

République Algérienne Démocratique et Populaire

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



---

UNIVERSITÉ ABOU-BAKR BELKAID TLEMCEM

FACULTÉ DES SCIENCES

DÉPARTEMENT DE PHYSIQUE

UNITÉ DE RECHERCHE MATÉRIAUX & ÉNERGIES RENOUVELABLES

ÉCOLE DOCTORALE ÉNERGIES RENOUVELABLES

---

## Thèse

Pour obtenir le grade de

**DOCTEUR EN PHYSIQUE**

Spécialité

Énergies Renouvelables

Présentée par

**BENMEDJAHED Miloud**

Sur le thème

**Choix du site et optimisation du dimensionnement d'une installation éolienne dans le nord Algérien et son impact sur l'environnement**

Soutenue en Novembre 2013

Devant le jury composé de :

<b>Président</b>	Mr Boumediene Benyoucef	Professeur	Université de Tlemcen
<b>Directeur de thèse</b>	Mme Nassera Ghellai	Professeur	Université de Tlemcen
<b>Co directeur de thèse</b>	Mr. Abdehalim Benmansour	Professeur	Université de Tlemcen
<b>Examineurs</b>	Mr. Mustapha Tioursi	Professeur	USTO – M.B d'Oran
	Mr. Ali Malek	Directeur de Recherche	CDER Alger
	Melle. Ouahiba Guerri	Maître de Recherche	CDER Alger
<b>Invité</b>	Mr. Nesr Eddine Chabane Sari	Professeur	Université de Tlemcen

**Année Universitaire 2012–2013**

## ***Remerciements***

*Pour commencer, je tiens à remercier ma directrice de thèse, Professeur Nassera GHELLAI, pour la manière dont elle a encadré mes travaux (sans aucun doute celle qui me correspondait le mieux) : avec bonne humeur, rigueur scientifique et enthousiasme. J'ai eu beaucoup de chance de travailler avec elle. Je lui suis sincèrement reconnaissant pour son soutien constant et pour l'intérêt qu'elle a porté à ce travail. Sa disponibilité, sa modestie et ses compétences m'ont été très précieuses.*

*Merci aussi à Mr le Professeur Abdelhalim BENMANSOUR co-directeur de ma thèse, pour avoir suivi mon travail avec un grand intérêt. Je tiens à lui exprimer ma profonde gratitude pour ses précieux conseils qu'il n'a cessé de me prodiguer tout au long de ce travail.*

*Merci aussi à Monsieur Abdellatif TABET HELLAL, pour avoir, tout au long de mes travaux de thèse, donné de son temps pour se joindre à mes encadreurs et me prodiguer de précieux conseils.*

*Je tiens à remercier tous les chercheurs et travailleurs de l'Unité de Recherche Matériaux et Energies Renouvelables (URMER) et en particulier ceux de la Division Nouveaux Matériaux, Systèmes et Environnement (DNMSE), ainsi que ceux de l'Unité de Recherche en Energies Renouvelables en milieu Saharien d'Adrar (URER-MS)..*

*-Mes encadreurs et moi sommes très honorés de la présence à notre jury de thèse de :*

- Monsieur Boumédiène BENYOUCEF, Professeur à l'Université de Tlemcen. Nous le remercions infiniment pour l'honneur qu'il nous fait en acceptant de présider le jury.*
- Monsieur Mustapha TIOURSI Professeur à l'Université des Sciences et de la Technologie d'Oran (USTO). Nous le remercions de nous avoir honorés par sa présence et d'avoir accepté d'examiner ce modeste travail.*
- Monsieur Ali Malek, Directeur de Recherche au Centre national de Développement des Énergies Renouvelables (CDER) Bouzeréah, Alger. Nous lui adressons nos vifs remerciements de nous avoir honoré par sa présence et sa participation à ce jury.*
- Mademoiselle Ouahiba GUERRI Maître de Recherche au Centre national de Développement des Énergies Renouvelables (CDER) Bouzeréah, Alger. Nous la remercions d'avoir accepté de s'associer à ce jury.*
- Monsieur Nasr Eddine CHABANE SARI Professeur à l'Université de Tlemcen. Nous le remercions profondément pour l'intérêt qu'il a porté à notre travail et pour sa participation à ce jury.*

*Mes sincères remerciements vont également à tous ceux qui ont participé de prêt ou de loin à ma formation, à tous ceux qui m'ont enrichi de leurs connaissances et à tous ceux et celles qui m'ont aidé pour faire aboutir cette thèse.*

## *Dédicace*

*A toute ma famille*

## SOMMAIRE

Introduction générale	12
Bibliographie	22
Chapitre I : Etude Bibliographique	23
I -1ORIGINE ET TYPES DES VENTS	25
Introduction	25
I-1-1 L'atmosphère	25
I-1-1-1 Les couches de l'atmosphère	26
I-1-1-2 L'atmosphère standard	27
I-1-1-3 La couche limite atmosphérique	28
I-1-1-4 Les conductions atmosphériques instables	38
I-1-2 climat	30
I-1-2-2 climats Méditerranéen	31
I-1-2-3 La météorologie	32
I-1-2-4 Le vent	32
I-1-2-5 Les vents géostrophiques	33
I-1-2-6 Les vents de surface	34
I-1-3 La mesure de la vitesse du vent	36
I-1-4 La rose des vents	37
I-2 EOLIENNES ET NOTION IMPACT	38
Introduction	38
I-2-1 Structure des éoliennes	38
I-2-1-2 Différents types d'aérogénérateurs – caractéristiques Cp	39
I-2-1-3 Production d'énergie éolienne	40
I-2-2 Notion et étude d'impact	41
I-2-2 -1 Les objectifs de l'étude d'impact	41
I-2-2 -2 Impact sonore	42
I-1-2 -3 Impacts visuels	48
I-2-2 -4 Impact sur les Systèmes de Télécommunications	52
I-2-2 -5 Impact sur la santé	53
I-2-2 -6 Impact sur la faune	54
I-2-2 -7 Impact sur la sécurité	56
Conclusion	58
Bibliographie	59
Chapitre II : analyse de l'état initial des sites étudiés	61
Introduction	62
II-1MILIEU PHYSIQUE	62
II-1-1 Relief	63
II-1-2 Climat	64

II-1-3 Vent et gisement éolien	68
II-1-3-1 Modèles d'ajustement	69
II-1-3-2 Rose des vents	73
II-1-4 Séismes et risque sismique en Algérie	78
II-2 MILIEU NATUREL	78
II-3 MILIEU HUMAIN	79
II-3 -1 La population	79
II-3 -2 L'agriculture et la pêche	80
II-3 -3 Les activités industrielles	81
II-3 -4 Energie	82
Conclusion	84
Bibliographie	86
Chapitre III : Choix des sites et dimensionnement des parcs éoliens	89
Introduction	90
III-1 ÉNERGIE ET PUISSANCE	91
III-1-1 Limite de Betz	92
III-1-2 Puissance effective d'éolienne	94
III-1-3 Le facteur de capacité	96
III-1-4 Estimation de l'énergie produit par un parc éolien	97
III-2 CHOIX DES EOLIENNES	99
III-3 ESTIMATION DU COUT D'INVESTISSEMENT DU PROJET	107
III-3-1 Coûts des études	107
III-3-2 Coûts d'ingénierie	108
III-3-3 Coûts de génie civil	108
III-3-4 Coût des éoliennes	108
III-3-5 Coût du transport	108
III-3-6 Coûts de raccordement électrique	108
III-3-7 Coûts divers	108
III-3-8 Coût de l'électricité à partir de l'énergie éolienne	110
Conclusion	112
Bibliographie	114
Chapitre IV : Impacts environnementaux des parcs éoliens	116
Introduction	117
IV -1 IMPACT ACOUSTIQUE DU PARC EOLIEN	118
IV -1-1 Méthode de calcul suivant la norme « Série ISO 9613-2»	120
IV -1-2 Présentation de la méthode	121
IV -2 IMPACT VISUEL	132
IV -2-1 Impact de l'éolienne sur l'environnement	138
IV -2-2 Milieu physique	138
IV -2-3 Milieu naturel	139

IV -2-1 Milieu humain	139
IV -3 Les effets de L'environnement Sur le Projet	140
IV -4 MESURES D'ATTENUATION DES IMPACTS SUR L'ENVIRONNEMENT	140
IV -4-1 Qualité de l'air	140
IV -4-2 bruits	140
IV -4-3 Circulation et transport	140
IV -4-4 Déchets	141
IV -4-5 Respects du paysage et de l'esthétique	142
IV -4-6 Aspects socioéconomiques	142
IV -4-7 Risques d'incendie	142
IV -4-8 Risques sismiques	143
Conclusion	144
Bibliographie	145
Conclusion générale	146

# Liste des tableaux

## Chapitre I : Etude Bibliographique

Tableau I- 1 : Production d'énergie éolienne mondiale 2000/2011 en MW	40
Tableau I-2 : Niveau sonore du bruit résiduel en fonction de la vitesse	44

## Chapitre II : Analyse de l'état initial des sites étudiés

Tableau II- 1: Position géographique des sites	63
Tableau II- 2: Température moyenne mensuelle des sites étudiés en (°C)	66
Tableau II- 3: Pluviométrie moyenne mensuelle de six sites étudiée en (mm)	67
Tableau II- 4: Caractéristiques des sites étudiés	69
Tableau II- 5: Paramètres de Weibull et vitesse moyenne, à 10m du sol	70
Tableau II- 6: Paramètres hybride Weibull et vitesse moyenne, à 10m du sol	72
Tableau II- 7: Paramètres de Weibull et vitesse par secteur pour les sites côtiers à 10m du sol	76
Tableau II- 8: Paramètres de Weibull et vitesse par secteur pour les sites des hauts plateaux à 10m du sol	77

## Chapitre III : Choix des sites et dimensionnement des parcs éoliens

Tableau III- 1: Paramètres de conception de l'éolienne standard	95
Tableau III- 2: Estimation de l'énergie produite par un parc éolien de puissance 9MW	100
Tableau III- 3: Estimation du coût d'investissement d'un parc éolien de 9MW	109
Tableau III- 4: Coût de l'électricité à partir de l'énergie éolienne	111

## Chapitre IV : Impacts environnementaux des parcs éoliens

Tableau IV- 1: Coefficient d'atténuation atmosphérique pour bandes d'octave de bruit de la norme ISO 9613-2	124
Tableau IV- 2 : Le bruit industriel, description de la méthode de calcul	126

## **Liste des figures**

### **Introduction générale**

Figure 1: Capacité (puissance en MW) éolienne installée de 1995 à 2012 dans le monde	15
Figure 2: Pénétration des énergies renouvelables dans la production nationale en TWh	17
Figure 3: Prévision énergétique de la production nationale en MW	18
Figure 4: Carte des vitesses annuelles moyennes du vent à 10m du sol	20

### **Chapitre I : Etude Bibliographique**

Figure I-1: Les couches de l'atmosphère	26
Figure I-2: Vue schématique de la couche limite atmosphérique	29
Figure I-3: Les vents géostrophiques	34
Figure I-4: Les brises vents de Mer	35
Figure I-5: Les brises vents de montagne	36
Figure I-6-a: Anémomètre	36
Figure I-6-b: Girouette	37
Figure I-7: La rose des vents	39
Figure I- 8: Composante d'une éolienne de forte puissance	39
Figure I- 9: Courbes caractéristiques des aérogénérateurs	43
Figure I- 10: Origine du bruit mécanique	44
Figure I- 11: Niveau sonore par élément	49
Figure I- 12: Insertion paysagère des éoliennes	49
Figure I- 13: Projection d'ombres d'une éolienne	51
Figure I- 14: Impact sur les oiseaux	54
Figure I- 15: Estimation du nombre d'oiseaux tués par an (Pays Bas)	55

### **Chapitre II : Analyse de l'état initial des sites étudiés**

Figure II- 1: Carte des stations de mesure de vent	63
Figure II- 2: Carte des grands ensembles du nord algérien et principaux sites	64
Figure II- 3: Température moyenne mensuelle de six sites étudiés	67
Figure II- 4: Pluviométrie moyenne mensuelle de six sites étudiés en (mm)	68
Figure II- 5: Courbes de Weibull et histogrammes de fréquence, à 10m du sol	72
Figure II- 6: Courbes Hybride Weibull et histogrammes de fréquence, à 10 m du sol	74
Figure II-7: Roses des fréquences de vent pour les sites côtiers à 10m du sol	75
Figure II- 8: Roses des fréquences de vent pour les sites des hauts plateaux à 10m du sol	75
Figure II- 9: Carte de la répartition démographique de l'Algérie	81

### **Chapitre III : Choix des sites et dimensionnement des parcs éoliens**

Figure III-1 : Courbes des coefficients d'efficacité de l'éolienne en fonction de la vitesse	96
--	----

Figure III- 2 : Densité de puissance moyenne pour les sites étudiés	97
Figure III- 4 : Facture capacité pour les sites étudiés	98
Figure III- 5 : Planification du parc éolien	100
Figure III- 6 : Planification du parc éolien de 9MW à Oran	101
Figure III- 7 : Parc éolien virtuel à Oran	101
Figure III- 8 : Planification du parc éolien de 9MW à Bejaia	102
Figure III- 9 : Parc éolien virtuel à Bejaia	102
Figure III- 10 : Planification du parc éolien de 9MW à Annaba	103
Figure III- 11 : Parc éolien virtuel à Annaba	103
Figure III- 12 : Planification du parc éolien de 9MW à Kasr-Chellala	104
Figure III- 13 : Parc éolien virtuel à Kasr-Chellal	105
Figure III- 14 : Planification du parc éolien de 9MW à M'sila	105
Figure III- 15: Parc éolien virtuel à M'sila	106
Figure III- 16: Planification du parc éolien de 9MW à Tiaret	106
Figure III- 17: Parc éolien virtuel à Tiaret	107
Figure III- 18 : Répartition des coûts d'investissement pour un parc éolien	107

#### **Chapitre IV : Impacts environnementaux des parcs éoliens**

Figure IV- 1 : Les trois régions distinctes pour la détermination de l'atténuation au sol	125
Figure IV- 2 Organigramme de la propagation du bruit produit par un parc éolien	127
Figure IV- 3 : Propagation du bruit dans le parc d'Oran	128
Figure IV- 4: Propagation du bruit dans le parc de Bejaia	128
Figure IV- 5: Propagation du bruit dans le parc d'Annaba	129
Figure IV-6 : Propagation du bruit dans le parc de Kacer-Chellela	130
Figure IV- 7 : Propagation du bruit dans le parc de M'sila	130
Figure IV- 8 : Propagation du bruit dans le parc de Tiaret	131
Figure IV- 9 : Simulation informatique de l'impact visuel des éoliennes sur le paysage en utilisant Wind pro pour Oran	135
Figure IV- 10 : Simulation informatique de l'impact visuel des éoliennes sur le paysage en utilisant Wind pro pour Bejaia	135
Figure IV- 2 : Simulation informatique de l'impact visuel des éoliennes sur le paysage en utilisant Wind pro pour Annaba	136
Figure IV- 3 : Simulation informatique de l'impact visuel des éoliennes sur le paysage en utilisant la Wind pro Software pour Kacer-Chellela	136
Figure IV- 4 : Simulation informatique de l'impact visuel des éoliennes sur le paysage en utilisant Wind pro pour M'sila	137
Figure IV- 5 : Simulation informatique de l'impact visuel des éoliennes sur le paysage en utilisant Wind pro pour Tiaret	137

## Nomenclature

$a$	Facteur d'actualisation	
$A$	Atténuation en bande d'octave	dB
$A_{atm}$	Atténuation due à l'absorption atmosphérique	dB
$A_{bar}$	Atténuation due à une barrière	dB
$A_{div}$	Atténuation due à la divergence géométrique	dB
$A_{misc}$	Atténuation due à divers autres effets	dB
$A_{sol}$	Atténuation due à l'effet de sol	dB
$C, C_1, C_2$	Facteur d'échelle de Weibull	m / s
$C_{am}$	Coût liés à la maintenance	USD
$C_e$	Coefficient d'efficacité de l'éolienne	
$C_{ep}$	Coût du kWh produit	USD
$CF$	Facteur de capacité	
$C_{it}$	Coût d'investissement global	USD
$C_{met}$	Correction climatique	dB
$C_p$	Coefficient de puissance	
$C_{ta}$	Coût total actualisé	USD
$D$	Diamètre du rotor	M
$D$	Distance entre la source et le point d'impact	m
$D_c$	Correction de directivité	dB
$D_{\Omega}$	Directivité de la source	dB
$d_p$	Distance entre la source sonore et le point d'impact, projetée au sol	m
$E$	Energie moyenne récupérable sur une année	kWh
$E_c$	Energie cinétique	KWh
$F$	Fréquence	Hz
$f(V)$	Densité de probabilité de la distribution	
$F_o$	Fréquence des vents calmes	
$G$	Facteur de sol	
$H_1, H_2$	Hauteur	M
$h_r$	Hauteur du point d'impact du bruit	m
$h_s$	Hauteur de la source au-dessus du sol	M
$k, k_1, k_2$	Facteur de forme	
$L$	Longueur de tuyau parcourue chaque seconde par le vent	M
$L_{AT}$	Niveau de pression acoustique	dB
$L_{JT}(DW)$	Niveau continu équivalent sous le vent par bande d'octave	dB
$L_{WA}$	Bande d'octave niveau de puissance acoustique	dB

$M$	<i>Masse du volume de vent ou d'air</i>	$Kg$
$g$	<i>Rendement de la génératrice</i>	
$m$	<i>Rendement du multiplicateur</i>	
$P$	<i>Puissance du vent</i>	$W$
$p_0$	<i>Pression acoustique de référence (= <math>20 \times 10^{-6}</math>)</i>	$Pa$
$p_a$	<i>Pression acoustique instantanée pondérée A</i>	$Pa$
$P_{eff}$	<i>Puissance éolienne réellement utilisable</i>	$W$
$P_n$	<i>Puissance nominale</i>	$W$
$\bar{p}$	<i>Puissance moyenne d'éolienne</i>	$W$
$r$	<i>Taux d'actualisation</i>	
$S$	<i>Surface de la roue</i>	$m^2$
$T$	<i>Intervalle de temps donné</i>	$S$
$V$	<i>Vitesse du vent</i>	$m/s$
$V_m$	<i>Vitesse moyenne</i>	$m/s$
$Z$	<i>Altitude</i>	$M$
	<i>Coefficient d'atténuation atmosphérique</i>	$dB/km$
$\Theta$	<i>Température ambiante</i>	$^{\circ}k$
	<i>Masse volumique de l'air</i>	$Kg/m^3$
	<i>Ecart type</i>	$m/s$

# ***INTRODUCTION GENERALE***

## **INTRODUCTION GENERALE**

La consommation d'énergie, dans le courant du siècle dernier, a considérablement augmenté à cause de l'industrialisation massive. Les prévisions des besoins en énergie pour les années à venir ne font que confirmer, voir amplifier cette tendance, notamment compte tenu de l'évolution démographique et du développement de certaines zones géographiques, en particulier en Asie.

D'une part, les gisements des ressources énergétiques traditionnelles, d'origines principalement fossiles, ne peuvent être exploités que pour quelques décennies, ce qui laisse présager une situation de pénurie énergétique au niveau mondial de façon imminente [1].

D'autre part, les déchets des centrales nucléaires posent d'autres problèmes en termes de pollution des déchets radioactifs, du démantèlement prochain des vieilles centrales et du risque industriel [2].

Pour subvenir aux besoins en énergie de la société actuelle, il est nécessaire de trouver des solutions adaptées et de les diversifier. Actuellement, il y a principalement deux façons possibles d'agir [3]. La première est de diminuer la consommation des récepteurs d'énergie et augmenter la productivité des centrales énergétiques en améliorant respectivement leur efficacité. Une deuxième méthode consiste à trouver et développer de nouvelles sources d'énergie.

Dans l'immédiat, nous disposons de ressources en énergie renouvelable inépuisables, que nous sommes en mesure d'exploiter de plus en plus facilement et proprement. Néanmoins, longtemps négligées, les techniques d'extraction de la puissance de ces ressources demandent des recherches & développements plus approfondis visant à fiabiliser, baisser les coûts (de fabrication, d'usage et de recyclage) et d'augmenter l'efficacité énergétique.

De plus le niveau des émissions de gaz à effet de serre est actuellement supérieur de 14% de l'objectif prévu pour 2020 comme indiqué par le Programme des Nations Unis pour l'environnement (PNUE) [4] .

Au lieu de diminuer, la concentration des gaz à effet de serre, comme le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), on a une augmentation dans l'atmosphère de près de 20% depuis 2000 [4].

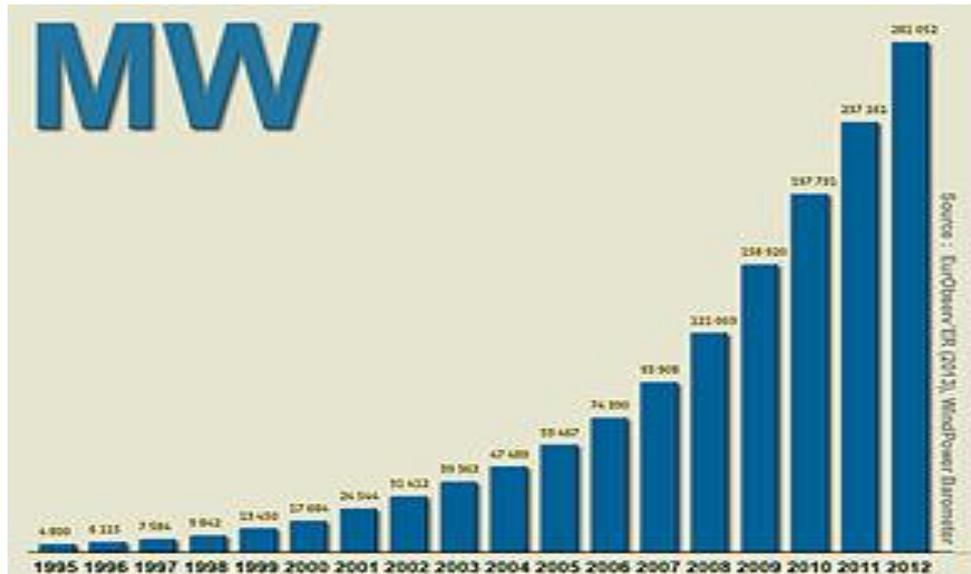
Si aucune mesure n'est prise rapidement, les émissions devraient atteindre 58 gigatonnes d'ici huit ans, d'après le rapport du PNUE auquel ont contribué 55 scientifiques de plus de 20 pays [4]. Cela entraînera un écart encore plus important que celui prévu par les évaluations de 2010 et de 2011 du PNUE, suite aux prévisions de croissance économique dans les principales économies en développement.

Pour cela on observe une augmentation considérable des investissements en faveur des nouvelles énergies renouvelables à l'échelle mondiale, qui s'élevaient à près de 260 milliards de dollars en 2011. Ces sources d'énergies renouvelables participent également à la sécurité d'approvisionnement et au développement local.

De plus, elles s'inscrivent doublement dans le développement durable : d'une part, en permettant aux générations futures d'économiser des ressources fossiles épuisables et d'autre part en ne produisant ni gaz ni déchets susceptibles d'affecter le développement des générations actuelles et futures.

Les atouts de l'énergie éolienne ont été reconnus au-delà de nos frontières avec la mise en place de politiques nationales incitatives. La puissance totale d'énergie éolienne installée au niveau mondial est de 42 000 MW. Elle est en forte croissance (17 000 MW début 2001) et l'on prévoit une puissance installée de plus de 83 000 MW en 2007, essentiellement en Europe.

La situation des pays européens est contrastée, avec quelques pays dominant largement la scène comme l'Allemagne, le Danemark et l'Espagne.



**Figure 1: Capacité (puissance en MW) éolienne installée de 1995 à 2012 dans le monde [9].**

En 2007, l'Allemagne disposait de 22,3 GW de puissance éolienne installée, les États-Unis 16,8 GW, l'Espagne 15,1 GW, l'Inde 8 GW, la Chine 6,1 GW et la France 2,4 GW (uniquement à terre) 8,9. En 2008, les États-Unis étaient devenus le premier pays pour la capacité d'énergie éolienne avec 25 170 MW installés devant l'Allemagne (23 902 MW<sup>10</sup>). Ce secteur employait en 2008 environ 85 000 Américains [9].

En 2010 la Chine détrône les États-Unis avec 42 GW (soit plus que 60 % de la puissance du parc nucléaire français) de puissance installée contre 40 GW pour les Américains.

Selon l'Observatoire des Énergies Renouvelables, l'éolien est actuellement la filière énergétique la plus dynamique dans le monde et plus particulièrement dans l'Union européenne où la production d'électricité éolienne a augmenté de 37,8 % par an en moyenne de 1993 jusqu'en 2002. Cette croissance a atteint 59 % par an sur la même période pour la France, qui était largement en retard dans ce domaine. Selon la même source, pour les années 2003-2004, la croissance dans l'Union européenne reste soutenue avec un taux de 28,9 % annuel (42,9 % en France) sur ces deux années<sup>12</sup>, et représente désormais 12,4 % de la production d'ENR (énergies renouvelables) de l'UE, en passe de dépasser la production à partir de biomasse (production : 12,9 %, croissance : 10,8 %) comme 2e source électrique d'origine renouvelable, après l'hydraulique (production : 73,3 %, croissance nulle).

Il n'en reste pas moins que la transition vers une économie verte, profitable à tous et à faibles émissions de carbone, est bien trop lente et que les chances d'atteindre l'objectif de 44 Gt diminuent d'année en année.

La prise en compte des facteurs environnementaux doit intervenir dès les études préalables à un projet éolien.

Le choix de la zone d'étude ne doit obéir ni aux seuls critères techniques garantissant la présence d'un vent suffisant et des possibilités de raccordements routier et électrique, ni uniquement aux opportunités foncières. La zone d'étude doit être sélectionnée, dès les investigations préalables, à partir des enjeux environnementaux locaux.

La démarche doit être la suivante :

- Identification des contraintes dans l'aire d'étude retenue (identification des impacts majeurs potentiels et définition des enjeux environnementaux à partir d'études préalables).
- Recherche des sites possibles d'implantation.
- Comparaison des différents sites potentiels d'implantation et identification du site offrant le plus d'avantages vis-à-vis des critères environnementaux, techniques, économiques et sociaux.
- Sur le site retenu, conduite d'études plus approfondies pour la caractérisation de l'environnement, des impacts potentiels et des mesures réductrices nécessaires.
- Rédaction du rapport d'étude d'impact, puis soumission à l'instruction administrative et à l'avis du public.

L'Algérie s'engage avec détermination sur la voie des énergies renouvelables afin d'apporter des solutions globales et durables aux défis environnementaux et aux problématiques de préservation des ressources énergétiques d'origine fossile.

Ce choix stratégique est motivé par l'immense potentiel en énergie solaire. Cette énergie constitue l'axe majeur du programme qui consacre au solaire thermique et au solaire photovoltaïque une part essentielle.

Le solaire devrait atteindre d'ici 2030 plus de 37% de la production nationale d'électricité.

Malgré un potentiel assez faible, le programme n'exclut pas l'éolien qui constitue le second axe de développement et dont la part devrait avoisiner les 3% de la production d'électricité en 2030.

L'Algérie prévoit également l'installation de quelques unités de taille expérimentale afin de tester les différentes technologies en matière de biomasse, de géothermie et de dessalement des eaux saumâtres par les différentes filières d'énergie renouvelable.

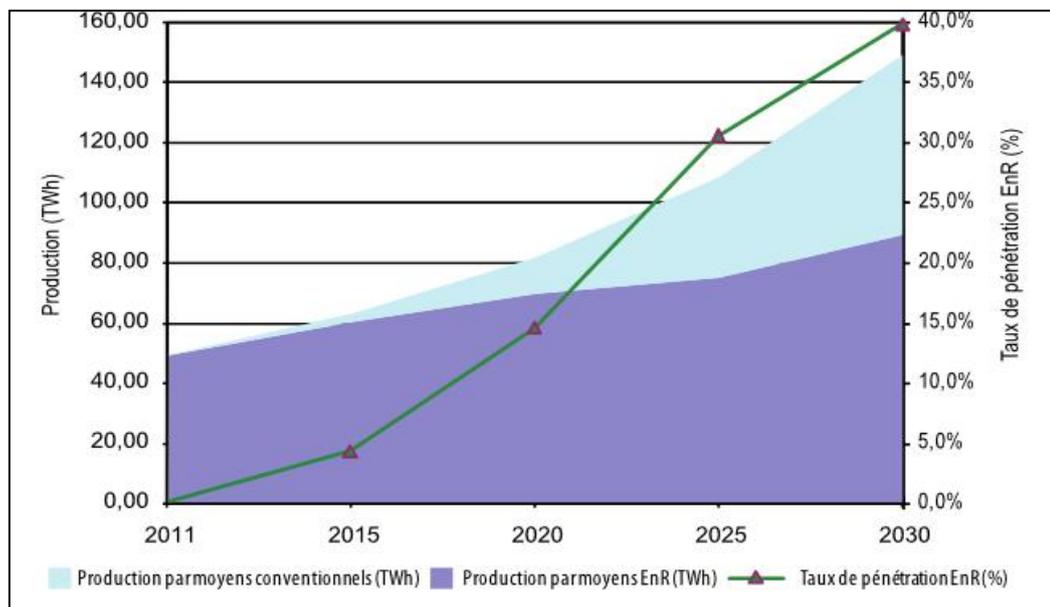
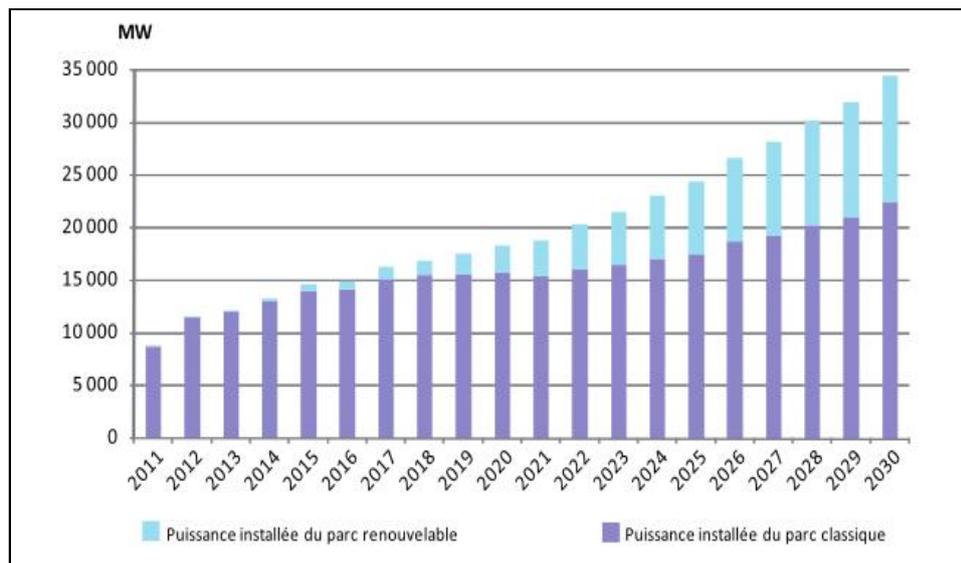


Figure 2: Pénétration des énergies renouvelables dans la production nationale en TWh [7] .

Le programme des énergies renouvelables est défini ainsi pour les différentes phases :

- d'ici 2013, il est prévu l'installation d'une puissance totale de l'ordre de 110 MW ;
- à l'horizon 2015, une puissance totale de près de 650 MW sera installée ;
- d'ici 2020, il est attendu l'installation d'une puissance totale d'environ 2 600 MW pour le marché national et une possibilité d'exportation de l'ordre de 2 000 MW ;
- d'ici 2030, il est prévu l'installation d'une puissance de près de 12 000 MW pour le marché national ainsi qu'une possibilité d'exportation allant jusqu'à 10 000 MW.

Actuellement, la puissance éolienne totale installée en Algérie est insignifiante. Cependant, une première ferme éolienne de 10 MW de puissance sera implantée à Adrar. Cette ferme devait être fonctionnelle en 2012. Par ailleurs, le ministère de l'énergie et des mines a projeté, dans son programme de développement des Énergies Renouvelables, d'installer sept autres centrales éoliennes d'une puissance totale de 260 MW à moyen terme [3], pour atteindre 1700 MW [4] l'horizon 2030.



**Figure 3: Prévision énergétique de la production nationale en MW [7].**

Ce programme prévoit aussi de lancer l'industrialisation de certains éléments ou composants d'aérogénérateurs, tels que les pales.

Dans ce contexte général, notre étude s'intéresse à la filière éolienne qui semble une des plus prometteuses avec un taux de croissance européen et mondial très élevé.

Les moulins à vent sont les ancêtres des éoliennes, ils convertissaient l'énergie éolienne en énergie mécanique de façon à créer une force qui permettait par exemple de moudre de la farine. Mais le problème était que l'énergie devait être utilisée immédiatement.

Malheureusement ces ressources sont mal ou peu exploitées. Pour utiliser le vent comme source d'énergie, il faut connaître le potentiel éolien d'une région.

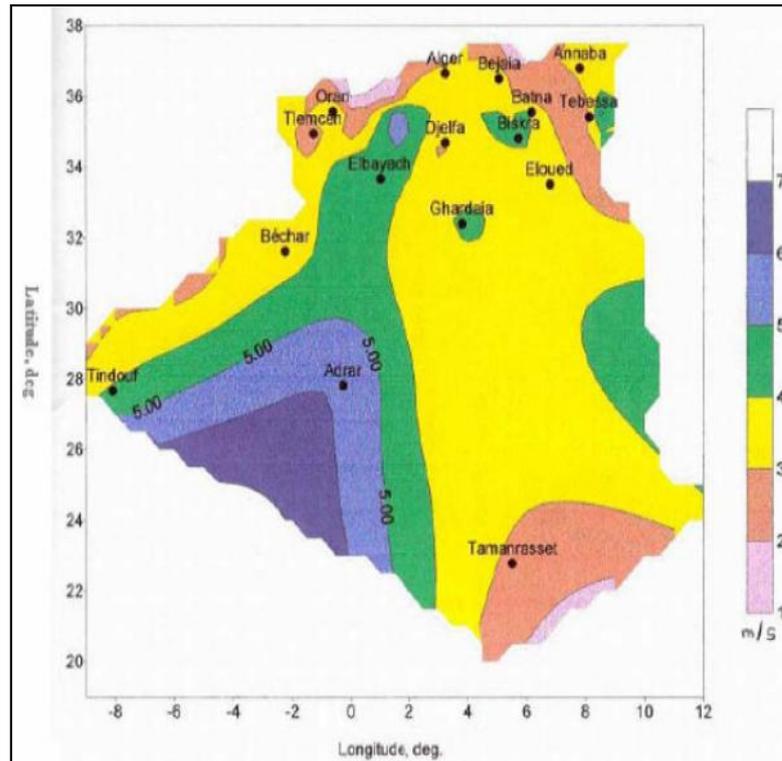
Les sites étudiés devraient être balayés durant toute l'année par des vents forts mais pour l'exploitation idéale de cette énergie, il faut connaître tous les impacts négatifs sur l'environnement.

L'objectif de notre travail est de dimensionner et étudier les impacts d'un parc éolien de 9MW dans six sites retenus, trois choisis dans la zone côtière et les trois autres se trouvent dans les hauts plateaux Algériens.

Dans le premier chapitre on a fait une étude bibliographie, on s'intéresse à la source de l'énergie éolienne en donnant un aperçu de l'impact du terrain sur la nature de vent et la spécificité de climat, nous abordons aussi la structure interne d'une éolienne, puis nous expliquons comment l'énergie du vent est transformée en énergie électrique .

Nous citons et analysons l'ensemble des technologies intervenant dans le fonctionnement d'une éolienne, en passant par la construction civile des tours d'éoliennes montrant qu'une éolienne fait appel à un vaste champ de connaissances technologiques et scientifiques [8], et pour terminer cette partie en va citer les différents impacts préalables à l'installation d'aérogénérateurs .

Le potentiel éolien diverge selon la situation géographique. Ainsi au nord du pays, le potentiel éolien se caractérise par une vitesse moyenne des vents modérée (1 à 4 m/s) avec des microclimats autour d'Oran, Annaba, sur les hauts plateaux et à Biskra. Au Sud, la vitesse moyenne des vents dépasse les 4m/s, plus particulièrement au Sud-Ouest, avec des vents qui dépassent les 6m/s dans la région d'Adrar.



**Figure 4: Carte des vitesses annuelles moyennes du vent à 10m du sol[6].**

Dans le deuxième chapitre on va présenter l'analyse de l'état initial des sites étudiés et de leur environnement (lieu, extension géographique, quantification). On a retenu trois sites sur la cote algérienne (ORAN, BEJAIA, ANNABA) et trois autres sites dans les hauts plateaux (TIARET, M'SILA, KSAR-CHELLALA). Les caractères spécifiques (aspect remarquable, originalité, rareté) et significatifs (qualité des milieux, niveau de protection) de ces sites seront pris en considération.

L'état initial de l'environnement constitue aussi le document de référence pour apprécier les conséquences du projet sur l'environnement et la remise en état du site à la fin de l'exploitation.

Le troisième chapitre est consacré aux choix des sites et au dimensionnement des parcs éoliens. On s'est intéressé à la planification des parcs éoliens avec une puissance nominale de 9MW, en fonction des spécificités de chaque site. Pour cela on a opté pour la simulation, de plus on s'est penché sur le rendement énergétique et le cout de projet pour chaque site.

Enfin le dernier chapitre on a évalué les différents impacts environnementaux de ces parcs éoliens, en montrant les effets directs et indirects, temporaires et permanents du projet sur l'environnement, en particulier sur la faune, la flore, les paysages, le sol, l'eau, l'air, le climat, les milieux naturels et les équilibres biologiques, sur la protection des biens et du patrimoine culturel et milieu humain etc. De plus un intérêt particulier est porté à l'impact sonore et visuel des éoliennes. On termine notre étude par quelques mesures d'atténuation des Impacts à prendre en considération.

Enfin nous terminons notre travail par une conclusion et des perspectives.

## Bibliographie

- [1] R. Redjem, Étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne, Mémoire de magistère, université de Constantine, (2009).
- [2] OCDE, Perspectives de l'énergie nucléaire, Sommaire exécutif, (2008).
- [3] A. Mirecki, Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance, thèse doctorat, Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique Industrielle de l'enséiht, unité mixte de recherche CNRS(2005), N° 5828.
- [4] ONU, Bulletin quotidien, les changements climatiques, Section des services de l'information sur Internet du Département de l'information de l'ONU, (2012).
- [5] A E M E, Guide de l'étude d'impact sur l'environnement des parcs éoliens, Guide, France (2004).
- [6]N. Broutin, S .Bendjeddou et C.Masegosa, Les énergies renouvelables en Algérie, Prestation réalisée sous système de management de la qualité certifié AFAQ ISO 9001, (2009).
- [7]SATINFO, Programme des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique, Groupe Sonelgaz, ministère de l'énergie et des mines,(2011).
- [8] D. Thomas, Une microsonde électronique en géologie, journal de la Faculté Polytechnique de Mons, 21e année (2012), n°47.
- [9] GWEC(2013), Référence Manuel, <http://www.gwec.net/>, (Accédé en Avril 2013).

## *Chapitre I*

### *Etude Bibliographique*

Le mot éolien vient du Grec (Éole) qui est le dieu des vents. Les éoliennes utilisent l'énergie du vent de façon à la transformer en énergie électrique. Leurs pales sont actionnées par le vent. Elles sont reliées à un axe qui entraîné par leur mouvement actionne un moteur permettant ainsi de créer de l'énergie électrique.

Dans la première partie de ce chapitre on s'intéresse à la source de l'énergie éolienne et à l'origine du vent en donnant un aperçu de l'impact du terrain sur la nature de vent et la spécificité du climat dans la région

Dans la deuxième partie nous abordons la structure interne d'une éolienne, puis nous expliquons comment l'énergie du vent est transformée en électricité. Nous citons et analysons l'ensemble des technologies intervenant dans le fonctionnement d'une éolienne, en passant par la construction civile des tours d'éoliennes montrant qu'une éolienne fait appel à un vaste champ de connaissances technologiques et scientifiques.

Dans la troisième partie nous présentant les impacts d'aérogénérateurs pour pouvoir analyser l'impact des machines sur l'environnement. Cette analyse met en évidence les conséquences de l'installation des éoliennes sur les milieux physiques et paysagers tout en accordant de l'importance à l'impact du bruit et l'impact Visual. Ces derniers sont importants car si, de par leur gabarit, les éoliennes marquent fortement le paysage, elles ont aussi des conséquences sur la vie des riverains.

## **I-1 : ORIGINE ET TYPES DES VENTS**

### **Introduction**

L'environnement est l'ensemble des éléments naturels et culturels dans lesquels les êtres vivants se trouvent.

L'environnement biophysique (biologique et physique) des espèces représente l'environnement naturel, tandis que l'environnement humain représente un environnement culturel. Composé de conditions écologiques et sociologiques, l'environnement détermine la présence et l'existence des organismes vivants. Dans cette dynamique de territoire, la culture humaine en rupture avec l'environnement naturel résulte la pollution globale et locale planétaire.

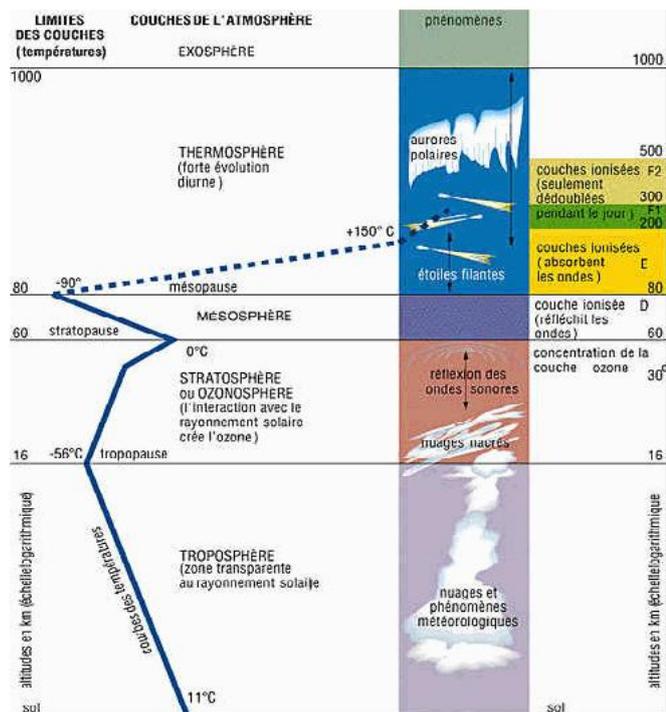
La petite planète bleu et vert appelée Terre est une sphère très particulière. Tous les organismes vivants qui l'habitent se trouvent à l'intérieur d'une mince couche composée d'air, d'eau et de terre d'environ 15 kilomètres d'épaisseur, qu'on appelle biosphère. La biosphère peut être divisée en trois couches : l'atmosphère (l'air), l'hydrosphère (l'eau) et la lithosphère (le sol). Toutefois, c'est l'atmosphère, à cause de ses caractéristiques particulières, qui rend la planète habitable par les êtres humains, les animaux et les plantes tels qu'on les connaît.

### **I-1-1 L'atmosphère**

L'atmosphère est un mélange de gaz et de particules qui entourent le globe. Vue de l'espace, elle forme une fine couche de lumière bleue foncée sur l'horizon. Elle est constituée de couches qui forment des anneaux autour de la Terre et s'étend sur quelques centaines de kilomètres d'altitude, mais confinée en majeure partie sur une hauteur de 50 kilomètres au-dessus de la surface terrestre (voir figure I-1).

La couche de l'atmosphère la plus proche de la surface est la troposphère, qui s'étend jusqu'à environ 15 kilomètres d'altitude.

La troposphère contient des gaz essentiels à la vie et sont présents à l'état naturel, comme l'oxygène et l'azote, ainsi que la majeure partie de la vapeur d'eau de l'atmosphère.



**Figure I-1: Les couches de l'atmosphère [18].**

Au-dessus de la troposphère jusqu'à environ 35 kilomètres d'altitude, on trouve la stratosphère, qui contient la couche d'ozone, le bouclier naturel de la Terre faisant obstacle aux rayons solaires. La troposphère et la stratosphère forment 99 % de notre atmosphère. Le reste s'étend sur plusieurs centaines de kilomètres au-dessus de la stratosphère; ce domaine comprend la mésosphère et la thermosphère.

### I-1-1-1 Les couches de l'atmosphère

#### Troposphère

La troposphère est la couche atmosphérique la plus proche du sol terrestre. Son épaisseur est variable: 7 kilomètres de hauteur au-dessus des pôles, 18 kilomètres au-dessus de l'équateur et environ 13 kilomètres, selon les saisons, dans la zone tempérée. C'est dans cette couche qu'on retrouve la plus grande partie des phénomènes météorologiques. Au fur et à mesure qu'on s'élève dans la troposphère la température décroît de façon régulière d'environ 6 degrés Celsius tous les 1000 mètres pour atteindre  $-56^{\circ}\text{C}$  à la tropopause (zone séparant la troposphère de la stratosphère). L'air près du sol est plus chaud qu'en altitude car la surface réchauffe cette couche d'air.

### Stratosphère

La stratosphère est au-dessus de la troposphère. C'est dans la stratosphère qu'on trouve la couche d'ozone. Cette dernière est essentielle à la vie sur Terre, car elle absorbe la majorité des rayons solaires ultraviolets qui sont extrêmement nocifs pour tout être vivant. Cette absorption provoque un dégagement d'énergie sous forme de chaleur. C'est pourquoi la température augmente lorsqu'on s'élève dans la stratosphère. Les mouvements de l'air y sont beaucoup moindres. Il s'agit d'un environnement beaucoup plus calme. La stratopause sépare la stratosphère de la mésosphère.

### Mésosphère

La mésosphère est au-dessus de la stratosphère. Dans cette couche, la température recommence à décroître avec l'altitude pour atteindre  $-80\text{ °C}$  à une altitude d'environ 80 km. Les poussières et particules qui proviennent de l'espace (les météores) s'enflamment lorsqu'elles entrent dans la mésosphère à cause de la friction de l'air. Ce phénomène nous apparaît sous la forme « d'étoiles filantes ».

### Thermosphère

La couche la plus haute est la thermosphère. Dans cette couche se trouve la région où près des pôles se forment les aurores boréales et australes. La température augmente avec l'altitude et peut atteindre environ 100 degrés Celsius. La thermosphère atteint des milliers de kilomètres d'altitude et disparaît graduellement dans l'espace. La thermosphère devient presque nulle et les molécules d'air sont très rares. La partie inférieure de la thermosphère est appelée l'ionosphère. L'ionosphère réfléchit les ondes courtes (ondes radio). Ces ondes, émises par un émetteur, rebondissent sur l'ionosphère et sont renvoyées vers la Terre. Si elles sont retournées avec un certain angle, elles peuvent faire presque le tour du globe.

#### **I-1-1-2 L'atmosphère standard**

L'Organisation de l'Aviation Civile Internationale (O. A.C.I) a défini une loi de variation de la pression atmosphérique et de la température qui permet de caractériser l'atmosphère standard. Cette caractéristique permet, entre autres, l'étalonnage d'instruments de vol et l'homologation de records.

### I-1-1-3 La couche limite atmosphérique

Couche limite atmosphérique [1], dont l'épaisseur est d'environ 1000m, est la couche qui contient 10% du recouvrement de la masse d'air totale et où le déplacement d'air est régi par le gradient de pression. Elle est contrôlée et modifiée partiellement par le frottement aérodynamique de la surface et l'importance de la stratification de la densité d'air qui résulte des différences de températures entre la surface du sol et l'air ambiant. Cette couche est fonction de plusieurs paramètres tel que :

- la vitesse du vent.
- la rugosité des sols.
- l'ensoleillement variable suivant les lieux et l'heure de la journée.

Près de la surface terrestre, la présence du sol perturbe l'écoulement de l'air et crée une forte turbulence (vent) alors que dans l'atmosphère libre, l'air sous l'action des forces de pression et de Coriolis est uniforme, horizontal et sa vitesse est constante (vent géostrophique). La couche limite atmosphérique (CLA), peut être divisée en deux sous-couches (figure I-2) à savoir la couche limite de surface (CLS) et la couche limite d'Eckermann.

#### La couche limite de surface (CLS)

Cette couche dont l'épaisseur varie entre 50 et 100 m, est la partie basse de la CLA. Elle est en contact direct avec la surface terrestre.

Dans cette région, les effets de la force de Coriolis sont négligeables devant les effets dynamiques engendrés par les frottements au sol ainsi que par la stratification thermique de l'air.

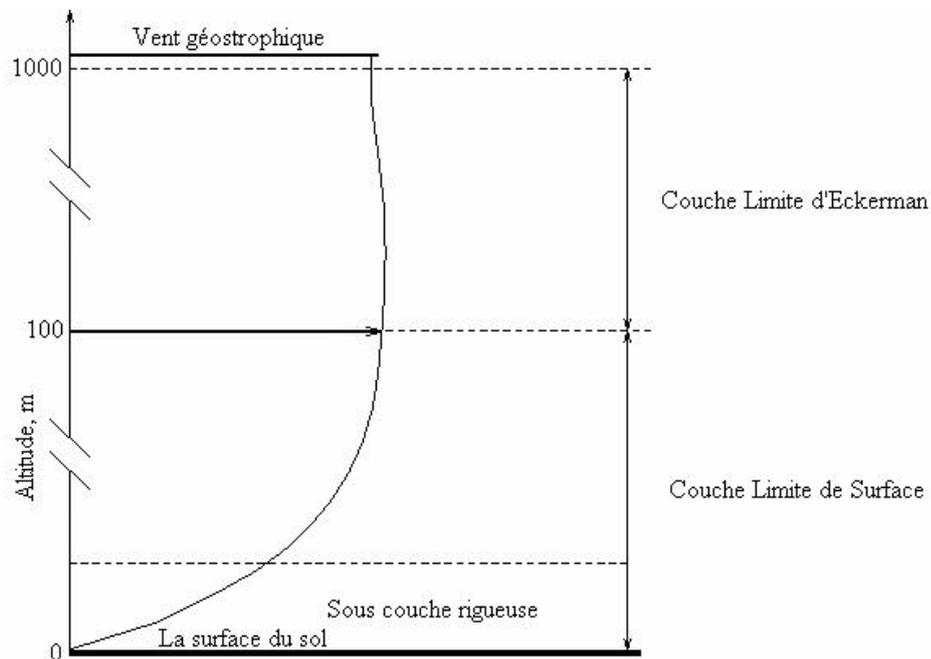
Elle peut être départagée en deux sous-couches :

- Une sous-couche inférieure située au-dessus du sol où les forces de frottement sont prédominantes, par rapport à la stratification thermique de l'air. Dans ce cas, le mouvement de l'air est turbulent et est directement lié à la rugosité du sol.
- La seconde sous-couche se situe juste au dessus de la première. Les effets de frottement y sont négligeables devant la stratification thermique de l'air.

### La couche limite d'Eckermann.

La couche limite d'Eckermann est la partie supérieure de la couche limite atmosphérique. Le vent est alors influencé par le frottement au sol, la stratification thermique de l'air et la force de Coriolis.

Avec l'altitude, les forces de frottement deviennent négligeable devant l'effet de la force de Coriolis, jusqu' à atteindre le vent géostrophique



**Figure I-2 : Vue schématique de la couche limite atmosphérique[1].**

Dans la couche limite de surface, la force Coriolis est négligeable et l'écoulement de l'air est régi par des turbulences d'origine [1]:

- mécanique : les turbulences sont générées par la proximité du sol qui modifie le profil de la vitesse du vent par la présence d'obstacle ou de discontinuité au sol
- thermique : les turbulences sont générées par la distribution de la température, due essentiellement aux différences de température résultantes du réchauffement et refroidissement, échange radiatif quotidien de la terre ainsi que de l'écoulement de l'air entre les régions chaudes et froides.

La sensibilité thermique de l'atmosphère est le rapport entre le gradient de température et le gradient adiabatique représentant l'augmentation de la température d'une masse d'air s'élevant adiabatiquement [1].

On distingue ainsi trois cas :

- les conditions atmosphériques instables
- les conditions atmosphériques neutres
- les conditions atmosphériques stables

#### **I-1-1-4 Les conditions atmosphériques instables**

Elles interviennent lorsque la température de l'air décroît plus vite que le gradient adiabatique des masses d'air. En s'élevant, ces masses se refroidissent moins vite que l'air environnant. Elles continuent alors à s'élever et sont remplacées par d'autres masses d'air provenant de la couche supérieure.

Quand le mouvement de l'air est fortement turbulent. Elles se manifestent durant la journée et spécialement pendant le lever du soleil

#### **I-1-2 Le climat**

D'année en année, on observe normalement à chaque endroit sur Terre un ensemble particulier et assez régulier de conditions météorologiques. Il y a des variations, mais l'ensoleillement, la quantité de précipitations, la gamme des températures et d'autres aspects du temps sont généralement comparables d'une année à l'autre. Ce sont ces conditions météorologiques moyennes qu'on appelle le climat.

Toutefois, pour déterminer le climat, on tient également compte des conditions extrêmes et exceptionnelles, des anomalies et de la variabilité. Le climat est souvent assimilé aux conditions météorologiques moyennes observées pendant plusieurs années.

Le climat terrestre varie de façon naturelle. Au fil des siècles et des millénaires, les cycles naturels du climat ont été marqués par des périodes de réchauffement et de refroidissement. Le climat exerce une influence sur l'ensemble des plantes et des animaux. Pour l'être humain, il détermine le choix des milieux et des modes de vie et influe sur la croissance et le bien-être.

Le climat peut être défini comme étant les conditions moyennes dans un endroit donné (température, précipitations, ...) calculées d'après des observations d'au moins 30 ans (défini par l'organisation mondiale).

Le climat désigne l'ensemble des conditions atmosphériques qui caractérise une région donnée, il est caractérisé par les valeurs moyennes, mais également par des variations et des extrêmes.

### **I-1-2-1 Le climat Méditerranéen**

Le climat méditerranéen est un type de climat tempéré (ou « tempéré chaud » ou « subtropical de façade ouest », selon les considérations), qui se caractérise par des étés chauds et secs et des hivers doux et humides. Le terme de « méditerranéen » s'explique par sa présence caractéristique autour de la mer Méditerranée, mais d'autres régions du monde possèdent les mêmes conditions climatiques. Il s'agit des façades Ouest des continents, entre 30 et 40° de latitude (Californie, centre du Chili, région du Cap en Afrique du Sud, Sud et Ouest de l'Australie).

En saison froide, des perturbations pluvieuses circulent principalement d'Ouest en Est sur la Méditerranée. Les deux tiers de celles-ci se forment sur la mer, les autres, originaires de l'océan Atlantique, sont réactivées au contact des eaux chaudes. Le gradient thermique vertical est souvent important. Sur les façades océaniques, les côtes sont touchées par les perturbations provenant de l'océan, qui atteignent leur maximum d'activité en hiver.

La chaleur et la sécheresse de l'été, l'irrégularité des précipitations de l'automne et la douceur de l'hiver sont des caractéristiques des régions de type méditerranéen. Le gel est assez rare, la nébulosité peu élevée et l'insolation importante. Les vents locaux, liés à la présence de couloirs et de reliefs montagneux, sont nombreux et assez violents : le Mistral en Provence Alpes Côte d'Azur, la Tramontane en Languedoc-Roussillon ou la Bora sur les côtes dalmates. Les précipitations sont d'une grande irrégularité selon les années.

Des averses, nombreuses et violentes, provoquent parfois des crues subites des cours d'eau, pouvant entraîner des inondations dramatiques (Bab El Oued Alger 10/11/2001).

### **I-1-2-2 La météorologie**

C'est l'étude des phénomènes atmosphériques tels que les nuages, les dépressions et les précipitations pour comprendre comment ils se forment et évoluent.

C'est une discipline qui traite principalement de la mécanique des fluides appliquée à l'air mais qui fait usage de différentes autres branches de la physique et de la chimie.

Elle permet donc d'établir des prévisions météorologiques en s'appuyant sur des modèles mathématiques à court comme à long terme. Elle est également appliquée pour la prévision de la qualité de l'air, pour les changements climatiques et pour l'étude dans plusieurs domaines de l'activité humaine (construction, trafic aérien)

### **I-1-2-4 Le vent**

L'air dont se compose l'atmosphère, exerce sur la terre une pression, appelée pression atmosphérique. Sur la surface de la terre, la pression atmosphérique n'est pas la même partout. Il existe des secteurs où règne une basse pression et des secteurs où règne une haute pression. L'air froid, plus lourd, descend, créant une zone de haute pression (HP). Inversement, l'air chaud, plus léger, monte naturellement dans les couches hautes de l'atmosphère avec pour conséquence la création d'une zone de basse pression (BP). La différence de pression entre ces deux masses d'air est à l'origine du vent. L'air contenu dans la haute pression a tendance à s'engouffrer dans la basse pression qui l'avoisine.

Le vent provient du déplacement d'une masse d'air de la haute vers la basse pression. Plus la haute pression est proche de la basse pression, plus le vent est fort.

L'air qui constitue l'atmosphère est un mélange de gaz et de particules solides ou liquides, concentrés dans la troposphère. Dans cette région, le déplacement de l'air par rapport à la surface terrestre, appelé vent, résulte de l'équilibre entre les forces en présence.

Pour un observateur à l'arrêt par rapport au sol, il existe quatre forces majeures qui agissent sur une partie élémentaire d'air :

- La force gravitationnelle.
- La force due au gradient de pression.
- La force de Coriolis
- La force de frottement.

### La force Gravitationnelle

Elle est la conséquence de l'attraction mutuelle des corps, cette force intervient à cause de la grande masse de la terre. Elle est dirigée vers le centre de la terre.

### La force de Pression

Dirigées des hautes pressions vers les basses pressions ces forces sont des gradient de pression résultant de l'échauffement inégal de l'air suivant les latitudes, nature des sols et la répartition des océans et des continents. Ces forces contribuent à mettre l'air en mouvement.

### La force de Coriolis

Cette force est le résultat de la rotation de la terre autour de son axe et est perpendiculaire à la vitesse du vent. Elle intervient dans les déplacements atmosphériques en raison de la faiblesse des forces contribuant à mettre l'air en mouvement.

### La force de frottement

Ces forces traduisent la friction turbulente de l'air avec le sol. Elles interviennent dans la couche limite atmosphérique. La force gravitationnelle et la force du gradient de la pression sont les deux forces qui peuvent initier un mouvement de l'air. Leurs actions se font ressentir près du sol dans une zone appelée couche limite atmosphérique.

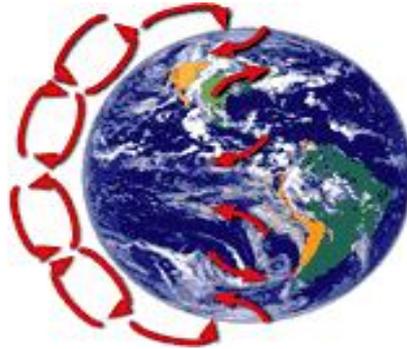
## **I-1-2-5 Les vents géostrophiques**

On les appelle aussi les vents globaux, produit d'écarts de température et des variations de pression, car le soleil réchauffe les régions situées autour de l'équateur, à la latitude  $0^\circ$ , bien plus qu'il ne réchauffe les autres parties du globe. Ayant une densité plus faible que l'air froid, l'air chaud s'élève jusqu'à une altitude d'environ 10 km. Ensuite il s'étend vers le nord et le sud. Si la terre ne tournait pas, les courants d'air iraient jusqu'aux pôles Nord et Sud avant de redescendre (suite au refroidissement) et de retourner à l'équateur mais L'air s'élève à l'équateur, s'étendant vers le nord et le sud dans la haute atmosphère.

Dans les deux hémisphères, à approximativement 30 degrés de latitude, la force de Coriolis empêche les courants d'air d'aller beaucoup plus loin. L'air en commençant de redescendre à cette latitude, il se crée une zone de haute pression (appelée aussi un anticyclone).

Lorsque l'air s'élève à l'équateur, il se crée au niveau du sol une zone de basse pression attirant des masses d'air du nord et du sud. Aux deux pôles, des anticyclones se produisent suite au refroidissement de l'air retenant la force de Coriolis. La surface du sol n'influe que peu sur la direction et la vitesse de ces vents.

On les trouve à des hauteurs supérieures à 1000m au-dessus du niveau du sol. Leurs vitesses peuvent être mesurées en utilisant des ballons-sondes.



**Figure I-3: Les vents géostrophiques [11].**

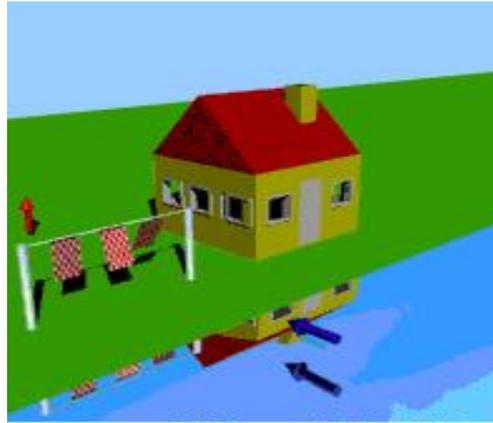
#### **I-1-2-6 Les vents de surface**

Jusqu'à environ 100 m de hauteur, l'influence de la surface du sol sur les vents est importante. Ainsi, comme nous allons voir par la suite, la rugosité du terrain ainsi que les obstacles naturels ou artificiels peuvent freiner les vents. A cause de la rotation de la terre, les directions des vents près de la surface diffèrent également un peu de celles des vents géostrophiques (cf. la force de Coriolis).

En matière d'énergie éolienne, ce sont les vents de surface et leur capacité énergétique qui présentent le plus grand intérêt.

##### Les brises de mer

En cours de journée, la terre se réchauffe plus rapidement que la mer, ce qui provoque un soulèvement de l'air chaud qui s'étend ensuite vers la mer. Ainsi, une dépression se crée près de la surface de la terre, attirant l'air froid provenant de la mer. On parle alors d'une brise de mer (figure I-4).



**Figure I-4 : Les brises vents de mer [11]**

Au crépuscule, il se produit souvent une période calme, les températures sur terre et sur mer étant plus au moins égales.

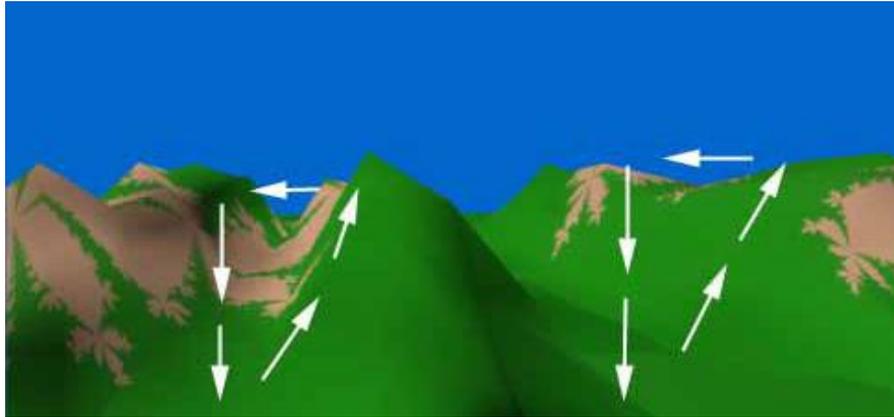
La nuit venue, le vent commence à souffler dans le sens inverse. En général, la vitesse de cette brise de terre est moins forte que celle de la brise de mer étant donné que la différence de température entre la terre et la mer est moins importante la nuit.

La mousson qui souffle en Asie du Sud-Est est en effet une brise de mer alternant avec une brise de terre à grande échelle, sa direction variant en fonction des saisons, et se produisant parce que la terre se réchauffe ou se refroidit beaucoup plus vite que la mer.

#### Brises de montagne

Les régions montagneuses donnent naissance à beaucoup de phénomènes climatologiques intéressants. La brise de vallée en est un exemple. Elle se produit sur les versants exposés au sud dans l'hémisphère Nord (au nord dans l'hémisphère Sud). Le réchauffement des versants et de l'air avoisinant fait tomber la densité de l'air. En conséquence, l'air commence à s'élever vers le sommet de la montagne, produisant ce que l'on appelle une brise montante. La nuit, le phénomène s'inverse et une brise descendante se produit. Si le creux d'une vallée est en pente, on peut observer l'effet dit de canyon, les vents montant et descendant le long des versants qui entourent la vallée.

Les vents s'écoulant le long des versants des montagnes peuvent être très violents. Comme exemple, on peut citer le Sirocco soufflant du Sud de Sahara vers la Méditerranée ainsi que le phénomène de Foehn que l'on trouve dans les Alpes.



**Figure I-5: Les brises vents de montagne [11].**

D'autres exemples de systèmes de vents locaux sont le Mistral qui pénètre dans la vallée du Rhône pour s'étendre ensuite vers la mer Méditerranée.

### **I-1-3 La mesure de la vitesse du vent**

La mesure de la vitesse du vent se fait le plus souvent par l'emploi d'un anémomètre à coupelles. Un tel anémomètre est muni d'un rotor de trois coupelles qui, sous l'effet du vent, se met à tourner autour d'un axe vertical. La vitesse de rotation est enregistrée électroniquement. En général, l'anémomètre est également doté d'une girouette indiquant la direction du vent. Au lieu de coupelles, l'anémomètre peut être muni d'une hélice, une solution qui est cependant assez rare.



**Figure I-6 a : anémomètre [19]**



**Figure I-6 -b : girouette [19]**

#### I-1-4 La rose des vents

Les mesures de vent peuvent être présentées à l'aide d'une rose des vents. Elle est un peu comme un compas de navigation qui divise l'horizon en secteurs angulaires. Pour chaque secteur, sont présentés :

- La fréquence du vent, c'est à dire le pourcentage du temps durant lequel le vent souffle dans ce secteur.
- La vitesse moyenne du vent multiplié par sa fréquence.
- La puissance disponible dans le vent.

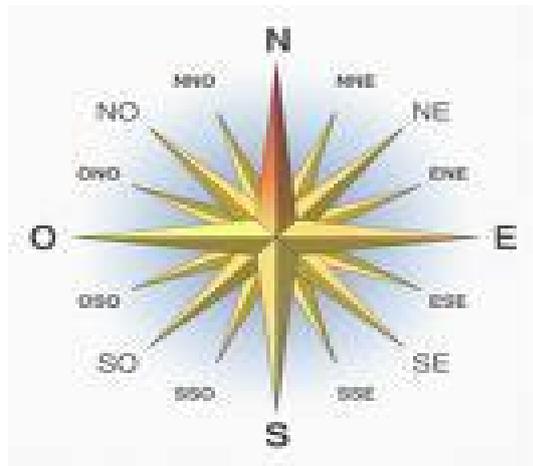


Figure I-7: Rose des vents [20].

Les roses des vents diffèrent d'une région à une autre. Elles constituent en fait une sorte d'empreinte climatologique.

Pour deux régions avoisinantes elles sont souvent très similaires. Pour cette raison, ce sera souvent suffisamment sûr de déterminer les directions du vent en interpolant les roses établies pour les villes voisines ; c.-à-d. en prenant la moyenne des résultats enregistrés. Cependant, de telles estimations s'avéreront souvent insuffisantes s'il s'agit de terrains complexes (régions montagneuses et côtières, entre autres).

Dans tous les cas, la rose des vents indique la distribution relative des directions du vent et non pas la vitesse réelle de ce dernier.

## I-2 EOLIENNES ET NOTION D'IMPACT

### Introduction

Pendant plusieurs décennies, l'énergie éolienne a servi à produire de l'énergie électrique dans des endroits reculés et donc non-connectés à un réseau électrique. Des installations sans stockage d'énergie impliquaient que le besoin en énergie et la présence d'énergie éolienne soient simultanés. La maîtrise du stockage d'énergie par batteries a permis de stocker cette énergie et ainsi de l'utiliser sans présence de vent, ce type d'installation ne concernant que des besoins domestiques, non appliqués à l'industrie.

Depuis les années 1990, l'amélioration technologique des éoliennes a permis de construire des aérogénérateurs de plus de 5 MW et le développement d'éoliennes de 10 MW est en cours. Ces unités se sont démocratisées et on en retrouve aujourd'hui dans plusieurs pays. Ces éoliennes servent aujourd'hui à produire du courant alternatif pour les réseaux électriques, au même titre qu'un réacteur nucléaire, un barrage hydro-électrique ou une centrale thermique au charbon. Cependant, les puissances générées et les impacts sur l'environnement ne sont pas les mêmes.

### I-2 Structure des éoliennes

Une installation est généralement constituée d'une éolienne, d'une tour avec de solides fondations et d'un ensemble d'équipements électriques pour le stockage de l'énergie produite ou pour gérer la connexion avec le réseau électrique local. La figure I- 7 présente les composantes d'une éolienne.

L'éolienne est pour sa part, composée d'un rotor bi ou tri pale, bien souvent à axe horizontal, d'une génératrice à courant continu ou d'un alternateur et d'une nacelle qui permet de fixer et supporter le rotor et la génératrice.

Dans certains cas, l'éolienne peut contenir un boîtier multiplicateur à engrenages pour relier le rotor et la génératrice, un empennage qui permet de l'orienter dans le vent, un système de contrôle du calage des pales pour optimiser la puissance

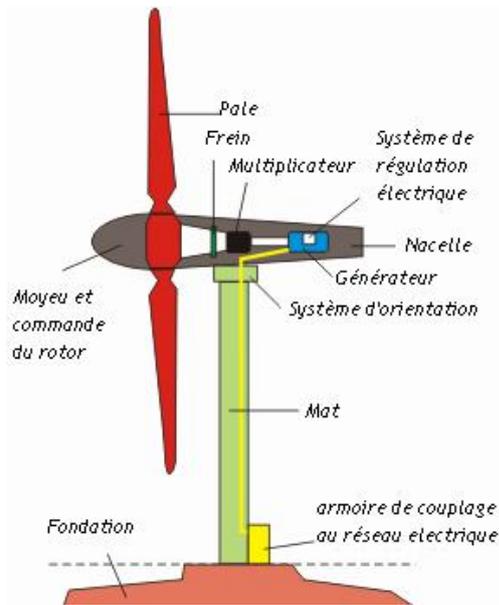


Figure I- 7: Composante d'une éolienne de forte puissance [2].

### I-2 -1-1 Différent types d'aérogénérateurs – caractéristiques $C_p$

Deux familles de voilures existent : les aérogénérateurs à axe vertical (VAWT) et à axe horizontal (HAWT). La figure I-8 donne une vue sur les coefficients de puissance  $C_p$  habituels en fonction de la vitesse spécifique, pour différents types d'éoliennes.

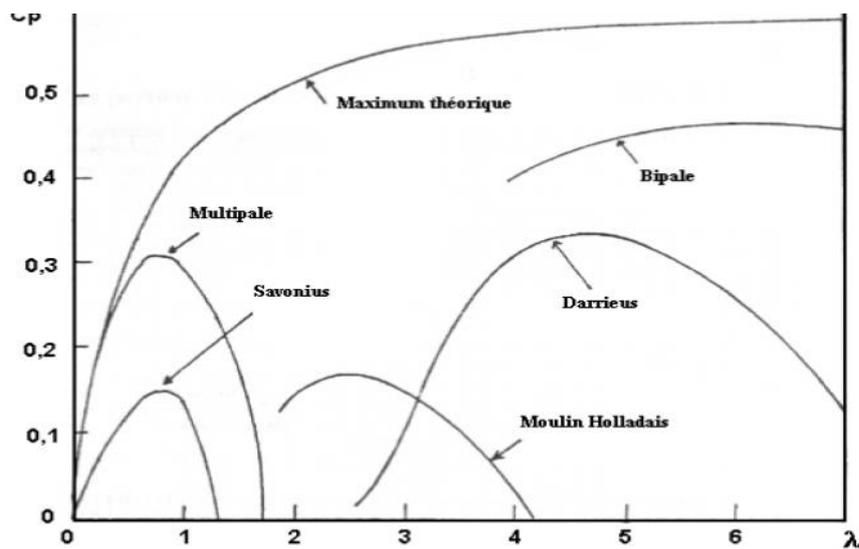


Figure I- 8: Courbes caractéristiques des aérogénérateurs[3].

### I-2 -1-2 Production d'énergie éolienne

Quelle est la part de l'éolien dans la production d'énergie électrique dans notre monde d'aujourd'hui ?

Pour répondre à cette question, on peut utiliser les chiffres de capacité de production d'électricité, ce qu'on appelle la puissance installée. Ces chiffres sont donnés en Mégawatts (MW, millions de watts,  $10^6$  ou en Gigawatts (GW, milliards de watts).

La capacité de production électrique totale installée dans le monde était à fin 2000 de l'ordre de 18.04 GW. La capacité de production éolienne atteignait, elle, 237.5 GW fin 2011, soit une multiplication par plus de 12 fois en 11 ans et une augmentation de 22% sur la dernière année (de 2010 à 2011).

Pays	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Chine	352	400	468	567	764	1266	2599	5899	12210	26010	41800	62733
États-Unis	2564	4258	4685	6370	6725	9149	11603	16819	25170	35159	40200	46919
Allemagne	6095	8754	12001	16629	18428	18500	20622	22247	23903	25777	27191	29060
Espagne	2535	3337	4830	6202	8263	10028	11630	15145	16754	19149	20623	21674
Inde	1267	1507	1702	2110	3000	4430	6270	7850	9600	10926	13065	15800
France	68	95	148	248	386	757	1567	2455	3404	4492	5970	6800
Italie	427	682	785	904	1265	1718	2123	2726	3736	4850	5797	6737
Royaume-Uni	409	474	552	684	888	1353	1963	2389	3241	4051	5204	6540
Canada	137	207	236	322	444	683	1460	1846	2369	3319	4008	5265
Portugal	83	131	194	289	522	1022	1716	2130	2862	3535	3706	4083
Danemark	2417	2383	2880	3110	3124	3128	3136	3125	3160	3465	3749	3871
Suède	241	295	345	404	452	509	571	831	1067	1560	2163	2907
Japon	142	275	334	506	896	1040	1309	1528	1880	2056	2304	2501
Pays-Bas	440	481	682	908	1078	1224	1559	1747	2225	2229	2269	2328
Australie	30	71	103	197	379	579	817	817	1494	1712	2020	2224
Turquie	19	19	19	21	21	201	65	207	333	801	1329	1799
Irlande	119	125	137	186	339	495	746	805	1245	1260	1392	1631
Grèce	247	272	276	365	473	573	756	873	990	1087	1323	1629
Pologne	5	22	28	58	58	73	156	276	472	725	1180	1616
Brésil	22	24	22	24	24	29	237	247	339	606	931	1509
Capacité totale mondiale	18040	24318	31184	41354	49461	59135	74176	93959	121335	158012	194680	237502

Tableau I- 1 : Production d'énergie éolienne mondiale 2000/2011 en MW[4].

## **I-2-2 Notion et étude d'impact**

Les projets éoliens doivent être réalisés de manière à prévenir les atteintes aux paysages, au patrimoine et à la qualité de vie des riverains. Dans cette perspective, l'étude d'impact constitue le seul moyen de fonder la décision. Elle facilite l'élaboration de projets prenant en compte les enjeux environnementaux et contribue au développement durable.

L'évaluation environnementale désigne l'étude descriptive et fonctionnelle des différents thèmes environnementaux : le milieu naturel (les écosystèmes, la faune, la flore, les habitats naturels ...) ; le milieu physique (la géographie, la topographie, l'occupation du sol, ...) ; le milieu humain (les activités humaines, les transports et l'environnement paysager).

Mais, c'est surtout la sensibilité du territoire sur lequel un projet est envisagé qui doit guider le porteur de projet : un petit projet dans un site sensible requiert des études qui peuvent être plus délicates, plus longues et plus onéreuses qu'un projet plus important mais dans un site peu sensible. L'ensemble des recommandations pour les études d'impact s'applique également pour les notices d'impact.

Pour certains thèmes (paysage, bruit,...), des recommandations spécifiques sont fournies dans le « Guide De l'Etude d'impact sur L'Environnement des Parcs Eoliens» [5].

### **I-2-2-1 Les objectifs de l'étude d'impact**

L'étude d'impact constitue la pièce maîtresse du dossier de demande de permis de construire. Elle permet de :

Concevoir un meilleur projet, pour le maître de l'ouvrage du projet, elle constitue le moyen de (dé) montrer comment il prend en compte les préoccupations d'environnement.

Eclairer l'autorité administrative sur la décision à prendre; l'étude d'impact contribue à informer l'autorité administrative compétente pour autoriser les travaux, à la guider pour définir les conditions dans lesquelles cette autorisation est donnée, et à définir les conditions de respect des engagements pris par le maître d'ouvrage. Informer le public et le faire participer à la prise de décision, la participation active et continue du public est essentiel notamment à la définition des alternatives et des variantes du projet étudié, ainsi qu'à la détermination des mesures pour l'environnement.

Dans notre travail un intérêt particulier est porté sur deux impacts majeurs : impact sonore et impact paysager.

### I-2-2-2 Impact sonore

Les premières générations d'éoliennes avaient un bruit relativement important. Les plus récentes ont bénéficié de nombreuses améliorations, ce qui a permis de réduire leurs émissions sonores. Des recherches pour la conception d'éoliennes moins bruyantes se poursuivent.

Le bruit des éoliennes repose sur une problématique de propagation acoustique à grande distance.

Le niveau sonore induit par un parc éolien dépend d'un nombre important de facteurs :

- intrinsèques à la source (puissance acoustique des éoliennes, taille du parc,...) ;
- liés à la configuration du terrain (topographie, nature du sol, géométrie éolienne- récepteur) ;
- liés aux conditions météorologiques ;
- liés au milieu environnant (zone rurale, zone industrielle, proximité d'axes routiers, présence de végétation...).

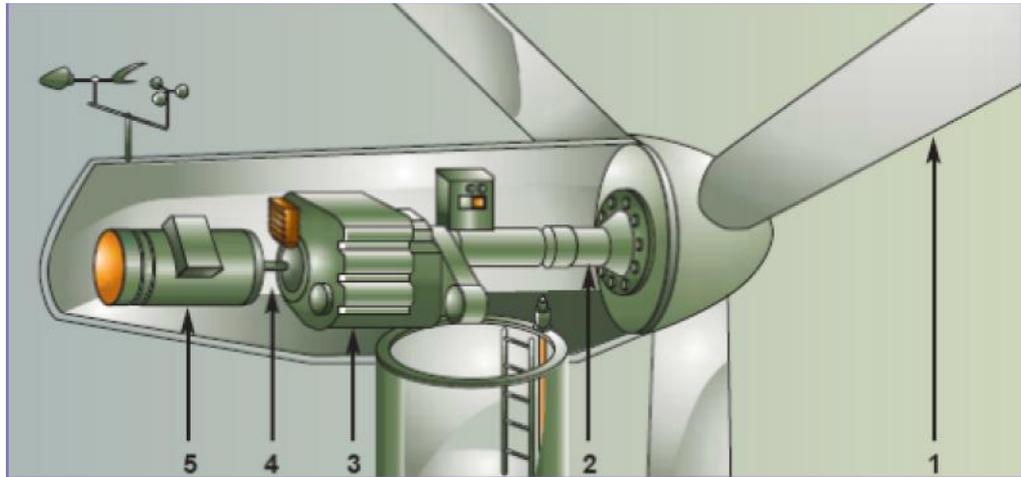
L'appréhension des niveaux sonores dus aux éoliennes va donc être orientée vers une prise en compte des émergences, comme c'est généralement le cas pour des bruits modérés.

Le bruit généré par une éolienne a deux origines : le bruit mécanique et le bruit aérodynamique.

#### Bruits d'origine mécanique

Le bruit mécanique provient du fonctionnement de tous les composants présents dans la nacelle. Les principaux composants générateurs de bruit sont le multiplicateur (sauf certains modèles récents), les arbres, la génératrice les équipements auxiliaires (systèmes hydrauliques, unités de refroidissement) [6]( voir figure I-9).

Le bruit émis est en large bande mais contient également des tons purs en relation avec les parties tournantes.



**Figure I- 9: origine du bruit mécanique [6].**

Entraîné par les pales (1), un premier arbre dit lent (2) attaque un multiplicateur (3) (une sorte de boîte de vitesse). Ce dernier ajuste, à sa sortie, la vitesse d'un nouvel arbre (4), qualifié cette fois de rapide, aux caractéristiques de la génératrice (5) qui produit l'électricité.

#### Bruits d'origine aérodynamique

Tout obstacle placé dans un écoulement d'air émet du bruit. La tonalité de ce bruit dépend de la forme et des dimensions de l'obstacle ainsi que de la vitesse de l'écoulement. Plus l'obstacle est vif, plus la tonalité est marquée. L'écoulement d'air peut également faire vibrer les surfaces. Dans l'industrie automobile, les exemples sont multiples (rétroviseur, portière, toit, capot, ...)

De nombreuses études [4] ont été menées pour mettre en relation la vitesse de l'écoulement avec le bruit émis. Tous les autres paramètres restant égaux, la pression sonore augmentera avec la puissance cinquième de la vitesse de la pale par rapport à l'air ambiant. C'est pourquoi la vitesse de rotation des éoliennes modernes, avec de grands diamètres de rotor, est très lente.

Tous ces bruits aérodynamiques sont dus à la présence de turbulences ou tourbillons dont les origines sont multiples :

- Présence de salissures ou d'imperfections sur le profil de la pale (trous, aspérités, fissures, ...) ;
- Turbulences liées au passage de l'air sur le coté intrados et extrados de la pale qui se rejoint pour créer des turbulences sur le bord de fuite ;
- Tourbillons en bout de pale dus aux surpressions /dépressions présentes dans cette zone.

Au niveau de la turbine de l'éolienne, le bruit n'est pas de 45 dB mais de 102 dB de puissance (voir Figure I- 10 et tableau I-2) à la source, le niveau de puissance sonore total d'une éolienne est de l'ordre de 102dB.

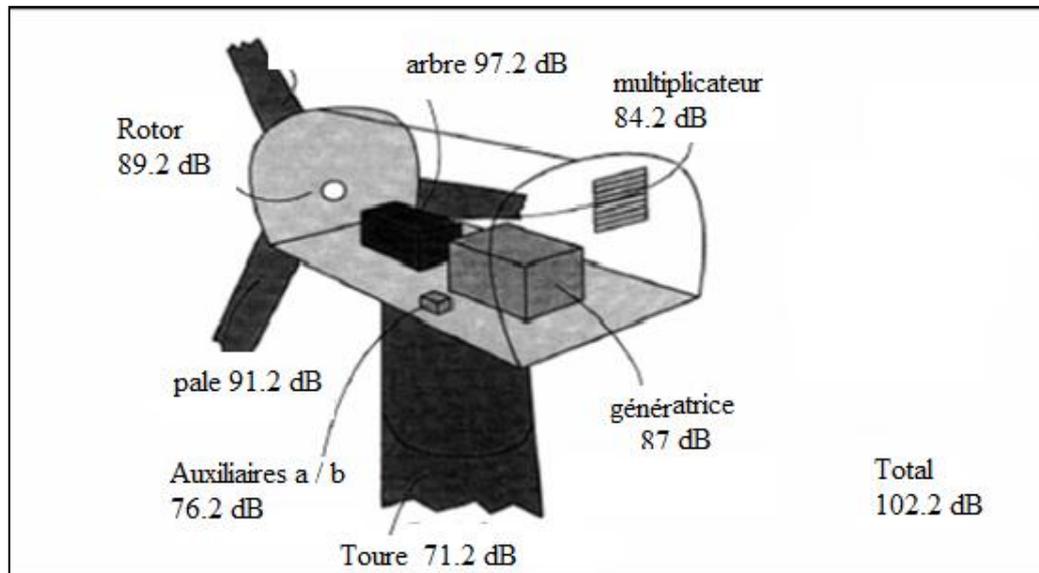


Figure I- 10: niveau sonore par élément d'éolienne [9].

<b>V (m/s)</b>	4	5	6	7	8	9	10	11
<b>L (dB)</b>	40	40	40	40	45	49	51	53

Tableau I-2: le niveau sonore du bruit résiduel en fonction de la vitesse [10].

### Réglementations

Les pays fixent des limites au bruit des éoliennes de deux façons : en s'appuyant sur des niveaux sonores absolus et le cas échéant sur des niveaux sonores relatifs en termes d'émergence exprimée en référence au bruit résiduel [7].

- Niveau absolu : Le bruit ambiant comprenant le bruit des éoliennes ne doit pas dépasser la valeur réglementaire visée : par exemple 35 dB (A) de nuit en façades des habitations.

Cette valeur est mesurée de façon différente selon les pays, mais elle reste une valeur limite.

Différents pays ont modulé ce niveau sonore absolu en fonction de la zone concernée (industrielle, commerciale, de loisirs, résidentielle, rurale ...etc.) et en fonction de la période considérée (jour, soir, nuit).

- Niveau relatif : Le bruit ambiant comprenant le bruit des éoliennes ne doit pas dépasser le bruit résiduel augmenté de la valeur réglementaire visée : l'émergence (par exemple de 5 dB(A) en façades des habitations de jour). Lorsque la valeur du niveau de bruit résiduel évolue au cours du temps (au cours de la journée, de la semaine, de la saison ou de l'année ...etc.) le niveau de bruit ambiant à ne pas dépasser évolue également – l'émergence reste constante. Or, le bruit résiduel évolue avec la vitesse du vent : en théorie, il est proportionnel à la racine carrée de la vitesse du vent [7]. Plus la vitesse  $V$  du vent augmente et plus le bruit résiduel  $L$  augmente et de façon plus ou moins rapide en fonction du relief et du type de végétation.

Pour une distance donnée (plusieurs centaines de mètres), lorsque la vitesse du vent est élevée, le bruit d'une éolienne est inférieur au bruit résiduel, et inversement lorsque la vitesse du vent est faible le bruit de l'éolienne est supérieur au bruit résiduel, la zone critique se situant pour de faibles vitesses de vent (inférieures ou égales à 6 m/s).

C'est pourquoi les réglementations de certains pays ont panaché les deux façons de définir des valeurs réglementaires en définissant des niveaux sonores absolus. Ainsi pour de faibles vitesses de vent la réglementation acoustique n'est pas trop contraignante au fonctionnement des machines.

Une telle réglementation apparaît donc comme un compromis entre la protection des riverains et l'exploitation de l'énergie éolienne.

Les réglementations nationales fixant les limites du bruit des éoliennes de deux façons.

La première en s'appuyant sur des niveaux sonores absolus (le bruit ambiant comprenant le bruit des éoliennes ne doit pas dépasser la valeur réglementaire ; cette valeur ne dépend pas du niveau de bruit résiduel).

La deuxième façon se base sur des niveaux sonores relatifs (le bruit ambiant comprenant le bruit des éoliennes qui ne doit pas dépasser le bruit résiduel augmenté de la valeur réglementaire visée : l'émergence).

### Réglementation algérienne

#### Décret exécutif n°93-184 du 27 juillet 1993 réglementant l'émission des bruits

- **Art. 1.** Le présent décret a pour objet de réglementer l'émission des bruits et ce en application de l'article 121 de la loi n°83-03 du 5 février 1983, susvisée.
- **Art. 2.** - Les niveaux sonores maximums admis dans les zones d'habitation et dans les voies et lieux publics ou privés sont de 70 décibels (70 dB) en période diurne (6h à 22h) et de 45 décibels (45 dB) en période nocturne (22 h a 6 h).
- **Art. 3.**- Les niveaux sonores maximums admis au voisinage immédiat des établissements hospitaliers ou d'enseignement et dans les aires de repos et de détente ainsi que dans leur enceinte sont de 45 décibels (dB) en période diurne (6 h a 22 h) et de 40 décibels (dB) en période nocturne (22 h a 6 h).
- **Art. 4.** - Sont considérés comme une atteinte à la quiétude du voisinage, une gêne excessive, une nuisance à la santé et une compromission de la tranquillité de la population toutes les émissions sonores supérieures aux valeurs limites indiquées aux articles 2 et 3 ci-dessus.
- **Art. 5.** - Les méthodes de caractérisation et de mesurage des bruits sont effectuées conformément aux normes algériennes en vigueur.
- **Art. 6.** - Toute personne physique ou morale exploitant des activités exigeant l'emploi de moteurs, d'outils, de machines, d'équipements ou d'appareils générateurs de bruits de niveaux supérieurs aux valeurs limites telles que définies par le présent décret est tenue de mettre en place des dispositifs d'insonorisation ou des aménagements appropriés de nature à éviter d'incommoder la population ou de nuire à sa santé.

- **Art.7.** - Les infrastructures sont construites, réalisées et exploitées en tenant compte des bruits aériens émis par leurs activités.
- **Art. 12.** - Les dispositions prévues aux articles 6, 7, 8, 9 et 10 ci-dessus doivent être satisfaites au plus tard, deux années à compter de la date de publication du présent décret au Journal officiel de la République algérienne démocratique et populaire.
- **Art. 13.** - Toutes infractions au présent décret sont sanctionnées conformément aux dispositions de l'article 129 de la loi n°83-03 du 5 février 1983 susvisée.

### Niveaux de bruit

#### a) Niveaux de bruit et évolution des équipements

Les niveaux de bruit des machines évoluent en fonction de leur puissance électrique. Chaque valeur de bruit correspond à la moyenne de plusieurs machines de constructeurs différents pour la même puissance électrique

Les données dont nous disposons sur les plus grosses machines, d'une puissance supérieure à 2,5 MW, sont des données estimées par le constructeur, non certifiées encore et peut être encore pénalisantes. Ceci peut expliquer l'importante augmentation apparente des niveaux sonores par comparaison aux machines de puissances électriques inférieures.

Si l'on regarde l'évolution entre 660 et 2500 kW nous constatons que l'augmentation des niveaux de bruit des machines est faible en comparaison de celle des puissances électriques. Globalement, quelle que soit la vitesse du vent, nous constatons une augmentation moyenne de 4 dB (A) du bruit de la machine (ce qui correspond à un peu plus du doublement du bruit émis) pour une multiplication par 4 de la puissance électrique de la machine.

#### b) Niveaux de bruit et distance

Toute source de bruit est caractérisée par sa puissance acoustique. Le niveau du bruit émis par cette source va décroître avec la distance. Cette décroissance dépend des dimensions (source ponctuelle, surfacique, linéique) et des caractéristiques acoustiques (directivité) de la source [8]. L'atténuation des ondes sonores dépend essentiellement de la divergence géométrique et de l'effet de sol. Cependant, à des distances plus importantes et pour des fréquences plus élevées l'absorption atmosphérique doit être prise en compte.

c) Diffusion géométrique

La première cause d'atténuation du son est la diffusion géométrique, elle est aussi la plus facile à prédire. Pour une source ponctuelle émanant dans un milieu homogène, on observe une atténuation de 6 dB lorsque la distance a doublée (diffusion sphérique) [8].

Dans le cas d'une source répartie sur un axe, on observe une atténuation de 3 décibels (diffusion cylindrique).

e) Absorption atmosphérique

L'absorption est causée par des processus physiques classiques (viscosité, conductivité thermique, diffusion moléculaire et diffusion thermique) couplés à l'absorption due à l'énergie de rotation des molécules dans l'air. L'absorption est due aussi à la relaxation des énergies de vibration des molécules d'azote et d'oxygène.

f) Propagation près du sol

Les caractéristiques du terrain influençant la propagation des ondes sonores sont principalement reliées à la nature et à la topographie du sol.

Quelle que soient la nature et la composition des sols entre la source et le récepteur, homogène ou discontinue, leur influence respective sur l'atténuation de l'onde sonore le long du champ de propagation est importante. Cette atténuation est fonction à la fois de la fréquence et de l'incidence de l'onde sonore. L'atténuation est d'autant plus importante que l'onde sonore est rasante et que la fréquence est élevée.

### **I-2-2-3 Impacts visuels**

Il existe deux types d'impacts visuels : ceux induits par une altération du paysage, et ceux dus à l'effet stroboscopique.

#### Insertion paysagère des éoliennes

Il va de soi que les éoliennes constituent toujours des éléments très visibles dans le paysage. Sinon elles ne seraient pas bien situées d'un point de vue météorologique.

La figure I- 11 montre le parc éolien de Kappel au Danemark. C'est probablement le parc éolien le plus esthétique jamais vu. Comme vous pouvez le voir sur la photo, la disposition des éoliennes suit la ligne de la côte.



**Figure I- 11: Insertion paysagère des éoliennes [11].**

Il y a cependant un élément qui déprécie l'impression générale d'une disposition harmonieuse : l'éolienne individuelle située à côté de la ferme (cette éolienne avait déjà été installée avant l'établissement du parc).

a) disposition géométrique simple des éoliennes

Dans les terrains plats, il est souvent préférable d'installer les éoliennes dans une disposition géométrique simple, facilement perceptible par le spectateur. Un alignement des éoliennes, équidistantes les unes des autres, est souvent une bonne solution, mais une disposition comme celle choisie pour le parc ci-dessus peut s'avérer encore plus élégante si les contours du paysage y invitent.

Il faut cependant être prudent : le dogme des dispositions géométriques simples n'a pas de valeur partout. Ainsi, dans les paysages ondulés, il est rarement possible d'opter pour une disposition simple, et, en général, on obtiendra un meilleur résultat si on laisse les éoliennes suivre les contours d'altitude ou bien la clôture ou d'autres caractéristiques du paysage.

Lorsque les éoliennes sont placées sur plusieurs rangs, il est normalement très difficile de percevoir la disposition du parc en le contemplant depuis l'altitude normale des yeux. En fait, la disposition n'est en général clairement perceptible que si le spectateur se place tout à la fin d'une rangée.

### b) Taille des éoliennes

En employant des éoliennes de grande puissance au lieu de petites éoliennes, on arrive à produire plus d'énergie tout en installant moins d'éoliennes. D'un point de vue économique, un tel choix comporte souvent des avantages, par exemple une diminution relative des frais d'entretien.

D'un point de vue esthétique, les grandes éoliennes s'intègrent souvent mieux dans le paysage que les petites, la vitesse de rotation de ces premières étant moins élevée ce qui attire normalement moins l'œil que les objets se mouvant à grande vitesse.

### c) Perception des éoliennes

La façon dont les gens perçoivent l'aspect des éoliennes est dans une large mesure une question de goût. Plusieurs études menées au Danemark, en Grande-Bretagne, en Allemagne et en Hollande ont démontré que les gens vivant à proximité d'une éolienne sont en général plus favorables à l'implantation d'éoliennes que la population urbaine.

### Effet stroboscopique

L'effet stroboscopique se produit dans le voisinage immédiat de l'éolienne. Résultant du passage des pales en rotation dans les rayons du soleil illuminant des pièces d'habitation ou des lieux de travail, l'effet stroboscopique ne se produit que lorsque l'ensemble des conditions suivantes sont simultanément réunies:

- Temps clair (soleil) ;
- Vent (rotation) ;
- Orientation du soleil par rapport à l'éolienne portant l'ombre de cette dernière sur un lieu d'habitation ou de travail
- Orientation des fenêtres du lieu en question vers l'éolienne.

### a) Projection d'ombres d'une éolienne

Lorsque le soleil est visible, une éolienne projette - comme toute autre haute structure - une ombre sur le terrain qui l'entoure.

Si vous habitez très près d'une éolienne, vous vous sentirez peut-être gêné, de temps à autre, lorsque ses pales traversent la lumière du soleil, la coupant en morceaux et provoquant ce que l'on appelle un effet stroboscopique. Cependant, une planification minutieuse permettra normalement de résoudre ce problème



**Figure I- 12 : Projection d'ombres d'une éolienne [11]**

b) Domaine très peu régulé

La projection des ombres n'est normalement pas régulée explicitement par les autorités de planification. En Allemagne, où une instance a été introduite, le juge a cependant fini par fixer à 30 heures par an la limite tolérable de projection d'ombres réelle. Selon la décision du juge, il faut calculer le nombre d'heures de projection d'ombres à partir des heures où la propriété est effectivement utilisée par des personnes (réveillées, remarquons).

c) Prévision de la projection d'ombres

Heureusement, on est aujourd'hui capable de prédire avec une assez grande précision la probabilité de l'heure du jour où il peut y avoir un effet stroboscopique - ainsi que la durée de celui-ci. Nous ne pouvons évidemment pas savoir d'avance s'il y aura effectivement du vent, ni dans quelle direction il soufflera. En faisant appel à l'astronomie et à la trigonométrie, nous sommes cependant en mesure de calculer soit le scénario probable, soit scénario le plus défavorable selon lequel il y aura constamment du soleil, et du vent, et où le vent continue d'orienter le rotor de l'éolienne de façon à ce que celui-ci suive le mouvement du soleil.

Trouver la forme, l'emplacement et l'heure exacte d'une ombre projetée par une éolienne demande des calculs très sophistiqués. Moyennant une distance minimale de 250 mètres, l'influence de l'ombre des éoliennes sur l'environnement humain est négligeable.

En effet, la distance par rapport à l'éolienne qui doit être considérée comme relevant pour le calcul de l'ombre portée dépend de son orientation et peut être estimée à environ 300 m vers le nord et jusqu'à 700 m vers l'est et l'ouest. Cela ne signifie pas pour autant qu'en deçà de ces distances, l'ombre portée interdit l'implantation d'une éolienne. Cela signifie seulement qu'une étude d'impact plus fine doit être réalisée dans ce périmètre.

Le seuil de tolérance en usage en Allemagne, soit 30 heures max/ an et 30 minutes max/jour calculé sur base du nombre réel d'heures pendant lesquelles le soleil brille (statistiques d'irradiation fournies par l'IRM) et pendant lesquelles l'ombre est susceptible d'être projetée sur l'habitation (statistiques de la direction des vents fournies par l'IRM) sera appliqué.

En effet, l'effet stroboscopique ne constitue pas véritablement un problème dans la mesure où le risque peut être facilement identifié, mesuré et écarté par l'arrêt automatique des pâles. Enfin, il faut noter que les inconvénients liés à la réflexion de la lumière sur les pâles peuvent être supprimés par l'utilisation d'une peinture et d'un matériau adaptés.

### **I-2-2-3 Impact sur les Systèmes de Télécommunications**

Des études traitant de ce sujet indiquent que certains systèmes de radiodiffusion et/ou télécommunications peuvent être grandement affectés. L'interférence due aux éoliennes prend deux formes; interférence par obstruction ou interférence par réflexion. Il en résulte une dégradation du signal reçu ce qui affecte la performance et la fiabilité du service [12].

Plusieurs éléments, tels que le type d'éolienne, son axe (vertical ou horizontal), le nombre et le diamètre des pâles, la forme et le type de matériel des pâles, la hauteur et le diamètre de la tour de support, peuvent être responsable des impacts potentiels d'interférences électromagnétiques causés à des services de radiodiffusion et de télécommunications.

D'autre part, certains paramètres rendent vulnérables les différents systèmes de communications : la localisation de l'émetteur et des récepteurs par rapport aux éoliennes, la fréquence d'émission, la polarisation du signal, le type de modulation,, les caractéristiques de propagation et la topographie du terrain. Les problèmes d'interférences associés aux éoliennes sont généralement causés par des pâles métalliques ou en fibres de carbone.

La rotation des pales présente, dans ces cas, une grande surface conductrice causant obstruction ou réflexion du signal. L'utilisation de pales de fibre de verre/époxy ou de plastique réduit le risque d'interférences causées par la rotation des pales, mais ne l'élimine pas complètement. Les structures de support des éoliennes présentent aussi un grand potentiel d'obstruction ou de réflexion à la transmission des signaux.

#### **I-2-2-4 Impact sur la santé**

Il y a environ à ce jour 50 000 éoliennes dans le monde, dont certaines en fonctionnement depuis plus de 20 ans. Depuis tout ce temps, aucun problème de santé qui aurait alerté les autorités sanitaires n'a été remarqué [13].

- Les matériaux employés pour construire les éoliennes sont sans effet sur la santé. Ce sont des matériaux non toxiques et d'usage courant : acier pour les tours, fibres de verre pour les pales, cuivre pour les câbles électriques.

- L'éloignement de plusieurs centaines de mètres entre les éoliennes et les habitations riveraines permet d'éviter tout éventuel problème de santé publique.

- Le niveau sonore à 300 m d'une éolienne est de 45 dB (A), ce qui correspond au bruit à l'intérieur d'une maison calme. Ces niveaux sonores sont sans conséquence sur la santé.

- La tension électrique est inférieure à 20 000 volts et les câbles d'évacuation de la production sont enterrés. Il s'agit de niveaux de tension particulièrement ordinaire : la France compte ainsi plus de 500 000 km de lignes à 20 000 volts.

- On n'a pas constaté de conséquences négatives de l'effet stroboscopique. Ce phénomène correspond à l'ombre portée des pales. Cette absence de conséquence négative s'explique car ce phénomène n'est pas en soi dommageable pour la santé.

De plus, avec l'augmentation de la taille des éoliennes, les vitesses de rotation diminuent et avec elles l'importance de cet effet.

- Enfin, l'éloignement de tout riverain limite encore plus sa perception.

- Les éoliennes n'émettent pas particulièrement d'infrasons (sons de très basse fréquence, inaudibles). Ces infrasons sont des phénomènes naturels que l'on retrouve partout où le vent souffle et heurte des obstacles durs (comme les bâtiments, les arbres).

### I-2-2-5 Impact sur la faune

Comme pour toute étude d'impact, il convient d'identifier et d'étudier les groupes selon le risque potentiel auquel l'espace éolien les expose et de porter une attention particulière aux espèces protégées.

L'identification d'une problématique spécifique conduit à approfondir les études sur ce point, notamment lorsque l'inventaire met en évidence la présence d'une espèce patrimoniale. La démarche à suivre comprend donc deux temps :

- 1- Identifier, quantifier et hiérarchiser les espèces,
- 2- Approfondir l'étude pour certaines espèces, en fonction du milieu rencontré.

Pour les espaces éoliens, les relevés et l'analyse visant à caractériser les aires d'études concernent généralement les oiseaux, faune pour laquelle le plus d'impacts potentiels a été identifié.

#### Impacts sur les oiseaux

Aux Etats-Unis et en Espagne, des parcs éoliens ont provoqué une mortalité anormale d'oiseaux. Les études réalisées ont mis en évidence un certain nombre de facteurs qui ont gravement participé à générer cet impact (voir figure I-12). Il s'agit de situations très spécifiques qui ne peuvent en aucun cas être présentées comme des exemples de référence.



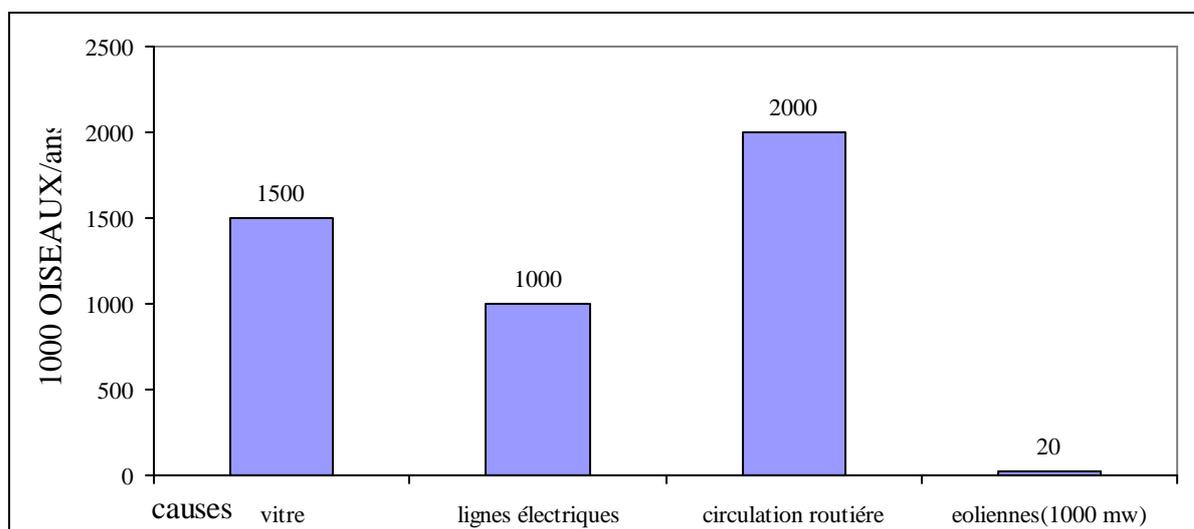
**Figure I- 12: impact sur les oiseaux [5].**

Les immenses parcs éoliens californiens sont en effet composés de plusieurs centaines de petites éoliennes montées sur des tours treillis. Ce type d'éolienne est en grande partie responsable de l'impact constaté sur les oiseaux (5,2 oiseaux tués en moyenne par éolienne et par an).

Placés au milieu de vastes surfaces planes et désertes, les aérogénérateurs constituent des perchoirs uniques pour les rapaces en chasse qui s'approchent alors dangereusement des pales en rotation.

En France, les éoliennes sont équipées de mâts tubulaires qui ne permettent pas aux oiseaux de se percher. Les études réalisées en Europe indiquent une mortalité de 0,4 à 1,3 oiseaux tués par éolienne et par an.

Si le risque n'est jamais nul, il faut rappeler que les routes, les lignes électriques aériennes, les baies vitrées et la chasse provoquent la mort de plusieurs dizaines de milliers d'oiseaux chaque année en France. La fondation hollandaise pour la protection des oiseaux a réalisé une estimation de la mortalité annuelle de l'avifaune dans ce pays. Les résultats (Figure I- 13) montrent un faible impact des éoliennes.



**Figure I- 13 : Estimation du nombre d'oiseaux tués par an (Pays Bas)[13].**

### Impacts sur les chauves-souris

Le taux de mortalité des chauves-souris dû à la production d'énergie éolienne est exprimé en nombre de mortalités par turbine par année ou en nombre de mortalités par mégawatts produits par année. Le taux de mortalité peut aussi correspondre au nombre de mortalités par rapport à la surface de balayage en 100 000 m<sup>2</sup> par année.

Selon Johnson (2004) [15], le taux de mortalité moyen aux États-Unis correspondaient (à cette date) à 3,4 mortalités par turbine par année ou à 4,6 mortalités par MW produits par année. Cependant, le taux de mortalité évalué pour certains projets est beaucoup plus élevé que la moyenne. Kerns et Kerlinger (2004) [15] ont évalué la mortalité à près de 2092 individus pour la période de recherche d'avril à novembre pour le site de mountaineer en Virginie de l'ouest. Cela équivaut à un taux de 47,53 mortalités par turbine. Une autre évaluation a été faite par Kerns, Erickson et Arnett [16] (2005) dont les recherches quotidiennes

### Impacts sur la faune sauvage et domestique

Les grands animaux peuvent éventuellement être dérangés au moment des travaux d'installation. En dehors de la phase de chantier, les éoliennes n'ont pas d'impact significatif sur la faune sauvage terrestre.

## **I-2-2-6 Impact sur la sécurité**

### Risques Liés à la construction

Comme toute activité humaine, le danger n'est pas complètement absent lors de la construction et de l'exploitation d'un parc éolien. Les principaux facteurs de risques sont liés à la présence d'éléments mécaniques en mouvement et à la proximité de courant électrique de tension et d'intensités élevées [17].

Le risque d'accident concerne les personnels chargés de l'installation et de la maintenance des éoliennes. La maintenance s'effectue en effet à plusieurs dizaines de mètres de hauteur. En général, pour réduire les pertes de production, ces interventions s'effectuent lorsque les conditions météorologiques sont favorables. Les personnels sont sensibilisés aux problèmes de sécurité et suivent régulièrement des formations. En outre, les éoliennes modernes sont équipées de dispositifs de protection contre les chutes.

Une personne qui monte au sommet d'une éolienne doit porter une paire d'attache inspirée du matériel des alpinistes. Les attaches sont fixées par un câble d'acier à un système d'ancrage (ligne de vie) qui suit la personne tout au long de son ascension vers la nacelle.

Durant l'entretien de l'éolienne, il est impératif qu'elle soit totalement arrêtée. Un système de freins permet de bloquer totalement le rotor et d'éviter ainsi tout mouvement des pièces mécaniques

Les systèmes de protection vis-à-vis de la machinerie, de l'incendie et des risques électriques doivent respecter des normes internationales très strictes. Les éoliennes font l'objet de certification par des organismes de contrôle indépendants.

#### Risques liés au fonctionnement des Eoliennes

Les risques potentiels d'accident concernent, par ordre de probabilité, le bris de pales et la chute de la tour [17].

Lors de la construction d'éoliennes, la résistance à la fatigue des matériaux ainsi que le comportement dynamique de la structure dans sa globalité sont étudiés avec soins. Les constructeurs conçoivent leurs éoliennes pour résister à des conditions météorologiques extrêmes (vents de 250 km/h pendant 5 secondes ou 180 km/h).

Ils doivent également tenir compte de la variation des forces exercées en fonction des fluctuations du vent.

Les composants soumis à des flexions répétées, comme les pales, peuvent développer des faiblesses structurelles si elles ont été mal conçues et/ou fabriquées.

Si la chute d'une tour est tout à fait rare, la rupture ou la chute de pales sont statistiquement plus importants. Ce fut notamment le cas avec les premières machines installées au début des années 80 équipées de pales métalliques.

La mauvaise tenue à la fatigue du métal pouvait engendrer des fissures. Les pales sont aujourd'hui fabriquées avec des matériaux composites qui ont l'avantage d'être légers et extrêmement résistants.

## Conclusion

Le vent est un mouvement de l'atmosphère. Ces mouvements de masses d'air sont provoqués par deux phénomènes se produisant simultanément : un réchauffement inégalement réparti de la surface de la planète par l'énergie solaire et la rotation de la planète. Sur Terre, plusieurs régions ont des vents caractéristiques auxquels les populations locales ont données des noms particuliers.

L'éolienne transforme grâce à ses pâles l'énergie du vent en énergie mécanique puis grâce au contenu de la nacelle (modulateur, multiplicateur, générateur ....) en énergie électrique.

Elle a quelques aspects négatifs (bruit, impact sur passage....etc) et afin de réduire la prolifération des projets et des problèmes, il faut regrouper les éoliennes dans des Zones de Développement de l'Eolien (ZDE) de plusieurs dizaines de éolienne.

S'il est indispensable de se soucier des paysages, ce n'est pas seulement cette raison qui doit nous conduire à refuser l'éolien industriel où que ce soit et quelle que soit l'échelle des parcs envisagés

## Bibliographie

- [1]N. Kasbadji Merzouk, évaluation du gisement énergétique éolien contribution a la détermination du profil vertical de la vitesse du vent en Algérie, Thèse de doctorat l'université ABOU BEKR Belkaid de Tlemcen (2006).
- [2]TH. Philippe T. Claude, étude d'une éolienne, projet technologique, université de Québec, (2007), TCH-090-095.
- [3]M. Lôpez, Contribution à l'optimisation d'un système de conversion éolien pour une unité de production isolée, thèse doctorat de l'université Paris-Sud 11, France, (2008).
- [4]M.Benmedjahed, le gisement éolien de la région de béni Saf et sont impacte sur l'environnement, thés, magister, université de Tlemcen, (2009).
- [5] A E M E, Guide de l'étude d'impact sur l'environnement des parcs éoliens, Guide, France, (2004).
- [6] ADEME, Éoliennes & impact sonore, Manuel préliminaire de l'étude d'impact des parcs éoliens, (2002).
- [7] Afsse, impacte sanitaires du bruit généré par les éoliennes, saisine 2006-005, France, (2008).
- [8] P. Navaro, Aéroacoustique numérique d'un écoulement tourbillonnaire, Thèse de doctorat, Laboratoire de Mécanique Université du Havre, (2002).
- [9]Amis de Montcimet-Anost-Cussy, Bruit émis par une éolienne, (2006), Référence Manuel, <http://www.amac.fr/a/Bruit%20%E9mis%20par%20une%20%E9olienne.pdf> (accédé en mai 2011).
- [10]Howe GASTMEIR CHAPNIK LIMTED, les éoliennes et le bruit, recommandations de pratiques d'excellence Canada, (2007).
- [11]Søren, Visite guidée dans l'univers de l'énergie éolienne, Association KROHN, Association de l'industrie éolienne (2002).
- [12]Y. HAMEL, études d'impact de l'ajout d'un parc d'éoliennes sur les systèmes de télécommunications à Murdoch ville, Projet: P-2003169, Québec (2003).
- [13]Fédération des énergies et vent .planète-éolienne (2009), Référence Manuel, <http://www.planete-eolienne.fr>. (accédé en mai 2011).
- [14]ADEME, Éoliennes & milieu naturel, Manuel préliminaire de l'étude d'impact des parcs éoliens(2002).

- [15] J. Kerns et P. Kerlinger ,A study of bird and bat collision fatalities at the Mountaineer Wind Energy Centre, Report, Tucker County, West Virginia: annual for 2003,( 2004).
- [16] J. Kerns, W.P. Erickson et E.B Arnett ,patterns of fatality, and behavior patterns of fatality, and behavioural interactions with wind turbines and interactions with wind turbines, Bat and bird fatality, Pennsylvania and West Virginia Energy Cooperative. E.B Arnett, Ed, (2005).
- [17] ADEME, Eoliennes & Sécurité, Manuel préliminaire de l'étude d'impact des parcs éoliens (2002).
- [18] lyc-richelieu-rueil(2009), Référence Manuel, <http://www.lyc-richelieu-rueil.ac>, (Accédé en Mars 2010).
- [19] Campbell Scientific(2009), Référence Manuel, <http://www.campbellsci.co.uk>, (Accédé en mai 2013) .
- [20] idata.over (2009), Référence Manuel,<http://idata.over-blog.com>, (Accédé en mai 2013).
- [21] recherche.lesechos (2010), Référence Manuel, <http://recherche.lesechos.fr/>, (Accédé en mai 2013) .
- [22] Wind turbines generate(2009), Référence Manuel, <http://www.wwindea.org/>, (Accédé en 15 juillet 2009).
- [23] GWEC(2013), Référence Manuel, <http://www.gwec.net/>, (Accédé en Avril 2013).

## *Chapitre II*

### *Analyse de l'état initial des sites étudiés*

## Introduction

L'objectif de l'analyse de l'état initial du site est de disposer d'un état de référence de l'environnement physique, naturel, paysager et humain du site avant que le projet ne soit implanté. Il doit fournir des données suffisantes pour identifier, évaluer et hiérarchiser les effets possibles du parc éolien.

L'état initial doit décrire de façon précise et détaillée le contexte géographique (lieu, extension, quantification), les caractères spécifiques (aspect remarquable, originalité, rareté) et significatifs (qualité des milieux, niveau de protection) des composantes de l'environnement analysé [1]. Il constitue le document de référence pour apprécier les conséquences du projet sur l'environnement et la remise en état du site à la fin de l'exploitation

## II-1 Milieu physique

L'Algérie est en Afrique du Nord entre 18° et 38° de latitude Nord et entre 9° et 12° de longitude, avec une superficie de 2.381.74.100 km<sup>2</sup>. Du Nord au Sud, le pays se caractérise par trois ensembles géographiques contrastés et individualisés par le relief et le climat et l'influence marine qui s'y rattachent. On distingue successivement :

- \* Le littoral et la zone tellienne au Nord qui plonge vers la mer Méditerranée.
- \* Les Hauts Plateaux et la Steppe compris entre l'Atlas Tellien au Nord et l'Atlas Saharien au Sud.
- \* Le Sahara.

Notre étude porte sur deux régions, la première étant la région côtière, où nous avons choisi trois sites Oran, Bejaia et Annaba, la Seconde région les hauts plateaux, où on a choisi Kasr-chellala, M'sila et Tiaret. Ces choix sont justifiés par la disponibilité des bases de données de fréquence des vitesses et directions du vent sur une période de dix ans, de plus ces derniers sont parmi les régions plus ventées.

Les détails des sites sont récapitulés dans le tableau II- 1 et la position géographique de ces stations est donnée dans la figure II- 1.

Site	Latitude (deg )	Longitude (deg)	Altitude (m)
Annaba	36.83	7.81	4
Bejaia	36.71	5.06	2
Kasr-Chellala	35.16	2.31	801
M'sila	35.66	4.50	442
Oran Es Senia	35.63	-0.60	90
Tiaret	35.35	1.43	1127

Tableau II- 1: Position géographique des sites.

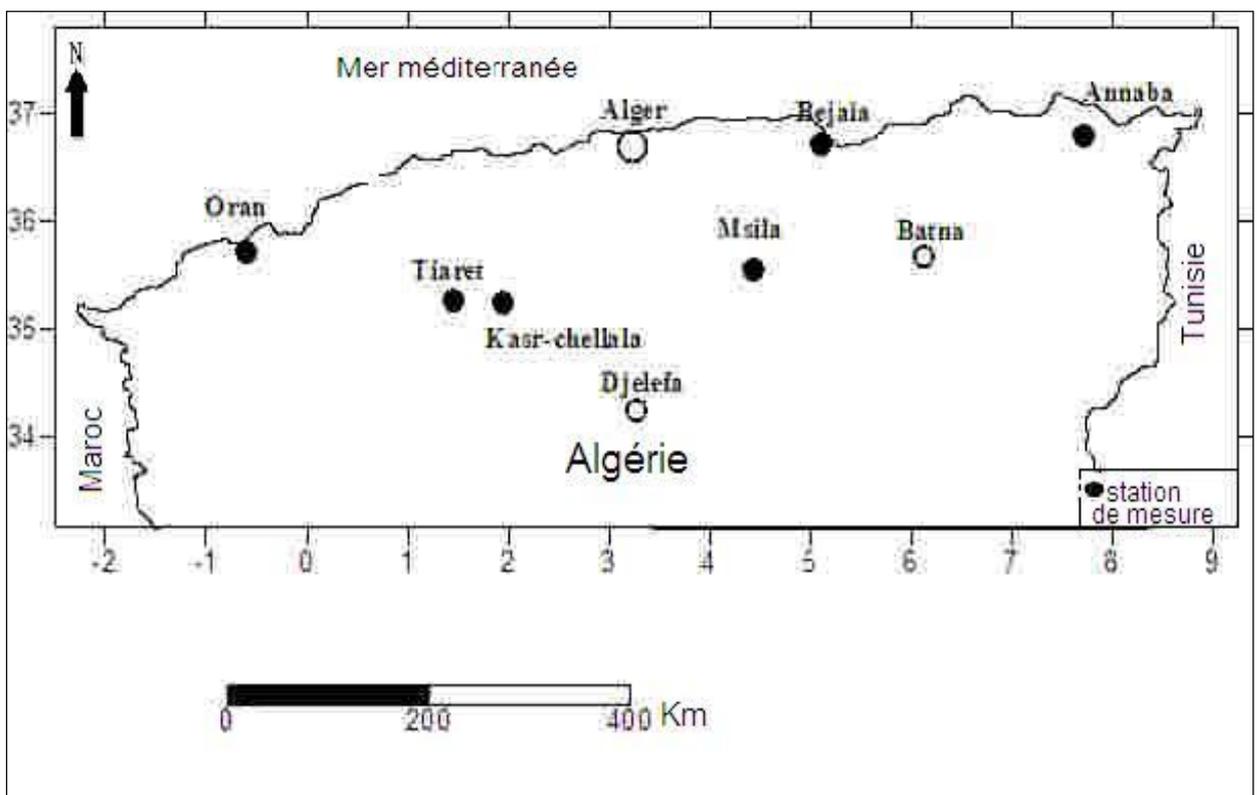


Figure II- 1: Carte des stations de mesure du vent



Espagne en automne et au printemps, empêche l'occurrence des pluies. Les masses d'air humides viennent plus du Nord Ouest ou du Nord que d'Ouest et donnent les pluies [2].

L'Atlas Tellien, les Hauts Plateaux et l'Atlas Saharien ont une orientation Ouest-Est avec un gradient marqué vers le Nord.

La chaîne de l'Atlas Tellien surplombe le littoral et reçoit, de plein fouet, les flux humides du Nord Ouest ou du Nord beaucoup plus que ceux Ouest. Le Tell-Est est plus exposé à ces flux que le Tell-Ouest, car ce dernier se trouve en position d'abri par rapport aux chaînes montagneuses du Rif Marocain. L'Atlas Tellien fait écran aux plaines et bassins de l'intérieur du pays en empêchant les vents humides d'y parvenir.

Le contraste pluviométrique est important et brutal en allant du Nord vers l'intérieur des terres.

Les hautes Plaines reçoivent l'humidité des vents qui arrivent à franchir les montagnes de l'Atlas Tellien. Ces vents sont beaucoup plus secs et ce d'autant plus que l'on s'éloigne en direction du Sud. Ce qui fait que la pluviométrie diminue du Nord au Sud dans cette zone.

#### **a. Températures**

Les températures moyennes hivernales dans les trois sites côtiers étudiés sont autour de 11 °C pour le mois de janvier. Elles montent à 17 °C au mois de mai pour atteindre une moyenne de 25°C en août.

La température annuelle moyenne est presque identique pour les trois sites (Oran, Bejaia et Annaba) est de l'ordre 17°C.

Au centre et à l'ouest, dans les Hauts-plateaux de la région de Tiaret et Kasr-Chellala, la température estivale est de l'ordre de 26°C pendant les mois Juillet et Août.

Pour M'sila la température maximale est 23°C au mois d'Août. La température annuelle moyenne pour les trois sites des hauts plateaux (Tiaret, Kasr-Chellala et M'sila) est de l'ordre de 14°C. Les Températures moyennes mensuelles des sites étudiés sont représentées dans le Tableau II- 2 et Figure II- 3.

Mois	Oran	Bejaia	Annaba	Kasr-Chellala	M'sila	Tiaret
<b>Janvier</b>	10.2	11.3	11	6	8.7	6.1
<b>Février</b>	11	11.4	11.5	7	9.4	6.9
<b>Mars</b>	13.3	12.5	12.5	9.5	11.4	9.1
<b>Avril</b>	15.4	14.6	14.6	11.5	13.8	12.2
<b>Mai</b>	18.3	17.4	17.8	16.5	16.8	16.1
<b>Juin</b>	21.8	20.8	21.2	22.5	20.5	21
<b>Juillet</b>	24.5	23.9	24.6	26	23.6	25.9
<b>Août</b>	25.1	25.4	24.9	26	23.8	26
<b>Septembre</b>	22.9	22.8	22.8	21	21.2	21.7
<b>Octobre</b>	18.4	18.6	19.6	16.5	17	15.9
<b>Novembre</b>	14.2	15.4	15.4	10.5	13	10.3
<b>Décembre</b>	11.1	11.8	12.2	7	10	6.6
<b>moyenne</b>	<b>17.2</b>	<b>17.2</b>	<b>17.3</b>	<b>15</b>	<b>15.8</b>	<b>14.8</b>

Tableau II- 2 : Température moyenne mensuelle des sites étudiés en (°C)

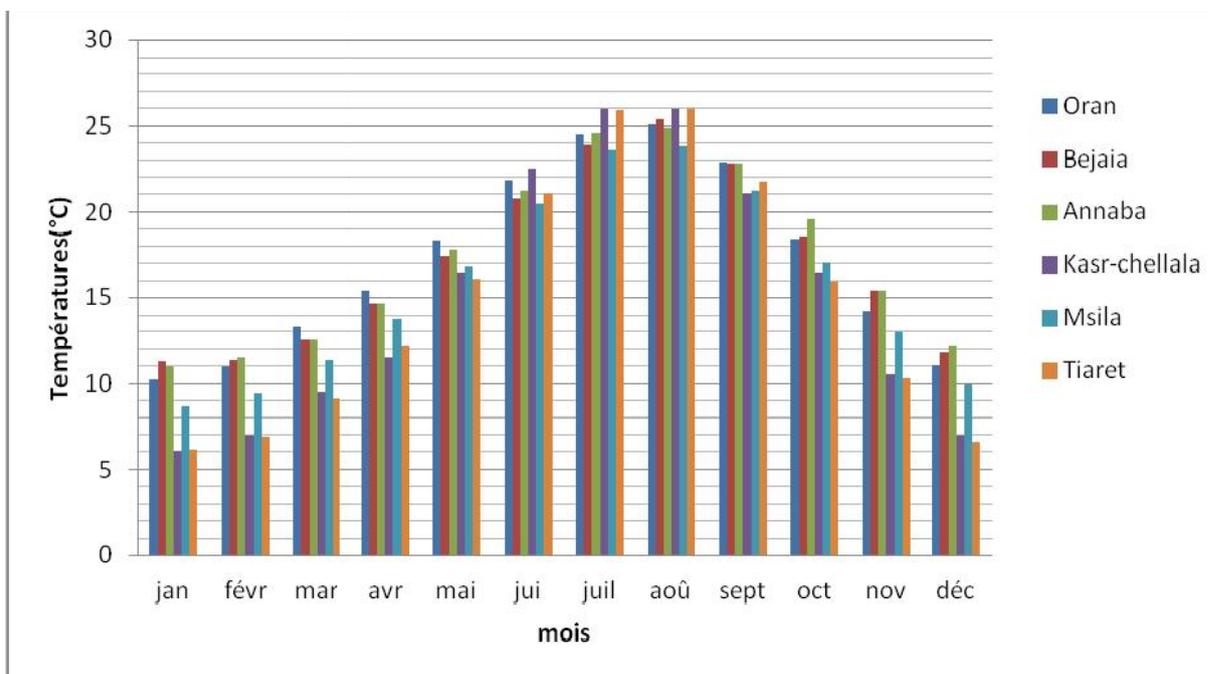


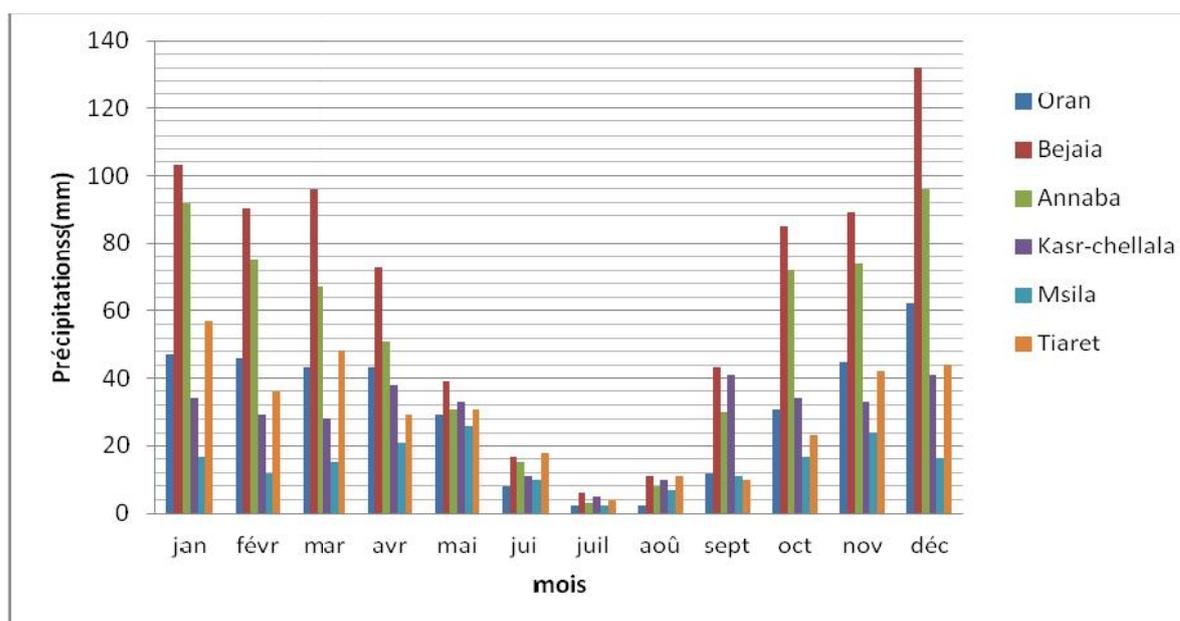
Figure II-3 : Température moyenne mensuelle de six sites étudiés.

**b. Précipitations**

Les sites étudiés dans la zone côtière sont caractérisés par des précipitations moyennes mensuelles qui varient entre 31 à 65 mm, pour les hauts plateaux elles varient de 16mm à 29mm (voir Tableau II- 3 et Figure II- 4).

Mois	Oran	Bejaia	Annaba	Kasr-chellala	M'sila	Tiaret
Janvier	47	103	92	34	17	57
Février	46	90	75	29	12	36
Mars	43	96	67	28	15	48
Avril	43	73	51	38	21	29
Mai	29	39	31	33	26	31
Juin	8	17	15	11	10	18
Juillet	2	6	3	5	2	4
Août	2	11	8	10	7	11
Septembre	12	43	30	41	11	10
Octobre	31	85	72	34	17	23
Novembre	45	89	74	33	24	42
Décembre	62	132	96	41	16	44
<b>moyenne</b>	<b>31</b>	<b>65</b>	<b>51</b>	<b>28</b>	<b>16</b>	<b>29</b>

**Tableau II- 3: Pluviométrie moyenne mensuelle de six sites étudiés en (mm).**



**Figure II- 4: Pluviométrie moyenne mensuelle de six sites étudiée en (mm).**

### II-1-3 Vent et gisement éolien

Les premiers travaux sur le gisement éolien algérien et l'établissement des atlas et des cartes du vent remontent à 1984. Parmi ces derniers nous avons les travaux de A. Ibrahim [7], suivi de ceux de H. Bensaid en 1985[8], de R. Hammouche en 1990[9], ensuite les travaux de N. Kasbadji Merzouk en 2000 [10], de F. Chellali 2011[11] .

Le potentiel éolien varie selon la situation géographique. Au Nord du pays, il se caractérise par des vents modérés de vitesse moyenne de 1 à 4m/s avec des micro- climats autour d'Oran, et d'Annaba.

Au Sud, la vitesse moyenne des vents dépasse les 4m/s, plus particulièrement au sud-ouest, avec des vents qui dépassent les 6m/s dans la région d'Adrar.

A partir des données du vent (vitesse et direction) collectées dans les stations météorologiques des sites, on s'est intéressé principalement aux vitesses moyennes annuelles des vents à 10 m du sol, qui varient de 3.3 à 4.2 m/s pour les sites étudiés (Tableau II- 4).

Les Hauts plateaux sont généralement balayés par des vents forts mais les fréquences calmes réduisent la vitesse moyenne à une moyenne annuelle de l'ordre de 3m/s

L'étude statistique est basée sur le traitement des données horaires collectées pendant dix ans de la période de 2001 à 2010 pour les divers sites retenus.

Vu que nous avons obtenu des fréquences calme calculées des vents  $f_0$  inférieures à 15 % pour les sites côtiers, notre choix s'est porté sur la distribution de Weibull [10].

Par contre nous allons utiliser la distribution hybride de Weibull pour les autres sites des hauts plateaux, car les fréquences calmes calculées du vent  $f_0$  sont beaucoup plus importantes que celle des sites du nord [10].

Site	Latitude (degrés)	Longitude (degrés)	Altitude (m)	Vitesse (m/s)
<b>Annaba</b>	36.83	7.81	4	3.7
<b>Bejaia</b>	36.71	5.06	2	3.3
<b>Kasr-chellala</b>	35.16	2.31	801	3.9
<b>M'sila</b>	35.66	4.50	442	4.2
<b>Oran es seina</b>	35.63	-0.60	90	3.5

**Tableau II- 4: Caractéristiques des sites étudiés.**

### II-1-3-1 Modèles d'ajustement

Lorsqu'on dispose de mesures de vent sur un site donné, l'information peut être représentée sous forme d'histogramme. Celui-ci peut représenter la variation de la fréquence relative des vitesses de vent. Si les intervalles de vitesse s'amenuisent, la limite de l'histogramme est une fonction de densité de probabilité. Pratiquement, l'obtention de cette fonction de densité de probabilité des vitesses de vent est obtenue en approchant l'histogramme par une fonction.

#### Distribution de Weibull

Pour représenter la probabilité d'occurrence de chaque vitesse de vent sur un site, on utilise la distribution probabiliste de Weibull. C'est une loi de probabilité continue où l'on peut régler deux paramètres, l'un de forme l'autre d'échelle. L'expérience a montré que toutes les distributions de vent peuvent être représentées par une courbe de Weibull dont on adapte les paramètres en fonction du site [12-17]. La densité de probabilité de la distribution de Weibull a pour expression:

$$f(V) = \left(\frac{k}{C}\right) \left(\frac{V}{C}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{V}{C}\right)^k\right) \quad (2.1)$$

k : facteur de forme (sans dimension)

C : facteur d'échelle en (m/s).

En général, le facteur de forme caractérise la symétrie de la distribution, le facteur d'échelle est très proche de la vitesse moyenne de la vitesse du vent.

Nous avons choisi la méthode de l'écart type pour la détermination des facteurs k et C, elle se base sur le calcul de l'écart type et de la vitesse moyenne [18-20]:

$$k = \left( \frac{\sigma_v}{V_m} \right)^{-1.090} \quad (2.2)$$

$$C = \frac{2V_m}{\sqrt{f}} \quad (2.3)$$

$V_m$ : vitesse moyenne (m/s).

$\sigma_v$ : écart type (m/s).

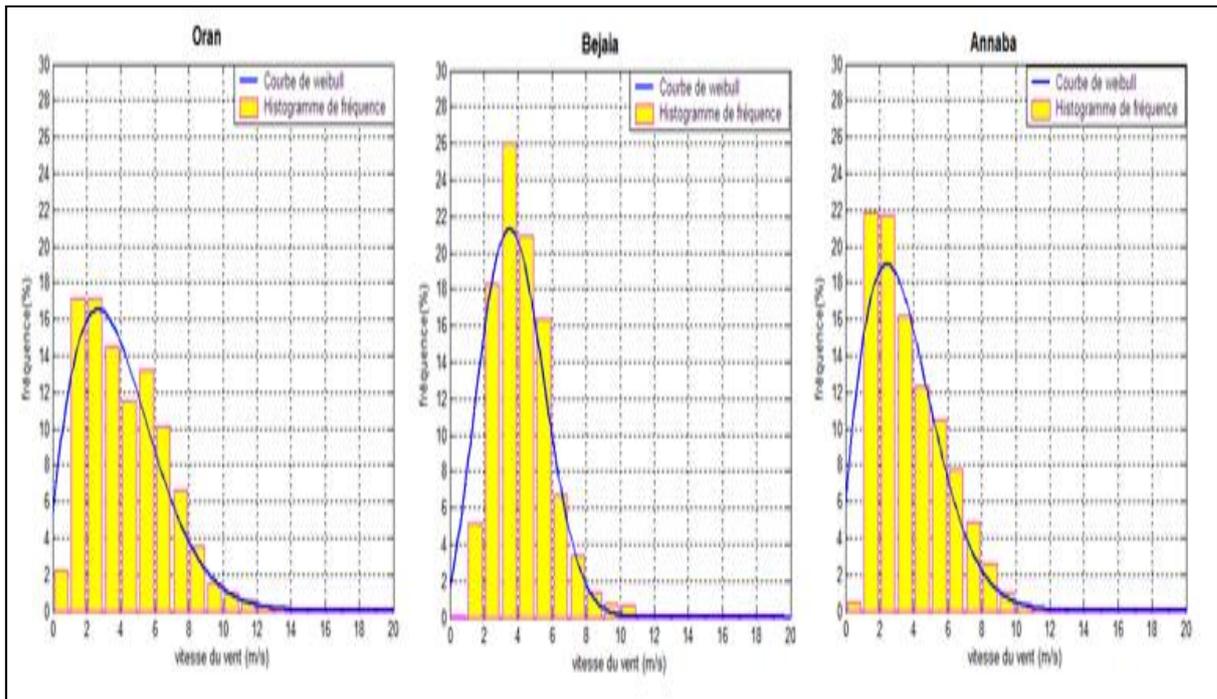
On a calculé les paramètres de Weibull et la vitesse moyenne pour les trois sites côtiers à 10m du sol (Tableau II- 5) puis on a tracé les courbes de Weibull avec les histogrammes de fréquence, à 10m du sol (voir tableau II-5).

Site	facteur d'échelle C [m/s]	Facteur de forme k	Vitesse moyenne V [m/s]
Oran	4.9	1.84	4.4
Bejaia	4.8	2.64	4.2
Annaba	4.3	1.75	3.8

**Tableau II-5: Les paramètres de Weibull et la vitesse moyenne, à 10m du sol.**

La valeur du facteur de forme k pour Bejaia est maximale, de l'ordre de 2.64, ce qui montre que la distribution est la plus stable [10].

On constate par contre que pour les deux autres sites  $k$  est faible ce qui dénote que les vents sont largement dispersés [10]. L'analyse des facteurs d'échelle  $C$ , montre que le site le plus venté est Oran ( $C= 4.9\text{m/s}$ ).



**Figure II- 5: Les courbes de Weibull et les histogrammes de fréquence, à 10m du sol.**

### Distribution hybride Weibull

Sur les sites où la fréquence des vents calmes est relativement importante ( $> 15\%$  du total des vents) la distribution de Weibull ne répond pas parfaitement à la situation.

En effet, cette proportion assez significative des vents calmes ne peut être négligée. On utilise donc ce qu'on appelle la distribution hybride de Weibull [21].

Cette dernière est définie par la fonction de densité de probabilité décrite par :

$$f(V) = (1 - f_0) \left( \frac{k}{C} \right) \left( \frac{V}{C} \right)^{k-1} \exp \left( - \left( \frac{V}{C} \right)^k \right) \quad (2.4)$$

Avec

$f_0$  : fréquence des vents calmes.

$k$  : facteur de forme (sans dimension).

$C$  : facteur d'échelle en (m/s).

Nous avons calculé les paramètres d'hybrides Weibull et la vitesse moyenne pour les sites des hauts plateaux à 10m du sol ainsi que les histogrammes de fréquence (voir Tableau et figure II -6).

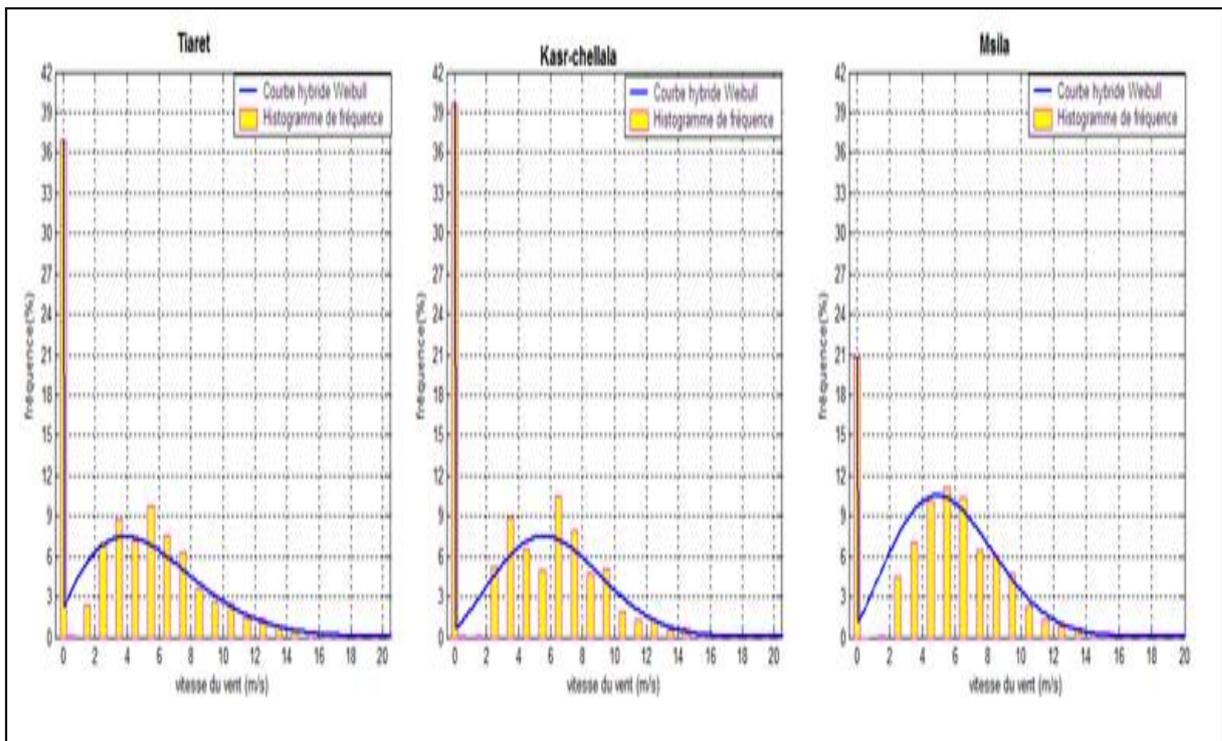
site	fréquence des vents calmes $f_0$ [%]	facteur d'échelle $C$ [m/s]	facteur de forme $k$	Vitesse moyenne $V$ [m/s]
Kasr-Chellala	40	7.7	2.34	3.9
M'sila	21	7.0	2.26	4.9
Tiaret	37	6.8	1.83	3.8

**Tableau II- 6: Les paramètres d'hybride Weibull et la vitesse moyenne, à 10m du sol.**

L'analyse des facteurs d'échelle  $C$ , montre que le site Kasr-Chellala a la plus grande valeur de  $C$ , soit  $C = 7.7\text{m/s}$ , caractérisée cependant par une fréquence calme importante de l'ordre de 40%, ce qui nous donne une vitesse moyenne de 3.9 m/s.

Le site le plus venté des hauts plateaux est celui de M'sila avec un facteur  $C$  de 7m/s et une fréquence calme de l'ordre de 21% (C'est la valeur la plus faible de la fréquence calme).

Le site le moins Venté est celui de Tiaret avec un facteur  $C$  de 4.3m/s et une fréquence calme considérable de l'ordre de 37%.



**Figure II- 6 : Courbes d’Hybride Weibull et les histogrammes de fréquence, à 10 m du sol .**

**II-1-3-2 Rose des vents**

La rose des vents joue un rôle important dans la localisation de sites appropriés à l’installation d’éoliennes.

L’étude statistique des données nous a permis de déterminer la rose des vents qui est la représentation graphique de la fréquence du vent en fonction de la direction dans un repère polaire. Nos résultats pour les sites côtiers sont présentés dans la Figure II-7 et pour les sites des hauts plateaux sont présentés la Figure II-8.

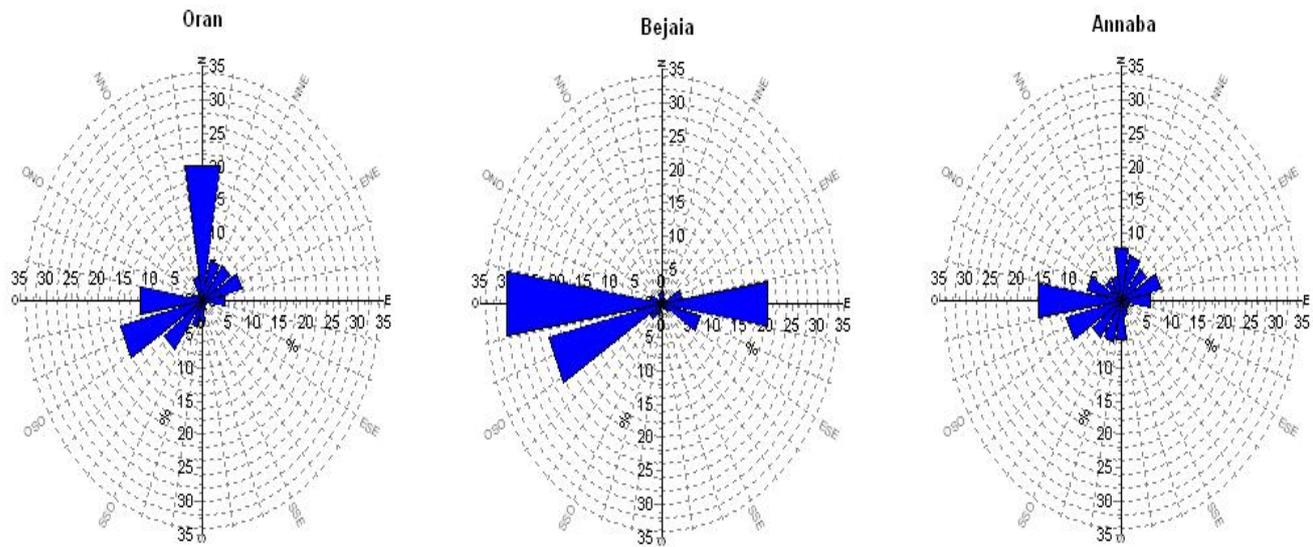


Figure II-7: Les roses des fréquences de vent pour les sites côtiers à 10m du sol.

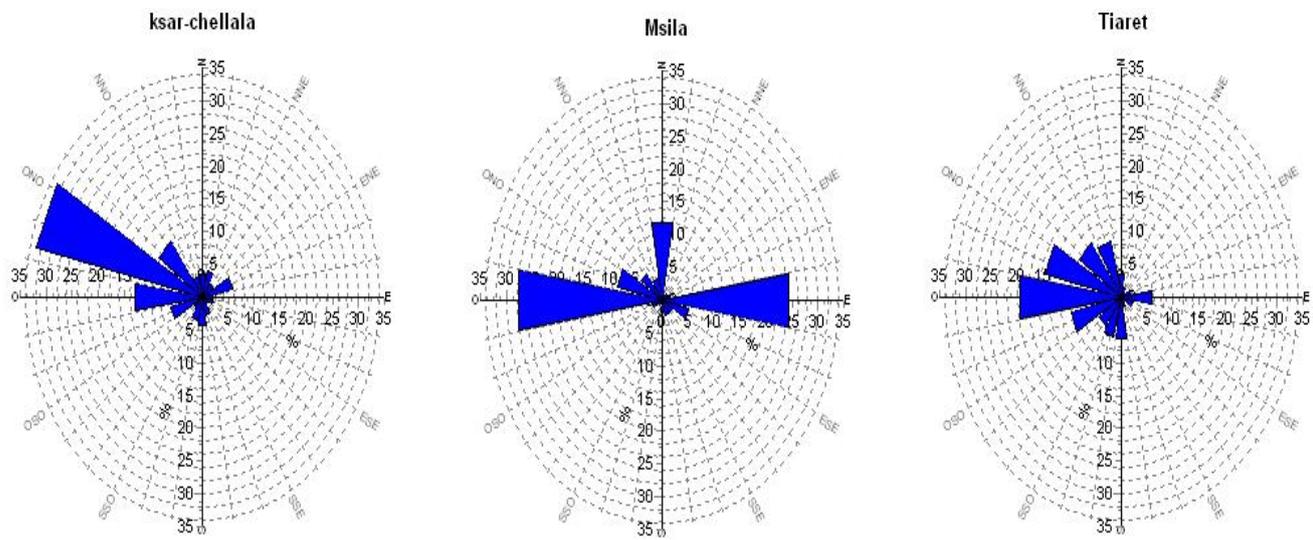


Figure II- 8: Les roses des fréquences de vent pour les sites haut plateaux à 10m du sol.

Pour le site d'Oran la direction dominante du vent est le Nord représentant 21.5%, des épisodes du vent et les directions prédominantes sont l'Ouest-Sud-Ouest (OSO) et l'Ouest, ils comptent respectivement 16.18% et 11.97 %.

Pour le site de Bejaia le secteur Ouest représente 30.46% des fréquences de vent, la direction Ouest-sud-ouest (OSO) et l'Est qui sont deux secteurs prédominants avec un pourcentage de l'ordre 20% pour chacune d'elle.

Dans la zone d'Annaba presque tous les secteurs sont égaux, mais la direction Ouest reste dominante avec 16%.

Pour Kasr-chellala la direction dominante du vent est l'Ouest Nord Ouest (ONO) , représentant 28% des épisodes, les directions prédominantes sont l'Ouest et Nord Ouest (NO) qui compte respectivement 13% et 11%.

Pour le site de M'sila le secteur dominant est le secteur Ouest avec 28% et le secteur prédominant est la direction Est représentant 25%.

Pour Tiaret le secteur dominant est l'Ouest comptant 20%, le secteur prédominant est l'Ouest Nord Ouest (ONO) avec 16%.

Les trois sites côtiers ont un point commun, le secteur Ouest représentant un pourcentage des fréquences important.

L'analyse des facteurs d'échelle  $C$  pour le secteur Ouest montre qu'il est important pour les trois sites, varie de 4 m/s (Annaba) à 6.3m/s (Oran), mais le vent dans cette direction n'est pas stable car le facteur de forme  $k$  est faible.

Le secteur Nord est le secteur le plus stable, où le facteur de forme  $k$  varie de 2.65 pour Oran à 4.91 à Annaba, de plus le facteur d'échelle  $C$  est pratiquement important pour les sites côtiers.

Les paramètres de Weibull et la vitesse moyenne par secteur pour les trois sites côtiers à 10m du sol sont calculés et regroupés dans le Tableau II- 7.

Secteur	Oran				Bejaia				Annaba			
	C m/s	k	f %	V m/s	C m/s	k	f %	V m/s	C m/s	K	f %	V m/s
Nord	5.5	2.65	21	4.9	5.3	3.15	2	4.7	5.8	4.91	8	5.1
Nord Nord Est	3.7	1.76	6	3.3	5.2	2.08	1	4.6	5.5	2.60	7	4.8
Nord Est	4.2	1.91	7	3.7	4.5	2.97	1	4.0	5.4	2.34	6	4.8
Est Nord Est	4.4	2.05	8	3.9	4.3	3.02	4	3.8	5.7	2.69	8	5.0
Est	3.5	1.77	4	3.1	4.5	3.41	21	4.0	4.5	2.19	6	4.0
Est Sud Est	2.6	1.54	1	2.3	4.9	3.02	7	4.3	2.8	1.92	2	2.5
Sud Est	2.5	1.48	1	2.2	5.2	3.13	2	4.6	2.6	2.01	2	2.3
Sud Sud Est	2.6	1.45	1	2.3	4.9	2.46	1	4.4	2.5	1.87	2	2.2
sud	2.6	1.84	3	2.3	3.7	2.09	1	3.3	2.8	2.21	6	2.5
Sud Sud Ouest	3.2	1.82	4	2.9	3.4	2.34	2	3.0	3.1	2.33	6	2.7
Sud Ouest	4.8	2.02	9	4.2	4.1	2.07	3	3.6	3.1	1.84	7	2.7
Ouest Sud Ouest	5.7	2.08	16	5.0	4.5	2.83	22	4.0	3.5	2.01	11	3.1
Ouest	6.3	1.76	12	5.6	5.4	2.69	30	4.8	4.0	2.05	16	3.5
Ouest Nord Ouest	5.4	1.49	2	4.8	5.6	2.36	2	5.0	4.7	2.10	7	4.2
Nord Ouest	4	1.42	1	3.6	5.5	1.81	1	4.9	5.1	2.08	4	4.5
Nord Nord Ouest	5.4	2.56	4	4.8	5.3	1.96	1	4.7	5.7	2.17	4	5.1

**Tableau II- 7: Paramètres de Weibull et la vitesse par secteur pour les sites côtiers à 10m du sol.**

Les trois sites de hauts plateaux sont balayés par des vents forts autour de la direction Ouest secteur dominant. L'analyse du facteur d'échelle C dans ce secteur montre qu'il est important pour les trois sites, sa valeur varie de 7.3 m/s (Kasr-chellala) à 7.6m/s (M'sila et Tiaret). Le vent dans cette direction est stable car le facteur de forme k est important, Sauf pour le site de Tiaret. Les paramètres de Weibull et la vitesse moyenne par secteur pour les trois sites hauts plateaux à 10m du sol sont regroupés dans Tableau II- 8.

Secteur	Kasr-chellala				M'sila				Tiaret			
	C m/s	k	f %	V m/s	C m/s	k	f %	V m/s	C m/s	K	f %	V m/s
Nord	5.4	2.33	4	4.8	8.2	2.78	12	7.3	5.2	2.33	4	4.6
Nord Nord Est	5	2.03	4	4.4	7.2	2.75	1	6.4	4.4	2.1	2	3.9
Nord Est	4.7	1.72	3	4.2	5.5	2.21	1	4.9	4.5	2.03	1	4
Est Nord Est	5.4	2.13	6	4.8	5.5	1.96	1	4.9	4.6	1.85	2	4.1
Est	4.9	1.48	3	4.4	6.3	3.09	25	5.7	5.5	1.92	6	4.8
Est Sud Est	5.9	1.98	2	5.3	6	2	6	5.3	6	1.76	2	5.3
Sud Est	5.7	2.46	1	5.1	5.1	2.29	2	4.5	6.7	2.22	1	5.9
Sud Sud Est	6.7	2.44	3	5.9	6.5	2.67	2	5.8	6.8	1.85	1	6
Sud	9.2	2.9	5	8.2	5.6	1.84	2	5	7.5	1.82	6	6.7
Sud Sud Ouest	8.4	2.46	3	7.5	7.2	1.56	1	6.5	7.8	1.88	6	8.9
Sud Ouest	8.6	2.41	2	7.7	6	2.39	2	5.3	6.9	1.89	5	6.1
Ouest Sud Ouest	8.1	2.41	7	7.1	4.7	1.66	2	4.2	6.2	1.82	10	5.5
Ouest	7.3	2.24	13	6.5	7.6	2.25	28	6.8	7.6	1.84	20	6.7
Ouest Nord Ouest	7.9	2.52	28	7	7.1	1.74	8	6.4	7.3	1.94	16	5.8
Nord Ouest	9	2.35	11	7.9	7.6	2.11	4	6.7	6.9	2.2	10	6.1
Nord Nord Ouest	7.2	2.46	6	6.4	7.9	2.76	3	7.2	6.5	2.27	9	5.7

**Tableau II- 8: Paramètres de Weibull et la vitesse par secteur pour les sites des hauts plateaux à 10m du sol.**

### **II-1-4 Séismes et risques sismiques en Algérie**

Toute la côte nord de l'Algérie se trouve dans une zone tectonique des plus propices aux tremblements de terre. Cette zone est classée parmi les zones les plus actives [25]. En octobre 1980 un grand séisme dévaste Al Asnam (Chlef actuellement). Un second terrible séisme fait plus de 2000 morts et plusieurs milliers de blessés et de sans-abri à Boumerdès.

La côte Nord de l'Algérie est traversée par une limite de plaques lithosphériques continentales convergentes: la plaque eurasiennne.

### **II-2 Milieu Naturel**

L'Algérie compte 107 espèces de mammifères dont 47 sont protégées et 30 menacées de disparition. Elle dénombre aussi 336 oiseaux dont 107 sont protégés. En hiver, l'Algérie devient la terre d'accueil de certains oiseaux migrateurs européens, dont les cigognes[26]. Enfin, les animaux que l'on croise le plus souvent en Algérie sont le dromadaire.

#### La zone des plaines littorales

Au nord, les sites étudiés se trouvent dans une zone caractérisé par un climat méditerranéen humide. On a 3 aires protégées, mais un seul Parc National, le Parc National de Gourara (W. de Bejaia) occupant une superficie de 3.807 hectares.

La région contient un grand nombre d'espèces de la faune, en particulier d'oiseaux locaux ou migrateurs, les plus remarquables sont :

Fauvette à tête noire, Gailles des blés, Merle noir, Perdrix gabra, Pic vert, Eochevis , tuppé et Mensonge bleu.

Les Mammifères la bande du littoral sont : Le Sanglier, le Lapin, le Renard, le Chacal, l'hérisson du nord, la Chauve- souris et le Porc-épic

#### La zone des hauts plateaux

Zone de rempart entre l'atlas tellien et l'atlas saharien, où dominent les grands espaces steppiques formés essentiellement d'alfa et de forêts à pin d'Alep, on a une seule aire protégée (La réserve naturelle de Mergueb à M'sila : 13.482 hectare) dans laquelle se retrouve encore à l'état naturel des populations de gazelles de Cuvier.

Cette gazelle endémique du Maghreb est menacée. L'espèce est protégée par la loi algérienne depuis 1983. La population totale est estimée à 400 et la réserve abrite une quarantaine.

D'autres espèces animales fréquentent la région où se trouvent nos trois sites étudiés, les plus remarquables sont : le hérisson d'Algérie, le hérisson du désert, le lynx et l'hyène rayée. Un nombre important d'oiseaux a été recensé au niveau de Mergueb : 83 espèces dont plus de 50% sont migratrices.

## **II-3 Milieu Humain**

### **II-3 -1 La population**

La population de l'Algérie était de 37,1 millions d'habitants au 1er janvier 2012, selon l'Office national des statistiques (ONS), qui prévoit une population de 37,8 millions d'habitants en janvier 2013.

Le taux d'urbanisation du Nord de l'Algérie avoisine les 60 % [27], et continue d'augmenter en dépit des efforts du gouvernement pour freiner la migration vers les villes. L'Algérie compte plus d'une trentaine d'agglomérations urbaines de plus de 100 000 habitants, presque toutes concentrées dans le nord du pays. La plus grande ville est Alger, mégapole de plus de six millions d'habitants [28] soit plus du dixième de la population globale [29].

Il y a également parmi les principales villes algériennes, en termes de population, d'influence culturelle ou d'importance économique : Oran, sur la côte ouest, deuxième ville du pays, Constantine, Annaba à l'est, ville touristique et économique, Batna, ville industrielle commerciale et culturelle, capitale des Aurès, Sétif, ville industrielle et universitaire, capitale des Hauts plateaux, Tlemcen, ville culturelle artistique économique et industrielle, Blida, Chlef, ville culturelle et industrielle, Skikda a un important port et c'est une ville touristique et industrielle ...

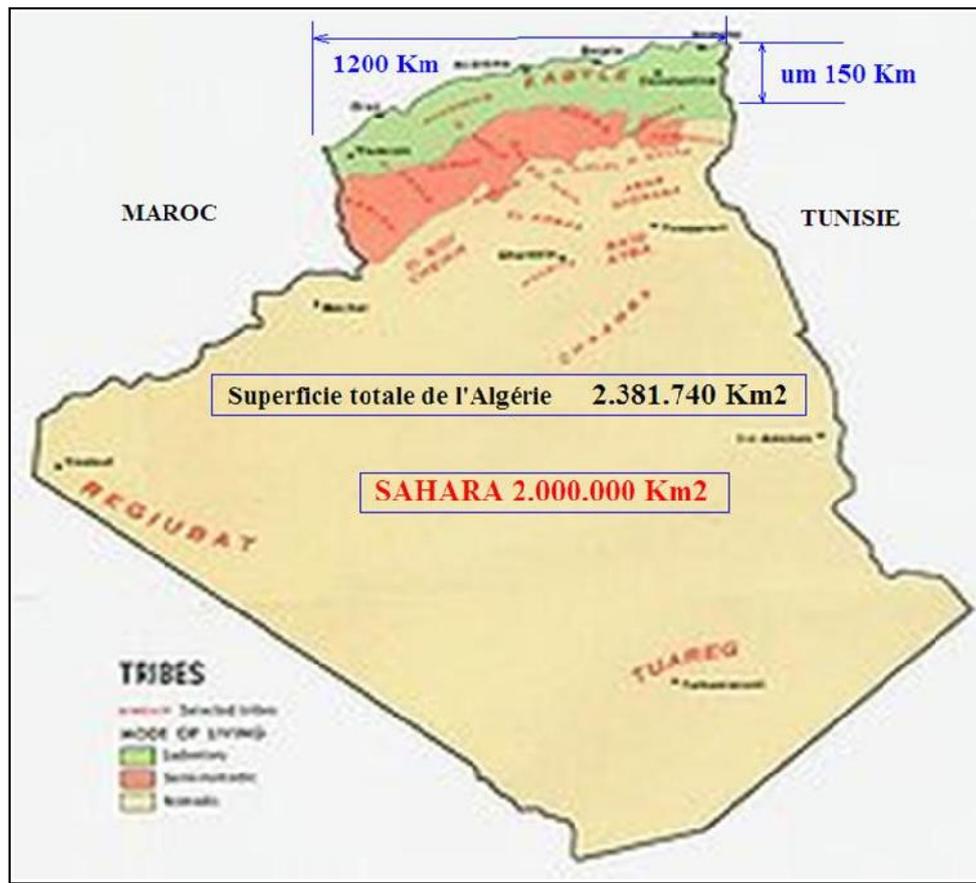


Figure II- 9 : Carte de la répartition démographique de l'Algérie [27]

### II-3.2 L'agriculture et la pêche

#### L'Agriculture

La croissance réalisée par le secteur pour la campagne 2011-2012 est de l'ordre de 8,3%. Celle atteinte durant les quatre dernières années est d'environ 13,8% alors que l'objectif tracé auparavant était de 8,3%.

Les surfaces irriguées représentaient 835 197 ha en 2006. Plusieurs arbres furent plantés afin de ralentir l'avancée du désert comme le barrage vert. La superficie totale de forêts ravagée par le feu pendant l'année 2006 a été estimée à 16 916 ha. Près de 900 millions de m<sup>3</sup> d'eaux de crues sont destinées à l'irrigation par épandage de 498 000 ha pour la production fourragère. Le potentiel de production arboricole et viticole compte près d'un million d'hectares[30].

### La Pêche

La côte algérienne longue de 1 200 km, partagée en quatorze wilayas maritimes. Chaque wilaya possède un certain nombre de ports, d'abris de pêche et de plages d'échouage. 64 sites de débarquements longent la côte algérienne (32 ports ,23 plages d'échouage ,4 sites d'abris aménagés et 5 sites d'abris naturels).

Les espèces halieutiques les plus consommées sont: poissons démersaux, petits pélagiques, grands pélagiques, requins et squales, crustacés et mollusques. L'Algérie pêche presque 230 000 tonnes par an, selon le Ministère de la pêche et des ressources halieutiques[31].

Annaba compte le grand nombre avec 536 marins pour une moyenne de 4 marins environ par barque[32].

La production nationale de la pêche a enregistré en 2012 une hausse de 4% par rapport à 2011, s'établissant à 108 000 tonnes.

## **II- 3- 3 Les activités industrielles**

### Industrie

L'Algérie a mis en place un réseau industriel dense, concentrant des secteurs polluants et gros consommateurs de sols, d'eau et d'énergie [33]. Ce tissu industriel a été implanté à proximité des sources d'eau (barrages, mer), des réservoirs de main d'œuvre, des ports, ....

Il existe près de 67 entreprises industrielles du secteur public qui se composent de 240 unités de production couvrant pratiquement tous les secteurs d'activités. On compte 1200 entreprises privées qui emploient plus de 10 employés chacune [33].

### Ressources naturelles et gisements

Les principaux gisements en Algérie sont parmi les plus importants dans le monde. Ils sont généralement localisés dans le Sud. Selon Sonatrach, les 67% de réserves en hydrocarbures sont situées dans les régions d'Oued Mya et de Hassi Messaoud. Le Gaz à Hassi R'mel et le pétrole à Hassi Messaoud (huile), Illizi contient 14% des réserves. En fin, Rhourde Nouss renferme 9% et Ahnet Timimoun 4% et Berkine [34].

L'activité minière en Algérie est très diversifiées, on observe plus d'une trentaine de substances qui sont exploités parmi elles : fer, sel, zinc, plomb, baryte, marbre, or, tungstène, diamant, terres rares, métaux rares et pierres précieuses et semi-précieuses.

### **II-3 - 4 Energie**

La consommation nationale d'énergie pour l'année 2011[36], est estimée à 38,9 TWh, soit 3 TWh de plus qu'en 2010, soit une évolution de 8,6% par rapport à l'exercice précédent.

Cette évolution des facturations s'explique en grande partie par la hausse des ventes aux clients basse tension de 9,9 % et des clients haute tension de 8.3% dont la croissance a plus que doublé par rapport aux trois dernières années (3.5 %).

La croissance des ventes des clients industriels s'explique essentiellement par la croissance importante des secteurs de l'eau et du transport respectivement de 53,5% et 27,9% par rapport à 2010 et, à un degré moindre, par la croissance relative des secteurs des hydrocarbures, matériaux de construction et industrie mécanique et électricité.

#### Émissions de gaz à effet de serre

Le secteur de l'Energie est responsable à plus des deux-tiers des émissions de gaz à effet de serre (66,92%) [37].

Le potentiel du pays en hydrocarbures explique en grande partie cette situation, car l'Algérie est un grand exportateur d'hydrocarbures. IL faut rappeler aussi le fait que l'Algérie a mis en œuvre, dès le début des années 80, une stratégie de développement basée sur les ressources énergétiques disponibles et, principalement, le gaz naturel qui est utilisé dans différents domaines d'activités (centrales électriques, secteur industriel et résidentiel, etc.). Le Changement d'affectation des terres et la foresterie est le second secteur important du point de vue des émissions (12,44%). L'Agriculture est le troisième secteur émetteur de gaz à effet de serre avec plus de 11,49% du total. Le secteur des Déchets intervient pour 4,59% et celui des procédés industriels pour 4,52%.

### Energies renouvelables

L'électrification de villages ruraux et l'alimentation électrique d'équipements collectifs sont les deux axes poursuivis par les pouvoirs publics[38]. Ainsi, près de 1000 foyers, répartis dans 20 villages de quatre Wilayas profitent d'un accès à l'électricité depuis 2000, grâce à des kits photovoltaïques. De même une centrale hybride solaire/diesel de 13 KW installée à Ilizzi permet à 300 foyers, soit 2000 personnes, de bénéficier d'un accès à l'électricité.

Le développement de la Steppe (HCDS), a permis l'électrification de 3000 foyers, la fourniture de 160 pompes solaires pour une puissance de 240 KW et de 80 pompes éoliennes équivalent à une puissance de 120 KW.

Le principal projet en cours est celui initié par l'Eew Energy Algeria (EEAL) en partenariat avec la société espagnole ABENER. Il porte sur la construction d'une centrale hybride solaire- gaz (part du solaire de 5%) d'une puissance de 150 MW à Hasi R'Mel pour un montant total de 315 M€

Dans le cadre du Programme National de Maîtrise de l'Energie (PNME) 2006-2010, un vaste projet de développement du marché des chauffe-eau solaires, financé par le PNUD, a été lancé en 2008. Il s'agit de l'installation de 10 000 m<sup>2</sup> de capteurs solaires, soit 4 000 CES dans le secteur résidentiel.

L'Agence Nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Energie (APRUE) a lancé en avril 2009 une importante campagne de promotion des ampoules à basses consommation auprès de la clientèle résidentielle dans 4 Wilayas du pays (250 000 ampoules), dont le coût est pris en charge à 50% par le Fonds national pour la maîtrise de l'énergie (FNME) [38].

Trois autres centrales hybrides solaire-gaz de 400 MW chacune sont prévues à l'horizon 2015. Le Ministère de l'Energie et des Mines prévoit un investissement global estimé entre 12 et 18 Mds USD.

Une ferme éolienne d'une puissance de 10 MW, implantée à Tindouf, est en cours d'adjudication. Le projet de 16 millions d'USD constitue le premier projet du genre en Algérie et fonctionnera sur une technologie hybride éolien-diesel [38].

## Conclusion

L'analyse des ressources éoliennes dans les sites sélectionnés montre que la zone côtière ainsi que les hauts plateaux de l'Algérie ont un potentiel d'énergie éolienne qui peut être effectivement exploité. En effet, le traitement statistique des données a permis d'évaluer les caractéristiques du potentiel éolien de six sites de notre étude (Oran, Bejaia, Annaba, Kasr-Chellal, M'sila et Tiaret) pour installer un parc éolien de 9MW. Les résultats obtenus montrent que:

La vitesse moyenne annuelle de trois sites trois sites côtière Oran, Bejaia et Annaba compte respectivement 4.4m/s ,4.2m/s et 3.8m/s, la direction Ouest est le secteur dominant pour Annaba et Bejaia pour Oran c'est la direction Nord.

Les hauts plateaux qui occupent environ 9 pour cent de la superficie totale, dont 5 millions d'hectares de terres agricoles, sont caractérisés par un climat semi-aride (pluviométrie comprise entre 100 et 400 mm/an). Les terres y ont une forte teneur en sel. Le processus de désertification est important du fait de la sécheresse, de la fragilisation des sols soumis à l'érosion éolienne, de la faiblesse des ressources hydriques et de la pratique intensive de l'agropastoralisme.

La vitesse moyenne annuelle de Kasr-chellala, M'sila et Tiaret sont respectivement 3.9m/s ,4.9m/s et 3.8m/s.

Les hauts plateaux sont caractérisés par des vents forts et une fréquence calme importante variant de 21% à 41%. La direction Ouest est le secteur dominant pour M'sila et Tiaret et l'Ouest Nord Ouest (ONO) pour Kasr-chellala.

Toute la côte nord de l'Algérie se trouve dans une zone tectonique des plus propices aux tremblements de terre. Cette zone est classée parmi les zones les plus actives.

Le pays est divisé en 5 bassins hydrographiques regroupant les 17 bassins versant. Les ressources en eau ne sont pas réparties équitablement, que ce soit au niveau de leur répartition géographique, de leur quantité ou de leur nature.

L'Algérie compte 107 espèces de mammifères dont 47 sont protégées et 30 menacées de disparition. Elle dénombre aussi 336 oiseaux dont 107 sont protégés.

Le taux d'urbanisation de l'Algérie avoisine les 60 % et continue d'augmenter avec une croissance plus soutenue dans le Sud algérien.

Le secteur agricole continue de jouer un rôle important dans l'économie algérienne, encore que secondaire par rapport aux secteurs pétrolier et industriel, employant 23 pour cent de la population active en 2004, et participant pour 11 pour cent au PIB.

La côte algérienne longue 1 200 km, partagée en quatorze wilayas maritimes. Chaque wilaya possède un certain nombre de ports et d'abris de pêche.

L'Algérie a mis en place un réseau industriel dense, concentrant des secteurs polluants et gros consommateurs de sols, d'eau et d'énergie.

Les principaux gisements en Algérie sont importants, localisés généralement dans le Sud.

## Bibliographie

- [1] AE M E, Guide de l'étude d'impact sur l'environnement des parcs éoliens, Guide, France (2004).
- [2] E. Prigent, J. E. Tarraire, géographie de l'Afrique du Nord, livre Moyen et de la Classe de Fin d'Études(1958).
- [3] Ministère de l'énergie et des mines, Carte de localisation des grands ensembles du Nord de l'Algérie et principaux gîtes (2013). Référence Manuel, <http://www.mem-algeria.org/>, (Accédé en mars 2013).
- [4] CNI, Elaboration de la stratégie et du plan d'action national des Changements climatiques, Communication Nationale Initiale projet ALG/98/G31, (2001).
- [5] AQUASTAT, L'irrigation en Afrique en chiffres – Enquête, Algérie (2005).
- [6] R. Lespès , Le climat de la Kabylie du Djurdjura. In Annales de Géographie. t. (1990), 18, n°97. pp. 24 33.
- [7] M. Said et A. Ibrahim, Energy in the Arab World. Energy, (1984), N° 9-3, pp. 217-38.
- [8] H.Bensaid, The Algerian Programme on Wind Energy. Proceeding of WEAC, pp. 21-27, Oxford, (1985).
- [9] R. Hammouche,Atlas Vent de l'Algérie/ONM. Office des Publications Universitaires (OPU), Alger (1990).
- [10] N.Kasbadji Merzouk, Wind energy potential in Algeria. Renewable Energy 2000, Wind energy potential in Algeria. Renewable Energy (2000),21:553–62
- [11] F. Chellali, A. Khellaf, A. Belouchrani , Wavelet spectral analysis of the temperature and wind speed data at Adrar, Algeria, Renewable Energy (2010),35:1214–9.
- [12] G. Solari, Wind Speeds Statistics, Collège on atmospheric Boundary Layer and Air Pollution. ICTP, Trieste, Italie (1994).
- [13] W. Weibull, A statistical distribution function of wide applicability, Journal of Applied Mechanics, (1951), n°18, pp. 293-297.
- [14] C. G. Justus, W. R. Hargraves, A. Yalcin, Nationwide assessment of potential output from wind-powered generators, Journal of Applied Meteorology, (1976), n°15, pp. 673-678.
- [15] C. G. Justus, W. R. Hargraves, A. Mikhail, D .Graber, Methods for estimating wind speed frequency distribution ,Journal of Applied Meteorology, (1978), n°17, pp. 350-353.
- [16] D. A. Stewart, O. M. Essenwanger, Frequency distribution of wind speed near the surface, Journal of Applied Meteorology, (1978) , n°17, pp. 1633-1642.

- [17] L. Van Der Auwera, F. De Meyer, L. M. Malet, The use of the Weibull three parameter model for estimating mean wind power densities, *Journal of Applied Meteorology*, (1980), vol. 19, n° 7, pp. 819 - 825.
- [18] C.G. Justus, et A. Mikhail, Height variation of wind speed and wind distribution statistics, *Geophys. Res. Lett*, (1976), 3, 261– 264.
- [19] D. Weisser, A wind energy analysis of Grenada: an estimation using the Weibull density function. *Renew. Energ.*, (2003), 28, 1803 – 1812.
- [20] M. Gokcek, A. Bayulken et S. Bekdemir, Investigation of wind characteristics and wind energy potential in Kirklareli, Turkey. *Renew. Energy*, (2007), 32, 1739–52.
- [21] O. Jensen, E. L. Petersen et I. Troen, World climate applications programmer: extrapolation of mean wind statistics with special regard to wind energy applications, World meteorological organization, WMO/TD-No, (1984).
- [22] S. Mathew, *Wind Energy Fundamentals Resource Analysis and Economics*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, (2006), ISBN-13 978-3-540-30905-5.
- [23] GENIVAR, Analyse des vents et des surcotes de tempêtes, Projet de réhabilitation du brise-lames à l'entrée du port de mer de la compagnie minière Québec cartier, (2007).
- [24] A. Geoffroy et Y. Bouzidi, Collecte, organisation, traitement, analyse de mesures éoliques et modélisation énergétique, thèse, Laboratoire d'évaluation solary éolica, Université Tecnica Federico Santa Maria Valparaiso Chile, (2007).
- [25] IRSN, Séisme en Algérie. Information, Bureau d'évaluation des risques sismiques pour la sûreté des installations (BERSSIN) de l'IRSN, France, (2003).
- [26] Forestiers algérien, Le monde des forêts et de l'environnement en Algérie, (2013). Référence Manuel, <http://www.forestiersalgeriens.net>, (Accédé en mars 2013).
- [27] Library publications, the world factbook, (2012). Référence Manuel, <http://www.cia.gov>, (Accédé en mars 2013).
- [28] Office National des Statistiques, Recensement 2008 de la population algérienne, (2010). Référence, Manuel [http://www.ons.dz/collections/pop1\\_national.pdf](http://www.ons.dz/collections/pop1_national.pdf), (Accédé en mars 2013).
- [29] Gouvernement Algérien, Rapport national sur les objectifs du Millénaire pour le développement, Rapport, Algérie (2009), ISBN : 9947-0-0961-0C .N.C.
- [30] Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural, l'état du potentiel productif agricole, Note, Algérie, (2006).

- [31] FAO, Informations sur l'aménagement des pêches dans la république algérienne démocratique et populaire (2003). Référence Manuel, <http://www.fao.org> , (Accédé en mars 2013).
- [32] M. Sahi et M. Bouaicha, la pêche artisanale en Algérie, Document FAO Copemed, Centre National d'Etudes et de Documentation pour la Pêche et l'Aquaculture , Algérie,(2003) .
- [33] Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, Plan National de Mise en œuvre (PNM) ALGERIE – Convention de Stockholm, Projet POP's – Algérie GF/ALG/02/001, (2009)
- [34] Sonatrach, Bilan du secteur de l'énergie et des mines, (2013). Référence Manuel, <http://www.sonatrach-dz.com>, ( Accédé en mars 2013).
- [35] Agence Nationale du Patrimoine Minier, une autorité administrative autonome, (2013). Référence Manuel, <http://www.anpm.gov.dz> , (Accédé en mars 2013).
- [36] SONEGAS, Rapport d'activités et comptes consolidés des sociétés du Groupe, Rapport, Algérie, (2011).
- [37] PNUD, Problématique du secteur de l'eau et impacts liés au climat en Algérie, rapport, Algérie (2009).
- [38] APRUE, Consommation Energétique Finale de l'Algérie, Rapport, Agence nationale pour la promotion et la rationalisation de l'utilisation de l'énergie, Algérie, (2005).

## *Chapitre III*

### *Choix des sites et dimensionnement des parcs éoliens*

## **Introduction**

La première étape dans le développement d'un parc éolien est d'identifier un emplacement approprié ayant une vitesse du vent relativement élevée. Une fois la région géographique destinée à l'implantation du parc éolien identifiée, il peut être possible de trouver plusieurs sites qui pourraient être utilisés pour la construction dudit parc éolien. Les données de vent disponibles dans les stations météorologiques locales ou dans les documents publiés, comme les cartes de vent, peuvent être utilisés à cette fin.

Une fois que ces sites disponibles dans la région sont identifiés, les modèles informatiques sont alors utilisés pour estimer le potentiel énergétique.

Dans une première étape nous nous sommes appuyés sur les informations existantes pour évaluer les potentialités des sites.

Dans la seconde étape, une analyse plus rigoureuse est nécessaire. La nature du vent, les spectres disponibles sur les sites doivent être bien compris pour une technique détaillée.

Pour cela, la vitesse du vent doit être mesurée à la hauteur du moyeu de la turbine de l'éolienne proposée. Des anémomètres installés sur les mâts sont utilisés pour la mesure du vent.

Une fois que les données horaires à long terme recueillies du vent sont disponibles, une étude détaillée doit être faite car la production en kWh par la turbine d'une éolienne donnée, sur un site donné, dépend de l'adéquation entre le profil du vent du site et les caractéristiques de la machine.

Par conséquent, il est recommandé d'inclure le comportement des turbines, qui vont être installées sur le site[1]-[3]. Cela nous donne le facteur de capacité et la sortie des turbines en kWh sur des intervalles de temps différents.

Outre les sites potentiels du vent, d'autres facteurs tels que l'accès au réseau, les routes et des infrastructures existantes pour la transmission de puissance et l'état du sol sur le site doivent également être analysés de manière critique tout en choisissant le site.

De même, l'accessibilité aux principales autoroutes et des routes est également un facteur important, car il faut transporter la turbine et ses composants sur le site.

La disponibilité et le coût du terrain pour le développement de parcs éoliens est aussi un autre facteur important. La condition physique du site doit être soigneusement examinée à ce stade. Cela nous donnera une idée sur le coût de la fondation et d'autres constructions connexes. La taille (puissance nominale) et le nombre de turbines nécessaires pour le projet peuvent être évalués. Le coût des éoliennes et de ses accessoires ainsi que le mode de maintenance peuvent être négociés avec le fabricant ou le fournisseur.

### **III-1 Énergie et puissance**

Le vent fournit une énergie cinétique puisqu'il s'agit d'une masse d'air qui se déplace. Cette énergie cinétique est donnée par l'équation suivante :

$$E_c = \frac{1}{2} m \cdot V^2 \quad (3.1)$$

Où :

$m$  : est la masse du volume de vent ou d'air (kg) en déplacement,

$V$  : la vitesse du vent (m/s).

Pour une conduite de section  $S$ , traversée par le vent soufflant à la vitesse  $V$ , l'énergie récupérable à chaque seconde, donc la puissance, peut s'écrire à l'aide de l'équation de l'énergie cinétique. La masse  $m$  est alors remplacée par le débit massique (kg/s) qui permet le passage de l'énergie à la puissance.

Pour un fluide incompressible, la masse  $m$  s'exprime par :

$$m = \dots \cdot l \cdot S \quad (3.2)$$

Où

$\dots$  : la masse volumique de l'air (kg /m<sup>3</sup>).

$S$  : la section du tuyau (m<sup>2</sup>).

$l$  : la longueur de tuyau parcourue chaque seconde par le vent (m).

L'énergie serait alors :

$$E_C = \frac{1}{2} m \cdot V^2 \quad (3.3)$$

Ou encore, 
$$E_C = \frac{1}{2} \dots \cdot L \cdot S \cdot V^2 \quad (3.4)$$

Par ailleurs, le débit massique est donné par:

$$\dot{m} = \dots \cdot V \cdot S \quad (3.5)$$

La puissance P est donc:

$$P = \frac{1}{2} \underbrace{\dots \cdot V \cdot S \cdot V^2}_m \quad (3.6)$$

Ou encore

$$P = \frac{1}{2} \cdot \dots \cdot S \cdot V^3 \quad (3.7)$$

L'aire S balayée par le rotor est proportionnelle au carré du diamètre D du rotor

$$S = \frac{f \cdot D^2}{4} \quad (3.8)$$

L'expression de la puissance en fonction du diamètre sera finalement donnée par:

$$P = \frac{1}{2} \dots \cdot \frac{f \cdot D^2}{4} \cdot V^3 \quad (3.9)$$

Nous voyons donc que la puissance du vent est proportionnelle au cube de la vitesse du vent et au carré de l'aire balayée par le rotor.

### III-1-1 Limite de Betz

La totalité de l'énergie ne peut pas être captée par l'éolienne car la vitesse en aval du rotor n'est jamais nulle. Donc une partie de l'énergie cinétique du vent n'est pas captée.

Le théorème du physicien Allemand Betz montre que le maximum d'énergie du vent récupérable par le rotor est égal à  $16 / 27$ , soit environ 62 % de l'énergie totale du vent[6].

$$C_p = \frac{\text{puissance}_{\text{rotor}}}{\text{puissance}_{\text{vent}}} \quad (3. 10)$$

#### a. Extrapolation des paramètres de Weibull

Pour estimer les paramètres de Weibull au niveau de moyeu, on procède à une extrapolation verticale des paramètres de Weibull que nous avons calculé à 10m du sol.

La loi de puissance permettant l'extrapolation des paramètres de Weibull  $k_1$  et  $C_1$  en un point  $H_1$  vers un niveau  $H_2$  est donnée par la relation:

$$k_2 = k_1 \left( \frac{1 - 0.0881 \log \frac{H_1}{10}}{1 - 0.0881 \log \frac{H_2}{10}} \right) \quad (3. 11)$$

$H_1$  : hauteur de mesure (m).

$H_2$  : hauteur de moyeu (m).

$k_1$  : facture de forme calculé à l' hauteur  $H_1$ .

$k_2$  : facture de forme estimé à l' hauteur  $H_2$ .

$$C_2 = C_1 \left( \frac{H_2}{H_1} \right)^n \quad (3. 12)$$

$C_1$  : facture d'échelle calculé à l' hauteur  $H_1$  (m/s).

$C_2$  : facture d'échelle estimé à l' hauteur  $H_2$  (m/s).

Avec

$$n = \frac{0.370 - 0.0881 \text{Log} C_1}{1 - 0.0881 \text{Log} \left( \frac{H_1}{10} \right)} \quad (3. 13)$$

### III-1-2 Puissance effective de l'éolienne

La puissance effective à une vitesse  $V$  du vent est [11] :

$$P_{eff} = c_e \underbrace{\frac{1}{2} \cdot \dots \cdot S}_{P_{vent}} \cdot V^3 \quad (3.14)$$

Le coefficient d'efficacité de l'éolienne est :

$$c_e = c_p \eta_m \eta_g \quad (3.15)$$

$C_p$  : Coefficient de la puissance.

$\eta_m$  : Le rendement du multiplicateur et

$\eta_g$  : Le rendement de la génératrice.

Au sol, l'air a une plus grande masse volumique, une plus grande pression et, sauf en cas d'inversion météorologique, une température plus élevée. Il devient moins dense quand l'altitude augmente.

Si la température était constante quelle que soit l'altitude, la pression et la masse volumique de l'air diminueraient proportionnellement avec l'altitude.

Connaissant l'altitude  $Z$  (m) et la température  $\Theta$  (°K) de notre site, la densité d'air peut être calculée par [12]:

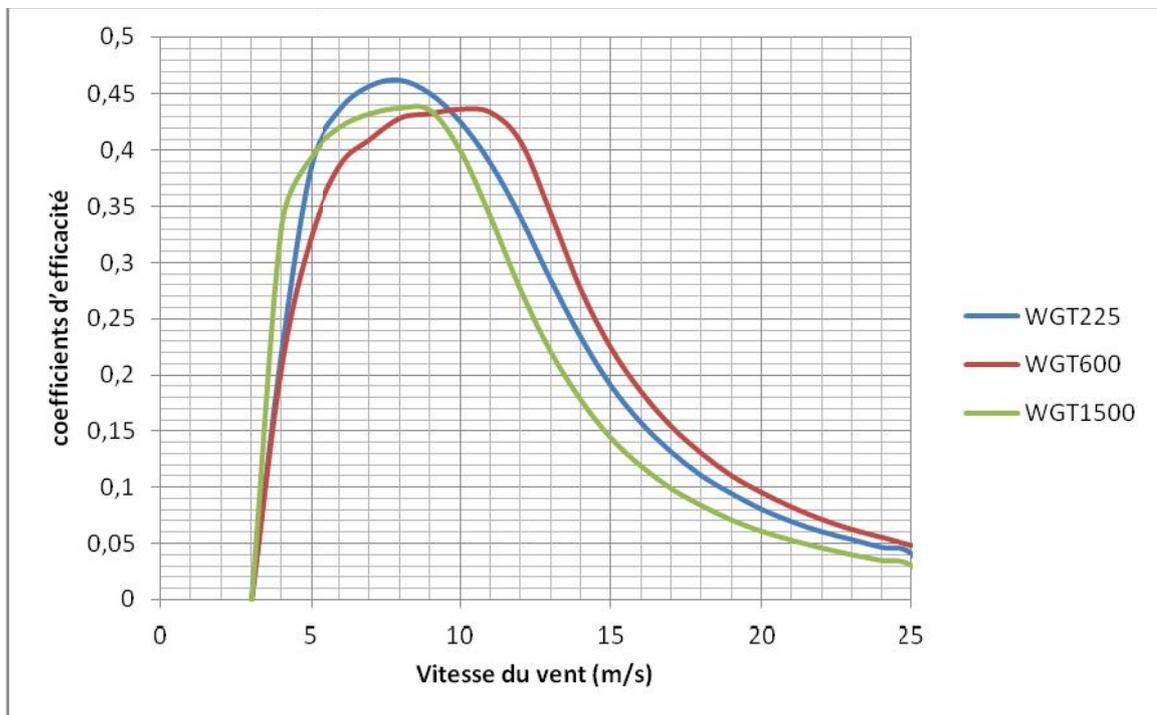
$$\dots = \frac{353.049}{\dots} \exp\left(-0.034 \frac{z}{\dots}\right) \quad (3.16)$$

Vu les caractéristiques du gisement éolien de nos sites étudiés, notre choix se porte sur les éoliennes suivantes, dont les caractéristiques techniques sont données dans le tableau suivant :

Variables	WGT225KW	WGT600 KW	Wgt1500 KW
Diamètre du rotor (m)	27.6	40	80
Puissance nominale (kW)	225	600	1500
Vitesse nominale (m/s)	15	15	14
Hauteur(s) du moyeu (m)	43.1	50	100
Nombre de tours par minute à la puissance nominale	27	25	19
Pale	3	3	3

**Tableau III- 1: Paramètres de la conception de l'éolienne standard [12].**

Pour nos calculs le coefficient d'efficacité de l'éolienne est pris des données Data\WTG Data (voir la Figure III- 1).



**Figure III-1: Courbes des coefficients d'efficacité de l'éolienne en fonction de vitesse.**

La puissance moyenne de l'éolienne est calculée comme l'intégrale de la puissance effective :

$$\bar{p} = \int P_{eff}(V) f(V) dV \quad (3.7)$$

En utilisant la méthode du trapèze pour l'approximation de l'intégrale donnée par l'équation suivante [14] ;

$$\int_a^b f(x) dx \approx \frac{h}{2} \sum_{i=1}^n (f(x_{i+1}) + f(x_i)) \quad (3.18)$$

Nous avons calculé la densité de puissance moyenne pour les trois types d'éoliennes.

Les résultats sont présentés dans la figure suivante.

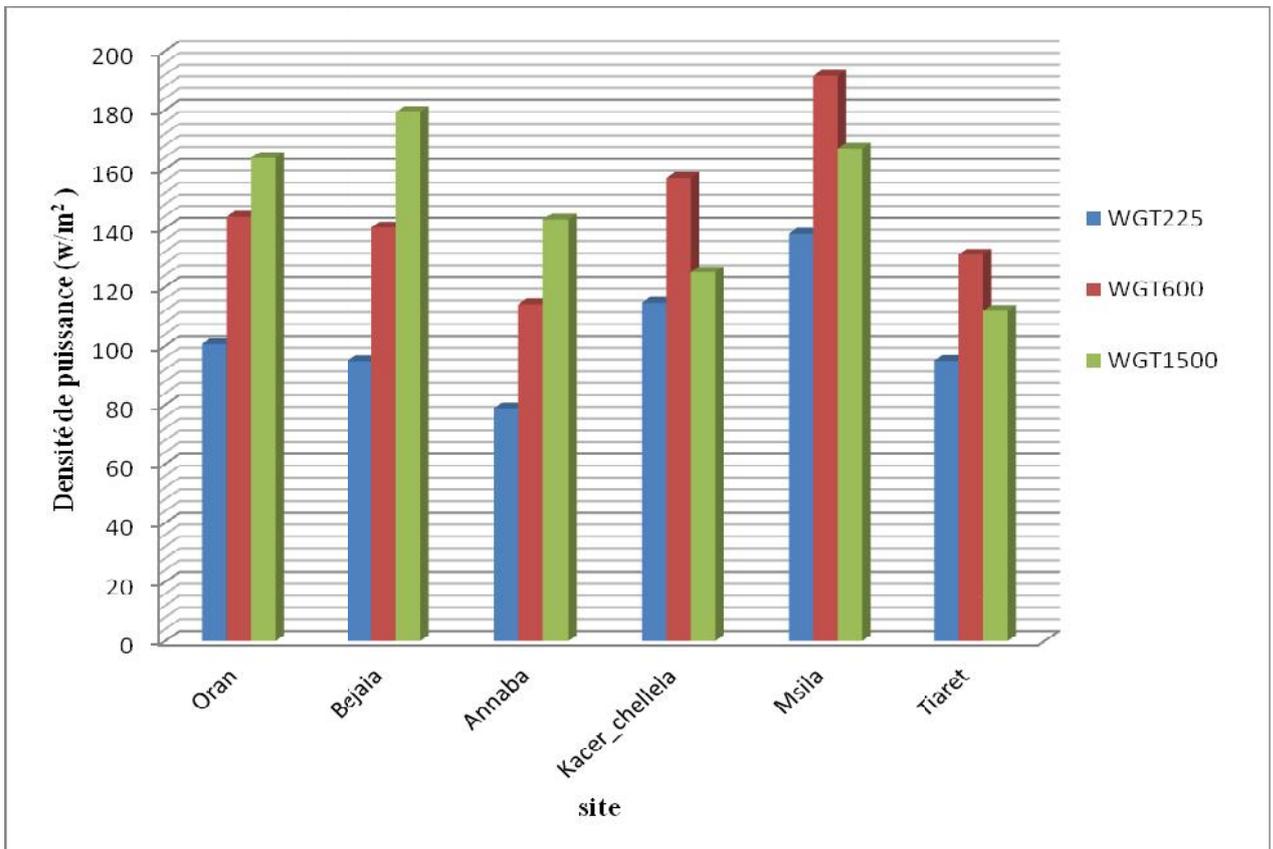


Figure III- 2: Densité de puissance moyenne pour les sites étudiés.

Pour les sites des hauts plateaux on remarque que la densité de puissance de l'éolienne WGT 600 KW est plus élevée que celle de WGT 1500 KW, par contre l'éolienne WGT 1500KW possède la meilleure densité de puissance pour les sites côtiers.

### III-1-3 Facteur de capacité

Le facteur de capacité (CF) pour un site donné est défini comme le rapport de l'énergie produite par le système sur l'énergie nominale[15] :

$$CF = \frac{\bar{P}}{P_N} \quad (3.19)$$

Nous avons calculé le facteur de capacité pour les trois types d'éoliennes. Les résultats sont présentés dans la figure III- 4.

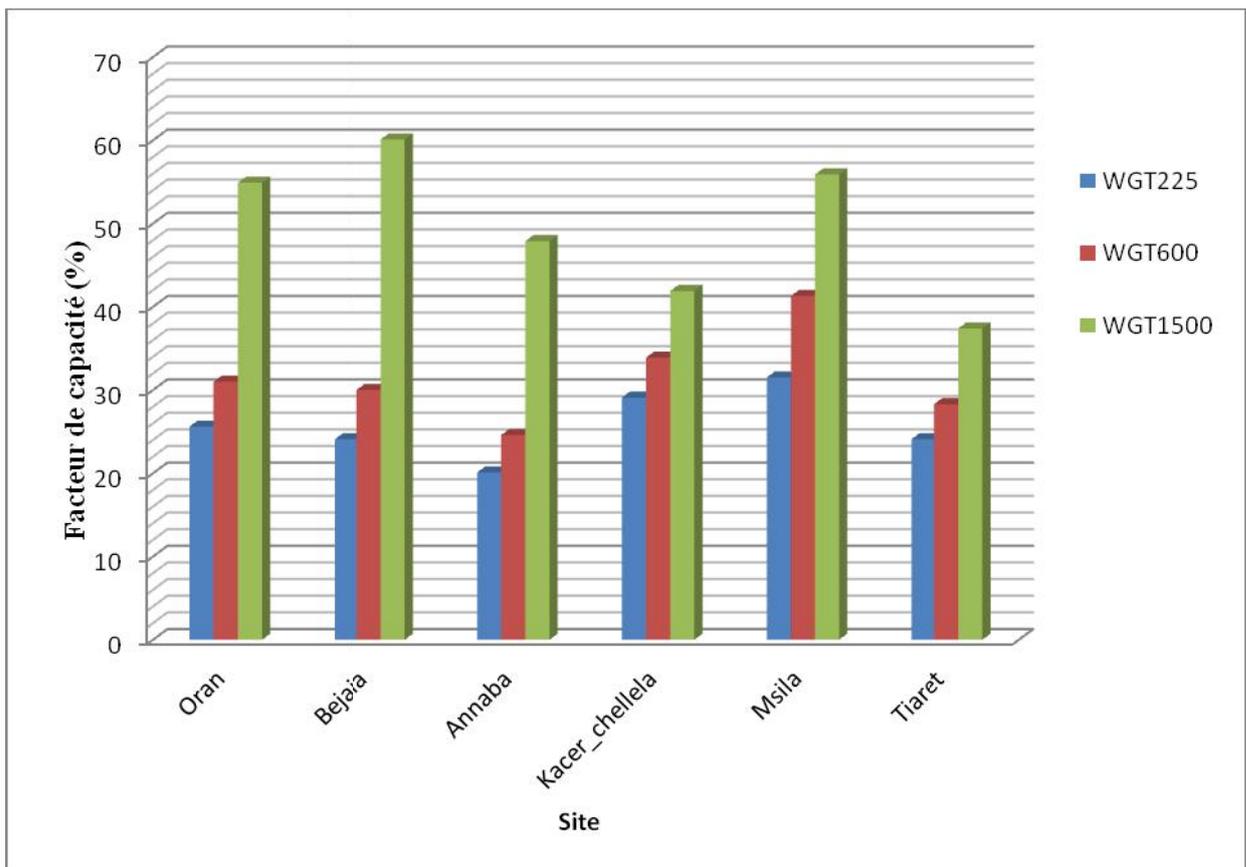


Figure III- 4: Facteur capacité pour les sites étudiés.

L'éolienne de type WGT (1500KW) possède le meilleur facteur capacité qui varie de 37 % à Tiaret à 60% à Bejaia. On constate que cette dernière a un meilleur rendement par rapport aux deux autres éoliennes

#### **III-1-4 Estimation de l'énergie produite par un parc éolien**

Pour produire une grande quantité d'énergie on doit installer un parc éolien. L'alignement des éoliennes a plusieurs avantages. En effet, l'installation, l'exploitation et l'entretien de ces dernières sont plus faciles que la gestion de plusieurs unités dispersées, offrant la même puissance.

L'énergie moyenne récupérable sur une année, est égale à [16] :

$$\overline{E} = \overline{P} \times 8760 \quad (3.20)$$

Lorsque plusieurs turbines sont installées en bloc, la turbulence due à la rotation des lames d'une turbine peut affecter les turbines à proximité.

Afin de minimiser l'effet de cette turbulence induite par le rotor, un espacement de l'ordre 3 à 4  $D_T$  ( $D_T$  est le diamètre du rotor) est fourni à l'intérieur des rangées.

De même, l'écartement entre les rangées peut être de l'ordre 10  $D_T$ , de sorte que le courant d'air passant à travers une turbine est rétabli avant son interaction avec la turbine suivante.

Cet espacement peut être encore augmenté pour une meilleure performance, mais il peut être coûteux car nous avons besoin de plus de terres et d'autres ressources pour plus d'espacement.

En général, la perte d'énergie à cause de l'effet de parc est d'environ 5 % [16].

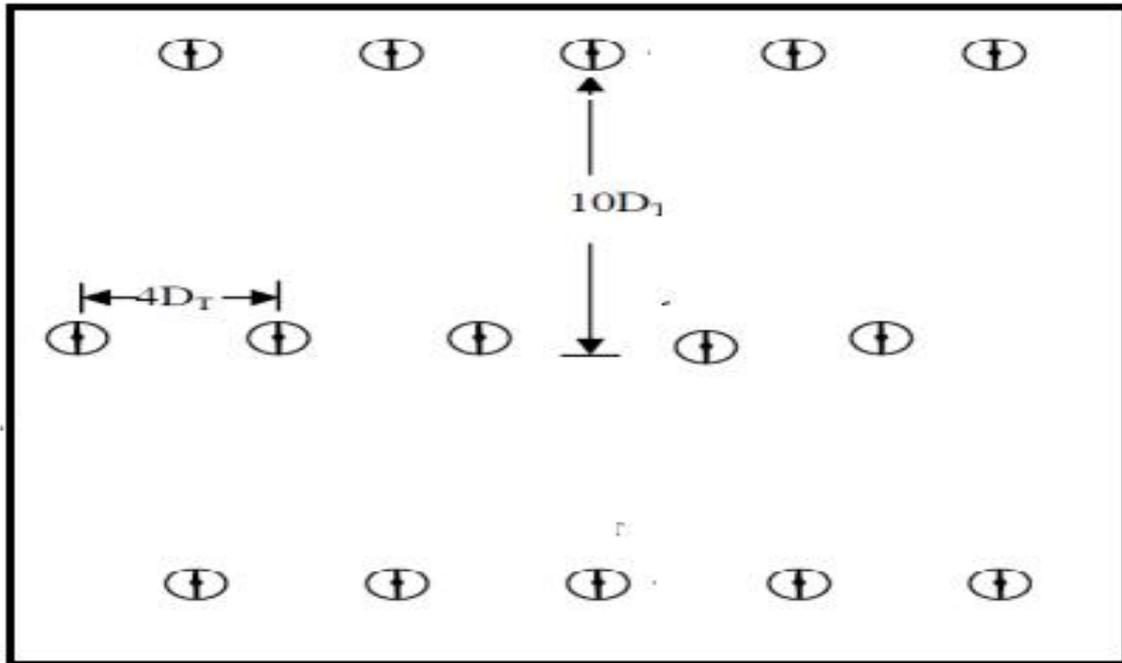


Figure III- 5: Planification du parc éolien [16].

Nous avons choisi d'installer un parc éolien avec une puissance nominale de 9 MW.

On a estimé, comme indiqué ci-dessous, l'énergie produite par les différents types d'éoliennes (voir tableau III-2).

On constate que le parc éolien composé d'une rangée de six aérogénérateurs (WGT1500 kW) produit une quantité d'énergie beaucoup plus élevée que les autres éoliennes (WGT600 KW et WGT225KW). Le choix de l'éolienne WGT1500 KW, beaucoup plus puissante que les deux autres nous a été imposé par la nature topographique et le relief du site étudié de Bejaia. En effet, les spécificités de ce dernier ne nous permettent pas d'installer plus de six éoliennes

La production énergétique du parc éolien choisi varie, durant une année, de 28096,74 MWh à Tiaret à 44988,73 MWh à Bejaia.

Nombre éolienne	WGT225KW		WGT600 KW		WGT1500 KW	
	40		15		6	
énergie	$E_{\text{Turbine}}$ (MWh)	$E_{\text{parc}}$ (MWh)	$E_{\text{Turbine}}$ (MWh)	$E_{\text{parc}}$ (MWh)	$E_{\text{Turbine}}$ (MWh)	$E_{\text{parc}}$ (MWh)
Oran	504.58	19173.89	1631.11	23243.35	7212.98	41114.01
Bejaia	475.67	18075.38	1590.82	22669.13	7892.76	44988.73
Annaba	395.08	15012.89	1293.85	18437.39	6293.18	35871.15
Kacer_chellela	572.90	21770.35	1780.91	25377.94	5503.03	31367.28
M'sila	275.94	10485.72	2173.36	30970.32	7342.63	41853.00
Tiaret	211.12	8022.41	1485.70	21171.17	4929.25	28096.74

**Tableau III- 2: Estimation de l'énergie produite par un parc éolien de puissance 9MW.**

### III-2 Choix des éoliennes

Après avoir comparé le rendement énergétique et le coût global des divers systèmes proposés, on peut procéder au choix des éoliennes à installer.

La nature du relief et la densité de la population au niveau des sites côtiers limitent les surfaces des zones de développement éolien (ZDE). A cet effet, notre choix s'est porté sur une éolienne puissante occupant moins de place. Le parc éolien de 9MW a nécessité six éoliennes de type WGT1500 kW.

Ce choix ne limite pas le rendement énergétique, par contre le coût est légèrement plus élevé.

À Oran, pour atteindre une puissance nominale de 9MW, notre choix c'est porté sur une rangée de six éoliennes distantes de 320 m entre elles de l'Est vers l'Ouest. La planification géographique du parc est illustrée dans Figure III- 6. Le parc éolien virtuel est représenté dans la Figure III- 7.

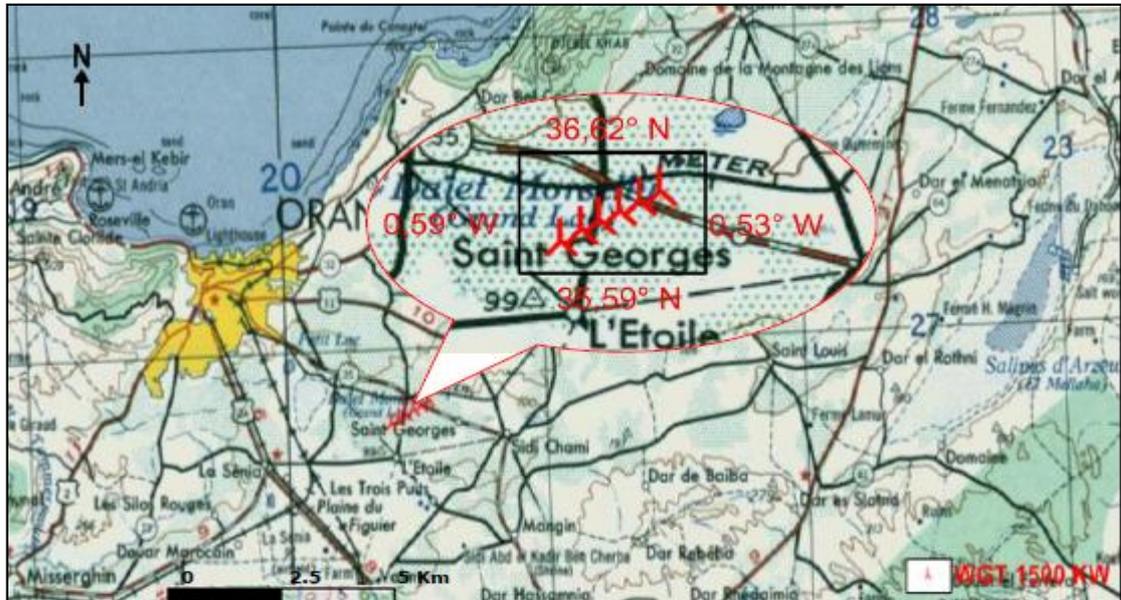
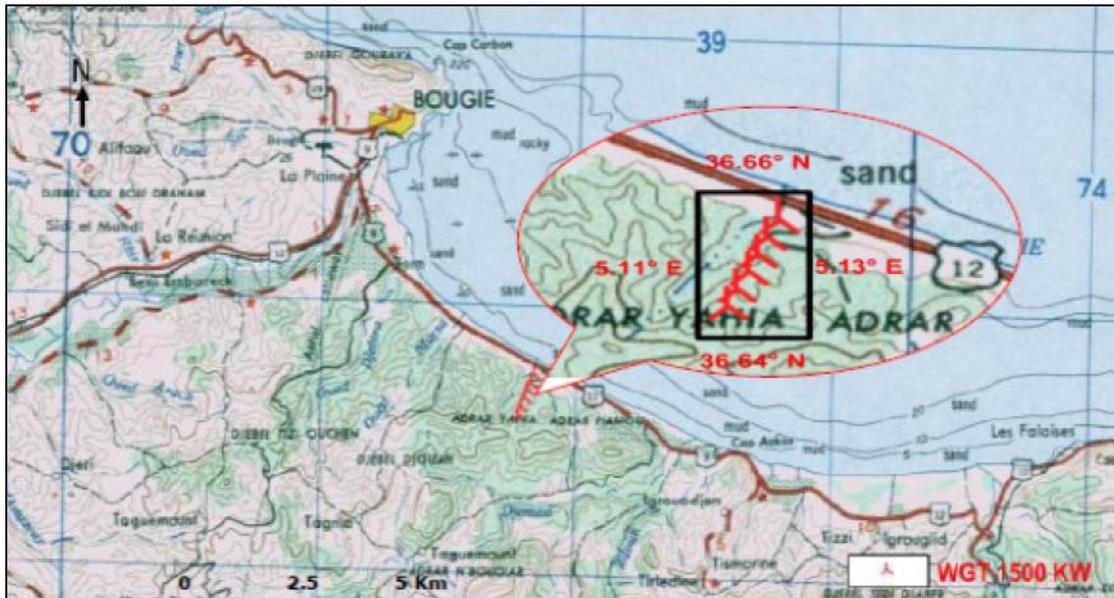


Figure III- 6: Planification du parc éolien de 9MW à Oran.



Figure III- 7: Parc éolien virtuel à Oran.

A Bejaia, on conserve la même planification que celle d'Oran. Cependant, l'orientation change selon l'axe Sud-Nord. En raison de la présence d'habitants, la distance entre les éoliennes est réduite de 320 à 240 m. L'installation des éoliennes est orientée du Nord vers le Sud car le vent ouest si le vent dominant. La planification du parc et le parc éolien virtuel sont montrés dans les Figures III- 8 et III- 9.



**Figure III- 8: planification du parc éolien de 9MW à Bejaia.**



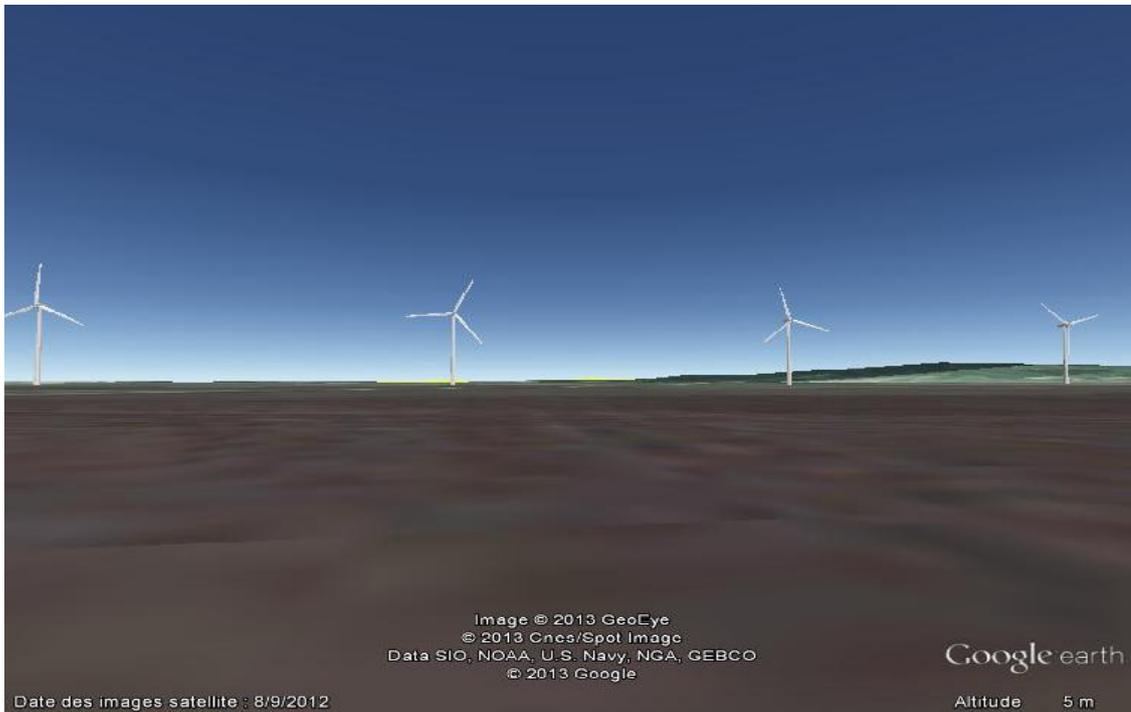
**Figure III- 9: Parc éolien virtuel à Bejaia.**

Pour Annaba, l'installation des éoliennes s'est faite en une ligne du Nord vers le Sud tout en gardant les mêmes distances prises que celles des deux premiers parcs. La planification géographique du parc est montrée dans Figure III- 10



**Figure III- 10: Planification du parc éolien de 9MW à Annaba.**

Le parc éolien virtuel est illustré dans la figure suivante :



**Figure III- 11: Parc éolien virtuel à Annaba.**

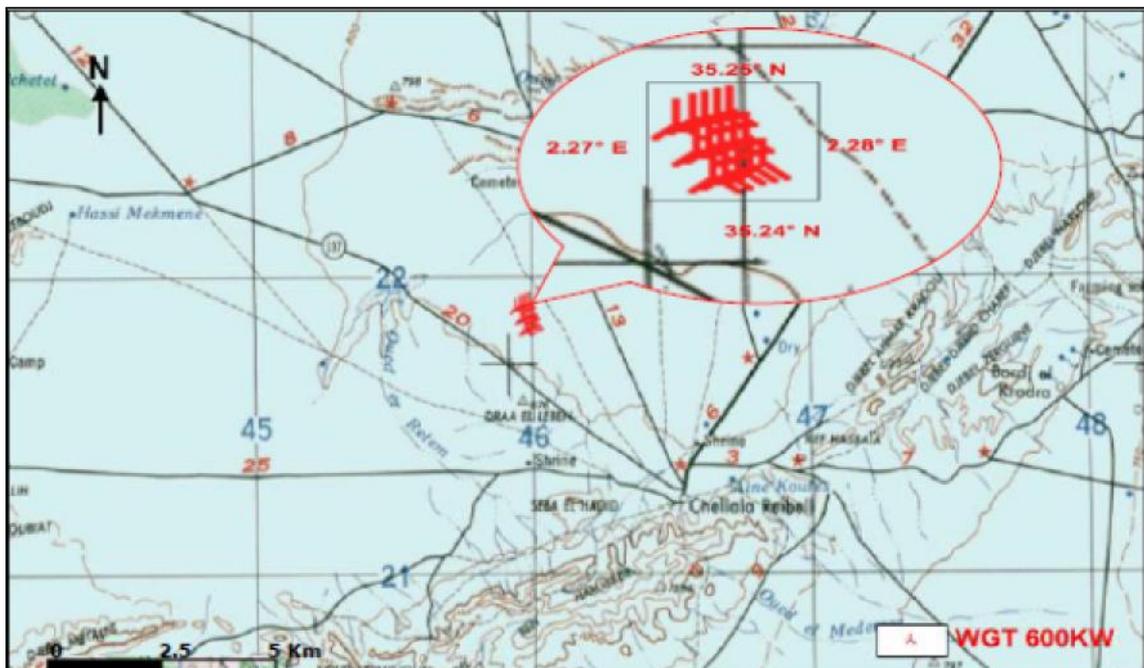
Pour les sites des hauts plateaux, on dispose de surfaces favorables pour d'importantes zones de développement d'éolienne ZDE. On peut alors choisir la machine WGT 600 KW dont le coût est plus faible par rapport aux autres.

Notre parc éolien est ainsi constitué de quinze aérogénérateurs et s'avère compétitif d'un point de vue énergétique et économique.

Pour Ksar- Chellala, notre choix s'est porté sur trois lignes d'éoliennes, distantes entre elles de 406 m suivant l'axe Ouest-Nord-Ouest suivant la direction Est- Sud- Est.

Chaque rangée comporte cinq éoliennes. La distance entre elles est de 123 m suivant l'axe Ouest-Sud- Ouest suivant la direction Est- Nord- Est.

La planification géographique du parc éolien ainsi que la représentation du parc éolien virtuel sont illustrés dans les Figures III- 12et III- 13.



**Figure III- 12: Planification du parc éolien de 9MW à Ksar-Chellala.**

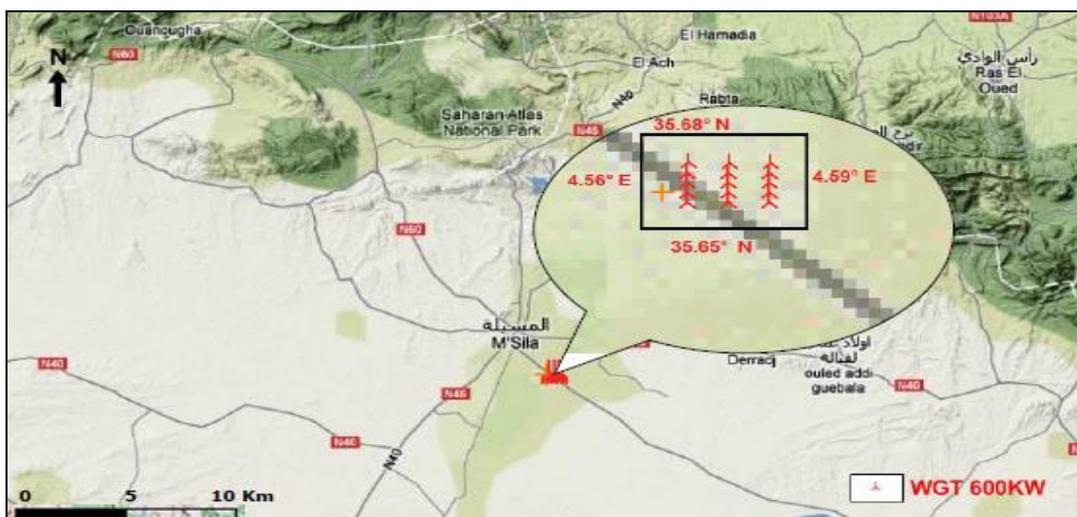


**Figure III- 1 3: Parc éolien virtuel à Kasr-Chellala**

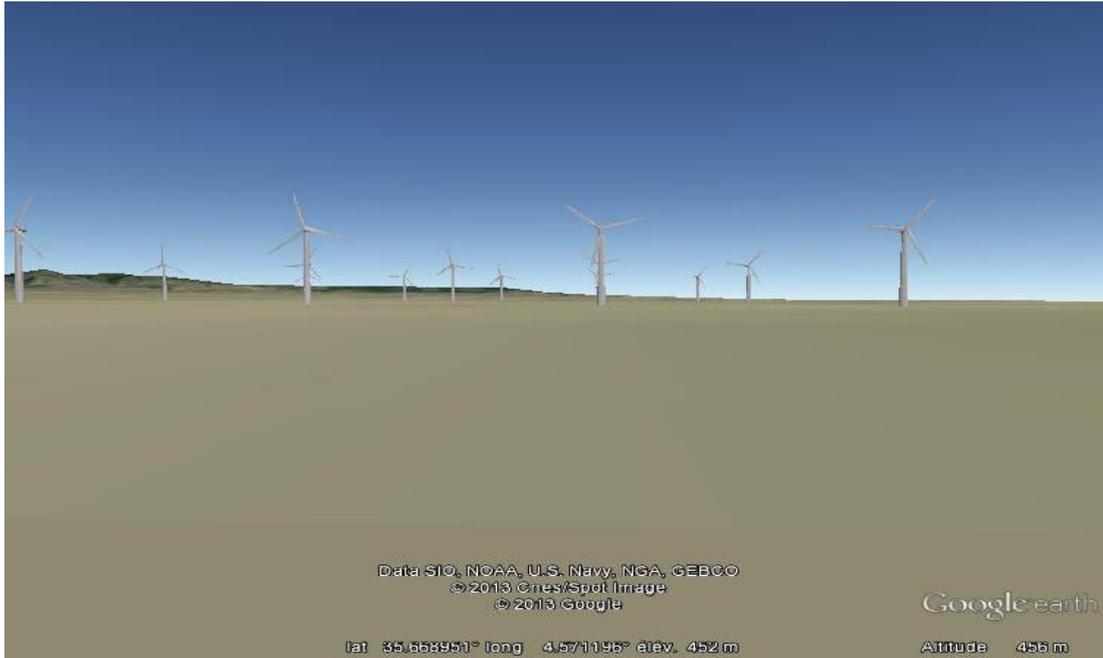
Pour le site de M'sila, le secteur dominant du vent est l'Ouest. Pour cela, les trois rangées d'éoliennes vont être orientées d'Ouest vers l'Est.

La distance entre deux rangée voisines est de 406 m , chacune est composée de cinq éoliennes séparées de 123 m suivant l'axe Nord – Sud .

La planification géographique du parc éolien ainsi que la représentation du parc éolien virtuel sont illustrés dans les figure suivantes:



**Figure III- 14: Planification du parc éolien de 9MW à M'sila.**

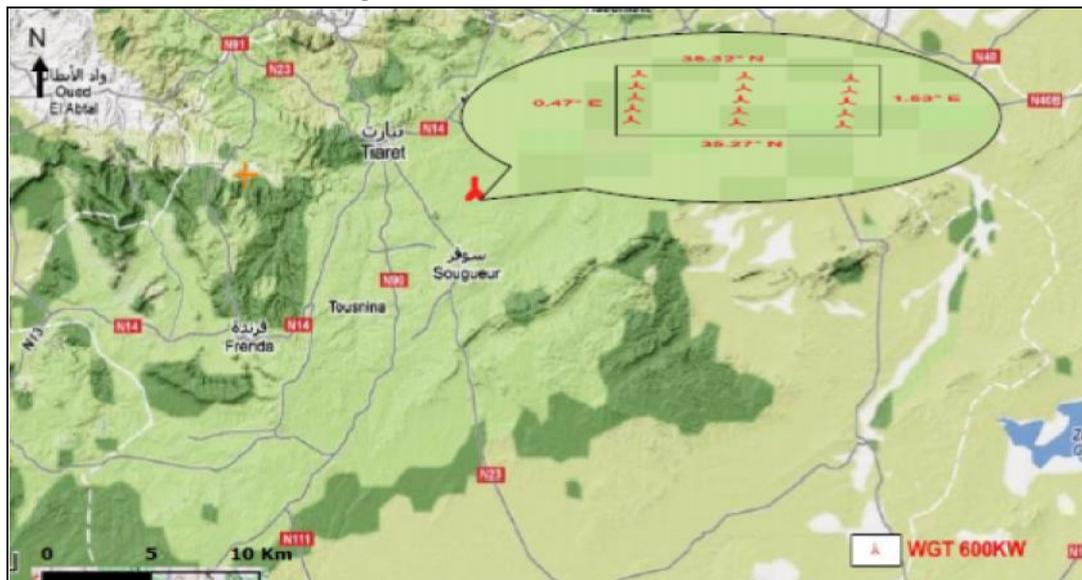


**Figure III- 15: Parc éolien virtuel à M'sila.**

Pour Tiaret, le secteur dominant du vent est l'Ouest. Par conséquent, le parc composé de trois rangées d'éoliennes est orienté suivant l'axe Ouest – Est. Les rangées sont distantes entre elles de 406 m.

Chaque rangée comporte cinq éoliennes distantes de 123 m suivant l'axe Nord – Sud.

La planification géographique du parc éolien ainsi que la représentation du parc éolien virtuel sont illustrés dans les Figures III- 16 et III- 17.



**Figure III- 16: Planification du parc éolien de 9MW à Tiaret.**



Figure III- 17: Parc éolien virtuel à Tiaret.

### III-3 Estimation du coût d'investissement des parcs éoliens

La répartition des coûts d'investissement  $C_{it}$  entre les différents sites peut varier d'un projet à l'autre, notamment selon le nombre d'éoliennes. En effet, pour les grands parcs, il est possible de réaliser certaines économies.

Quel que soit le nombre d'éoliennes envisagé dans le parc éolien, les coûts sont les suivants [17]:

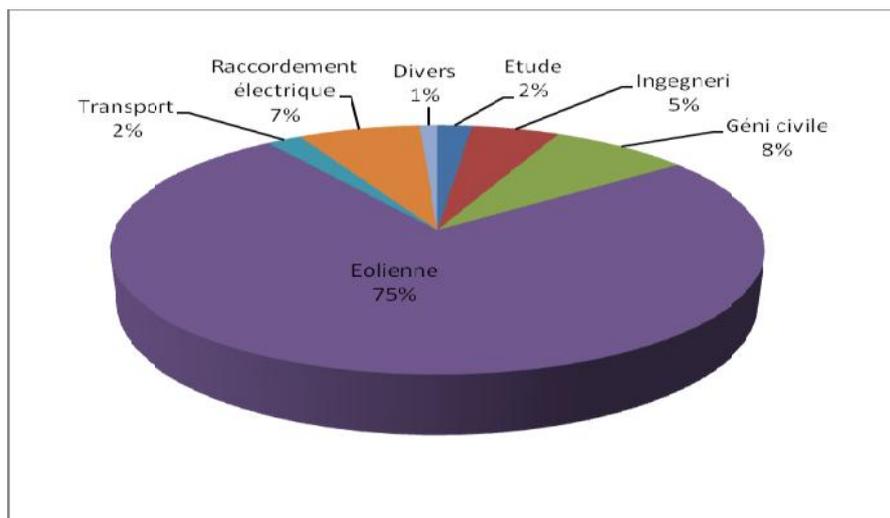


Figure III- 18 : Répartition des coûts d'investissement pour un parc éolien [17] .

**III-3-1 Coûts des études**

Les Coûts des études représentent environ 2% du coût global. Ils couvrent les frais d'étude de faisabilité, la planification, les plans de construction du site, l'étude du potentiel éolien et le choix optimal de l'emplacement de l'éolienne (ou du parc éolien) sur le site, les frais de déplacement, et les frais imprévus.

**III-3-2 Coûts d'ingénierie**

Ils s'élèvent généralement à 5 % du montant total de l'investissement éolien et comprennent les études de sol, le calcul des structures, la coordination et la gestion de chantier.

**III-3-3 Coûts de génie civil**

Ils représentent environ 8 % du coût total d'un investissement éolien et recouvrent la réalisation des fondations, l'aménagement et réaménagement des chemins d'accès pour le chantier et l'établissement de l'aire de montage.

**III-3-4 Coût des éoliennes.**

Il peut varier sensiblement en fonction du type d'éoliennes, de la disponibilité en stock et du coût des matières premières (acier, ...). La variation peut atteindre jusqu'à 25 à 30 % du prix. Cet écart est loin d'être négligeable car le coût total d'achat des éoliennes représente généralement 75 % du coût total du projet.

**III-3-5 Coût du transport**

En général, le coût du transport est fonction de la distance, du volume et du poids de l'ensemble des composants et équipements. Pour notre étude on suppose que le Coût du transport est constant pour tous les sites, et égal à 2% du coût total du projet.

**III-3-6 Coûts de raccordement électrique**

Ils s'élèvent en moyenne à 7 % du coût total du projet. Ils peuvent varier en fonction de la présence, à proximité du site, d'un poste de transformation d'électricité et de sa capacité

d'accueil pour l'injection sur le réseau de l'électricité produite par le parc éolien. Ils incluent les coûts des différents raccordements inter-éoliens au poste de transformation et l'installation de cabine.

### III-3-7 Coûts divers

Englobent les coûts relatifs au raccordement téléphonique, au terrain, au balisage, ... Ils constituent environ 1 % du coût global.

Nous avons estimé le cout d'un parc éolien de puissance nominale de 9 MW, dans les divers sites de notre étude. Les détails de coût de notre étude sont donnés dans le Tableau III- 1

Après estimation des divers coûts, on constate que le coût d'investissement global  $C_{it}$  du parc éolien de 9MW dans les six sites étudiés est compris entre 9 et 140 Million USD, l'équivalent de 718 et 1114 Million DA.

Coûts	parc WGT225KW			parc WGT600KW			parc WGT1500KW		
	%	Mille USD	Mille DZD	%	Mille USD	Mille DZD	%	Mille USD	Mille DZD
Etude	2	213.33	17013.33	2	180.00	14355.00	2	2793.60	222789.60
Ingenneri	5	533.33	42533.33	5	450.00	35887.50	5	6984.00	556974.00
Géni civile	8	853.33	68053.33	8	720.00	57420.00	8	11174.40	891158.40
Eolienne	75	8000	638000	75	6750.00	538312.50	75	104760.00	8354610.00
Transport	2	213.33	17013.33	2	180.00	14355.00	2	2793.60	222789.60
Raccordement électrique	7	746.67	59546.67	7	630.00	50242.50	7	9777.60	779763.60
Divers	1	106.67	8506.67	1	90.00	7177.50	1	1396.80	111394.80
<b>Total</b>	<b>100</b>	<b>10666,67</b>	<b>850666,67</b>	<b>100</b>	<b>9000,00</b>	<b>717750,00</b>	<b>100</b>	<b>139680,00</b>	<b>11139480,00</b>

Tableau III- 3: Estimation du coût d'investissement d'un parc éolien de 9MW.

### III-3-8 Coût de l'électricité à partir de l'énergie éolienne

Le coût du KWh produit est égal au rapport du coût total actualisé du projet  $C_{ta}$  sur l'énergie électrique produite  $E_p$  [17]:

$$C_{ep} = \frac{C_{ta}}{E_p} \quad (3.22)$$

$E_p$  : l'énergie électrique produite (KWh).

$C_{ta}$  : coût total actualisé du projet (USD).

Le coût total actualisé  $C_{ta}$  est donné par la relation :

$$C_{ta} = aC_{it} + C_{am} \quad (3.23)$$

Avec :

$C_{am}$  : coûts liés à la maintenance (USD).

$C_{it}$  : coût d'investissement total (USD).

Les coûts liés à la maintenance  $C_{am}$  sont pris égaux à 2.5 % du coût d'investissement total et le facteur d'actualisation  $a$  défini par :

$$a = \frac{r}{1 - (1 + r)^n} \quad (3.24)$$

Un accord préalable sur les conditions de financement précise que le projet a une durée de vie économique de 20 ans et que le taux d'actualisation  $r$  est de 8 % [11].

Nous envisageons l'estimation du coût de l'énergie en prenant en compte les diverses possibilités de choix d'éoliennes composant notre parc éolien de puissance nominale de 9MW.

Pour le choix d'un parc éolien composé de 40 éoliennes de type WGT225KW, nous avons calculé le coût de l'énergie, qui varie de 0.02 à 0.05 USD/KWh (voir Tableau III- 2).

Pour un parc éolien de même puissance nominale, composé de 15 éoliennes de type WGT600KW, le coût estimé de l'énergie varie de 0.01 à 0.02 USD/KWh.

Pour un parc éolien de 6 éoliennes de type WGT1500KW, le coût estimé de l'énergie est très élevé par rapport aux deux autres choix. Il varie de 0.21 à 1.05 USD/KWh.

En général, le Coût de l'électricité est aux normes, sachant qu'à l'échelle mondiale le coût du KWh électrique sur sites isolés est relativement élevé avec des valeurs voisines de 0,5 USD/KWh [17].

Les détails du Coût de l'électricité estimé provenant des divers choix d'éoliennes sont représentés dans le Tableau III- 3

Site	Parc (WGT225KW)		Parc (WGT600KW)		Parc (WGT1500KW)	
	USD/KWh	DZD/KWh	USD/KWh	DZD/KWh	USD/KWh	DZD/KWh
Oran	0.02	1.83	0.02	1.27	0.80	11.18
Bejaia	0.02	1.94	0.02	1.31	0.73	10.21
Annaba	0.03	2.34	0.02	1.61	0.92	12.81
Kacer-Chellela	0.02	1.61	0.01	1.17	1.05	14.65
M'sila	0.04	3.35	0.01	0.96	0.78	10.98
Tiaret	0.05	4.37	0.02	1.40	0.21	16.35

**Tableau III- 4: Coût de l'électricité à partir de l'énergie éolienne.**

## **Conclusion**

En tenant compte des caractéristiques du gisement éolien de nos sites étudiés, notre choix s'est porté sur les éoliennes de type WGT225KW, WGT600 KW et WGT1500 KW.

On remarque que pour les sites des hauts plateaux, la densité de puissance de l'éolienne de type WGT 600 KW est plus élevée que celle de WGT 1500 KW.

De nos calculs, on peut déduire que l'éolienne de type WGT (1500KW) possède le meilleur facteur capacité qui varie de 37 % à Tiaret à 60% à Bejaia. On constate que cette dernière a un meilleur rendement par rapport au deux autres éoliennes.

Nous avons choisi d'installer un parc éolien avec une puissance nominale de 9 MW.

Ce choix nous a été imposé par la nature topographique et le relief du site étudié de Bejaia. En effet, les spécificités de ce dernier ne nous permettent pas d'installer plus de six éoliennes de 1500 KW.

On a estimé l'énergie produite par les différents types d'éoliennes. On constate que le parc éolien composé d'une rangée de six aérogénérateurs (WGT1500KW) produit une quantité d'énergie beaucoup plus élevée que les autres éoliennes (WGT600 KW et WGT225KW).

La production énergétique du parc éolien choisi durant une année varie de 28096,74 MWh à Tiaret à 44988,73 MWh à Bejaia.

Après avoir comparé le rendement énergétique et le coût global des divers systèmes proposés, on a procédé au choix des éoliennes à installer.

La nature du relief et la densité de population au niveau des sites côtiers limite les surfaces des zones de développement éolien (ZDE). A cet effet, notre choix s'est porté sur une éolienne puissante occupant moins de place. Le parc éolien de 9MW a nécessité six éoliennes de type WGT1500 kW. Ce choix ne limite pas le rendement énergétique, par contre le cout est légèrement élevé.

Pour les sites des hauts plateaux, on dispose de surfaces favorables pour d'importantes zones de développement d'éolienne ZDE. On peut choisir la machine WGT 600 KW avec un coût faible par rapport aux autres.

Notre parc éolien est constitué de quinze aérogénérateurs, compétitif d'un point de vue énergétique et économique.

Nous avons planifié le choix du site géographique optimal, pour les diverses zones de notre étude, en tenant compte des spécificités de chaque site. Le programme windpro a été ensuite utilisé afin de planifier un parc éolien virtuel dans les différents sites.

Après avoir étudié techniquement notre parc éolien de puissance nominale de 9 MW, on s'est intéressé au coût de ce dernier dans les divers sites considérés.

L'estimation du coût d'investissement global  $C_{it}$  du parc éolien de 9MW dans les six sites étudiés est comprise entre 9 et 140 Million USD, l'équivalent de 718 et 1114 Million.

## Bibliographie

- [1]M. Bauer, Les projets d'énergie éolienne dans les communes, RTS, l'IHK Zetis GmbH, Allemagne, (2011).
- [2]P. Robin, Les différentes phases de développement d'un parc éolien, EED/POWEO, Limoges, (2009).
- [3]P. Baril, la participation des municipalités aux projets d'éoliennes, Gouvernement du Québec, (2007), ISBN 978-2-550-50247-0.
- [4]C .Mahe et L. Bonamy, Projet de parc éolien offshore de la baie de Saint-Brieuc ,Rapport final du Groupe de Travail, (2011).
- [5]M. Nadjah, M. Khechana, L. Laiche, T .Ouksel et C. Mahfoudi , Etude de l'hélice d'une éolienne de 5 kW , Revue des Energies Renouvelables CISM'08 Oum El Bouaghi , (2008), 257 – 264.
- [6]T. Philippe et TH.Claude, étude d'une éolienne, projet technologique, université de Québec, (2007), TCH-090-095.
- [7]D. Marche et H. Langlois, Étude de l'éolienne Air X en soufflerie, rapport de laboratoire école de technologie supérieure, Québec, (2009).
- [8]P. Leconte, M. Rapin et E. Szechenyi, Éoliennes, BM 4 640, Techniques de l'Ingénieur, traité Génie mécanique,( 2001), N°: 15.
- [9]J. Menet et B. Ménart, une procédure de comparaison de quelques éoliennes classiques Basée sur l'utilisation du critère l-sigma, XVème Congrès Français de Mécanique, Nancy, 3 – 7 Septembre (2001).
- [10]C G. Justus et A. Mikhail, Height Variation of Wind speed and Win Distributions Statistics, Geophysical Research Letters, (1976). vol. 3: N° 5
- [11]R. Maouedj, S. Bousalem , B. Benyoucef ,ALGERIA WIND ENERGY RESOURCES, Scientific Technical Centre «TATA»,( 2008), 6 (62).
- [12]A. Arbaoui, Aide à la décision pour la définition d'un système éolien adéquation au site et a un réseau faible, thèse doctorat, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Centre de Bordeaux, (2006).
- [13]EMD, the Wind Pro Software. Available from: <http://emd.dk/WindPro/downloads%20and20%updates> (accessed 10july2011), (2009).
- [14]A. Meier, P. Bonanomi et D. Messina , Intégration numérique , Mathématiques - Mini Projet, école polytechnique fédéral de Lausanne, (2006).

[15] S. Mathew, Wind Energy Fundamentals .Resource Analysis and Economics, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, ( 2006), ISBN-13 978-3-540-30905-5.

[16] N. Kasbadji Merzouk, évaluation du gisement énergétique éolien contribution a la détermination du profil vertical de la vitesse du vent en Algérie, thèse doctorat université de Tlemcen, (2006).

[17] M. Duquesne, Eolien: quelle est la répartition des coûts entre les différents postes d'un projet, Rapport, Union des Villes et Communes de Wallonie asbl, (2010).

[18] A. Arbaoui, J.P. Nadeau et P. Sébastian, Adéquation site et système éolien éléments d'aide à la décision par la modélisation par contraintes, Rev. Energ. Ren. Vol. 8, (2005) 81 – 94.

## *Chapitre IV*

### *Impacts environnementaux des parcs éoliens*

## **Introduction**

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

L'impact néfaste de certaines activités de l'homme sur la nature est aujourd'hui reconnu. Certaines sources d'énergie contribuent à un changement global du climat et/ou à la pollution de notre planète. La concentration de CO<sub>2</sub> a augmenté de 25% depuis l'ère préindustrielle et on augure qu'elle doublera pour 2050[1]. Ceci a déjà provoqué une augmentation de la température de 0,3 à 0,6° C depuis 1900, les scientifiques prévoient que la température moyenne augmentera de 1 à 3,5° C d'ici l'an 2100, ce qui constituerait le taux de réchauffement le plus grand des 10 000 dernières années [1]. Toutes les conséquences de ce réchauffement ne sont pas prévisibles, mais on peut par exemple avancer qu'il provoquera une augmentation du niveau de la mer de 15 à 95 cm d'ici l'an 2100 [1].

L'énergie éolienne est avant tout une énergie respectant l'environnement, d'autre part elle a des atouts économiques, en effet :

- C'est une source d'énergie disponible qui répond aux besoins locaux en énergie. Ainsi les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont moindres. Cette source d'énergie peut de plus stimuler l'économie locale, notamment dans les zones rurales.

- C'est l'énergie parmi les moins chères entre les énergies renouvelables sur site isolé [2].

- Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement. Elle répond au besoin urgent d'énergie permettant à ces pays de se développer. L'installation d'un parc éolien ou d'une éolienne est relativement simple.

Le coût de l'investissement nécessaire est faible par rapport aux énergies traditionnelles. Enfin, ce type d'énergie est facilement à intégrer dans un système électrique existant déjà.

- L'énergie éolienne crée plus d'emplois par unité d'électricité produite que n'importe quelle source d'énergie traditionnelle.

Même s'ils ne sont pas nombreux, les éoliennes ont quelques désavantages:

- L'impact visuel. Ceci reste néanmoins un thème subjectif.
- Le bruit : il a nettement diminué, notamment le bruit mécanique qui a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur.

Le bruit aérodynamique est lié à la vitesse de rotation du rotor, et celle-ci doit donc être limitée.

- L'impact sur les oiseaux: certaines études montrent que ceux-ci évitent les aérogénérateurs [9]. D'autres études disent que les sites éoliens ne doivent pas être implantés sur les parcours migratoires des oiseaux.
- La qualité de la puissance électrique.

La source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne.

Jusqu'à présent, le pourcentage de ce type d'énergie dans le réseau était faible, mais avec le développement de l'éolien, notamment dans les régions à fort potentiel de vent, ce pourcentage n'est plus négligeable.

Ainsi, l'influence de la qualité de la puissance produite par les aérogénérateurs augmente, les contraintes des gérants du réseau électrique sont de plus en plus strictes.

- L'investissement dans l'énergie éolienne par rapport aux sources d'énergie classiques : Bien qu'en terme de coût, l'éolien puisse être rentable sur les meilleurs sites, là où il y a le plus de vent, il peut concurrencer la plupart des sources d'énergie classique mais son coût reste encore plus élevé que celui des sources classiques sur les sites les moins ventés.

## **IV-1 Impact acoustique du parc éolien**

Aujourd'hui, bien que la taille des éoliennes et la capacité des parcs éoliens deviennent de plus en plus grandes, les nuisances liées au bruit des éoliennes peuvent constituer un frein au développement de cette source d'énergie renouvelable. Ce bruit est caractérisé par des fluctuations temporelles d'amplitude qui peuvent être à l'origine d'une gêne chez les riverains.

Comme tous les autres systèmes mécaniques tournants, les turbines éoliennes créent du bruit lors de leur fonctionnement.

Le bruit était un problème grave avec les conceptions de turbines dans les années 80. Pendant ce temps, les impacts environnementaux de l'énergie éolienne n'étaient pas un sujet de préoccupation tel qu'il est aujourd'hui. Certaines turbines construites durant cette période étaient assez bruyantes et dérangent les gens, même à de grandes distances.

Dernièrement, les émissions sonores des éoliennes ont attiré plus l'attention des scientifiques, des organismes environnementaux et des organismes de réglementation.

Un certain nombre de modifications de conception ont été fait pour l'éolienne moderne beaucoup plus calme que les anciennes.

Tout son indésirable peut être considéré comme du bruit.

Qu'est-ce que le bruit?

Le son : Du point de vue physique, le son est un phénomène produit par la mise en vibration des molécules de l'air ambiant à l'aide d'un émetteur sonore.

Le bruit : C'est un son indésirable, qui dérange ou crée des dommages aux récepteurs. Une émission sonore est composée de nombreuses fréquences (Hz) qui constituent son spectre.

Le spectre audible s'étend environ de 20 Hz à 20 000 Hz et se décompose comme suit :

- De 20 à 400 Hz : graves
- De 400 à 1 600 Hz : médiums
- De 1 600 à 20 000 Hz : aigus

La tendance pour les éoliennes futures est à l'augmentation de leur taille, ce qui va dans le sens d'un renforcement du contenu basse fréquence du spectre de bruit.

Comment mesure-t-on le bruit ?

La perception du bruit par l'homme varie selon les individus.

La pression sonore, exprimée en dB ou en dB(A), est mesurée à l'aide d'un sonomètre. Elle permet de quantifier le niveau sonore perçu à une distance donnée.

Il y a quatre types de bruit qui peuvent être générées par le fonctionnement d'une éolienne: tonale, à large bande, basse fréquence et impulsifs.

Dans tous les cas, le bruit d'une éolienne résulte de la contribution sonore de plusieurs sources de bruit (mécaniques et aérodynamiques).

Bruits d'origine mécanique

Le bruit mécanique provient du fonctionnement de tous les composants présents dans la nacelle. Les principaux émetteurs de bruit sont le multiplicateur de vitesse, les arbres, la génératrice et les équipements auxiliaires.

Le bruit émis est en large bande mais contient également des tons purs en relation avec les parties tournantes.

Bruits d'origine aérodynamique

Le freinage du vent et son écoulement autour des pales engendrent un son caractéristique, comme un souffle. La plus grande partie du bruit a pour origine l'extrémité de la pale et dans une moindre mesure, son bord de fuite.

L'utilisation de profils et de géométries de pales spécifiques aux éoliennes a permis de réduire cette source sonore.

Les bruits d'origine aérodynamique sont divisés en trois groupes principaux:

\*Basse fréquence et infrason

Le passage des pales devant la tour crée un bruit qui se situe dans les basses fréquences. Les éoliennes émettent des sons que l'on entend peu (basses fréquences) ou pas du tout, les infrasons (très basse fréquences).

Les infrasons se propagent loin avec peu d'atténuation ; ils ne sont arrêtés ni par les murs des maisons, ni par les fenêtres, même isolées ou insonorisées.

L'amplitude du bruit peut être exprimée soit en termes de niveau de puissance acoustique soit en termes de niveau de pression acoustique.

Le niveau de puissance acoustique indique la puissance acoustique avec laquelle le bruit est émis par la source alors que la pression sonore nous indique l'intensité du bruit perçu par l'auditeur situé en un point donné.

**IV-1-1 Méthode de calcul suivant la norme « Série ISO 9613-2 »**

La série ISO 9613-2 est une norme spécifique des méthodes de description de bruit à l'extérieur dans des environnements communautaires.

D'autres normes, expliquent les méthodes de détermination des niveaux de puissance acoustique émis par les sources de bruit différents, tels que les machines et le matériel spécifié (ISO 3740) [10], ou plaintes industrielles (ISO 8297).

Cette partie de l'ISO9613 est destinée à combler le fossé entre ces deux types de normes (ISO 3740) et (ISO 8297).

La méthode décrite dans cette partie de l'ISO 9613 est générale en ce sens qu'elle peut être appliquée à une grande variété de sources de bruit, et couvre la plupart des principaux mécanismes d'atténuation.

Il y a, cependant, des contraintes quant à son utilisation, qui découlent principalement de la description du bruit ambiant dans la série ISO 1996 de normes 9613-2.

Cette dernière est une méthode d'ingénierie pour le calcul de l'atténuation du son lors de propagation dans l'air afin de prédire les niveaux de bruit ambiant à distance à partir d'une variété de sources

La méthode spécifiée dans cette partie de l'ISO 9613 consiste précisément des algorithmes des bandes d'octave (avec fréquences MID BAND nominales de 63 Hz à 8 kHz), pour calculer l'atténuation du son, qui provient d'une source sonore ponctuelle, ou un ensemble de sources ponctuelles La source(ou les sources) peut être mobile ou fixe [11][13].

Les termes spécifiques sont fournis dans les algorithmes pour les effets physiques suivants:

- Divergence géométrique;
- L'absorption atmosphérique;
- L'effet de sol.
- Réflexion sur les surfaces.
- Le dépistage par des obstacles.

## **IV-1-2 Présentation de la méthode**

### Niveau de pression sonore

Le Niveau de pression acoustique ( $L_{AT}$  en décibels), est défini par l'équation(4 .1):

$$L_{AT} = 10 \text{ Log } \left\{ \frac{\left[ \frac{1}{T} \int_0^T P_A^2(t) dt \right]}{p_0} \right\} \quad (4. 1)$$

Où

$p_a(t)$  : pression acoustique instantanée pondérée A, en pascals.

$p_0$  : pression acoustique de référence (égale à  $20 \times 10^{-6}$  Pa).

T : intervalle de temps donné en secondes.

### Équations de base

Le niveau de la pression sonore est défini par :

$$L_{fT}(DW) = L_{WA} + D_C - A - C_{met} \quad (4.2)$$

$L_{WA}$  : bande d'octave niveau de puissance acoustique, en décibels, produite par la source sonore par rapport à un point de puissance acoustique de référence d'un pico Watt (1pW).

$D_C$  : la correction de directivité, en décibels, qui décrit la mesure dans laquelle le niveau continu équivalent de pression acoustique à partir de la source sonore ponctuelle s'écarte dans une direction spécifiée par rapport au niveau d'une source sonore ponctuelle.

Niveau de pression acoustique continu équivalent pondéré A, par vent portant, Il est égal à la somme des différentes contributions des différentes sources, pour les différentes bandes d'octave.

$$L_{AT}(DW) = 10 \log \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^8 10^{0.1(L_{fi}(ij) + A_{f(j)})} \quad (4.3)$$

$D_C = D_\Omega$  Correction apportée afin de tenir compte de la directivité de la source (avec les directivités = 0 dB).

La réflexion sur le sol D qui peut être calculée comme suit:

$$D_{\Omega} = 10 \text{Log} \left( 1 + \frac{d_p^2 + (h_s - h_r)^2}{d_p^2 + (h_s - h_r)^2} \right) \quad (4.4)$$

$h_s$ : hauteur de la source au-dessus du sol (hauteur du moyeu).

$h_r$ : hauteur du point d'impact du bruit(en fonction de la réglementation).

$d_p$ : distance entre la source sonore et le point d'impact projetée au sol(m).

La distance est calculée à partir des coordonnées(x, y) de la source (indice S) pour le point d'impact (indice r):

$$d_p = \sqrt{(x_s - x_r)^2 + (y_s - y_r)^2} \quad (4.5)$$

Cette atténuation est donnée par l'équation suivante :

$$A = A_{div} + A_{atm} + A_{sol} + A_{bar} + A_{misc} \quad (4.5)$$

Où

$A_{div}$  : Atténuation due à la divergence géométrique, donnée par :

$$A_{div} = 10 \text{Log} (d) + 11 \quad (4.6)$$

d: distance entre la source et le point d'impact(m)

$A_{atm}$  : Atténuation due à l'absorption atmosphérique.

$$A_{atm} = \frac{r d}{1000} \quad (4.7)$$

Où

: coefficient d'atténuation atmosphérique en décibels par kilomètre, pour chaque bande d'octave à la fréquence centrale.

Pour les valeurs de  $\alpha$ , certaines conditions atmosphériques ne sont pas prises dans cette norme, pour cela on a recours à la norme ISO 9613-1 (voir le tableau IV- 1).

Température (°C)	Humidité relative (%)	Coefficient d'atténuation atmosphérique (dB/km)							
		Fréquence (Hz)							
		60	125	250	500	1000	2000	4000	8000
10	70	0.1	0.4	1.0	1.9	3.7	9.7	32.8	117
20	70	0.1	0.3	1.1	2.9	5.0	9.0	22.9	76.6
30	70	0.1	0.3	1.0	3.1	7.4	12.7	23.1	59.3
15	20	0.3	0.6	1.2	2.7	8.2	28.1	88.8	202
15	50	0.1	0.5	1.2	2.2	4.2	10.8	36.2	129
15	80	0.1	0.3	1.1	2.4	4.1	8.3	23.7	82.8

**Tableau IV- 1: Coefficient d'atténuation atmosphérique pour les bandes d'octave du bruit de la norme ISO 9613-1 [12].**

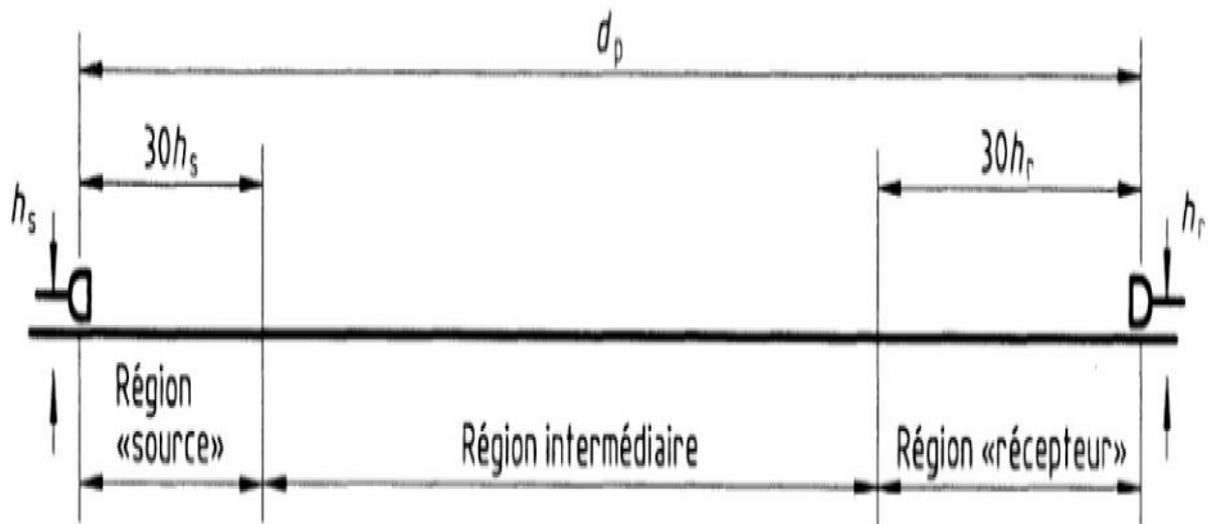
Maintenant on définit le paramètre  $A_{sol}$  : Atténuation due à l'effet de sol

La méthode de calcul utilisée est valable pour les sols horizontaux ainsi que pour les sols en pente constante. Trois régions distinctes de l'atténuation au sol sont spécifiées (voir figure IV-1):

- ° La région source : De la source à une distance de  $30h_s$  avec un maximum de distance  $d_p$ .
- ° La région récepteur : Du récepteur à une distance de  $30h_r$  avec un maximum de distance  $d_p$ .
- ° La région intermédiaire : Comprise entre les deux régions précédentes. Elle n'existe pas si  $d_p$  est inférieure à  $(30h_s+30h_r)$ .

Avec :  $h_s$  est la hauteur de la source, et  $d_p$  la distance de la source au récepteur, telle que projetée sur le plan.

Selon ce modèle l'atténuation n'augmente pas avec la région intermédiaire mais dépend principalement des propriétés des régions sources et récepteurs.



**Figure IV-1: Les trois régions distinctes pour la détermination de l'atténuation au sol[12].**

Dans nos calculs on va négliger l'atténuation due à une barrière  $A_{bar}$  et celle qui est due à divers autres effets  $A_{misc}$ .

Pour la correction climatique  $C_{met}$ , cela se fait comme suit :

$$\begin{cases} c_{met} = 0 & \text{si } d_p < 10(h_s + h_r) \\ c_{met} = c_0 \left[ 1 - \frac{10(h_s + h_r)}{d_p} \right] & \text{si } d_p > 10(h_s + h_r) \end{cases} \quad (4.8)$$

fréquence centrale nominale	A <sub>s</sub> ou A <sub>r</sub> Db	A <sub>m</sub> dB
60	-1.5	-3q <sup>2</sup>
125	-1.5 + G × a'(h)	3q(1 - G <sub>m</sub> )
250	-1.5 + G × b'(h)	
500	-1.5 + G × c'(h)	
1000	-1.5 + G × d'(h)	
2000	-1.5(1 - G)	
4000	-1.5(1 - G)	
8000	-1.5(1 - G)	
<p>Note :</p> $a'(h) = 1.5 + 3e^{-0.12(h-5)^2} \left(1 - e^{d_p/50}\right) + 5.7e^{-0.09h^2} \left(1 - e^{2.8 \times 10^{-6} d_p^2}\right)$ $b'(h) = 1.5 + 8.6e^{-0.09h^2} \left(1 - e^{\frac{-d_p}{50}}\right)$ $c'(h) = 1.5 + 14e^{-0.46h^2} \left(1 - e^{\frac{-d_p}{50}}\right)$ $d'(h) = 1.5 + 5e^{-0.9h^2} \left(1 - e^{\frac{-d_p}{50}}\right)$ <p>Pour les calculs de A<sub>s</sub>, prendre G=G<sub>s</sub> et h=h<sub>s</sub> ; Pour A<sub>r</sub>, prendre G=G<sub>r</sub> et h=h<sub>r</sub> ;</p> <p>Pour les diverses valeurs de surface de sol q, on a :</p> $q = 0 \quad \text{si} \quad d_p \leq 30(h_s + h_r)$ $q = 1 - \frac{30(h_s + h_r)}{d_p} \quad \text{si} \quad d_p > 30(h_s + h_r)$		

Tableau IV- 2: Le bruit industriel, description de la méthode de calcul[12].

Niveau de pression acoustique continu équivalent pondéré A à long terme est défini par:

$$L_{AT}(LT) = L_{AT}(DW) - C_{met} \quad (4.9)$$

Afin d'évaluer le bruit, nous avons modélisé ce dernier en tenant compte des différents paramètres présentés dans la norme ISO 9613-1et 2.

Nous avons utilisé le MATLAB pour notre simulation, suivant l'organigramme suivant :

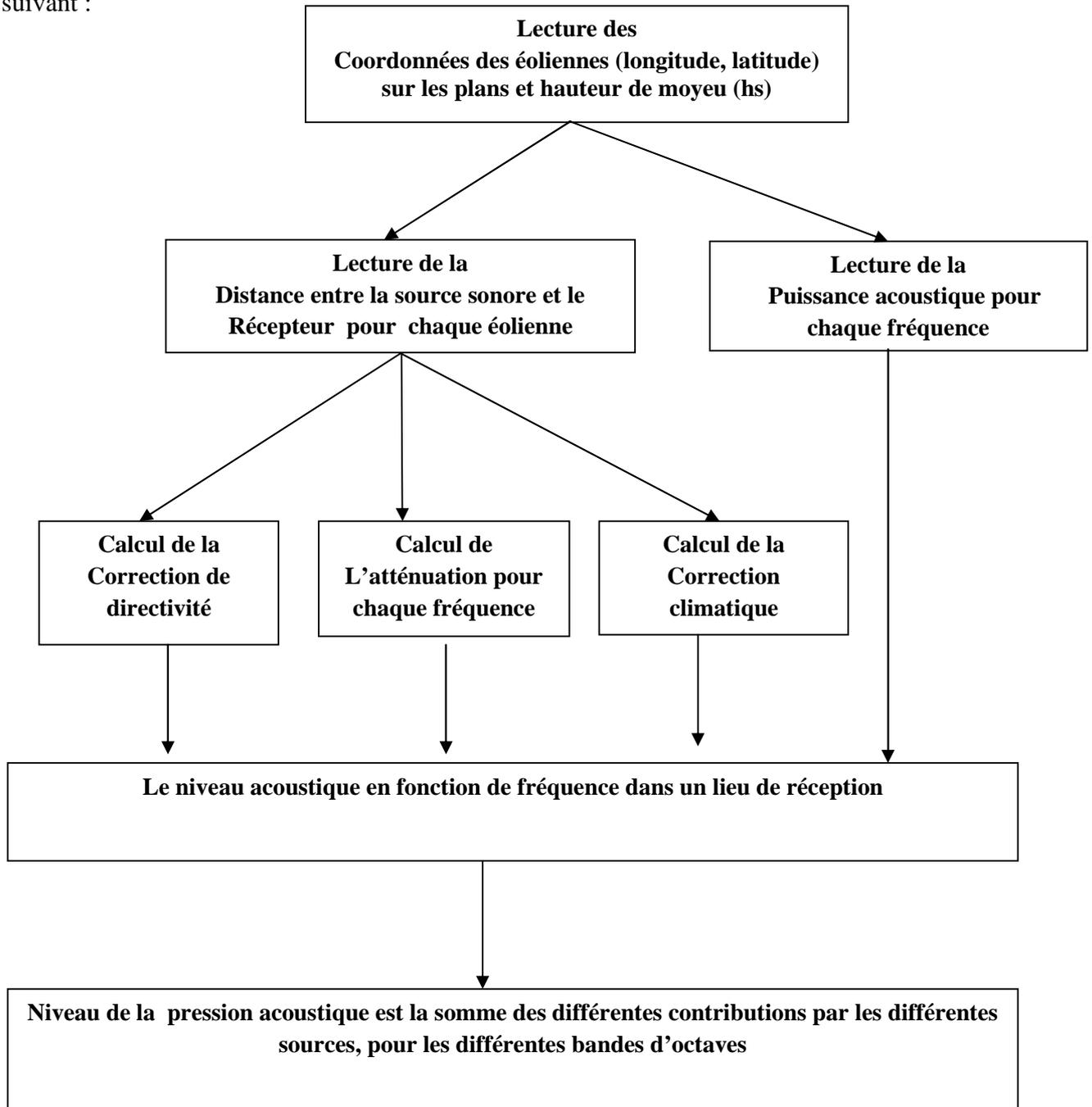
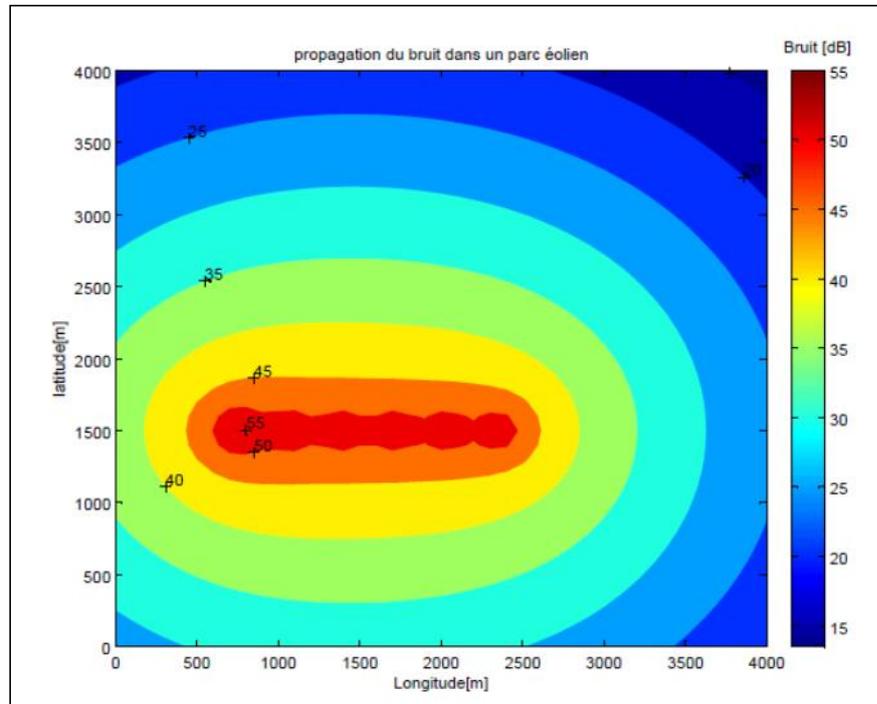
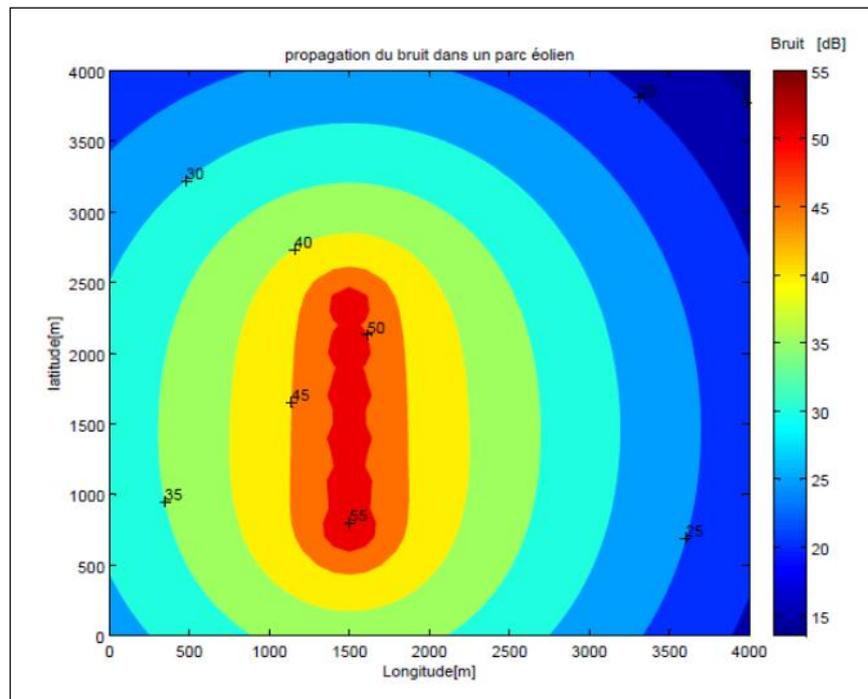


Figure IV- 2: Organigramme de la propagation du bruit produit par un parc éolien.

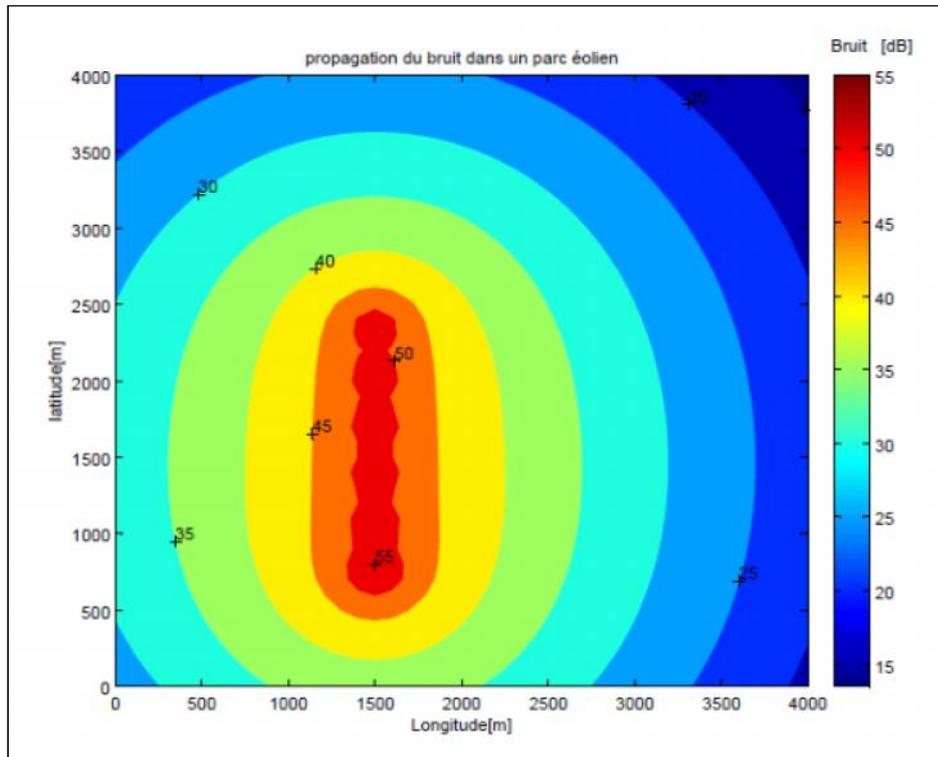
Pour les sites côtiers, Les résultats de notre propagation du bruit par des parcs éoliens de Oran, Bejaia et Annaba sont représentés respectivement par la Figure IV- 3, Figure IV- 4 et Figure IV- 5.



**Figure IV- 3: Propagation du bruit dans le parc d'Oran.**



**Figure IV- 4: Propagation du bruit dans le parc de Bejaia.**



**Figure IV- 5: Propagation du bruit dans le parc d'Annaba.**

La puissance acoustique de chaque éolienne type WGT1500KW donnée par le fabricant est de 103 dB (A).

Selon nos calculs, en utilisant la méthode (ISO 9613-2), le niveau de bruit est d'environ 44.5 dB (A) à 320 m de la plus proche éolienne du parc. L'atténuation due à la divergence géométrique est de 89.72 dB (A) tandis que les autres atténuations représentent 30.6dB (A).

Une correction de l'ordre de 19 dB (A) est nécessaire pour prendre en compte la directivité de la source.

A une distance de 480 m, le niveau de bruit sera d'environ 41 dB (A) et L'atténuation due à la divergence géométrique est l'ordre de 90.67 dB (A), les divers autres atténuations sont environ de l'ordre de 31dB (A). La correction est pratiquement invariable.

Pour les sites des hauts plateaux, les résultats de notre simulation de la propagation du bruit par des parcs éolien de Kacer-Chellala, M'sila et Tiaret sont représentés respectivement dans les Figure IV- 6, Figure IV-7 et Figure IV- 8.

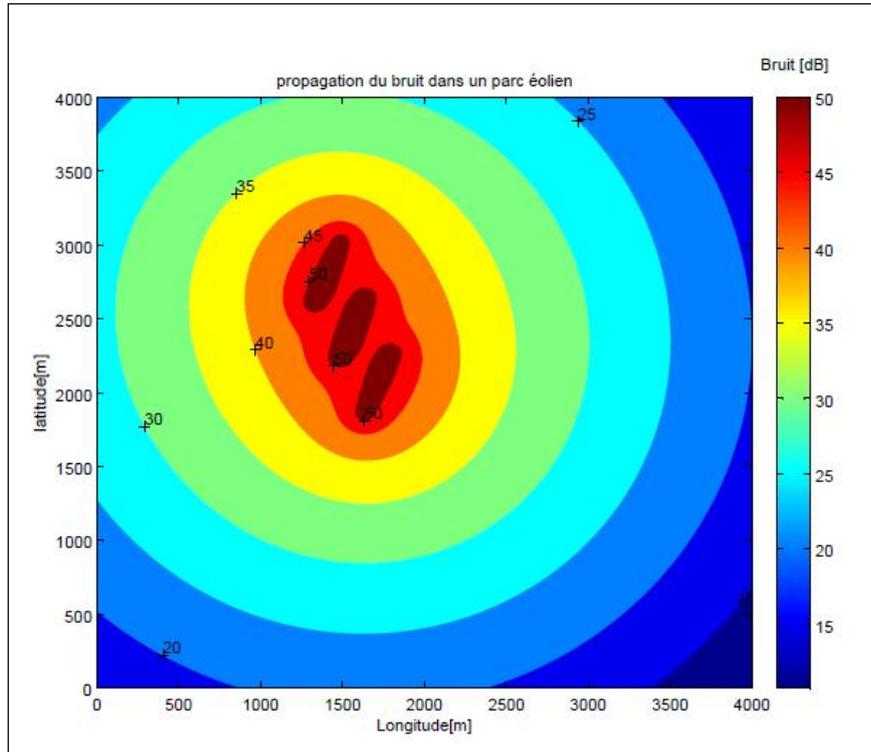


Figure IV- 6: Propagation du bruit dans le parc de Kacer- Chellala.

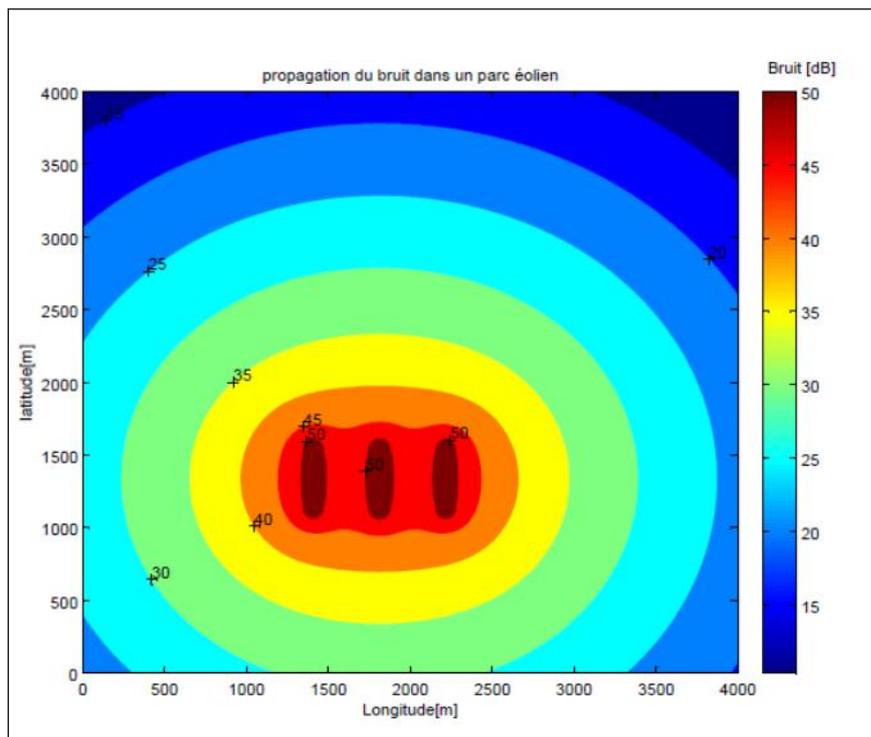
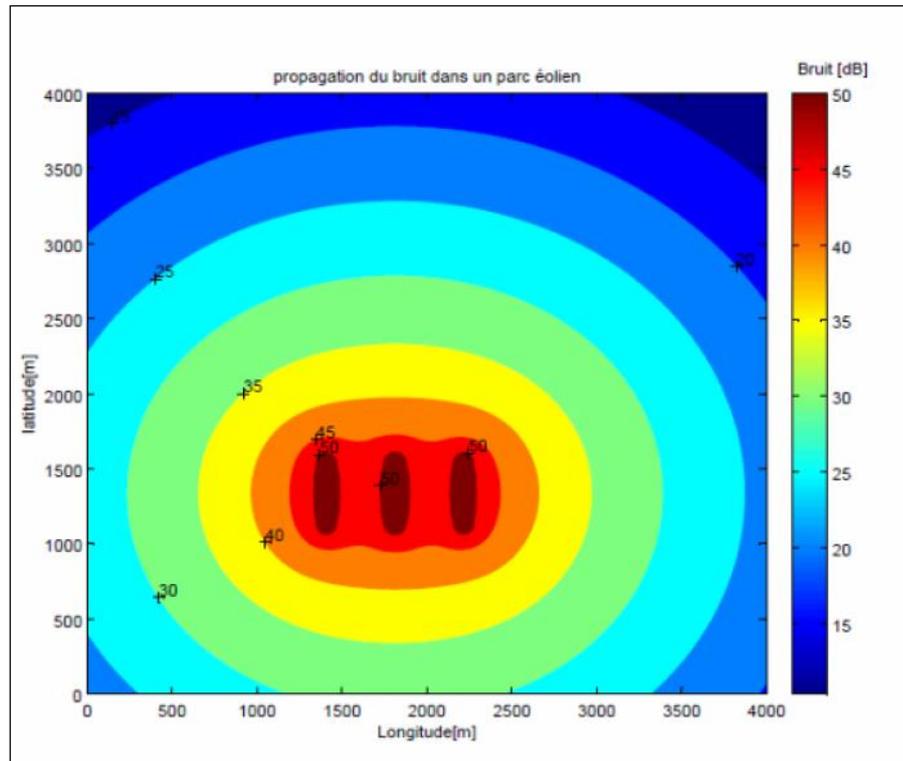


Figure IV- 7: Propagation du bruit dans le parc de M'sila.



**Figure IV- 8 : Propagation du bruit dans le parc de Tiaret.**

La puissance acoustique donnée par le constructeur est de 98 dB (A) pour chaque éolienne type WGT600KW.

Selon nos calculs, en utilisant la méthode (ISO 9613-2), le niveau de bruit est d'environ 42 dB (A) à 320 m de la plus proche éolienne. L'atténuation due à la divergence géométrique est de 90 dB (A), tandis que les autres atténuations représentent 33 dB (A), une correction de l'ordre de 24dB (A) est nécessaire pour prendre en compte la directivité de la source.

A une distance de 480 m, le niveau de bruit sera d'environ 39dB (A) et L'atténuation due à la divergence géométrique est l'ordre de 92 dB (A) et les autres atténuations sont de l'ordre de 34dB (A). La correction est pratiquement invariable.

On constate que l'intensité du bruit diminue avec la distance de la source. L'atténuation due à la propagation spatiale est le facteur le plus important qui diminue l'énergie des ondes sonores.

Les perturbations causées par le bruit des éoliennes en fonctionnement est faible compte tenu de la capacité d'adaptation des animaux et de la nature intermittente du bruit émis par le vent.

Le niveau de bruit d'une éolienne est de 42dB (A), ce qui correspond au bruit d'une maison silencieuse. Par conséquent, ces niveaux de bruit n'ont pas d'effet sur la santé et sont conformes à la norme algérienne (décret exécutif n ° 93-184 du 27 Juillet 1993, réglementant les émissions sonores).

## **IV-2 Impact visuel**

Les projets éoliens, par leur nature, leurs dimensions ou leur localisation sont susceptibles d'avoir des incidences notables sur l'environnement appelées impact.

Après avoir étudié l'impact du bruit, nous nous sommes intéressés à l'impact visuel.

On peut définir l'impact visuel comme une préoccupation de l'environnement de développement de parcs éoliens est son effet sur la pittoresque beauté des paysages.

Les éoliennes sont de grandes structures installées dans des zones ouvertes ce qui les rendent visuellement importantes dans le paysage. Les turbines peuvent finir par prédominer notre regard jusqu'à 2 km ou plus. Ils sont souvent perçus comme un élément important dans le paysage à une distance de 5 km.

Comme «la beauté réside dans les yeux du spectateur », certains peuvent aimer la vue des éoliennes, pour la production d'énergie d'une manière respectueuse de l'environnement proche de leur région.

Cependant, nous ne devons pas oublier qu'il peut y avoir certaines personnes qui pourraient envisager la turbine comme «une boîte sur un long bâton, ruinant la beauté pittoresque du paysage. Par conséquent, les turbines doivent être naturellement intégrées au paysage pour les rendre visuellement attrayantes et acceptables.

La valeur que l'on attribue au paysage et ses environs est un important facteur dans le moulage par son opinion sur le parc éolien.

La valeur esthétique d'un paysage est jugée en fonction de son visuel, historique, écologique, socioculturelle.

Par conséquent, il est recommandé d'évaluer la sensibilité du paysage en fonction de ces facteurs, avant l'étude de tout projet de parc éolien.

Il existe plusieurs méthodes pour établir la sensibilité esthétique d'un paysage[4].

L'utilisation de ces techniques en collaboration avec les sondages d'opinion publique peut nous donner une indication sur la pertinence d'un site pour l'installation du parc éolien. Beaucoup d'autorités compétentes ont déjà quantifié la sensibilité de leurs paysages.

L'utilisation de ces méthodes disponibles pour les développeurs est efficace pour l'évaluation de la pertinence de tout projet éolien.

Outre les caractéristiques de l'endroit où le parc éolien est proposé, la visibilité de l'emplacement des autres points clés est également importante.

Ces profils distincts et variés peuvent également être visibles à long distances. Un objet attire davantage l'attention, même à distance, si il est placé dans le point focal d'une vue panoramique.

Il a été établi que des petits groupes de turbines sont plus acceptables. Un vaste projet comprenant un certain nombre de turbines s'adapte confortablement dans le paysage.

Le nombre de turbines compris dans un groupe peut varier d'un cas à l'autre en fonction des caractéristiques du paysage, mais normalement 6 à 10 turbines peuvent faire une unité compacte.

Il est préférable d'avoir un espacement uniforme entre les turbines dans des paysages «terres agricoles» pour avoir une image cohérente.

Cependant, en landes de montagne, des tableaux multiples des turbines aléatoirement espacées peuvent ne causer aucune gêne visuelle, mieux si les éoliennes sont serrées dans celui-ci (avec un espacement suffisant pour éviter l'interférence entre les turbines).

Turbines de même type, la taille et le même nombre de lames sont préférés pour le nettoyage, vue simple et répétitif. Hauteur de la tour uniforme est également conseillée. Toutes les turbines doivent être fonctionnelles avec des rotors en rotation de préférence dans le même sens et à la même vitesse.

Les mâts tubulaires sont préférés aux pylônes en treillis. Les composants de la turbine devraient être esthétiquement conçus avec toutes ses composantes majeures - tour, nacelle et des pales - proportionnellement à la taille.

Toute la turbine dans une ferme devrait être de couleur uniforme. Il est préférable de donner la même couleur pour les pales, nacelle et tours car il évite le contraste des couleurs entre les composants. La couleur blanche est préférée, bien que certains concepteurs optent pour des couleurs « blanc cassé » et « gris ».

Les structures créées pour les postes, lignes de transport et routes d'accès, causent souvent une gêne visuelle que les éoliennes elles-mêmes. Autant que possible, ces structures peuvent être enterrées afin qu'ils ne puissent pas venir en vue directe.

Les végétations de croissance, qui sont associés avec les décors naturels de l'environnement, est une autre possibilité de cacher les postes. De même, les cases du transformateur peuvent être cachées à la base du mât.

Les lignes de transmission supplémentaires nécessaires à l'exploitation agricole peuvent être minimisées en localisant les installations de production à proximité des lignes électriques existantes.

Les routes et autres structures faites pour la construction du parc éolien devrait être de nature temporaire et l'espace dégagé peut être remis en végétation après la construction.

Fils de fer barbelés des clôtures autour du parc éolien peut être évité afin de rendre les zones environnantes accessibles au public. Ceci est utile pour éliminer les inquiétudes du public au sujet du projet et de clarifier tous les doutes possibles.

En outre, l'interaction avec les turbines va leur donner une chance de sentir la façon dont l'énergie propre est générée dans leur région.

C'est une expérience commune qui, une fois le projet est mis en place et les avantages environnementaux de l'énergie éolienne y sont compris, le parc éolien est devenu visuellement plus acceptable.

Dans notre travail, un intérêt particulier est porté à l'impact visuel.

A l'aide du logiciel « wind pro », on a essayé de simuler l'interaction entre le parc éolien des différents sites étudiés en fonction des spécificités de chaque site afin d'optimiser le choix de ce dernier.

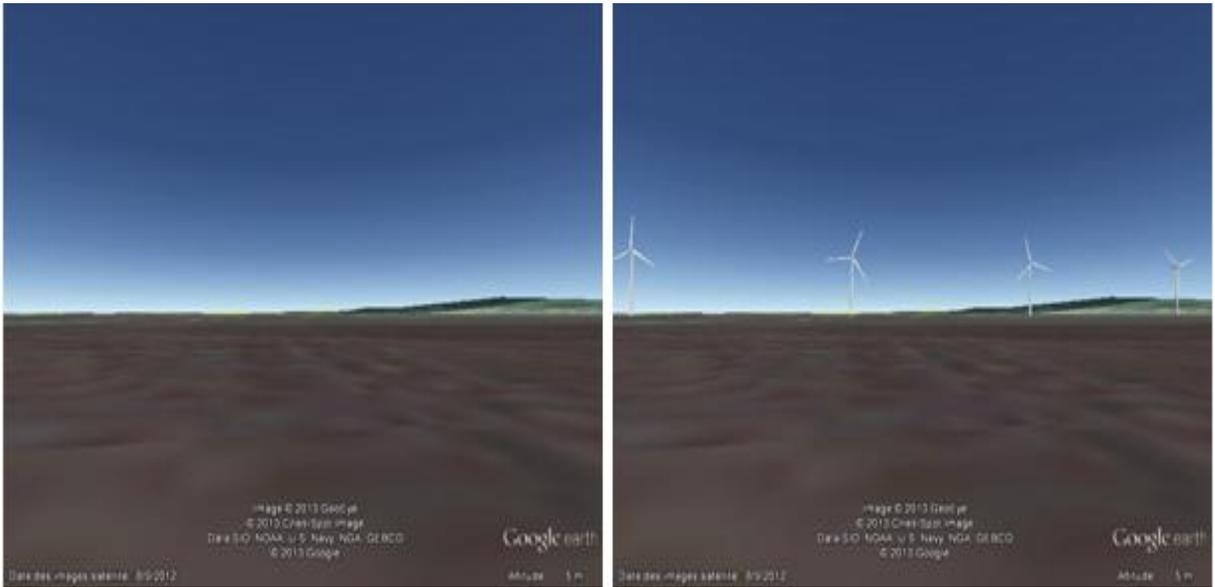
Les résultats de notre simulation sont donnés par les figures suivantes.



**Figure IV- 9: Simulation informatique de l'impact visuel des éoliennes sur le paysage en utilisant Wind Pro pour Oran.**



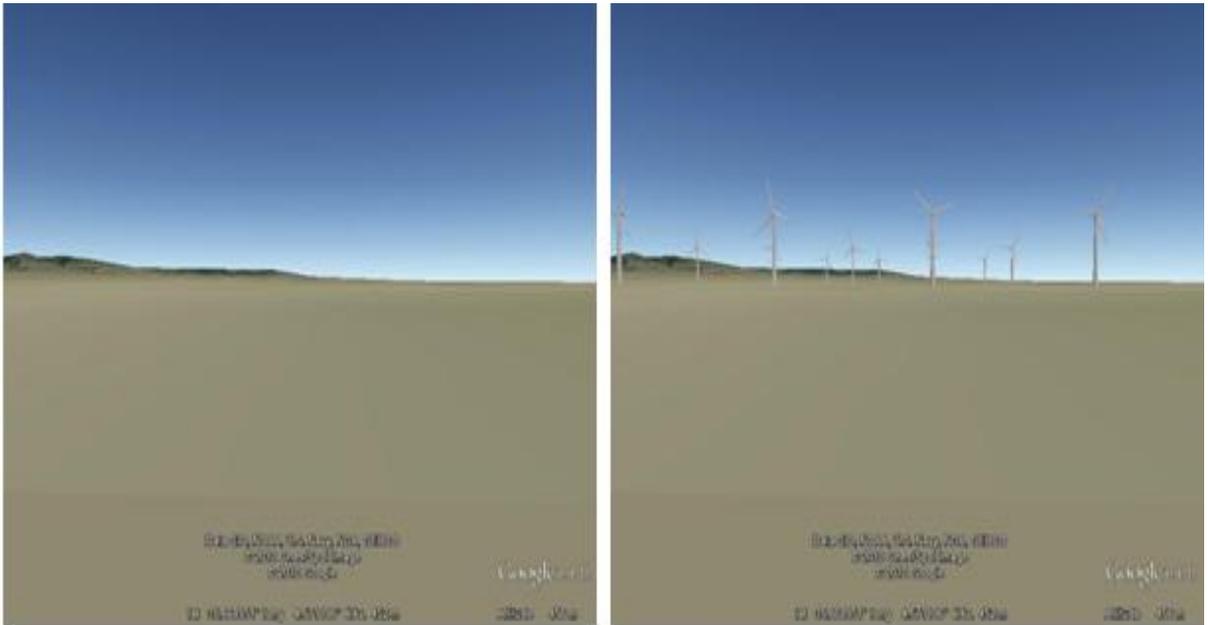
**Figure IV- 10 : Simulation informatique de l'impact visuel des éoliennes sur le paysage en utilisant Wind Pro pour Bejaia.**



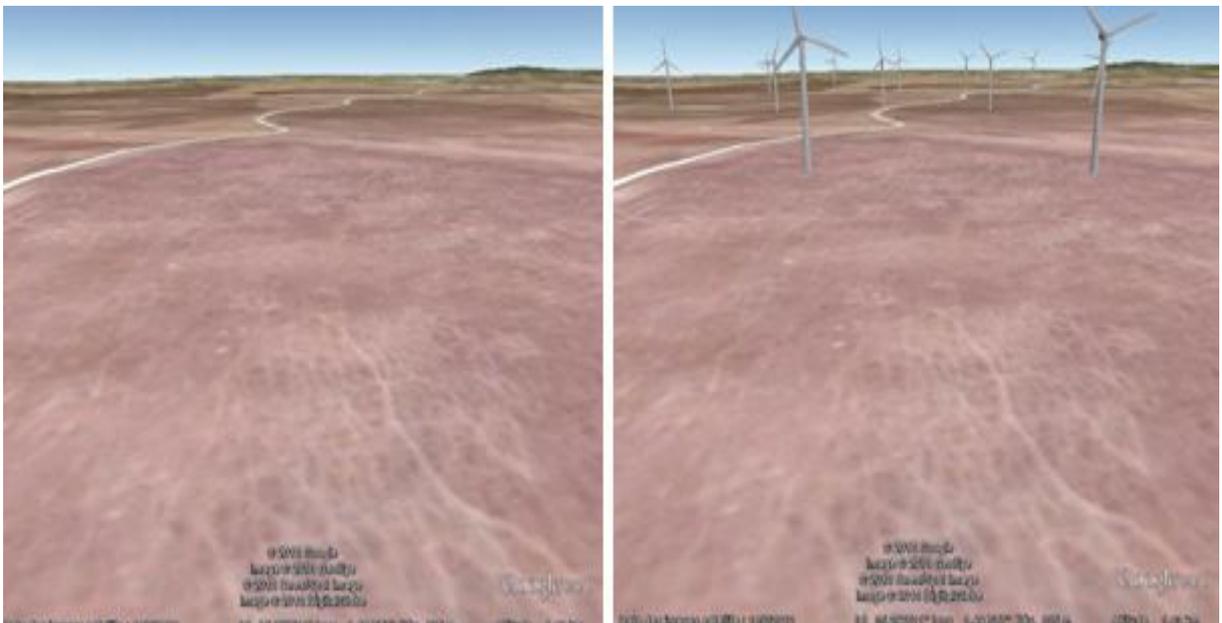
**Figure IV- 11: Simulation informatique de l'impact visuel des éoliennes sur le paysage en utilisant Wind Pro pour Annaba.**



**Figure IV- 12: Simulation informatique de l'impact visuel des éoliennes sur le paysage en utilisant Wind Pro pour Kacer- Chellala.**



**Figure IV- 13 : Simulation informatique de l'impact visuel des éoliennes sur le paysage en utilisant Wind Pro Software pour M'sila.**



**Figure IV- 14 : Simulation informatique de l'impact visuel des éoliennes sur le paysage en utilisant Wind Pro Software pour Tiaret**

Les parcs éoliens construits astucieusement peuvent être un ajout positif aux paysages et avec des présentations naturellement mélangé avec les paysages et les turbines conçues avec un sens esthétique, peut ajouter à la pittoresque beauté du paysage.

Des modèles informatiques sont disponibles pour évaluer l'impact visuel des éoliennes sur le paysage, la flore et la faune, avant que les fermes éoliennes ne soient effectivement construites.

### **IV-3 Impacts des éoliennes sur l'environnement**

#### **IV-3-1 Milieu physique**

Bien que les activités de construction puissent affecter la qualité de l'air en soulevant de la poussière, celles-ci se dérouleront à une grande distance des zones résidentielles ou peuplées.

L'impact sur la qualité de l'air du transport et de la circulation dans les zones considérées sensibles est jugé peu important. La réduction de la vitesse des véhicules sur le segment non pavé, à la hauteur des habitations et sur la portion du chemin d'accès à proximité de la ville limitera davantage les impacts.

Pour minimiser l'impact sur les sols et préserver les eaux de surface et les eaux souterraines il faut garder une distance entre le parc éolienne et les ressources principales des eaux, c'est le cas de Soummam (Bejaia) et de Sebaous (Annaba).

Pour cela, les travaux ne doivent pas être effectués dans des zones sensibles à l'érosion, la couche superficielle sera remplacée autour des éoliennes après leur érosion et une attention particulière sera accordée au captage des eaux de surface.

Les éoliennes seront aménagées sur des sols bien drainés au sommet des collines et aucun puits d'eau potable n'est installé dans le domaine du parc éolien.

En phase d'exploitation, aucun impact n'est prévu sur ces composantes. Lors du démantèlement, un impact faible est attendu sur les sols en raison du passage de la machinerie lourde tout comme en phase de construction, mais sur des faibles superficies.

**IV-3-2 Milieu naturel**

Pour minimiser l'impact sur le milieu naturel en phase de préparation, il faut éviter les grandes surfaces forestières et les territoires agricoles dans la région.

Lors des phases de préparation/construction et de démantèlement, le dérangement causés par le bruit et la présence des travailleurs et de la machinerie ainsi que la modification de l'habitat constitueront les principaux désagréments, ceux-ci sont jugés de faible importance mais pas pour les zones très importantes par leur écosystème. En hiver, l'Algérie devient la terre d'accueil de certains oiseaux migrateurs européens.

Les impacts sur la faune terrestre seront faibles pendant les trois phases du projet. Le dérangement par le bruit et la présence des travailleurs sera intermittent en phases de préparation/construction et démantèlement, cessant avec l'arrêt des activités. Les habitants seront perturbés à proximité des superficies déboisées.

Le dérangement par le bruit des éoliennes en phase d'exploitation est faible compte tenu de la capacité d'adaptation des animaux et du caractère intermittent des émissions sonores en fonction des vents.

**IV-3-3 Milieu humain**

Le parc éolien aura des impacts positifs au niveau de la création d'emplois, des retombées économiques, du développement d'expertises spécialisées en région et sur la formation de la main-d'œuvre.

En phases de préparation/construction et de démantèlement, l'augmentation de la densité de circulation et le ralentissement sur les routes seront intermittents en fonction de l'arrivée des convois. L'impact sur les infrastructures de transport est donc jugé d'importance moyenne. En phase d'exploitation, aucun impact n'est prévu sur le transport.

Selon les conditions, la présence d'éoliennes ou d'un parc éolien peut causer une interférence électromagnétique sur certains systèmes de communication, notamment les systèmes radio, la télévision analogique et les réseaux téléphonique (GSM ou WLL).

Les impacts prévus seraient ressentis seulement lors de la phase d'exploitation du projet. Aucun impact sur les systèmes de radiodiffusion AM et FM n'est prévu. Cependant, il y a une possibilité d'interférence électromagnétique sur les systèmes.

L'impact visuel par unités de paysage et selon certains points de vue a été évalué sur la base de la sensibilité des unités de paysage et du degré de perception des éoliennes et des autres composantes du projet (lignes électriques aériennes et chemins d'accès).

#### **IV-4 Effets de l'environnement sur le projet**

Les vents extrêmes (vitesses de vent supérieures à 25 m/s), les épisodes de verglas et les températures extrêmes (supérieures à 45 °C) sont des conditions qui peuvent avoir un impact négatif sur le parc éolien.

Les changements climatiques associés au réchauffement de la planète risquent d'entraîner une augmentation de la température, des précipitations sous forme de verglas, ce qui pourrait se traduire par une légère diminution de la production énergétique du parc.

Les feux de forêt et la foudre sont des phénomènes naturels contre lesquels il a été prévu des mesures de protection.

L'érosion n'est pas susceptible d'affecter le parc éolien car aucune zone d'érosion n'a été répertoriée dans le domaine du parc.

#### **IV-5 Mesures d'Atténuation des Impacts sur L'environnement**

##### **IV-5 -1 Qualité de l'air**

Il n'est pas possible d'éliminer complètement l'émission de poussière du chantier, il faut que le programme de construction comporte certaines mesures permettant de réduire les émissions comme :

Utilisation des systèmes d'extraction de poussière

Les camions seront bâchés pendant le transport de matériaux et déchets de constructions. Arrosage des pistes... etc.

##### **IV-5 -2 Bruits**

L'entrepreneur devra veiller au respect des directives appropriées et il devra donc contrôler les niveaux sonores produits pendant la construction et adopter les mesures nécessaires, à savoir :

Installation de silencieux d'échappement sur les équipements de chantiers motorisés

Limitation de vitesse à 30km/h pour les engins mobiles et autres véhicules

Un nettoyage à la vapeur ne sera entrepris pendant les heures de travail à la lumière de jour

Les activités de construction nocturnes seront normalement limitées à des activités non bruyantes.

L'entrepreneur devra veiller au respect de la réglementation en matière de nuisance sonore pendant la construction de parc éolienne.

En phase d'exploitation il incombe à l'entrepreneur de veiller à ce que le niveau de bruit normal de l'exploitation de parc éolienne soit pleinement conforme à toutes les limites applicables par la réglementation algériennes et celle de la banque mondiale.

La maintenance du projet comprendra l'entretien et le remplacement des équipements et les activités de maintenance ne devraient pas nécessiter des opérations qui produisent un bruit important.

#### **IV-5 -3 Circulation et transport**

Il faut prendre des mesures d'atténuation des effets pouvant se révéler nécessaires pour réduire les impacts des véhicules du chantier sur le trafic:

Pour accéder au site d'aménagement, le véhicule utilitaire lourd devra éviter les zones sensibles d'habitations.

Limitation de vitesse pour tout le trafic à l'intérieur du chantier

Définir des horaires durant lesquels les véhicules lourds peuvent rentrer ou sortir du chantier afin de réduire les impacts sur le trafic pendant les heures de pointes aux niveaux des zones sensibles le long des rues d'accès.

Adoption de pratique de chantiers adéquats, comme le bâchage des véhicules lourds transportant des matériaux et obligation du port de casque- antibruit pour les travailleurs.

#### **IV-5 -4 Déchets**

Il faut avoir un plan de gestion des déchets solides pendant la construction et l'exploitation, pour assurer un niveau élevé de gestion des déchets solides, les mesures suivantes d'atténuation des effets seront mises en œuvre conformément à la réglementation en vigueur :

Les déchets solides seront classés selon leur type et déposés dans un site prévu à cet effet.

Les déchets remplaçables feront l'objet d'une procédure de vente.

Les déchets de papier, carton et plastique...etc. seront acheminés vers les recycleurs.

Les déchets de cantine vers le Centre d'enfouissement technique des déchets solides le plus proche pour chaque site.

#### **IV-5 -5 Respects du paysage et de l'esthétique**

Les règles à suivre sont :

Prévoir un aménagement paysagiste qui comprendra en général des plantations autour du Site du projet pour le masquer des zones adjacentes.

En outre, prêter attention au choix des couleurs, des finitions et des matériaux, on veillera à utiliser des couleurs pâles sur les ouvrages de grande hauteur pour limiter les impacts sur la ligne d'horizon.

#### **IV-5 -6 Aspects socioéconomiques**

Les règles à suivre sont :

Il faut que les offres d'emploi soient publiées sur la presse afin de donner la possibilité à un maximum de personnes de déposer une demande d'emploi.

Il faut que la société réalisatrice mette sur pied un système d'apprentissage ou autre démarche similaire pour aider les travailleurs locaux à acquérir des compétences supplémentaires.

#### **IV-5 -7Risque d'incendie**

Le parc éolien doit avoir « un réseau anti-incendie ». Néanmoins le promoteur devra respecter la réglementation, notamment la loi N° 88-07 du 26 janvier 1988 relative à la prévention et à la lutte en matière d'incendie sur les lieux de travail.

Des extincteurs de différents types et capacités, en nombre suffisant, facilement accessibles devront être répartis convenablement dans le parc.

Des consignes particulières doivent être données au personnel de maîtrise et au personnel de gardiennage et de surveillance.

Le risque d'incendie sera minimisé si les règles de sécurité établies sont suivies rigoureusement par l'ensemble du personnel.

#### **IV-5 -8 Risques sismiques**

La Société chargée de construction du projet (parc éolien) devra respecter les réglementations algériennes RPA 99 régissant les activités parasismiques [16].

Grâce à l'application de ces normes, basée sur l'évaluation des données historiques et mesures des évènements sismiques enregistrés dans la région, les impacts potentiels d'un événement sismique pendant l'exploitation ne seront pas importants.

## **Conclusion**

Les parcs éoliens sont à l'origine d'effets positifs sur le milieu physique et sur le milieu humain (émissions de CO<sub>2</sub> évitées et création d'emplois directs et indirects).

Les effets négatifs des parcs éoliens peuvent être temporaires ou permanents. Dans notre travail, on s'est intéressé aux différents impacts des parcs éoliens sur l'environnement, principalement l'impact sonore et visuel.

Afin d'évaluer l'impact acoustique des parcs éoliens de capacité 9MW dans les six sites retenus, nous avons fait une simulation du bruit de nos différents parcs éoliens en utilisant la méthode (ISO 9613-2). Nos résultats de simulation en accord avec les travaux de recherche dans ce domaine.

Nous avons trouvé un niveau de bruit de 44.5 dB (A) à 320 m de la plus proche éolienne du parc composé de six aérogénérateurs de type WGT 1500 KW et il est de l'ordre de 39dB (A) à une distance de 480 m pour les sites côtiers.

Pour les sites des hauts plateaux, les résultats de notre simulation de la propagation du bruit pour les parcs éoliens composé de quinze éoliennes de type WGT600KW montre qu'à une distance de 320 m de la plus proche éolienne est estimé à 42 dB (A) et il est d'environ 39dB (A) à une distance de 480 m.

On peut conclure que ces niveaux de bruit n'ont pas d'effet sur la santé et sont conformes à la norme algérienne.

Pour l'impact visuel, on peut dire que si les parcs éoliens sont construits astucieusement, ils peuvent être un ajout positif aux paysages et à sa pittoresque beauté.

Dans notre travail, un intérêt particulier est porté à l'impact visuel. A l'aide du logiciel « wind pro », on a essayé de simuler l'interaction entre le parc éolien des différents sites étudiés en fonction des spécificités de chaque site afin d'optimiser le choix de ce dernier

**Bibliographie**

- [1] C. Bourillon, Wind Energy-Clean Power For Generations, Renewable Energy (1999), vol. 16, pp. 948 – 953
- [2] M. Etxaide et B. Kortabarria, Dosierra : Energie Eolicoa, Elhuyar, (1998), Vol. 133 – 134
- [3] E. Avia et I. Cruz, The Development of The Wind Energy Market In Spain, European Wind Energy Conference Proceedings, Nice, (1999), pp. 477 – 480.
- [4] ADEME, Éoliennes & milieu naturel, Manuel préliminaire de l'étude d'impact des parcs éoliens (2002).
- [5] G. Johnson, M.K. Perlik, W.P. Erickson et M.D. Strickland, Bat Activity, composition and collision mortality at a large wind plant in Minnesota, Wild life Society Bulletin, (2004), 32 .
- [6] J. Kerns et P. Kerlinger, A study of bird and bat collision fatalities at the Mountaineer Wind Energy Centre», Tucker County, West Virginia: annual for 2003, (2004).
- [7] J. Kerns, W.P. Erickson et E.B. Arnett, Bat and bird fatality (patterns of fatality, and behavior patterns of fatality, and behavioral interactions with wind turbines oral interactions with wind turbines) in Pennsylvania and West Virginia, Energy Cooperative. E.B Arnett, ed. (2005).
- [8] ADEME, Éoliennes & impact sonore »Manuel préliminaire de l'étude d'impact des parcs éoliens, (2002).
- [9] Afsse, impacte sanitaires du bruit généré par les éoliennes, saisine 2006-005, (2008).
- [10] AWEA «The most frequently asked questions about wind energy», American Wind Energy Association, Washington D.C, (2002).
- [11] ISO 3741, Acoustics — Determination of sound power levels of noise sources, Precision methods for broad-band sources in reverberation rooms, (1988).
- [12] ISO 1996-1, Acoustics — Description and measurement of environmental noise, Part 7: Basic quantities and procedures, (1982).
- [13] ISO 1996-2, Acoustics — Description and measurement of environmental noise, Part 2: Acquisition of data pertinent to land use, (1987).
- [14] ISO 1996-3, Acoustics — Description and measurement of environmental noise, Part 3: Application to noise limits (1987).
- [15] MosArt, Associates Landscape assessment for wind farm planning and design-character and sensitivity, Final report, Altener project, (2000), AL/98/542 pp 1-18
- [16] Centre National de Recherche Appliquée en Génie-Parasismique, Règles parasismiques algériennes RPA 99 / version 2003, document technique réglementaire B C 2 48, (2003).

## ***CONCLUSION GENERALE***

## *Conclusion générale*

Les énergies renouvelables participent à la lutte contre le changement climatique et à la maîtrise de l'approvisionnement énergétique propre.

C'est aussi la lutte contre les gaz à effet de serre et la prise de conscience collective d'un environnement plus « propre » qui conduit notre pays à aller de l'avant pour développer d'autres sources d'énergies dites « vertes », parmi elles l'énergie éolienne.

Dans ce cadre ; et afin de diversifier ces choix énergétiques, notre pays s'engage avec détermination sur la voie des énergies renouvelables, et commence à s'intéresser à la filière éolienne, d'où l'importance de notre travail.

Actuellement la puissance éolienne totale installée en Algérie est insignifiante, cependant une première ferme «éolienne est en phase de réalisation à Adrar. Par ailleurs d'autres programmes nationaux visent à installer une puissance éolienne totale de l'ordre de 1700 MW à l'horizon 2030.

La problématique de localisation se rencontre lors du choix du site d'une installation éolienne. Ce choix est stratégique, ainsi il est primordial d'optimiser cet emplacement en tenant compte de toutes de toutes les dimensions ou aspects qui entrent en jeu dans cette décision.

Le but de notre travail est d'identifier avec une certaine fiabilité la meilleure solution pour l'emplacement d'un parc éolien, pour cette raison nous nous sommes intéressés à l'optimiser du choix du site et au dimensionnement de parcs éoliens de puissance 9MW et leurs impacts sur l'environnement dans le nord Algérien.

La question posée est la suivante : Quels sont les différents critères d'aide au choix du site, comment optimiser ce dernier, ainsi que le dimensionnement des parcs éoliens ?

Pour cela on a tenu compte des facteurs techniques lors de l'évaluation du gisement éolien de nos sites étudiés sans oublier les autres facteurs environnementaux et économique.

En effet le développement de notre projet éolien aux sites retenus doit être réalisé de manière à prévoir les atteintes au paysage, au patrimoine et à la qualité de vie des riverains. Dans cette perspective, l'étude d'impact constitue le seul moyen de fonder la décision. Elle facilite l'élaboration du projet en prenant en comptes les enjeux environnementaux.

Pour répondre à cette problématique, nous nous sommes intéressés à divers critères d'aide au choix du site et à l'optimisation du dimensionnement des fermes éoliennes.

Nous avons étudié dans un premier temps, l'état initial des sites étudiés et de leur environnement afin d'optimiser le choix du site.

Le premier critère étant la fréquence de la vitesse et de la direction des vents, pour cela on a évalué le gisement éolien pour trois sites côtiers et trois sites dans les hauts plateaux à partir des données météorologiques horaires sur une durée de dix ans.

Notre étude nous permet de donner les conclusions suivantes :

La vitesse moyenne annuelle de trois sites côtiers Oran, Bejaia et Annaba est respectivement de 4.4m/s ,4.2m/s et 3.8m/s, la direction Ouest est dominante pour Annaba et Bejaia, pour Oran c'est le Nord.

La valeur du facteur de forme  $k$  pour Bejaia est maximale, de l'ordre de 2.64, ce qui montre que la distribution est la plus stable. On constate que pour les deux autres sites  $k$  est faible ce qui dénote que les vents sont largement dispersés. L'analyse des facteurs d'échelle  $C$ , montre que le site le plus venté est Oran ( $C= 4.9\text{m/s}$ ).

Les trois sites côtiers ont un point commun, le secteur Ouest représentant un pourcentage des fréquences important.

La vitesse moyenne annuelle de trois sites des hauts plateaux Kasr-Chellala, M'sila et Tiaret compte respectivement 3.9m/s ,4.9m/s et 3.8m/s, caractérisés par des vents fort, mais une fréquence calme importante qui varie de 21% à 41%.

L'analyse des facteurs d'échelle  $C$ , montre que le site Kasr-Chellala a la plus grande valeur soit  $C = 7.7\text{m/s}$ , caractérisée cependant par une fréquence calme importante de l'ordre de 40%, ce qui nous donne une vitesse moyenne de 3.9 m/s.

Le site le plus venté des hauts plateaux est celui de M'sila avec un facteur  $C$  de 7m/s et une fréquence calme de l'ordre de 21% (C'est la valeur la plus faible de la fréquence calme). La direction Ouest est dominante pour M'sila et Tiaret, pour Kasr-chellala c'est l'Ouest Nord Ouest (ONO).

L'analyse de l'état initial des sites étudiés et de leur environnement nous a permis d'optimiser le choix du site et le dimensionnement des parcs éoliens. On a retenu trois type d'aérogénérateurs (WGT 225KW, WGT 600KW et WGT 1500KW).

Vu la nature du relief et la densité de populations, six éoliennes de type WGT 1500KW sont la meilleure solution pour notre parc éolien dans les sites côtiers, occupant peu de place avec un rendement énergétique acceptable, mais le coût reste élevé.

Dans les haut plateaux on dispose de surface suffisante pour installer quinze éoliennes de type WGT 600KW.

Les sites des hauts plateaux, sont favorables pour des grand ZDE (zone de développement éolienne), pour cela on a opté pour l'éolienne WGT 600 KW car elle a un cout faible par rapport aux autres.

Les effets négatifs des parcs éoliens peuvent être temporaires ou permanents. Dans notre travail, on s'est intéressé aux différents impacts des parcs éoliens sur l'environnement, principalement l'impact sonore et visuel.

Afin d'évaluer l'impact acoustique des parcs éoliens de capacité 9MW dans les six sites retenus, nous avons fait une simulation du bruit de nos différents parcs éoliens en utilisant la méthode (ISO 9613-2). Nos résultats de simulation en accord avec les travaux de recherche dans ce domaine.

Nous avons trouvé un niveau de bruit de 44.5 dB (A) à 320 m de la plus proche éolienne du parc composé de six aérogénérateurs de type WGT 1500 KW et il est de l'ordre de 39dB (A) à une distance de 480 m pour les sites côtiers.

Pour les sites des hauts plateaux, les résultats de notre simulation de la propagation du bruit pour les parcs éoliens composé de quinze éoliennes de type WGT600KW montre qu'à une distance de 320 m de la plus proche éolienne est estimé à 42 dB (A) et il est d'environ 39dB (A) à une distance de 480 m.

On peut conclure que ces niveaux de bruit n'ont pas d'effet sur la santé et sont conformes à la norme algérienne.

Pour l'impact visuel, on peut dire que si les parcs éoliens sont construits astucieusement, ils peuvent être un ajout positif aux paysages et à sa pittoresque beauté

Dans notre travail, un intérêt particulier est porté à l'impact visuel. A l'aide du logiciel « Wind pro », on a essayé de simuler l'interaction entre le parc éolien des différents sites étudiés en fonction des spécificités de chaque site afin d'optimiser le choix de ce dernier

Les perturbations causées par le bruit des éoliennes en fonctionnement est faible compte tenu de la capacité d'adaptation des animaux et de la nature intermittente du bruit émis par le vent. Le niveau de bruit d'une éolienne est de 42 dB (A), ce qui correspond au bruit dans la maison silencieuse. Par conséquent, ces niveaux de bruit n'ont pas d'effet sur la santé et sont conformes à la norme nationale (décret exécutif n ° 93-184 du 27 Juillet 1993, réglementant les émissions sonores).

Les parcs éoliens construits astucieusement peuvent être un ajout positif aux paysages et avec des présentations, naturellement mélange avec la vigueur paysages et des turbines.

La Région étudiée est dans la zone d'activité sismique, les constructions doivent être en conformité avec les normes nationalement établies. Il s'y trouve des zones résidentielles, elles doivent éviter autant que possible évité pour assurer la santé des citoyens.

Il vaut mieux opter pour une éolienne de puissance avec des pales en fibre de verre afin de minimiser ses impacts sur les systèmes de télécommunications et sur la faune.

Les vents extrêmes (vitesses de vent supérieures à 25 m/s), les épisodes de verglas et les températures extrêmes (supérieures à 45 °C) sont des conditions qui peuvent avoir un impact négatif sur le parc éolien.

# ***ANNEXE***

# Wind Potential Assessment of Three Coastal Sites in Algeria; Calculation and Modeling of Wind Turbine Noise using Matlab

M. BENMEDJAHED

Unité de Recherche Matériaux et  
Energies Renouvelables,  
DNMSE-URMER, University of  
Tlemcen

Unité de Recherche en Energies  
Renouvelables en milieu  
Saharien/ Adrar

N. GHELLAI

Unité de Recherche Matériaux et  
Energies Renouvelables,  
DNMSE-URMER, University of  
Tlemcen

A. BENMANSOUR

Unité de Recherche Matériaux et  
Energies Renouvelables,  
DNMSE-URMER, University of  
Tlemcen

## ABSTRACT

Our study focuses on the assessment of wind resources of three coastal sites, open to the Mediterranean Sea in north Algeria (Annaba, Oran and Bejaia). The hourly data used in this study span a period of 10 years. The parameters considered are the speed and direction of wind. For this purpose, the most energetic and frequent speed as well as the Weibull parameters were evaluated to plot the wind rose. In order to estimate the noise annoyance, a small 30 kW wind turbine was used to produce energy. Then, its noise was calculated and then modeled. The results obtained from the three sites gave annual mean speeds around 4 m/s as the west and north sectors are dominant, with an estimated noise level around 45 dB at a distance of 60 m from the wind turbine. Calculation of the energy produced showed that the optimal energy can only be produced by small wind turbines. Among the considered sites, Oran was found to be the best in terms of energy (63.83 GWh/wind turbine), with a capacity factor of around 24%.

## Keywords

Weibull parameters, wind rose, extracted energy, wind power, noise, Algerian coast.

## 1. INTRODUCTION

Considering the exhaustion of fossil energy resources and environmental problems caused by the emission of greenhouse gases while using these resources, other alternative energy resources have been and must still continue to be developed. Among these, nuclear fission energy, which does not directly release any carbon dioxide, can be mentioned. However, waste treatment from this mode of production is very expensive, its radioactivity remains high for many years and the risks resulting from the operation of nuclear power plants due to natural disasters or human incidents are irreversible.

Renewable energy can be another alternative that allows producing clean and sustainable electricity, with less dependence on conventional resources, provided that natural and random fluctuations are accepted. Today, after water. The low production costs of wind power make it more competitive. It helps reduce greenhouse gas emission in the atmosphere as well. Wind energy by the first decade of the 21st century had a growing importance worldwide, year by year [1][2]. Indeed, the turbines installed in 2009 accounted

for an electrical power of 37500 megawatts, the equivalent of 20 EPR nuclear reactors, representing a 31 % increase, between 2008 and 2009 [3] [3]. The works on wind energy potential in Algeria were firstly undertaken by Said & al in their publications [4] in 1984, followed by Bessad in 1985 [5] Hammouche in 1990 [6], Kasbadji Merzouk in 2000 [7] and Farouk Chellali [8]. The present study tries to determine various wind parameters and then focuses on the processing and simulation of hourly data, collected during 10 years (from 2001 to 2010). Wind potential, its direction and frequency are assessed by plotting the wind rose, in order to select the appropriate site for future wind turbines. Finally, after the evaluation of wind power, energy and capacity for WGT 30kw, the environmental impact of wind turbines was evaluated. For this purpose, the ISO 9613-2 calculation model is used in the case where octave data are available; otherwise some calculation formulas based on Matlab are developed. The optimal energy can be only produced by small wind turbines in the Algerian coastal area which is characterized by its significant agricultural potential and where the small wind turbine is used to generate electricity and supply it to electrical equipment (pumps, lighting ...), in an economical way with a low noise impact. This study aims to complete the work of Benmedjahed & al (2010) on installing and dimensioning a wind turbine and its noise impact on the environment in the region of BeniSaf [9].

## 2. WIND DATA & SITES DESCRIPTIONS

In this study, meteorological data from three coastal sites, located in northern Algeria (see figure 1), were used to evaluate the wind potential. The geographic coordinates are shown in Table 1.

Table 1. The geographic coordinates of data collection station used in the study

Location	Longitude	Latitude	Altitude [m]
Oran	00°37'W	35°38'N	90
Bejaia	05°04'E	36°43'N	02
Annaba	07°49'E	36°50'N	04

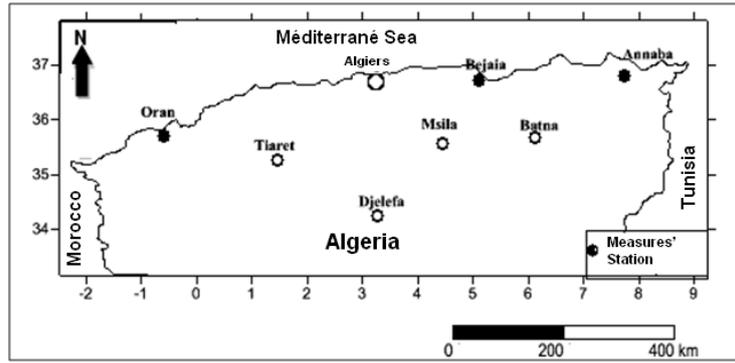


Fig 1: The location of the wind measurement station in north Algerian

The measurements were performed over the past decade, at a height of 10 m from the ground with a time interval of one hour for each recording

### 3. METHODOLOGY

#### 3.1 Determination of Weibull parameters

The wind characteristics will determine the amount of energy that can be effectively extracted from the wind farm. In order to determine the properties of a site, measurements of the speed of wind and its direction are needed. This study was carried out over a period of ten years.

However, previous studies in the field of wind energy showed that the most important and appropriate characteristic to exploit is the Weibull statistical distribution [10]. This is a probability function that can be expressed as:

$$f(V) = \left(\frac{k}{C}\right) \left(\frac{V}{C}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{V}{C}\right)^k\right] \quad (1)$$

Parameters  $k$  and  $C$  are the shape factor (dimensionless) and the scale factor (m/s), respectively. Usually, the shape factor characterizes the symmetry of the distribution. The scale factor is very close to the average speed of wind. The standard deviation method was chosen to determine both factors  $k$  and  $C$ . This method is based on the calculation of the standard deviation and the average speed [11]:

$$k = \left(\frac{\sigma_v}{V_m}\right)^{-1.090} \quad (2)$$

$$C = \frac{2V_m}{\sqrt{\pi}} \quad (3)$$

$V_m$ : average speed (m/s)  
 $\sigma$ : standard deviation(m/s)

#### 3.2 Wind rose

The wind rose is like a navigational compass that divides the horizon into angular sectors. For each sector, are exhibited [11]:

- The wind frequency, i.e. the percentage of time that the wind blows in this sector,
- The average wind speed multiplied by its frequency,
- The power available in the wind.

The wind rose plays a very important role in locating suitable sites for wind turbines. While much of the wind energy comes

from a particular direction, it is important to have as few obstacles as possible and an appropriate terrain in that direction.

#### 3.3 Extrapolation of the Weibull parameters

Justus C.G & all [12]proposed an expression for the exponent of the power law, to extrapolate the Weibull parameters  $k_1$  and  $C_1$  at point  $z_1$  towards level  $z_2$ :

$$k_2 = k_1 \left( \frac{1 - 0.0881 \log \frac{z_1}{10}}{1 - 0.0881 \log \frac{z_2}{10}} \right) \quad (4)$$

$$C_2 = C_1 \left( \frac{z_2}{z_1} \right)^n \quad (5)$$

With

$$n = \frac{0.370 - .0881 \log C_1}{1 - 0.0881 \ln \left( \frac{z_1}{10} \right)} \quad (6)$$

#### 3.4 Wind power

A wind turbine allows extracting the kinetic energy from the wind and converting it into mechanical and/or electric energy. Wind power plants for producing electricity are booming. The theoretical power of wind energy is defined by [13]:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V^3 \quad (7)$$

$\rho$ : density of air at sea level(kg/m<sup>3</sup>).

$S$ : pipe section or area swept by the rotor (m<sup>2</sup>).

$V$ : wind speed(m/s).

$$P_{eff} = c_e \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V^3 \quad (8)$$

$C_e$ : coefficient of efficiency of the wind turbine.

### 3.5 Estimation of the generated energy and the capacity factor

The histogram method is used to estimate the energy generated by a wind turbine. The superposition of the energy response curve (KW) and the frequency histogram give[13]:

$$E = \sum_{i=1}^n P_i(V_i)F_i(V_i) \times N \quad (9)$$

N: number of hours per year.

P (Vi): effective power of the wind turbine at speed Vi.

F (Vi): probability at speed Vi.

The capacity factor is defined as the ratio of the actual energy produced in a period of time (E) e, if the turbine operates at its rated power (PN), for one year.

$$CF = \frac{E}{P_N \times 8760} \quad (10)$$

### 3.6 Calculation models to estimate the noise level

Usually, in order to measure the wind turbine noise, the level of the weighted acoustic power is calculated as an average level at 500 Hz. The impact of noise is calculated according to the international standard ISO 9613-2[14], as follows:

$$L_{AT}(DW) = L_{WA} + D_C - A - C_{met} \quad (11)$$

Where

$L_{AW}$ : level of weighted acoustic power of the noise source.

$D_c = D_{\Omega}$ : Correction made in order to take into consideration the directivity of the source (with out directivity=0dB) and the reflection on the ground  $D_{\Omega}$  which can be calculated as follows:

$$D_{\Omega} = 10 \text{Log} \left( 1 + \frac{d_p^2 + (h_s - h_r)^2}{d_p^2 + (h_s + h_r)^2} \right) \quad (12)$$

hs: height of source above the ground (hub height).

hr: height of point of noise impact (depending on the regulations but also adjustable when defining the calculation).

dp: distance between noise source and point of impact, projected on the ground (m). The distance is calculated from the coordinates (x, y) of the source (index S) to the point of impact (index r):

$$d_p = \sqrt{(x_s - x_r)^2 + (y_s - y_r)^2} \quad (13)$$

A: attenuation during noise propagation between the source (the wind turbine nacelle) and the point of impact. The total attenuation is given by:

$$A = A_{div} + A_{atm} + A_{sol} \quad (14)$$

$A_{div}$ : is the attenuation due to spatial propagation

$$A_{div} = 10 \text{Log}(d) + 11 \quad (15)$$

d: distance between source and point of impact(m).

$A_{amt}$ : attenuation due to atmospheric absorption

$$A_{amt} = \frac{\alpha d}{1000} \quad (16)$$

$\alpha_{500}$ : absorption coefficient of air= 1.9dB/km in the most favorable condition of noise propagation (temperature = 10 °C and relative humidity = 70 %).

$A_{gr}$ : attenuation of ground:

$$A_{gr} = 4,8 - \left[ \left( \frac{2h_m}{d} \right) \left( 17 + \frac{300}{d} \right) \right] \geq 0 \quad (17)$$

$h_m$ : average height (m) of noise path above the ground. If no digital model of ground is found, then the average height can be calculated as follows:

$$h_m = \frac{(h_s + h_r)}{2} \quad (18)$$

If contour lines are available, the vertical surface F is calculated, between the wind turbine and the point of noise impact. This surface is bounded by the ground and the straight line passing through the wind turbine and the point of noise impact. The average height is calculated as follows:

$$h_m = \frac{F}{d} \quad (19)$$

F: total area after integrating all sub-areas calculated at each step(m<sup>2</sup>).

d: distance between source and point of noise impact (m).

$C_{met}$ : weather correction. This is done as follows

$$\begin{cases} c_{met} = 0 & \text{if } d_p < 10(h_s + h_r) \\ c_{met} = c_0 \left[ 1 - \frac{10(h_s + h_r)}{d_p} \right] & \text{if } d_p > 10(h_s + h_r) \end{cases} \quad (20)$$

### 3.7 Wind turbine

In the group of small wind turbines (personal or even domestic wind turbine), type FUHLÄNDER FL 30 of wind turbines retained our attention. Its data sheet is shown in Table 2 and its power curve in Fig2. These wind turbines can be small to medium-sized; their power may range from 100 watts to 30 kilowatts. They are mounted at 10 to 35 meters high poles, and can be either connected to the network or stand-alone in an isolated rural site.

Table 2. Wind turbine parameters[15]

Model	FUHLÄNDER FL 30
Rated power	30,0 kW
Rotor diameter	13,0 m
Hub height	27m
Swept area of rotor	133 m <sup>2</sup>
Cut-in wind speed	4 m/s
Rated wind speed	18 m/s
Cut-out wind speed	25 m/s

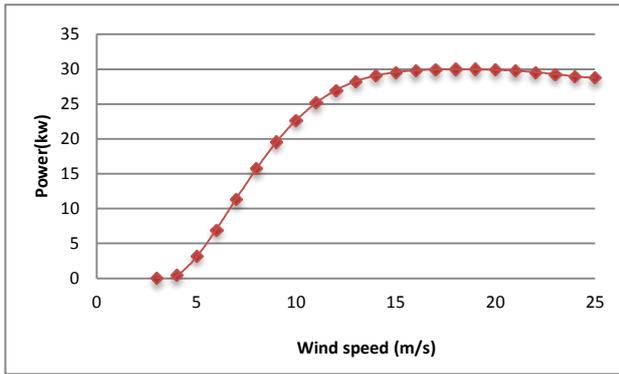


Fig 2: Power curve for WGT 30K (EMD 2009)[15]

#### 4. RESULTS & INTERPRETATIONS

From the hourly data measured for ten years, from 2001 to 2010, in the three weather stations (Oran, Bejaia and Annaba) at a height of 10 m from the ground, the Weibull parameters could be calculated for the three sites (see Table3).

The factor form value  $k$  (2.64) for Bejaia shows that the distribution is stable, whereas the two other sites have a lower value of  $k$ , which means that winds are widely dispersed. Analysis of the scale factor  $C$  shows that Oran the most windy (4.9 m/s) and the least windy is Annaba (4.3 m/s)

Table 3. Weibull distribution parameter and wind speeds for three studied sites at 10m height

site	C (m/s)	k	V (m/s)
Oran	4.9	1.84	4.4
Bejaia	4.8	2.64	4.2
Annaba	4.3	1.75	3.8

Statistical data analysis allowed the determination of the wind rose which is the graphical representation of wind frequency against the direction in a polar reference. It is determined for ten years. The results obtained (see Fig3) show that:

- In Oran, the prevailing wind direction is the north which represents 29.5 % of episodes and other predominant directions are west-south-west (SW) and west which have respectively 16.18 % and 11.97 % of episodes.
- In the region of Bejaia, the western sector represents 30.46 % of wind frequencies, while the west-south-west (WSW) and the east directions are two predominant sectors with a percentage of around 20 % each.
- In the area of Annaba, almost all sectors are equal; however the west direction remains dominant with 16.17 %.

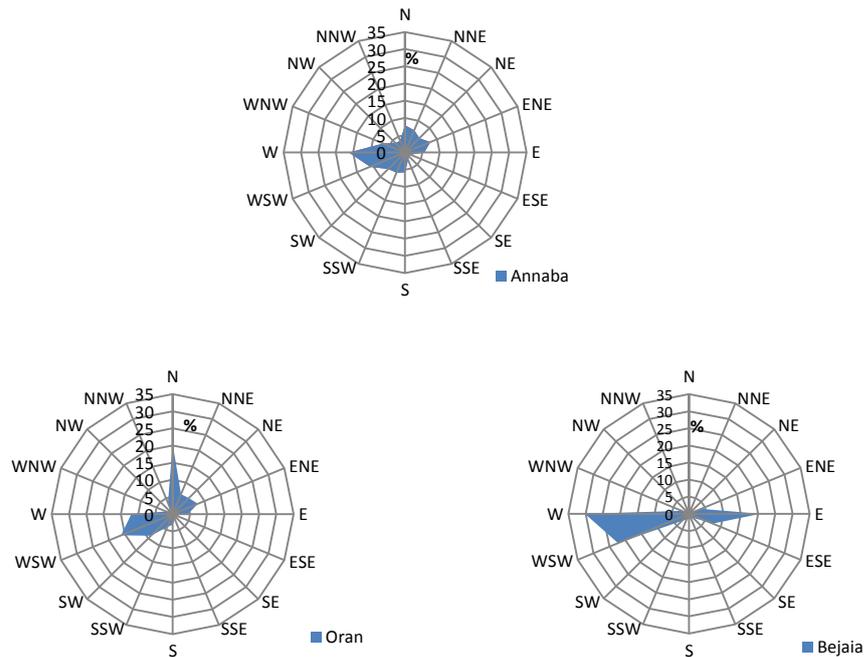


Fig 3: The wind roses for three studied sites at 10m height

The western sector which is common to the three sites represents a significant percentage of frequencies for all the three, with a substantial average annual wind speed, ranging from 3.5m/s to 5.2m/s.

The study of distribution of available energy (see fig4) shows that an energy exceeding 2600kWh can be exploited in the three sites; the values of energy produced in one year in Oran, Bejaia and Annaba are 63.83, 55.86 and 48.86 GWh, respectively. Therefore, the maximum value of the capacity factor is 24% for Oran (see Fig5). The results show that Oran is the most

favorable site for the installation of this type of wind turbines, though Bejaia still remains profitable in rural and remote areas. The results for Annaba are somewhat lower compared to the first two sites.

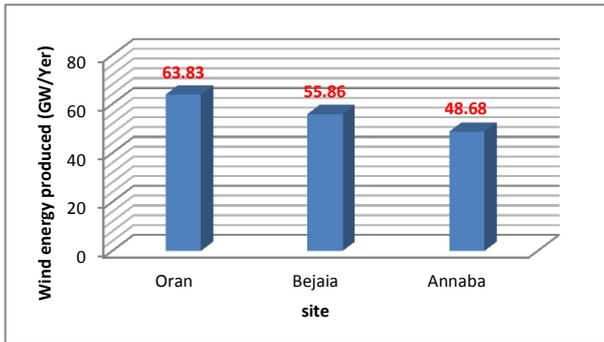


Fig 4 :Annual wind energy produced results by WGT 30kW

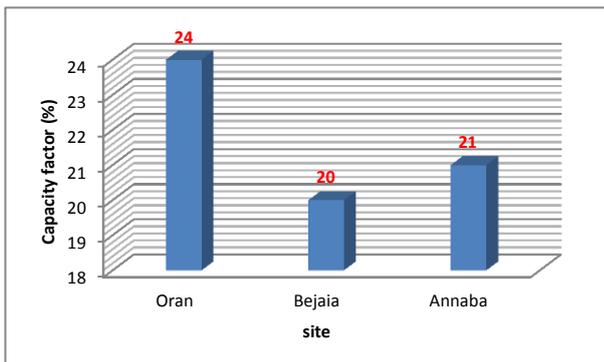


Fig 5 : Capacity factor results by WGT 30Kw

The noise emitted by a wind turbine constitutes the main impact on environment. Noise can be produced by any obstacle placed on an air flow trajectory. The tone of this noise depends on the shape and dimensions of the obstacle as well as on the air flow speed, in addition to the mechanical noise from the operation of all components present in the enclosure. The main noise generating components are: the multiplier (except for some recent models), shafts, the generator, and auxiliary equipment (hydraulic systems, cooling units). The WGT 30kW wind turbine was chosen considering its low noise power. Matlab software was used to calculate the noise generated by the wind turbine under the conditions that can be met by our three sites (flat ground).

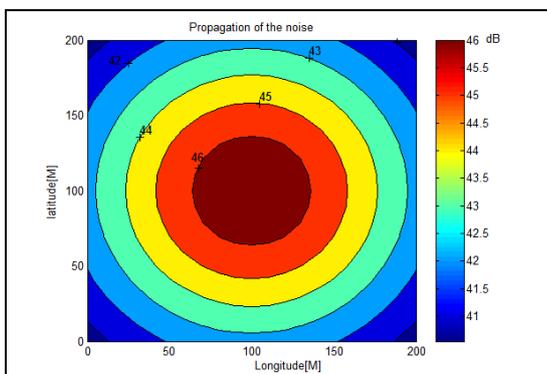


Fig 6: Noise propagation emitted by WGT 30kW

The results of noise propagation are exhibited in fig 6. This wind turbine produces noise of magnitude 93 dB (A), (as given by the manufacturer). According to our calculations,

using the (ISO 9613-2 [12]) method, the noise level is around 45 dB (A) at 60 m from the source. The noise fading due to spatial propagation is 50.86 dB (A) while the other attenuations are virtually negligible, but a correction of the order of 2.9 dB (A) is necessary in order to take into account source directivity. At a distance of 120 m, the noise level will be around 42 dB (A) and fading due to spatial propagation is of the order of 55dB (A) and atmospheric absorption around 0.23 dB (A). The correction is practically invariant.

It is found that noise intensity decreases with distance from the source. Fading due to spatial propagation is the most significant factor that decreases the energy of sound waves. Disturbance from wind turbine noise during operation is low given the animal adaptability and the intermittent nature of noise emitted by wind. The noise level of a wind turbine is 42 dB (A), which corresponds to the noise inside quiet house. Hence, these noise levels have no effect on health and are consistent with the national standard (Executive Decree No. 93-184 of July 27, 1993, regulating noise emission).

## 5. Conclusion

This study focused on the evaluation of wind potential of three coastal sites in northern Algeria (Annaba, Oran and Bejaia), in order to use small wind turbines, based on wind speed measurements recorded during a ten-year period, from 2001 to 2010. Wind resource analysis in the selected sites shows that northern Algeria has a wind energy potential that can be exploited effectively. Indeed, statistical treatment of data allowed evaluating the characteristic speeds and wind potential for each site. The results obtained show that:

- The average annual wind speeds, at 10 meters from the ground, are around 4.4 m/s, 4.2 m/s and 3.8 m/s for Oran, Bejaia and Annaba, respectively.
- As for the values of the Weibull parameters (at ten 10 m above the ground), the respective form factors  $k$  are 1.75 in Annaba, 2.64 in Bejaia and 1.84 in Oran, while the scale factor  $A$  is 4.3 m/s in Annaba, 4.8 m/s in Bejaia and 4.9 m/s in Oran.
- The western sector represents 30.46 % of wind frequencies in the region of Bejaia, and only 16.17 % for the site of Annaba. However, the prevailing wind direction for Oran is the north with 29.5 % of episodes.
- The estimated capacities of the yearly energy produced at the sites of Oran, Bejaia and Annaba are 63.83, 55.86 and 48.68 GWh, respectively.
- The maximum capacity factor was 24% and was recorded in Oran.
- The noise level at 60 m above the ground, of the selected wind turbine is 45 dB (A), which corresponds to the noise inside a quiet house. These noise levels have no environmental effects.

## 6. REFERENCES

- [1] Carlin ,P W. Laxson .A.S, Muljadi. E. B. 2003. The History and State of the Art of Variable-Speed wind Turbine Technology. *Wind Energy*. 6:129–159.
- [2] Veldkamp , D. 2008. A Probabilistic Evaluation of Wind Turbine Fatigue Design Rules. *Wind Energy* 11:655–672
- [3] Boulif, M. 2010. L'Énergie éolienne au Maroc. Communication SMEE'2010. Alger. Algérie,

- [4] Said,M. Ibrahim,A.1984. Energy in the Arab. World. Energy. 9(3):217-38.
- [5] Bensaid,H .1985. The Algerian program on wind energy.Proceeding of WEAC,Oxfordpp. 21-27.
- [6] Hammouche, R. 1990. Atlas Vent de l'Algérie. ONM Office des Publications Universitaires (OPU). Alger.
- [7] Kasbadji Merzouk, N. 2000. Wind energy potential in Algeria. Renewable Energy. 21:553-62.
- [8] Chellali,F.Khellaf,A.Belouchrani,A. 2010. Application of time–frequency representation in the study of the cyclical behavior of wind speed in Algeria: wavelet transform.Stochastic Environmental Research and Risk Assessment. Vol8:1233-9.
- [9] Ben Medjahed ,M. Ghellai ,N.Tabet Hellal,MA. 2010 .choix du site et optimisation du dimensionnement d'une installation éolienne dans la région de ben Saf et son impact sur l'environnement. internationale d'héliotechnique.42, 1-6.
- [10] Solari,G.1994.Wind Speeds Statistics.Collège on atmospheric Boundary Layer and Air Pollution, ICTP, Trieste, Italie .
- [11] Mathew,S .2006. Wind Energy Fundamentals.Resource Analysis and Economics,Springer-Verlag Berlin Heidelberg. ISBN-13 978-3-540-30905-5.
- [12] Justus,C G,Mikhail .1976.A.Height Variation of Wind speed and Win Distributions Statistics.Geophysical Research Letters. vol. 3: N° 5.
- [13] Yousef , B. Aymeric,G. 2005. Collecte, organisation, traitement, analyse de mesures éoliques et modélisation énergétique.Thèse doctorat,Université Tecnica Federico Santa Maria, UTFSM.Valparaso.Chili.
- [14] Judith , L. Gmbh ,L.1996.Industrial noise - Description of the calculation method. AR-INTERIM-CM adaptation and revision of the interim noise computation methods for the purpose of strategic noise mapping .LABEIN Technological Centre.
- [15] EMD .2009. The WindPro Software. Available from: [http://emd.dk/WindPro/downloads%20 and20%updates](http://emd.dk/WindPro/downloads%20and%20updates) (accessed 10july2011),

## Résumé

Dans le présent travail, nous avons optimisé le choix du site et le dimensionnement de parcs éoliens de 9MW et leurs impacts sur l'environnement pour le nord Algérien. Des données météorologiques horaires sur une durée de dix ans, spécialement les vitesses et directions des vents sont utilisés afin d'évaluer le gisement éolien des sites retenus. L'analyse de l'état initial des sites étudiés et de leur environnement nous a permis d'optimiser le choix du site et le dimensionnement des parcs éoliens. On a retenu trois types d'aérogénérateurs (WGT 225KW, WGT 600KW et WGT 1500KW). Vu la nature du relief et la densité de populations, six éoliennes de type WGT 1500KW sont la meilleure solution pour notre parc éolien dans les sites côtiers, occupant peu de place avec un rendement énergétique acceptable, mais le coût reste élevé. Dans les hauts plateaux on dispose de surface suffisante pour installer quinze éoliennes de type WGT 600KW, avec un rendement énergétique favorable et un coût faible par rapport au choix précédent.

Mener un projet éolien à son terme nécessite de l'identification de secteurs potentiels à l'implantation de ce dernier de nombreuses étapes au cours desquelles l'évaluation environnementale joue un rôle important, d'où notre étude des impacts. On a évalué l'impact acoustique des nos parcs éoliens dans les six sites en se basant sur la méthode (ISO 9613-2). Nos résultats de simulation sont en accord avec les travaux de recherche dans ce domaine, pour cela on peut conclure que ces niveaux de bruit n'ont pas d'effet sur la santé et sont conformes à la norme algérienne. Pour l'impact visuel, on a simulé l'interaction entre le parc éolien et le paysage en fonction des spécificités de chaque site afin d'optimiser le choix de ce dernier.

## Abstract

In This Works, we optimized the choice of the site and the dimensioning of wind farms of 9MW and their environmental impacts for Algerian north. Time meteorological data over ten year's duration especially speeds and directions of the winds are used in order to evaluate the wind potential of the selected sites. The analysis of the studied sites initial state and their environment enabled us to optimize the choice of the site and the wind farms dimensioning. We retained three type of aero-generators (WGT 225KW, WGT 600KW and WGT 1500KW). In view of the relief nature and the population density, six wind engines of WGT 1500KW type are the best solution for our wind farm in the coastal sites, occupying little place with acceptable energetic efficiency, but the cost remains high. In the high plateaus we dispose sufficient surface to install fifteen wind-engines of WGT 600KW type, with a favorable energetic yield and a weak cost compared to the preceding choice.

To lead a wind project it requires the identification of potential sectors to this latter establishment of many stages during which the environmental evaluation plays a big role, from where our studies of the impacts. We evaluated the acoustic impact of our wind farms in the six sites while basing on the (ISO 9613-2) method. Our simulation results are in agreement with the research tasks in this field, for that we can conclude that these noise levels do not have an effect on health and are in conformity with the Algerian standard. For the visual impact, we simulated the interaction between the wind farm and the landscape according to each site specificities in order to optimize the choice of this latter.

في هذا العمل الراهن , قمنا باختيار مواقع و أبعاد حظائر الرياح ذات طاقة قدرها 9 ميفا واط و تأثيرها على البيئة المحيطة في شمال الجزائر وذلك انطلاقا من تحصيل معطيات الرياح في كل ساعة على مدار عشرة سنوات وقد ركزنا على السرعة و اتجاه الرياح لتقييم مكن طاقة الرياح في المواقع المختارة . التحليل الأولي للمناطق قيد الدراسة سمح لنا بتحسين تحديد مواقع الخاصة بحظائر الريا الهوائية ( WGT 225KW, WGT 600KW ) .

WGT 1500KW). بنظر الى كثافة السكان و وعدم توفر المساحة كبيرة لأراضي , تعد ستة عفات هوائية من نوع WGT 1500KW الحل المثالي في ثلاث مناطق ساحلية المدروسة , حيث أنها تشغل حيزا صغيرا مع مردود جيد ونقى التكلفة الكبيرة هي السلبية الوحيدة لهذا النوع.

أما فيما يخص المناطق الهضاب العليا , فان توفر مساحة الكافية يجعل خمس عشر عفه من نوع WGT 600KW الاختيار الملائم, وذلك لمرودها المقبول وتكلفة الرخيصة بمقارنة مع النوع السابق.

وع حظائر الرياح يجب التحقق من كل التأثيرات المرتقبة على البيئة المحيطة. وقد قمنا بتركيز على الأثير الصوتي والبصري وقد تبين لنا بعد محاكاة التأثير الصوتي باعتماد على معيار (ISO 9613-2) أنه ليس لديه أيتأثير على صحة السكان و متوافقة مع القوانين الجزائرية و متطابقة مع البحوث في هذا المجال , أما فيما يخص التأثير البصري فأن الحظائر تتفاعل بشكل ايجابي مع منظر المحيطة بها وهذا حسب كل موقع وتضاريسه.