			
9	1,79	3,77	29	1,6	2,68			
10	1,52	3,12	30	1,87	4,24			
11	1,83	5,71	31	2,3	4,88			
12	1,71	3,65	32	1,3	3,22			
13	1,83	2,69	33	2,33	4,56			
14	1,46	4,41	34	1,81	2,41			
15	1,07	1,67	35	1,54	2,94			
16	1,73	4,54	36	1,68	4,21			
17	1,81	5,24	37	2,15	6,41			
18	1,95	4,06	38	1,52	3,73			
19	2,8	4,29	39	1,32	3,24			
20	1,6	3,44	40	1,78	3,8			
16	1,73	4,54	41	1,32	3,82			
17	1,81	5,24	42	1,55	3,38			
18	1,95	4,06	43	1,9	3,67			
19	2,8	4,29	44	1,45	3,2			

- Le tableau suivant représente les résultats de la Vitesse moyenne annuelle, la quantité d'hydrogène, et l'énergie d'électricité produite obtenu à l'aide du code Fortran.

Tableau A.2 : Résultats de la Vitesse moyenne annuelle, la quantité d'hydrogène, et l'énergie d'électricité produite.

Wiley	Vm1(m/s)	W (GWh/m ² /an)	MH ₂ (tonne/an/km ²)
1	6,388	7532908,8	143757,802
2	3,182	802080,238	15306,8748
3	6,115	5676298,3	108326,303
4	3,257	932492,238	17795,6534
5	3,755	1102260,925	21035,5138
6	3,161	524504,456	10009,627
7	4,346	2374009,4	45305,5229
8	3,797	1509736,025	28811,7562
9	3,354	956540,525	18254,5902
10	2,812	699129,275	13342,1617
11	5,074	3223649,15	61520,0219
12	3,255	924616,4	17645,3511
13	2,39	339479,962	6478,62523
14	3,995	2123139,65	40517,9323
15	1,627	260650,541	4974,24697
16	4,046	1747666,15	33352,4074
17	4,659	2527078,9	48226,6966
18	3,6	1076648,275	20546,7228
19	3,82	960024,462	18321,0775
20	3,084	857454,15	16363,6288
21	3,65	1257669,9	24001,334
22	2,631	642626,338	12263,8614
23	3,73	865488,15	16516,9494
24	3,4	943073,088	17997,578
25	2,428	438713,838	8372,40149

26	3,021	729178,338	13915,6171
27	2,103	299851,306	5722,35317
28	4,03	2718087,9	51871,9065
29	2,403	406882,025	7764,92414
30	3,764	1286754,275	24556,3793
31	4,323	1599403,275	30522,9633
32	2,974	1063389,025	20293,6837
33	4,04	1292432,4	24664,7405
34	2,143	248301,416	4738,57664
35	2,646	572021,962	10916,4497
36	3,759	1454536,525	27758,3306
37	5,677	3833613,4	73160,5611
38	3,362	1192671,9	22760,9141
39	2,983	1045004,15	19942,8273
40	3,381	986767,838	18831,4473
41	3,517	1710934,775	32651,427
42	3,04	858068,525	16375,3535
43	3,257	819785,462	15644,7607
44	2,902	823791,775	15721,2171
45	4,96	2590405,9	49435,2271
46	2,63	916209,775	17484,9194
47	3,566	1205976,4	23014,8168
48	3,189	895931,088	17097,9215

Annexe B : le système informatique géographique (SIG)

Le (SIG) nous permet de rassembler et d'analyser des données spatiales, il a été employé plus souvent comme outil analytique, représentant des rapports mathématiques entre les données spatiales, telles que des couches de carte, et les diverses informations. La plus nouvelle utilisation a été l'application des SIG comme système d'aide à la décision dans les méthodes d'Analyse de Décision [4]. Comme il est capable aussi de stocker de manière élégante des caractéristiques dépendantes d'un lieu, ce qui permet de combiner certaines caractéristiques d'un lieu et des zones de tabulation. [45].

Le SIG étant ainsi un outil de gestion de données à part entière et un système qui englobe à la fois :

- Les logiciels pouvant être utilisés (ArcGIS, QGIS, MapInfo, Gvsig etc.).
- Les données que vont utiliser ces mêmes logiciels (données urbaines, données de réseaux, données routières etc.).
- Le matériel informatique (capacité, système d'exploitation etc.).
- Les compétences thématiques.

Les informations dans un SIG sont généralement liées à des coordonnées spatiales longitude et latitude (x,y), et parfois l'altitude (z) qui vont indiquer l'emplacement de ces données dans l'espace[45]. Les objets géographique (données géo-localisées) sont organisés sous formes des couches (Figure B.1) contenant un ensemble homogène des données et référencé à un thème tels que : la couche de réseau électrique, de sites de productions, de réseau routier, des stations météorologiques, ... etc.

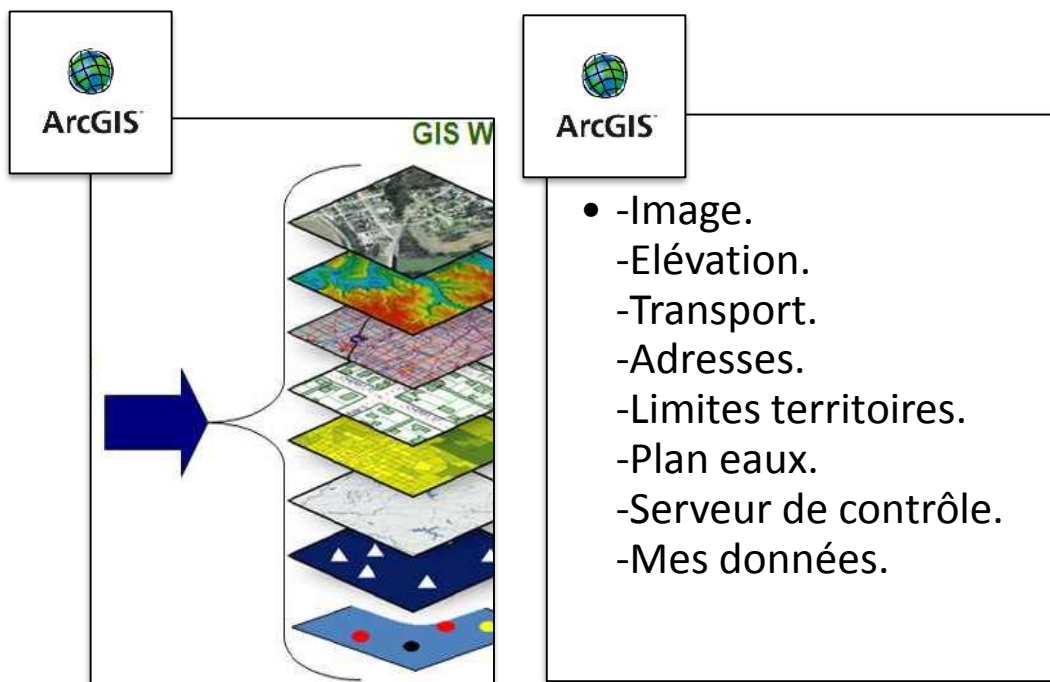


Figure B.1 Schéma général d'un SIG.

Parmi les outils du SIG nous avons utilisé le logiciel ArcGIS qui englobe la gamme complète des tâches SIG de conception, gestion et édition de données, à la production et visualisation des cartographies et l'analyse spatiales des données géographiques. L'ArcGIS est constitué de trois applications qui sont[45]. comme c'est illustré sur la figure (Figure B.2)

- **ArcMap** : est l'application principale dans l'ArcGIS utilisé pour créer des cartes, éditer des données, et permet la visualisation des résultats de l'analyse, tel que des cartographies numérisées.
- **ArcCatalog** : est employé pour établir des bases de données de GIS et les organiser selon le type vecteur (points, lignes, polygones) ou raster. Il est également employé pour rechercher, et contrôler les données géographiques.
- **ArcToolbox** : Les outils dans ArcToolbox sont utilisés pour le traitement, l'analyse, conversion des données géographiques pour développer des nouvelles bases de données.

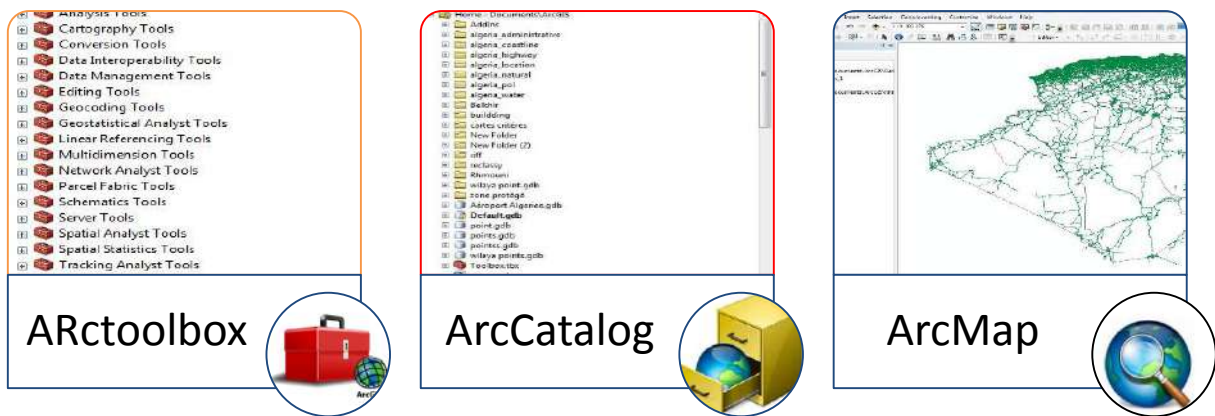


Figure B. 2 Les application de L'ArcGis.

Les données de type vecteur sont un format par lequel des points, des lignes, et des polygones (Figure B.3) soient employés pour représenter de vrais dispositifs sur la surface objet spatial est doté d'un identifiant qui permet de relier à un tableau attributaire. Les données.

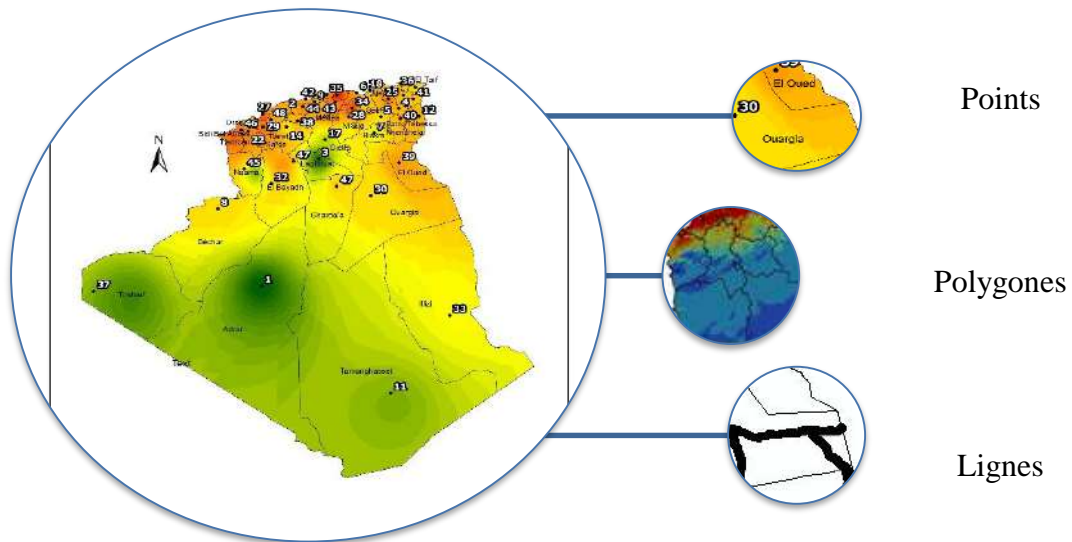


Figure B.3 Représentation de l'information en mode vectoriel.

Le système de coordonnées utilisé selon cette approche est le système géodésique WGS 1984. Chaque fois que le système de coordonnées géographiques a été défini, il a été converti en système projeté à l'aide d'un outil de gestion de données capable de transformer un jeu de données raster d'une projection à une autre et de changer l'unité de décimal degré au mètre, dans l'ordre et diminuer l'erreur en moins d'un demi pixel.

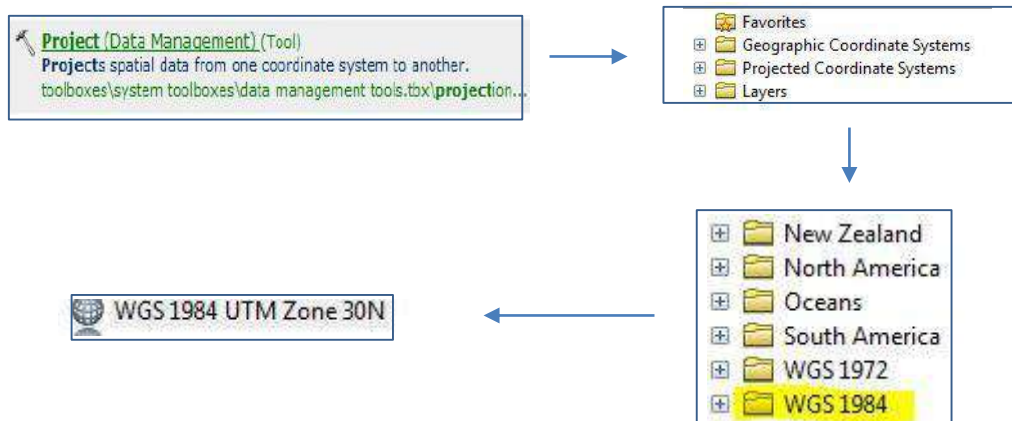


Figure B.4 projections des données.

L'outil ArcGIS inclut des méthodes spécifiques d'interpolation pour estimer dans l'espace des phénomènes continus, ici c'est le vent et le potentiel d'hydrogène. Le but des méthodes d'interpolation est de créer des grilles extérieures dans ArcGIS afin d'évaluer les valeurs des cellules aux endroits qui manquent des points prélevés. Parmi les méthodes d'interpolation dans le logiciel ArcGIS, il y a Inverse Distance Weighted (IDW). La méthode

la plus appropriée dépend de la distribution des points prélevés car l'ensemble de points est assez dense pour capturer l'élargissement de la variation extérieure[45],

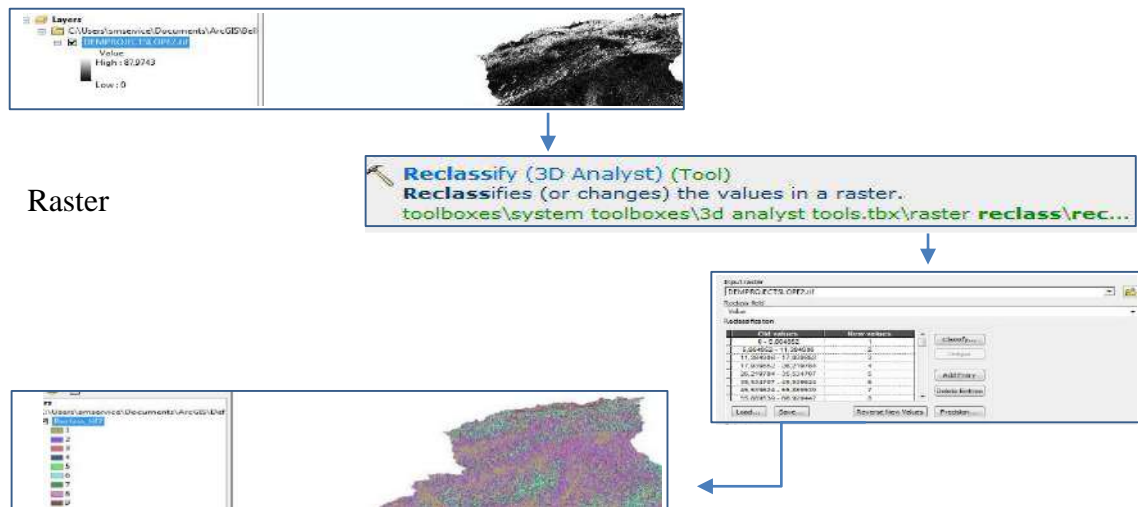


Figure B. 5 les étapes de l’outil de reclassification.

À titre d’illustration, les caractéristiques géographiques naturelles (telles que les pentes, l’altitude, les zones urbains, les masses d’eau) peuvent également être combinées aux infrastructures techniques (telles que des routes nationales). Les cartes de restriction sont construites et reclassées de manière à indiquer les zones appropriées et non appropriées pour les parcs éoliens. Une carte de restriction ultime est produite en superposant toutes les cartes de restriction. Ci-dessous, toutes les zones de restriction sont illustrées, c'est-à-dire 8 cartes différentes qui montrent comment chaque restriction affecte l’installation et le potentiel éolien.

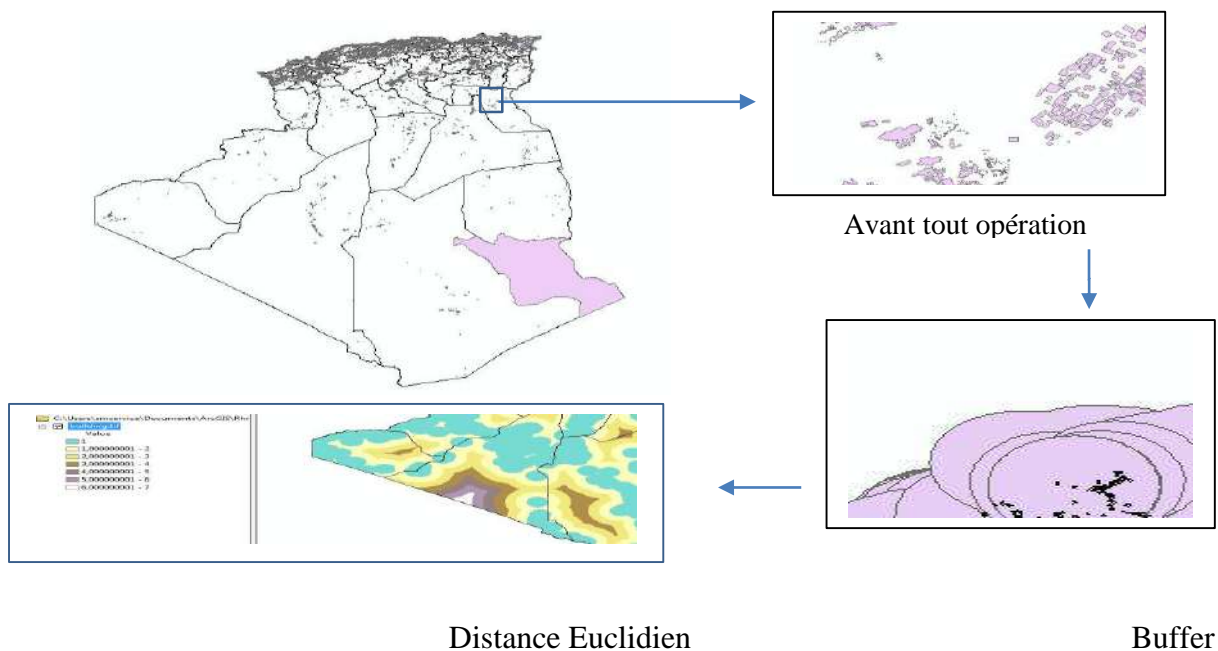


Figure B.6 image descriptive des outils Buffer et distance euclidien.