



UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA 1
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DES ENERGIES RENOUVELABLES



Mémoire

Présenté pour l'obtention du diplôme de

**MASTER
EN
ENERGIES RENOUVELABLES**

Option : CONVERSION THERMIQUE

Thème :

***Effet du sillage
sur la production énergétique d'une
ferme éolienne***

Par :

Melle MEDJDOUB Nourhane

Soutenu le 10/09/2020 devant le jury compose de :

Merzouk Mustapha

Lafri Djamel

Kasbadji Nachida Merzouk

Professeur à Université de Blida1

Docteur à Université de Blida1

Directrice de Recherche CDER

Président

Examineur

Promotrice

Dédicace

Par le biais de cet humble et modeste travail synonyme de concrétisation de cinq ans de formation, de labeur et d'efforts, Je dédie le fruit de ma patience, de ma persévérance :

*A ma raison de vivre ma mère, symbole d'amour,
pour sa patience, ses sacrifices,
sa conscience, ses conseils qui ont éclairés mon chemin,*

*A mon cher père ; en reconnaissance de tout ce qu'il a fait
pour moi tout au long de son existence.*

A mon cher frère bien aimé.

A tous mes Amis de la promotion 2015.

Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre de la préparation d'un mémoire de master en Energie Renouvelables, option Thermique au Département des Energies Renouvelables de l'Université Saad Dahleb de Blida 1,

Avant tout, je tiens à remercier Dieu de nous avoir donné le courage, la volonté, la patience, et la santé durant toutes ces longues années d'étude.

J'adresse mes sincères remerciements à tous mes enseignants de L'université Saad Dahleb département des Energies Renouvelables, notamment à ma promotrice Dr. Nachida Kasbadji Merzouk la directrice de Recherche en énergie renouvelable, qui a assuré la direction et l'encadrement du travail présenté dans ce mémoire. Je tiens notamment, à adresser l'expression de ma sincère reconnaissance aux membres du jury d'examen, le président Professeur Merzouk Mustapha et l'examinatuer Docteur Lafri Djamel .pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail.

Enfin, mes remerciements vont à tous ceux qui m'ont soutenu de près ou de loin à réussir ce travail.

Table des matières

Introduction générale

Chapitre 1 Etude Bibliographique

1.1.Introduction	3
1.2. Origine et types des vents	3
1.2.1 L'atmosphère	3
1.2.2 L'atmosphère standard	3
1.2.3 La couche limite atmosphérique	4
1.2.4 Le climat	6
1.2.5 Le vent	6
1.3.Energie éolienne	10
1.3.1 Définition des capteurs éoliens	10
1.3.2 Historique	10
1.3.3 Les différents types d'éoliennes	12
1.3.4 Architecture et mode de fonctionnement d'une éolienne	14
1.3.5 Potentiel énergétique d'une éolienne	15
1.4. Effet de sillage	16
1.4.1 Parcs éoliens	16
1.4.2 Structure du sillage éolien	17
1.4.3 Effets des structures tourbillonnaires	17
1.4.4 Sillage éolien et l'interaction entre les machines	18
1.4.5 Etat de l'art	19
1.5. Conclusion	21

Chapitre 2 Modélisation

2.1.Introduction	22
2.2.Modélisation du sillage	22
2.2.1 Effet du sillage créé par une turbine	22
2.2.2 Effet du sillage entre deux turbines	23
2.2.3 Effet du sillage dans une ferme éolienne	24
2.3. Modèle de puissance	28
2.3.1 La puissance de sortie par l'éolienne	28
2.3.2 Le rendement d'une éolienne	28
2.3.3 La puissance de sortie extraite par une ferme éolienne	28
2.4. Cas étudié	28
2.4.1 Hypothèses de calcul	29
2.4.2 Configurations adoptées	29
2.5. L'organigramme du programme de calcul	29
2.6. Conclusion	31

Chapitre 3 Résultats et discussions

3.1. Introduction	32
3.2. Positionnement des éoliennes de la ferme (Cas 1)	32
3.2.1. Vitesses de sillage	32
3.2.2. Puissance sortie d'une ferme éolienne	33
3.2.3. Le rendement	34
3.2.4. Puissance totale extraite par une ferme éolienne	34
3.2.5. Le rendement total par une ferme éolienne :	35
3.3. Résultat du deuxième positionnement des éoliennes de la ferme (Cas 2)	36
3.3.1. Vitesses de sillage	36
3.3.2. Puissance sortie d'une ferme éolienne	37
3.3.3. Le rendement	38
3.3.4. Puissance totale extraite par une ferme éolienne :	39
3.3.5. Le rendement total par une ferme éolienne :	40
3.4. Synthèse des cas1 et cas2	40
3.5. Effet de l'espacement perpendiculaire entre les éoliennes :	42
3.5.1. Vitesses de sillage	42
3.5.2. Puissance sortie de la ferme éolienne	42
3.5.3. Le rendement	43
3.5.4 Puissance totale extraite par une ferme éolienne :	44
3.6. La courbe de puissance pour une gamme de vitesse du vent typique	45
3.7. Le choix d'aérogénérateurs	46
3.8. Conclusion :	48

Conclusion générale

Références

Annexes

Liste des figures

Figure 0-1 l'évolution de la puissance du parc éolien	1
Figure 1-1 Les couches de l'atmosphère	4
Figure 1-2 Vue schématique de la couche limite atmosphérique	5
Figure 1-3 Les vents géostrophiques	7
Figure 1-4 Les brises vents de mer	8
Figure 1-5 Les brises vents de montagne	9
Figure 1-6 girouette	9
Figure 1-7 anémomètre	9
Figure 1-8 Rose des vents	10
Figure 1-9 La première éolienne automatique.....	13
Figure 1-10 Éolienne de Poul La cour.....	14
Figure 1-11 Eolienne de Darrius	14
Figure 1-12 Courbes caractéristique des aérogénérateurs	15
Figure 1-13 Schéma de principe du rotor de savanius.....	16
Figure 1-14 Schéma du rotor de savanius.....	16
Figure 1-15 Photographie et shéma d'une éolienne de darrius	17
Figure 1-16 Composants d'une éolienne.....	18
Figure 1-17 Éléments d'une nacelle.....	19
Figure 1-18 Courbe de puissance d'une éolienne.....	19
Figure 1-19 Le parc terrestre et le parc offshore	21
Figure 1-20 Sillage proche et sillage lointain	22
Figure 1-21 Visualisation du sillage par la fumée en soufflerie	22
Figure 1-22 Structure du sillage en aval d'une éolienne, révélée par la fumée	23
Figure 1-23 Effets de sillages sur le parc éolien d'Horns Rev,Danemark.....	19
Figure 2-1 Schéma représente l'effet de sillage	23
Figure 2-2 Exemple de sillages multiples affectant une position	25
Figure 2-3 L'effet sillage en version schématique vue par Jensen	26
Figure 2-4 Illustrations des multiples interactions de sillage	27
Figure 2-5 Illustration des deux principaux types d'interactions de sillage qui se produisent dans les parcs éoliens.	30
Figure 2-6 Positionnement des turbines de la ferme.	30
Figure 3-1 : Cas 1 : Position initiale des turbines éoliennes.....	33
Figure 3-2 La vitesse de sillage des éoliennes en fonction de la distance en aval (cas 1).....	34
Figure 3-3 Energie de sortie des éoliennes en fonction de la distance en aval (cas 1).....	34
Figure 3-4 Rendement des éoliennes en fonction de la distance en aval (cas 1).....	35
Figure 3-5 Puissance maximum de la ferme éolienne	36
Figure 3-6 Rendement de la ferme éolienne cas1.....	37
Figure 3-7 Cas 2 : Configuration proposée pour 9 éoliennes.	37
Figure 3-8 Vitesses de sillage des éoliennes en fonction de la distance en aval (cas 2)	38
Figure 3-9 Energie de sortie des éoliennes en fonction de la distance en aval (cas2).....	39
Figure 3-10 Rendement des éoliennes en fonction de la distance en aval (cas 2).....	39
Figure 3-11 Puissance maximum de la ferme éolienne (cas 2)	39

Figure 3-12 Rendement de la ferme éolienne cas2.....	41
Figure 3-13 l'énergie de sortie de la ferme éolienne cas1 et cas 2	41
Figure 3-14 Rendement de la ferme éolienne pour	42
Figure 3-15 Vitesse de sillage des éoliennes en fonction de la distance perpendiculaire d	43
Figure 3-16 Energie de sortie des éoliennes	44
Figure 3-17 Rendement de la ferme éolienne.....	44
Figure 3-18 Puissance maximum de la ferme éolienne	45
Figure 3-19 Rendement de la ferme éolienne.....	46
Figure 3-20 L'énergie de sortie des éoliennes en fonction de la variation de la vitesse de vent	46
Figure 3-21 L'énergie de sortie totale d'une ferme éolienne en fonction de la variation	47
Figure 3-22 L'énergie de sortie d'une ferme éolienne pour 3 types d'aérogénérateurs	48
Figure 3-23 Puissance de sortie totale d'une ferme éolienne en fonction de la hauteur pour 3 types d'aérogénérateurs 600KW, 1MW, 3MW.....	48

Liste des tableaux

Tableau0-1 La consistance de programme en énergie renouvelables à réaliser pour le marché national sur la période 2015-2030 est de 22 000MW.....	2
Tableau 3-1 Rendement, Puissances et Pertes de puissance en fonction du sillage.....	36
Tableau 3-2 Rendement total cas 1 et cas2	42
Tableau 3-3 Caractéristiques des éoliennes choisies.....	47

Nomenclature

A : surface de la turbine éolienne (m^2)
 A_{OV} : la surface balayée (m^2)
 C_p : coefficient de puissance
 C_t : coefficient de poussée
 D : diamètre de rotor (m)
 d_{per} : L'espace perpendiculaire (m)
 d_{ws} : La distance entre les turbines amont i et aval j (m)
 F_1, F_2, F_3 : coefficients obtenus par interpolation pour calcul de A_{ov}
 H : la hauteur du moyeu de l'éolienne (m)
 $N_{éol}$: nombre d'éoliennes
 P : le nombre de pales.
 P_{Pr} : puissance de sortie (MW)
 P_r : la puissance nominale (MW)
 P_{tot} : La puissance totale (MW)
 R : rayon du rotor de la turbine éolienne (m)
 R_{wk} : le rayon du sillage (m)
 r_r : le rayon du rotor (m)
 r_d : rayon du rotor en aval (m)
 U : vitesse de l'extrémité des pales (m/s)
 V : vitesse du vent (m/s)
 V_{df} : déficit de vitesse du vent (m/s)
 V_{sr} : vitesse du vent réduite par l'effet de sillage (m/s)
 $W(j)$: l'ensemble des turbines affectant la position j avec un sillage
 x_{ij} : la distance entre les positions i et j (m)
 Z_h : la hauteur de l'éolienne (m)
 Z_0 : la rugosité du sol (m)

Lettres grecques

λ : vitesse spécifique locale
 ρ : masse volumique de l'air (Kg/m^3)
 Θ : direction du vent.
 α : constante dit d'entraînement
 a : facteur d'induction axiale
 η_{wts} : le rendement
 η_m : rendement mécanique
 η_g : rendement électrique de générateur

Résumé

La recherche d'une localisation optimale des systèmes d'éoliennes dans le but de minimiser les interactions aérodynamiques entre eux et de maximiser la puissance de sortie est l'une des problèmes complexes au stade de la conception des fermes éoliennes. En général, les interférences de sillage créées par les systèmes en amont influencent la qualité de l'électricité produite par les turbines en aval. Dans ce contexte, ce mémoire présente une approche de recherche d'un emplacement optimal d'éoliennes qui maximisent la puissance produite avec de faibles pertes de puissance active en raison de l'effet de sillage. Par conséquent, une zone avec 9 turbines similaires est proposée comme étude de cas. L'arrangement optimal est basé sur des critères (puissance totale et le déficit de vitesse du vent) en fonction des variables de conception (espacement entre les turbines et les rangées). Les résultats et les discussions montrent que la production d'électricité est diminuée sensiblement lorsque les turbines fonctionnent à faible distance où le niveau d'interaction des sillages est très important. Cette dégradation peut être évitée si les turbines en aval sont déplacées de ceux en amont.

Mots-clés : ferme éolienne, turbine éolienne, interactions de l'effet de sillage, puissance de sortie, la qualité de l'électricité produite, conception de ferme éolienne

Abstract:

Seeking for an optimal location of wind turbine systems with the aim to minimize the aerodynamic interactions between them and maximize the output power is one of the most complex problems in the stage of wind farm design. In general, the wake interferences created by upstream systems influence the quality of power produced by downstream turbines. In this spirit, this memoire presents an optimization approach in preliminary design phase that looks for an optimal location of wind turbines that extremes the power generated with low active power losses due to wake effect. Therefore, an area with nine similar wind turbines (3 lines and 3 columns) is proposed as a case study. The power losses are quantified using a standard analytical wake model. The optimal arrangement is based on criteria (total power produced and wind velocity deficit) as a function of crucial design variables (inter-space between turbines and rows). Results and discussions show that power production is significantly decreases when turbines operate in low distance where wake interactions level is very important. This degradation can be avoided if downstream turbines are displaced from upstream ones.

Key words: wind farm, wind turbine, wake interactions, power quality, design

ملخص:

البحث عن الموقع الأمثل لأنظمة توربينات الرياح بهدف تقليل التفاعلات الديناميكية الهوائية بين بعضها البعض وزيادة طاقة المنتجة هي واحدة من أكثر مشاكل المعقدة في مرحلة تصميم مزرعة الرياح. بشكل عام تؤثر تدخلات الاستيقاظ التي تم إنشاؤها بواسطة أنظمة المنبع على جودة الطاقة التي تنتجها توربينات الرياح المصب، تقدم هذه المذكرة منهجية التحسين في الأولي مرحلة التصميم التي تبحث عن الموقع الأمثل لتوربينات الرياح مع التحسين في جودة الطاقة المنتجة التي تغير و تنخفض بسبب تأثير ظاهرة الاستيقاظ، لذلك تم اقتراح دراسة تسعة توربينات الرياح متشابهة كل منها موزع على الشكل التالي (3 خطوط و 3 أعمدة). يتم قياس خسائر الطاقة باستخدام نموذج تنبيه التحليلي القياسي. يعتمد الترتيب الأمثل على المعايير (الطاقة الكلية المنتجة وعجز سرعة الرياح) بدلالة متغيرات التصميم (مسافة بين التوربينات والصفوف)، تظهر النتائج والمناقشات أن إنتاج الطاقة ينخفض بشكل ملحوظ عندما تكون المسافة صغيرة بين عمل التوربينات الرياح حيث يكون مستوى تفاعلات الاستيقاظ مهماً جداً في هذه الحالة. لذلك يمكن تجنب هذه الظاهرة إذا تم إزاحة توربينات الهوائية من المصب الى المنبع في الصفوف.

الكلمات المفتاحية: مزرعة الرياح، توربينات الرياح، تفاعلات الاستيقاظ، الطاقة الجودة والكفاءة والتصميم.

Introduction générale

Le développement de l'énergie éolienne, suite à la surexploitation du pétrole et du gaz naturel dans ces dernières décennies, suscite la promotion et l'installation des parcs éoliens dans plusieurs pays à travers le monde, pour réduire les émissions de gaz carbonique qui sont les premiers responsables de l'effet de serre.

Au niveau mondial, près de 51,3 GW de nouvelles capacités éoliennes ont été installées en 2018 (plus de 91% d'installations terrestres) selon les dernières données du Global Wind Energy Council (GWEC) qui doit remettre son rapport définitif le 3 avril prochain. Le volume de ces nouvelles installations est inférieur de 3,6% à celui de 2017 mais GWEC souligne l'émergence de nouveaux marchés comme l'Amérique latine, l'Asie du Sud-Est et l'Afrique (avec toutefois seulement 10% des capacités installées en 2018).

En 2018, la Chine a compté à elle seule pour près de 45% des nouvelles installations éoliennes dans le monde (+ 23 GW), très loin devant les États-Unis (+ 7,6 GW) et les pays européens. Signalons que l'empire du Milieu est également en tête des installations d'éoliennes offshore (+ 1,8 GW en 2018) alors que ce marché s'est historiquement développé dans les eaux européennes.

Au total, la puissance du parc éolien mondial a atteint 591 GW à fin 2018 selon GWEC qui n'a pas encore communiqué ses données sur les productions associées (1 096 TWh en 2017 selon les dernières données de l'Agence internationale de l'énergie. Selon GWEC, les installations de nouvelles éoliennes pourraient dépasser 55 GW par an d'ici à 2023 [1].

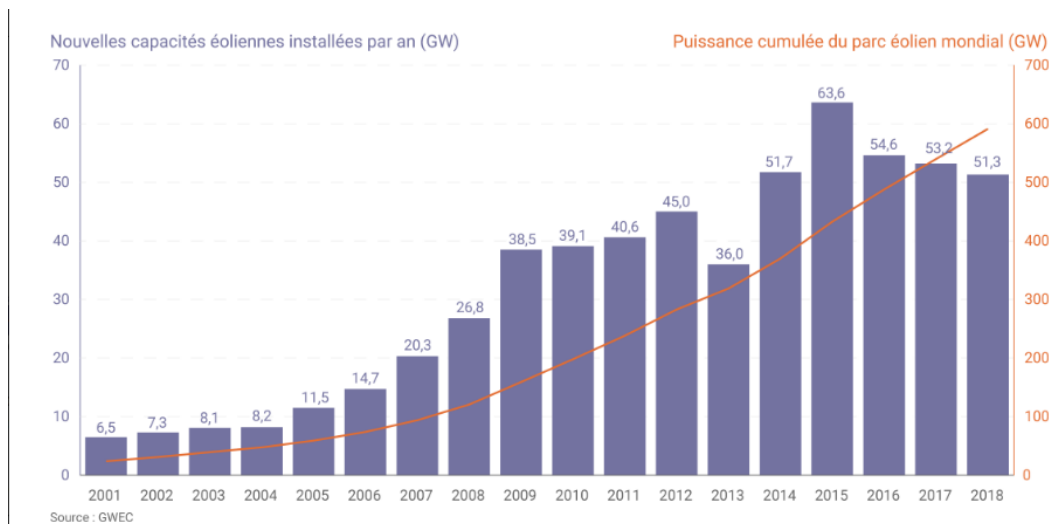


Figure 0-1 l'évolution de la puissance du parc éolien [1]

L'Algérie s'est engagée 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 à travers le lancement d'un programme ambitieux pour le développement des énergies renouvelables qui a été adopté par le Gouvernement en février 2011 et révisée en mai 2015. L'Algérie s'engage dans une nouvelle ère énergétique durable. Le programme des énergies renouvelables actualisé consiste à installer une puissance d'origine renouvelable de l'ordre de 22 000 MW à l'horizon 2030 pour le marché national.

La consistance du programme en énergie renouvelables à réaliser pour le marché national sur la période 2015-2030 est de 22 000 MW, répartie par filière comme suit :

Tableau 0-1 Programme en énergie renouvelables à réaliser pour le marché national sur la période 2015-2030 est de 22 000 MW [3].

	1ère phase 2015-2020 [MW]	2ème phase 2021-2030 [MW]	TOTAL [MW]
Photovoltaïque	3000	10575	13575
Eolien	1010	4000	5010
CSP	—	2000	2000
Cogénération	150	250	400
Biomasse	150	640	1000
Géothermie	05	10	15
TOTAL	4525	17475	22000

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. Deux autres parcs éoliens, de 20 MW chacun, doivent être développés au cours de la période 2014-2013. Des études seront menées pour détecter les sites adéquats pour réaliser les autres projets au cours de la période 2016-2030 pour une puissance d'environ 1700 MW [2].

Dans ce contexte général, notre étude s'intéresse à la filière éolienne et à l'intervention pour le développement de la performance des parcs éoliens, à travers l'implantation des aérogénérateurs.

Sous l'effet du sillage, des réductions importantes de la vitesse du vent peuvent être notées, également la puissance produite dans la zone en aval de la turbine.

Notre objectif principal, dans ce mémoire est d'optimiser l'emplacement d'aérogénérateurs dans une ferme éolienne en diminuant les effets de sillage. Pour cela on a modélisé les effets de sillage et travailler sur une simulation numérique sous Matlab, pour estimer la puissance optimale sortie du parc éolien en fonction de l'emplacement.

Le présent mémoire est composé de trois chapitres encadrés par une introduction générale et une conclusion générale, les chapitres sont présentés dans l'ordre suivant :

Le premier chapitre l'étude bibliographique ou on s'intéresse à la ressource de l'énergie éolienne, la technologie éoliennes (les principes composants, les différents types de la machines ...), la description d'effet de sillage ainsi que les travaux antérieurs sur l'effet de sillage et les parcs éoliens.

Le second chapitre porte sur la modélisation ou nous présentons à la méthode de calcul pour de l'effet de sillage et l'estimation de la puissance optimale sortie d'une ferme éolienne, en fonction de l'emplacement des aérogénérateurs pour deux configurations.

Au troisième chapitre sont présenté les résultats et discussions de la puissance de la ferme éolienne. Les résultats sont donnés en forme de courbes.

Enfin nous terminons par tirer des conclusions.

Chapitre 1

Etude Bibliographique

1.1. Introduction

Depuis les 30 dernières années, l'énergie éolienne s'impose de plus en plus comme une source d'énergie renouvelable efficace, non polluante et compétitive. Comme beaucoup d'énergies renouvelables, le gisement éolien mondial est considérable, puisqu'il est très supérieur à la consommation énergétique actuelle de l'humanité [5].

Le monde entier se propose de réduire l'utilisation des combustibles fossiles, une des causes les plus préoccupantes de la diminution de l'épaisseur de la couche d'ozone et, sans doute, de l'effet de serre. L'exploitation de l'énergie éolienne est donc perçue comme une voie positive menant à la résolution de ces problèmes [4].

Le présent du premier chapitre est composé de trois parties présentées dans l'ordre suivant :

- ❖ La première partie : origine et les types des vents
- ❖ La deuxième partie : technologie des éoliennes
- ❖ La troisième partie : le sillage éolien

1.2. Origine et types des vents

1.2.1 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 bleu foncé 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 1-1).

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.[9]

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 [9].

1.2.2 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 [4].

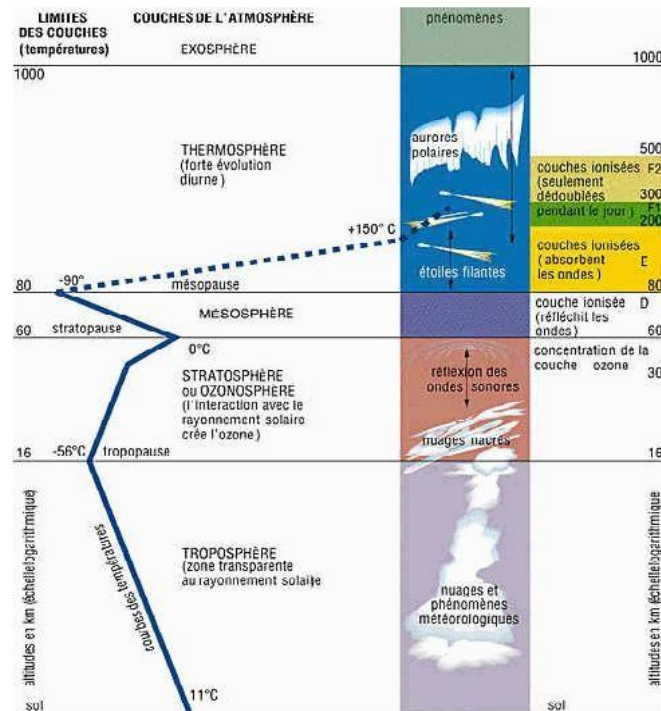


Figure 1-1 Les couches de l'atmosphère [13].

1.2.3 La couche limite atmosphérique

Couche limite atmosphérique [7], 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 de 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.

1.2.3.1 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.

1.2.3.1 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

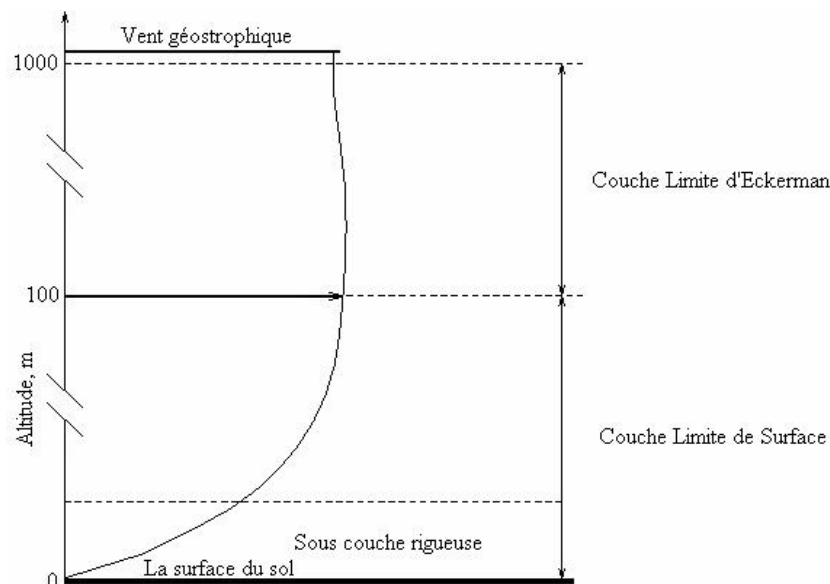


Figure 1-2 Vue schématique de la couche limite atmosphérique [7].

Dans la couche limite de surface, la force Coriolis est négligeable et l'écoulement de l'air est régi par des turbulences d'origine [7] :

- 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, du 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 adiabatique.

On distingue ainsi trois cas :

- Les conditions atmosphériques instables
- Les conditions atmosphériques neutres
- Les conditions atmosphériques stables

Elles interviennent en fonction de la température de l'air qui décroît plus vite ou moins vite que le gradient adiabatique des masses d'air, [4].

1.2.4 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. [10]

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 [4] [11].

1.2.5 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. [8]

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 [13] :

- 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 due au gradient de pression Dirigées des hautes pressions vers les basses pressions ces forces sont des gradients 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.

1.2.5.1 Le mouvement du vent

On les appelle aussi les vents globaux, produit d'écart de température et des variations de pression, car le soleil réchauffe les régions situées autour de l'équateur, à la latitude 0°, 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. [17-18-8].

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 1-3 Les vents géostrophiques [12].

1.2.5.2 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 [4].

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 1-4).

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.



Figure 1-4 Les brises vents de mer [12]

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, le vent 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.

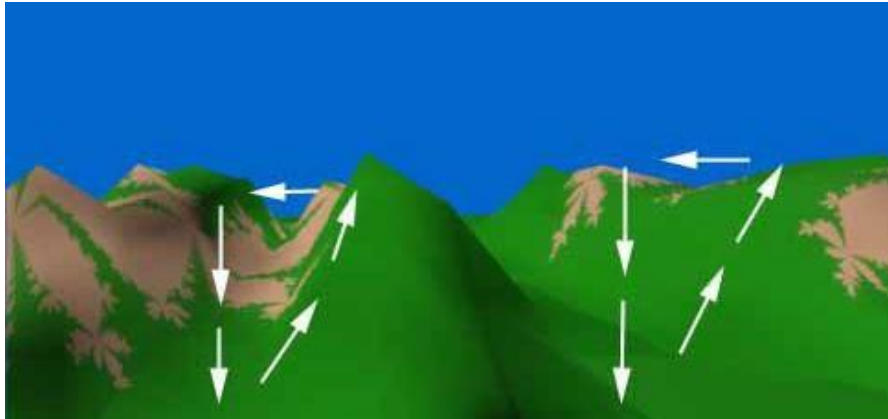


Figure 1-5 Les brises vents de montagne [12].

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.

1.2.5.3 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 1-6 anémomètre [15]



Figure 1-7 girouette [15]

1.2.5.4 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 le quel vent souffle dans ce secteur.

- La vitesse moyenne du vent multiplié par sa fréquence.
- La puissance disponible dans le vent.

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

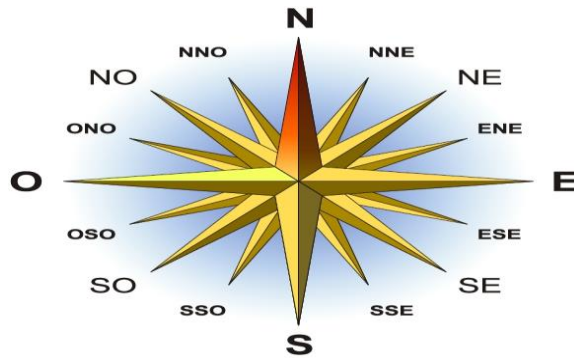


Figure 1-8 Rose des vents [16].

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.

1.3. Energie éolienne

1.3.1 Définition des capteurs éoliens

Une éolienne produit de l'énergie mécanique ou électrique grâce au vent. Sous l'effet du vent, l'hélice, appelée aussi rotor, se met en marche. Le rotor est situé au bout d'un mât car les vents soufflent plus fort en hauteur. Suivant le type d'éoliennes, le mât varie entre 10 et 100m de haut. Le rotor comporte généralement 2 à 3 pales, mesurant entre 5 et 90 m de diamètre. L'hélice d'une turbine entraîne un axe dans la nacelle, appelé arbre qui est relié à un alternateur.

Grâce à l'énergie fournie par la rotation de l'axe, l'alternateur produit un courant électrique alternatif.[19]. Un transformateur situé à l'intérieur du mât élève la tension du courant électrique produit par l'alternateur pour qu'il puisse être plus facilement transporté dans les lignes à moyenne tension du réseau. Pour pouvoir démarrer, une éolienne nécessite une vitesse de vent minimale d'environ 10 à 15 km/h. Pour des questions de sécurité, l'éolienne s'arrête automatiquement de fonctionner lorsque le vent dépasse 90 km/h. La vitesse optimale est de 50 km/h, [19, 16].

1.3.2 Historique

La première éolienne destinée à produire de l'électricité (voir Figure 1-9) fut construite par Charles F. Brush en 1887. Composée de 144 pâles et d'un diamètre de 17 m, elle ne produisait que 12 kW.

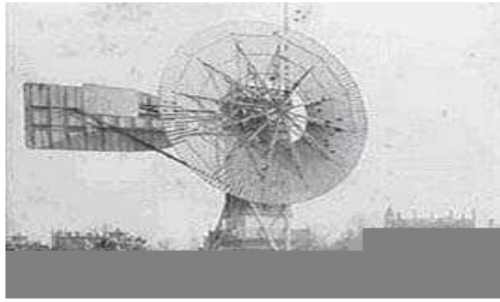


Figure 1-9 La première éolienne automatique, fabriquée à Cleveland en 1887 par Charles F.Brush. [20]



Figure 1-10 Éolienne de Paul La cour [20]

Le météorologiste danois Paul La Cour qui voyait dans l'électricité une des techniques qui auraient le plus d'importance dans l'avenir, avait mené des recherches pour améliorer l'efficacité des moulins à vent et améliorer l'invention de Charles F. Brush. Il conclut ainsi qu'une éolienne à rotation rapide (voir Figure 1-10) ayant un nombre de pales limité produisait plus d'électricité. Ceci a été possible grâce à ses recherches dans une soufflerie aérodynamique

Plus tard, Darrieus, un ingénieur français fit construire en 1931 la première éolienne à axe vertical. Cette éolienne dite de type Darrieus dont le fonctionnement repose sur l'effet de portance subit par un profil soumis à l'action d'un vent relatif (effet qui s'exerce sur les ailes d'un avion). Cette configuration présente un important avantage sur les éoliennes classiques, où l'éolienne peut fonctionner quelle que soit la direction du vent. Des recherches sont en cours actuellement visant à améliorer ce système qui reste fragile en cas de vents trop violents.



Figure 1-11 Eolienne de Darrieus [20]

En Algérie, la première éolienne a été installée à Adrar en 1953. Cette éolienne faisait partie des trois premières grandes éoliennes dans le monde et la 1^{ère} installée en Afrique avec une capacité de pompage de 50 litres par seconde (à trois hélices avec une forme aérodynamique de 15 m de diamètre). Cette éolienne se trouve hors d'usage depuis 1969.

[21-22]

Entre temps, plusieurs pompes éoliennes multi-pales, ont été mises en place dans les zones isolées pour l'intérêt des agriculteurs et des éleveurs, notamment à Djelfa, M'sila, Laghouat et Ghardaïa. La plupart de ces pompes éoliennes ont été fabriquées en Algérie par deux usines situées au niveau de Laghouat et El-Berouaguia.[22]

1.3.3 Les différents types d'éoliennes [23]

Les solutions techniques permettant de recueillir l'énergie du vent sont très variées et il existe deux types d'éoliennes :

- ✓ Les aérogénérateurs à axe vertical,
- ✓ Les aérogénérateurs à axe horizontal.

Le graphique de la Figure 1-12 donne une vue sur les coefficients de puissance CP habituels en fonction de la vitesse spécifique λ pour différents types d'éoliennes., [24]. La vitesse spécifique ou le paramètre de rapidité λ est le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales et la vitesse du vent.

Le coefficient de puissance Cp [26], détermine la quantité maximale d'énergie cinétique du vent qui peut être convertie en énergie mécanique (rotation du rotor) avec un rendement qui ne peut dépasser 16/27 soit approximativement 59 % [27].

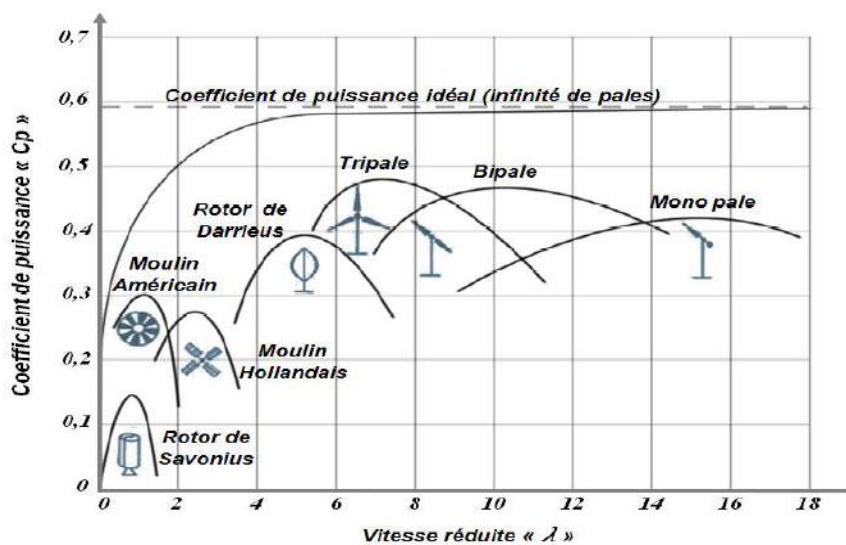


Figure 1-12 Courbes caractéristique des aérogénérateurs [28]

1.3.3.1 Les aérogénérateurs à axe horizontal

Les voilures à axe horizontal sont les plus utilisées actuellement. Les différentes constructions des aérogénérateurs utilisent des voilures à deux pales, trois pales et multiples. A noter que les éoliennes à trois pales sont les plus courantes. La caractéristique de puissance Cp dépend principalement du nombre de pales comme le montre la Figure 1-12 et des propriétés aérodynamiques de la voilure (coefficient de poussée CF, coefficient de couple CM...). [29]

A noter aussi, qu'il existe deux catégories d'éolienne à axe horizontal [30]:

- **Amont** : le vent souffle sur le devant des pales en direction de la nacelle. Les pales sont rigides et le rotor est orienté selon la direction du vent par un dispositif.
- **Aval** : le vent souffle sur l'arrière des pales en partant de la nacelle. Le rotor est flexible, auto-orientable.

La disposition des turbines en amont est la plus utilisée pour sa simplicité et donne de meilleurs résultats pour les fortes puissances, où les efforts de manœuvre sont moins importants avec une meilleure stabilité. Les pales des éoliennes à axe horizontal doivent toujours être orientées selon la direction du vent. Pour cela, il existe des dispositifs d'orientation de la nacelle en fonction de cette direction.

Aujourd'hui, l'éolienne à axe horizontal, présente un réel intérêt pour la production d'électricité à grande échelle.

1.3.3.2 Les aérogénérateurs à axe vertical [28]

Les pylônes des éoliennes à axe vertical sont courts, entre 0,1 et 0,5 fois la hauteur du rotor. Cela permet de placer tout le dispositif de conversion de l'énergie (génératrice, multiplicateur, etc.) au pied de l'éolienne, facilitant ainsi les opérations de maintenance.

De plus, il n'est pas nécessaire d'utiliser un dispositif d'orientation du rotor comme pour les éoliennes à axe horizontal. Cependant, les vents sont faibles à proximité du sol, ce qui induit un moins un bon rendement car l'éolienne subit les turbulences du vent. De plus, ces éoliennes doivent être entraînées au démarrage et le mât subit de fortes contraintes mécaniques. Pour ces raisons, de nos jours, les constructeurs d'éoliennes privilégient les éoliennes à axe horizontal. Les deux types des structures d'éoliennes à axe vertical les plus répandues sont :

- Le rotor de Savonius montré sur les Figures 1-13 et 1-14. Les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensités différentes. Il en résulte un couple entraînant la rotation de l'ensemble

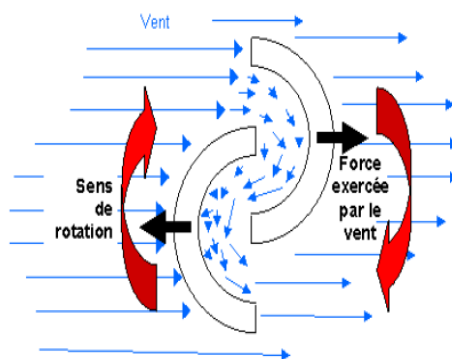


Figure 1-13 Schéma de principe du rotor de Savonius [28]

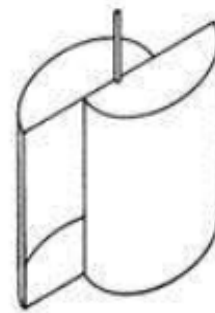


Figure 1-14 Schéma du rotor de savonius [28]

- Le rotor de Darrieus représenté sur les Figures 1-15 montre un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles et soumis à des forces d'intensité et de directions variables. La résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif.



Figure 1-15 Photographie et schéma d'une éolienne de darrius [28]

1.3.4 Architecture et mode de fonctionnement d'une éolienne

La turbine éolienne ou l'aérogénérateur est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique rotative, afin de la convertir en énergie électrique par l'intermédiaire d'un arbre qui entraîne une génératrice.

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 1-16 présente les composantes d'une éolienne.

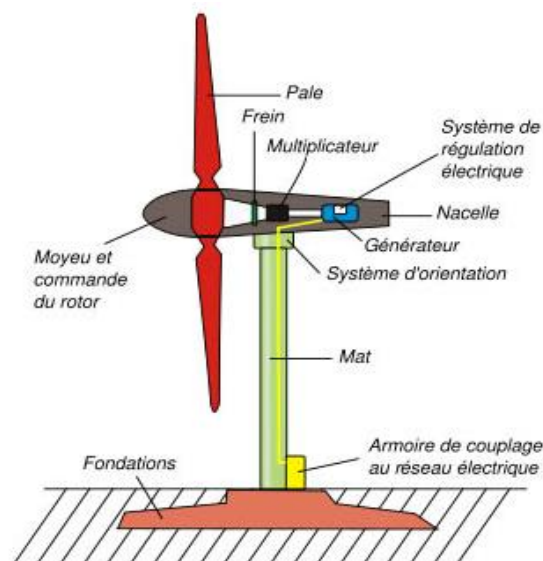


Figure 1-16 Composants d'une éolienne [31].

Rotor : C'est le capteur d'énergie qui transforme l'énergie du vent en énergie mécanique. Le rotor est un ensemble constitué des pales (d'un nombre variable) et de l'arbre primaire, la liaison entre ces éléments étant assurée par le moyeu. Sur certaines machines, l'arbre primaire qui tourne à faible vitesse comporte un dispositif permettant de faire passer des conduites hydrauliques entre la nacelle (repère fixe) et le moyeu (repère tournant). Cette installation hydraulique est notamment utilisée pour la régulation du fonctionnement de la machine (pas des pales variable, freinage du rotor...).

Nacelle : Son rôle est d'abriter l'installation de génération de l'énergie électrique ainsi que ses périphériques. Différentes configurations peuvent être rencontrées suivant le type de la machine. La figure 2-117 présente une coupe d'une nacelle avec ses différents composants.

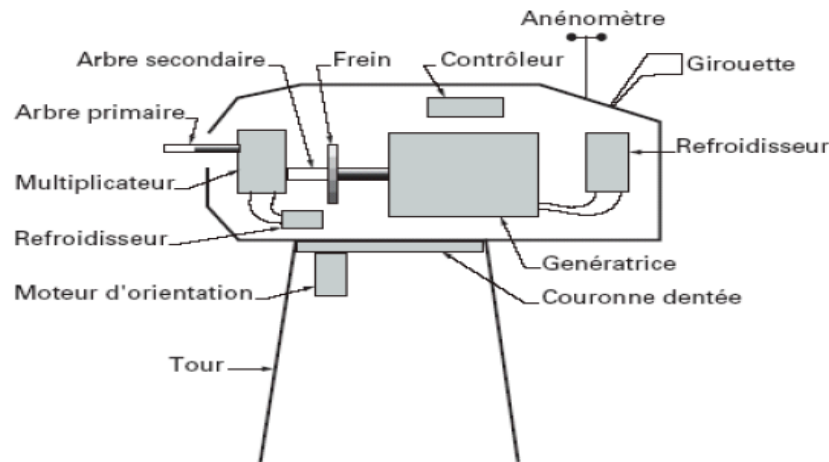


Figure 1-17 Éléments d'une nacelle [31].

Tour : Son rôle n'est pas seulement de supporter l'ensemble rotor + nacelle pour éviter que les pales ne touchent le sol, mais aussi de placer le rotor à une hauteur suffisante, de manière à sortir autant que possible le rotor du gradient de vent qui existe à proximité du sol., améliorant ainsi la captation de l'énergie. Certains constructeurs proposent ainsi différentes hauteurs de tour pour un même ensemble rotor + nacelle de manière à s'adapter au mieux à différents sites d'implantation [24].

1.3.5 Potentiel énergétique d'une éolienne

1.3.5.1 Bilan énergétique d'une éolienne [7-33]

La puissance nominale d'une éolienne est l'énergie que peut produire une éolienne par unité de temps dans des conditions optimales de fonctionnement, c'est-à-dire quand la vitesse et la direction du vent sont telles, que l'éolienne fonctionne à plein régime. Celle-ci dépend de la surface balayée par le rotor, plus la surface est importante, plus l'énergie développée est grande.

1.3.5.2 Domaine de fonctionnement d'une éolienne :

La Figure 1-18 donne la courbe de puissance d'une éolienne en fonction du vent.

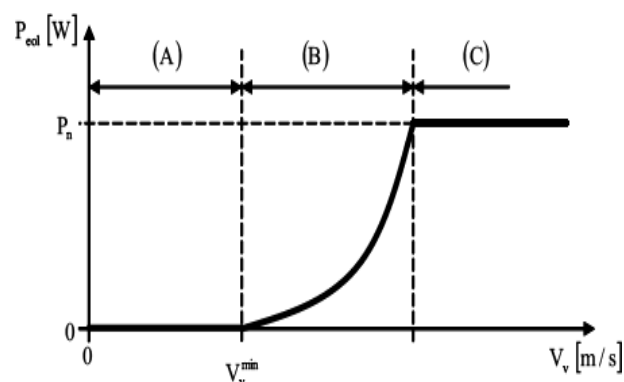


Figure 1-18 Courbe de puissance d'une éolienne [34]

- La partie **A** où la vitesse du vent est inférieure à la vitesse de démarrage $V_{v_{min}}$. Dans ce cas, la puissance produite est nulle car le rotor ne tourne pas.
- La partie **B** représente la partie où il y'a un mouvement au niveau de la turbine qui est actionnée par un vent supérieur à V_{min} jusqu'à atteindre une valeur maximale de puissance (puissance nominale P_n) et qui représente la puissance maximale de la turbine.
- La partie **C** est une zone où la puissance est maximale dans une marge de vitesse de vent qui peut supporter la turbine.
- Au-delà d'une certaine limite de vitesse du vent la turbine doit être arrêtée.

1.4. Effet de sillage

1.4.1 Parcs éoliens

Un parc ou une centrale éolienne est un ensemble d'aérogénérateurs placés dans un site donné et reliés entre eux électriquement. La production totale d'énergie éolienne d'un parc augmente avec le nombre de turbine et le choix du terrain.

Il existe deux grands types d'installation : le parc terrestre et le parc offshore. On peut voir à la Figure 1-19, un exemple typique de parc.

Le développement de parcs éoliens a été initié en Californie au début des années 80 et il s'est depuis propagé dans le monde entier. En effet, plutôt que de construire des éoliennes gigantesques et de grande puissance, on préfère actuellement utiliser un nombre plus élevé de machines de moyenne puissance. Cette pratique est basée sur le fait que les éoliennes de grande puissance produisent de grandes fluctuations de puissance sur le réseau et leur entretien et leurs réparations sont coûteuses et difficiles à réaliser. De plus, une fois qu'elles sont arrêtées, elles n'alimentent plus le réseau électrique. L'avantage d'utiliser un ensemble d'éoliennes de moyenne puissance est évident : lorsqu'une éolienne nécessite le besoin d'un entretien ou qu'un bris est constaté, les autres peuvent continuer à produire sans interrompre totalement la production énergétique. De plus, les manufacturiers sont parfaitement initiés au design et à la construction de ce genre de machines, ce qui se traduit par une meilleure fiabilité.

Au début, avec l'expérience limitée que l'on avait de la conception de parcs éoliens, les premiers parcs en opération ont produit significativement moins d'énergie que prévu. Cette énergie manquante a souvent été attribuée aux pertes dans le sillage et à la méconnaissance des effets du sol. Mais depuis ces premiers essais, une meilleure connaissance des interférences mutuelles turbine/sillage et le développement de méthodes d'analyse ont permis la conception optimale de parcs [6].



Figure 1-19 Le parc terrestre et le parc offshore

1.4.2 Structure du sillage éolien

Le sillage éolien est une structure tourbillonnaire qui émane des pales tournantes du rotor. Cette structure tourbillonnaire évolue ensuite à l'aval du rotor éolien et forme des tourbillons marginaux. Le sillage comporte deux domaines : le sillage proche et le sillage lointain comme illustré par la figure 1-20. Le sillage proche joue un rôle important dans l'évaluation des performances aérodynamiques du rotor éolien. En plus, il permet de définir les conditions initiales de développement du sillage lointain. La compréhension de ce dernier permet d'améliorer la conception des parcs éoliens en minimisant les interactions entre éoliennes [37].

La structure du sillage en aval d'une éolienne peut être révélée par la présence de fumée dans l'air passant à travers le rotor. La figure 1-21 montre le sillage et les tourbillons marginaux révélés par la fumée en soufflerie.

La figure 1-22 prise en 1997 par le Laboratoire National de Riso montre le sillage proche révélé par la fumée en conditions réelles

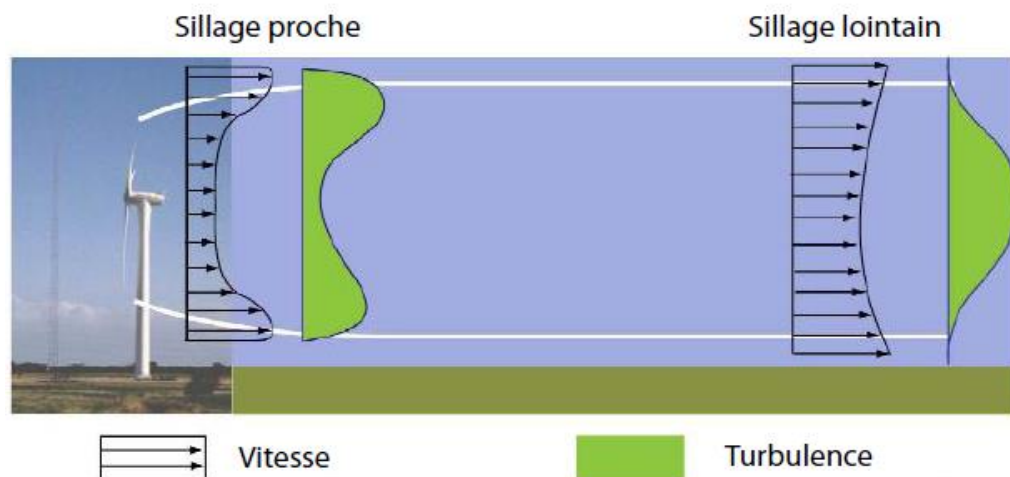


Figure 1-20 Sillage proche et sillage lointain

1.4.3 Effets des structures tourbillonnaires

Le sillage éolien génère plusieurs problèmes à cause des structures tourbillonnaires qu'il contient. Dans le cas d'un parc éolien, par exemple, les tourbillons présents dans le sillage

sont à l'origine de chargements in stationnaires sur les pales des éoliennes situées en aval. Ces chargements sont responsables de la dégradation des performances aérodynamiques des éoliennes situées en aval, des problèmes de fatigue qui réduisent la durée de vie des pales, des vibrations et des émissions de bruits aérodynamiques.[37]



Sillage d'une éolienne testée par le NREL [39]



Tourbillons marginaux d'un rotor testé par le FFA [38]

Figure 1-21 Visualisation du sillage par la fumée en soufflerie [37]



Figure 1-22 Structure du sillage en aval d'une éolienne, révélée par la fumée [37]

1.4.4 Sillage éolien et l'interaction entre les machines

Dans les parcs éoliens, il est nécessaire d'espacer les éoliennes afin d'éviter que le sillage et le déficit de vitesse existant derrière chaque machine n'affectent trop la production énergétique et l'intégrité mécanique des éoliennes situées plus en aval, [40, 41].

En règle générale, les éoliennes dans les parcs sont toutes identiques et la distance entre les machines est définie d'après des règles simples données par les constructeurs, à savoir : cinq à neuf fois le diamètre dans la direction des vents dominants et de trois à cinq fois le diamètre dans la direction perpendiculaire [42].

Ces règles ne constituent évidemment pas une garantie d'optimisation de l'implantation des machines et ne permettent pas d'évaluer la prise en compte de la topographie du terrain. Actuellement, la simulation numérique en mécanique des fluides a fait d'énormes progrès et permet de donner des informations intéressantes sur l'écoulement d'air autour des éoliennes. Les codes industriels modernes permettent d'obtenir des résultats quantitatifs satisfaisants [43]. La simulation pourrait donc être un outil appréciable pour analyser le sillage éolien [44]

et optimiser l'implantation des éoliennes dans un parc en fonction des caractéristiques des machines et de la topographie du site éolien [45, 46, 47].

Le sillage éolien génère plusieurs problèmes à cause des structures tourbillonnaires qu'il contient. Dans le cas d'un parc éolien, par exemple, les tourbillons présents dans le sillage sont à l'origine de chargements instationnaires sur les pales des éoliennes situées en aval. Ces chargements sont responsables de la dégradation des performances aérodynamiques des éoliennes situées en aval, des problèmes de fatigue qui réduisent la durée de vie des pales, des vibrations et des émissions de bruits aérodynamiques [63].



Figure 1-23 Effets de sillages sur le parc éolien d'Horns Rev, Danemark [32].

1.4.5 Etat de l'art

De nombreuses études concernant le sillage éolien pour l'implantation des centrales éoliennes, ont été effectuées par plusieurs chercheurs. Nous nous limitons ici à énumérer les principaux travaux sur les parcs éoliens. Jensen [48] a travaillé sur l'interaction des éoliennes dans un parc éolien et l'effet du sillage en estimant la vitesse du vent qui subit une diminution importante sur la partie aval d'un aérogénérateur. Un modèle numérique, basée sur la description linéaire du sillage a été proposé pour décrire le développement du rayon du sillage en fonction de la distance en aval d'une turbine éolienne.

Moseti et al.[49] ont travaillé sur une autre approche pour la recherche d'un arrangement optimal des turbines dans un parc éolien. Il s'agit de l'algorithme génétique en appliquant le minimal du cout par unité d'énergie. Cette théorie impose une codification des éoliennes dans le site, pour permettre une sélection sur plusieurs étapes en arrivant à l'emplacement optimal des aérogénérateurs.

Magnusson et al.[50] ont fait une étude sur le sillage résultant d'une turbine éolienne située dans une zone côtière, par l'analyse d'un ensemble de données et de paramètres atmosphériques. Les résultats obtenus ont été généralisés sur l'ensemble des aérogénérateurs placés dans un parc éolien ou la turbulence est beaucoup plus importante dans le cas d'un multiple sillage qu'affronte une seule éolienne dans le parc.

Keranoudis et al [51] ont fait une étude concernant le problème du design des parcs éoliens lié aux avantages économiques, comme la détermination des conditions du choix du modèle approprié d'un parc, des besoins énergétiques pour les planifications régionales, les types de turbines commerciales, l'investissement dans le domaine de la production d'énergie électrique en provenance du vent et le nombre optimal des aérogénérateurs à installer dans un site déterminé.

Ammara et al.[52] ont proposé une formulation basée sur la résolution des équations de Navier-Stoke Ils ont mis en évidence l'avantage d'exploiter l'effet de venturi dans un parc éolien. Le travail de Vermeer et al. [53], est une revue des méthodes appliquées pour l'étude de l'écoulement dans le sillage des éoliennes, pour deux cas, proche et loin de la turbine en aval (near wake et far wake). Dans le cas proche, l'écoulement est uniforme et bien contrôlé, alors que pour le cas loin, le sillage touche une grande partie du parc éolien et son effet diminue. Les résultats obtenus sont utilisés pour le principal intérêt, d'étudier comment le sillage influe sur la production d'énergie éolienne.

Zhao et al. [54] ont proposé une nouvelle méthode pour trouver la capacité de l'installation et la connexion des parcs éoliens dans les réseaux électriques. Chaque parc éolien a des capacités à travers plusieurs limites du système du réseau, tels que, la limite de la stabilité de la tension, le coup de charge et les limites de la puissance produite. Cette méthode combine entre l'optimisation et l'analyse probabiliste de maximiser le nombre d'éoliennes pour les deux types à vitesse fixe et à vitesse variable.

Gomba et al.,[55] ont réalisé un travail qui traite le cas général, de l'emplacement des parcs éoliens et l'usage des terres de fermes favorables à la production d'énergie propre en provenance du vent, leurs impacts sur l'environnement, le tourisme et les décisions politico-sociales, ce qui implique une étendue d'intégration économique et technique de l'énergie éolienne.

Mora et al.[56] ont présenté un algorithme pour optimiser les bénéfices donnés par un investissement sur un parc éolien en incluant plusieurs facteurs économiques tels que le capital initial, la valeur de l'énergie produite et durée de vie des éoliennes.

Marmidis et al., [57] ont utilisé le résultat optimal du coût par unité d'énergie produite en utilisant la méthode de Monte Carlo, pour déterminer l'emplacement optimal des éoliennes dans un site bien déterminé. Une telle approche est basée sur les critères qui minimisent les coûts d'installations, et par conséquent en maximisent les avantages économiques des parcs éoliens comme source d'énergie propre et durable.

Sorensen et al [58] ont effectué une étude sur la modélisation de la turbulence dans des fermes éoliennes de 100 turbines ou plus et la durée de vie des aérogénérateurs, en se basant sur les conditions extrêmes de la fatigue des éléments de la turbine et la durée de vie des pales. (L'intensité de la turbulence augmente dans le sillage des éoliennes, ce qui signifie une nécessité d'investigation sur réduction des conditions défavorables de la fatigue de la structure de l'aérogénérateur).

Rodriguez –Amenedo et al.[59] ont donné un détail sur les possibilités de contrôler la connexion des parcs éoliens, selon leur conception au réseau électrique existe. La variation de la vitesse du vent, influe sur le comportement de chaque aérogénérateur du parc, et pour garantir une meilleure conversion de l'énergie éolienne, un système de contrôle adéquat a été mis au point.

Masson et al.[60] ont fait de la simulation numérique du sillage d'une éolienne à axe horizontal, avec un modèle hybride qui consiste à combiner une approche CFC avec le modèle du disque actuateur. Un terme $K-\epsilon$ est effectivement introduit dans l'équation d'évaluation du taux de dissipation d'énergie. Le modèle $K-\epsilon$ modifié est appliqué à la région proche du sillage "near wake".

J. Serrano González et al [61] ont étudié l'optimisation du fonctionnement des éoliennes pour réduire au minimum Pertes dues à l'effet de sillage dans les parcs éoliens offshore,

L'optimisation se fait en contrôlant l'angle de tangage et le rapport de vitesse de rotation de chacune des éoliennes afin de minimiser l'effet de sillage global entre les éoliennes.

C. Hwanga, et all [62] ont travaillé sur la modélisation et la simulation de l'effet de sillage dans un parc éolien, en utilisant le modèle de sillage de Jensen. Le parc éolien est composé de 10 éoliennes. La vitesse du vent due à l'effet de sillage et l'heure d'arrivée sont retardées proportionnellement à la distance entre les turbines. La simulation est également réalisée pour montrer l'influence de l'effet de sillage.

Z. Saïd et A. Smaili [63] ont étudié l'optimisation de la micro-localisation des aérogénérateurs dans un parc éolien. Ils ont proposé un modèle numérique basé sur description linéaire du sillage à l'aide de la méthode d'optimisation de Monte Carlo. Les résultats ont montré la micro-localisation optimale des turbines en fonction des caractéristiques aérodynamiques et des espacements entre les turbines.

M. Samorani [64] ont travaillé sur le problème de l'optimisation des fermes éoliennes. Ils ont résolu le problème d'optimisation de l'agencement du parc éolien qui consistait à positionner de manière optimale des turbines au sein du parc éolien (afin que les effets de sillage soient minimisés et donc la production d'énergie attendue maximisée).

N. Charhouni et al., [65] ont étudié l'effet des interactions de sillage sur l'efficacité des parcs éoliens et recherché l'emplacement optimal de l'éolienne dans le but de minimiser les interactions aérodynamiques entre eux et de maximiser la puissance de sortie. Les résultats montrent que la production d'électricité est diminuée sensiblement lorsque les turbines fonctionnent à faible distance où le niveau d'interaction des sillages est très important.

1.5. Conclusion

L'étude bibliographique menée a permis de faire le point sur les principaux travaux de recherche se rapportant à l'étude concernant la technologie éolienne et l'implantation des centrales éoliennes. L'étude a été orientée vers la recherche de l'influence de l'effet du sillage sur la production énergétique.

Dans la première partie de ce chapitre nous avons eu un aperçu sur la source même de notre étude qui est le vent. Nous avons donné les différents types de vents et les forces qui le modifient. A la fin, tout en mettant l'accent sur sa variabilité spatiale et temporelle, nous avons présenté comment et avec quels appareils il est possible de mesurer le vent.

Dans la deuxième partie, nous avons donné la définition d'une éolienne, son évolution dans le temps. En présentant le domaine de son utilisation, nous avons défini les deux grandes familles d'éoliennes et l'architecture d'une éolienne à axe horizontale.

Dans la troisième partie, nous introduisons les parcs éoliens et l'effet de sillage ainsi que les travaux antérieurs sur les parcs éoliens, l'implantation et influence des interactions du sillage.

Chapitre 2

Modélisation

2.1. Introduction

La simulation numérique est le processus qui permet de calculer sur ordinateur les solutions de ces modèles, et donc de simuler la réalité physique. On distingue classiquement cinq phases différentes dans la simulation d'un système physique [66] :

1. Recherche d'un modèle mathématique représentant la physique (mise en équation).
2. Elaboration d'un maillage (discrétisation des équations de la physique).
3. Résolution des équations discrètes.
4. Traduction informatique et programmation des relations discrètes.
5. Simulation numérique et exploitation des résultats

Donc dans ce chapitre, nous traitons la méthodologie de la simulation numérique pour effectuer l'objectif de ce travail.

2.2. Modélisation du sillage

En récupérant l'énergie du vent, une turbine crée un sillage plus lent et plus turbulent derrière elle. Ce phénomène, appelé effet de sillage (voir figure 2.1),

Vermeer et ses collaborateurs [53] se concentrent sur les expériences visant à identifier les modèles mathématiques qui décrivent avec précision l'effet de sillage, tant en termes de réduction de la vitesse du vent que d'intensité des turbulences. Certains de ces modèles ne sont valables qu'à proximité de l'éolienne qui génère le sillage (modèles de sillage proche), et d'autres ne sont valables qu'à distance de l'éolienne qui génère le sillage (modèles de sillage lointain). Au-delà d'une distance de 3 diamètres de rotor, Vermeer et al [53] proposent d'utiliser les modèles de sillage lointain. Dans le sillage proche, l'intensité de la turbulence est importante que les turbines concernées doivent être arrêtées afin d'éviter d'endommager les pales. Bien que les méthodes de calcul plus précises aient été proposées (en particulier la CFD - voir [74]), les travaux existants sur l'optimisation de l'aménagement des parcs éoliens utilisent le modèle proposé par [75, 72] car sa simplicité le rend plus pratique à intégrer dans les procédures d'optimisation et dans les programmes informatiques, tels que PARK [76]. Les journaux ont rapporté que le modèle de sillage de Jensen [77] est le plus qualifiée en termes de simplicité et de performance d'estimation [64] .

2.2.1 Effet du sillage créé par une turbine

Afin d'expliquer le sillage, on commence par présenter le sillage créé par une turbine, et développé par le modèle Jensen à travers l'exemple de la figure 2-1. Le vent souffle, de gauche à droite, à la vitesse u_0 et frappe une turbine (représentée par un rectangle noir sur la gauche) dont le rayon du rotor est r_r . À une distance x sous le vent, la vitesse du vent est u et le rayon du sillage (initialement égal à r_1) devient $r_1 = ax + r_r$, [64].

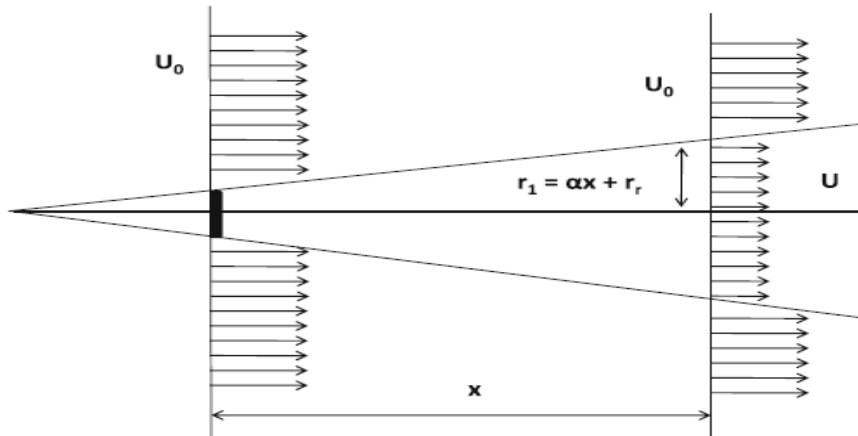


Figure 2-1 Schéma représente l'effet de sillage [49]

Le paramètre scalaire α détermine la vitesse à laquelle le sillage s'étend avec la distance,[64] et il est défini comme :

$$\alpha = \frac{0.5}{\ln \frac{z}{z_0}} \quad (2.1)$$

Où z est la hauteur du moyeu de la turbine générant le sillage et z_0 est une constante appelée rugosité de surface, qui dépend des caractéristiques du terrain.

2.2.2 Effet du sillage entre deux turbines

Soit i la position de l'éolienne qui génère le sillage, j la position affectée par celui-ci, u_0 la vitesse du vent ambiant, et u_j la vitesse du vent à j , [64] alors :

$$u_j = u_0(1 - vd_{ij}) \quad (2.2)$$

Où vd_{ij} est le déficit de vitesse induit sur la position j par le sillage est calculé comme suit, [64] :

$$vd_{ij} = \frac{2a}{1 + \alpha \left(\frac{x_{ij}}{r_d}\right)^2} \quad (2.3)$$

Le terme a est appelé facteur d'induction axiale, [64] calculé par l'expression suivante :

$$a = 0.5(1 - \sqrt{1 - C_T}) \quad (2.4)$$

Le terme r_d est appelé rayon du rotor en aval, [64], égal à :

$$r_d = r_r \sqrt{\frac{1 - a}{1 - 2a}} \quad (2.5)$$

Le terme x_{ij} est la distance entre les positions i et j . La notation que nous proposons est cohérente avec celles utilisées dans [78-49, 79, 80], et elle est équivalente à celle proposée par [81].

Comme de nombreuses turbines sont installées dans un parc éolien, les sillages peuvent se croiser et affecter les turbines sous le vent en même temps. Dans le modèle Jensen, le déficit de vitesse total

$v_{def}(j)$ à un endroit j qui est touché par plus de sillages, [64] est obtenu comme suit :

$$v_{def}(j) = \sqrt{\sum_{i \in W(j)} v d_{ij}^2} \quad (2.6)$$

Où $W(j)$ est l'ensemble des turbines affectant la position j avec un sillage. $v_{def}(j)$ est utilisé dans (2) au lieu de vd_{ij} pour calculer u_j Illustrons cela avec l'exemple rapporté dans la Fig. 2-2.

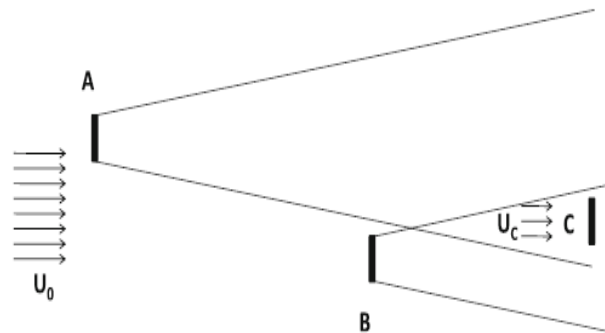


Figure 2-2 Exemple de sillages multiples affectant une position [64].

2.2.3 Effet du sillage dans une ferme éolienne

La qualité de l'énergie produite par chaque turbine d'une ferme éolienne peut être influencée par les interactions de sillage créées par les systèmes. C'est pourquoi, compte tenu de ce type de pertes est nécessaire pour déterminer l'aménagement optimal de ferme éolienne. À ce jour, un certain nombre de modèles remarquables ont été développés pour assumer les pertes de sillage [65-68-69]. Selon les travaux publiés les modèles analytiques de sillage sont plus appropriés pour traiter l'optimisation de l'aménagement des parcs éoliens [70-71].

Les journaux ont rapporté que le modèle de sillage de Jensen [72] est le plus qualifiée en termes de simplicité et de performance d'estimation.

Pour cette raison, ce modèle est utilisé dans ce travail pour prévoir le déficit de vitesse du vent dans la zone aval.

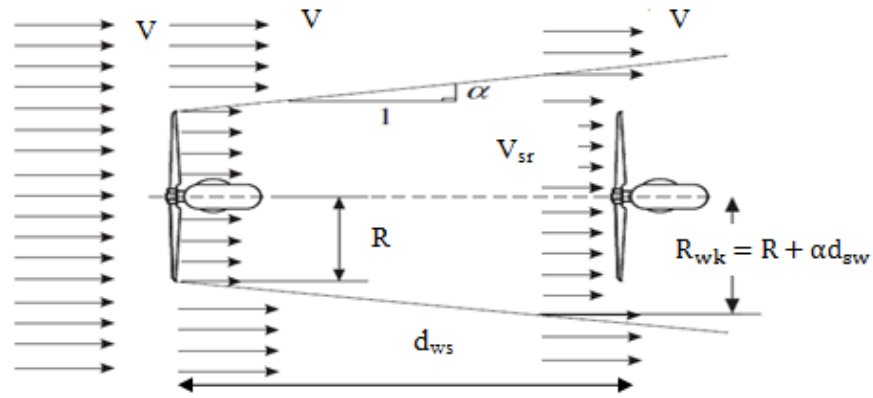


Figure 2-3 L'effet sillage en version schématique vue par Jensen [72].

2.2.3.1 La vitesse du vent réduit par l'effet de sillage

La vitesse du vent réduit par l'effet de sillage V_{sr} est formulée à partir de [65] :

$$V_{sr} = V - V_{df} \quad (2.7)$$

Où V : la vitesse d'entrée du vent et V_{df} est le déficit de vitesse du vent formulé comme suivant, [65] :

$$V_{df} = V(1 - \sqrt{1 - C_t}) \left(\frac{R}{R_{wk}} \right)^2 \quad (2.8)$$

Avec R_{wk} étant le rayon de sillage donné par la relation suivante, [65] :

$$R_{wk} = R + \alpha d_{sw} \quad (2.9)$$

R est le rayon du rotor de la turbine éolienne, C_t le coefficient de poussée et α est la constante d'entraînement donné en équation 2.1. La valeur de α est une constante déterminée respectivement à 0,075 et 0,04 pour les parcs éoliens terrestres et offshore [73].

2.2.3.2 La distance entre les turbines

Dans les parcs éoliens, les éoliennes sont affectées par des coordonnées cartésiennes :

$$\begin{aligned} X &= (X_1, X_2, \dots, X_{n-1}, X_n) \\ Y &= (Y_1, Y_2, \dots, Y_{n-1}, Y_n) \end{aligned} \quad (2.11)$$

La distance entre les turbines amont i et aval j est écrit comme suit :

$$d_{sw}(x) = (x_i - x_j) \quad (2.12)$$

L'espace perpendiculaire est :

$$d_{per}(y) = (y_i - y_j) \quad (2.13)$$

2.2.3.3 Le déficit de vitesse dans une ferme éolienne

Dans un parc éolien, l'éolienne en aval peut être influencée par des interférences multiples de sillage générées par des interférences de sillage en amont. Dans ce cas le déficit total de la vitesse peut être exprimé comme suit,[65] :

$$V_{dft} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{A_{ov}}{A}\right) (V_{df})^2} \quad (2.14)$$

Où :

A_{ov} : représente la surface balayée (figure 2-4)

Les turbines en aval peuvent être influencées par plusieurs systèmes éoliens en amont en fonction de la séparation distance et direction du vent Θ . Donc la vitesse du vent réduit par l'effet de sillage V_{sr} réécrire de la façon suivante,[65] :

$$V_{sr} = V - V_{dft} \quad (2.15)$$

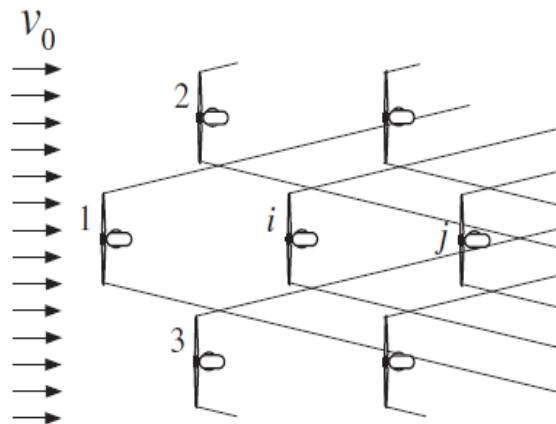


Figure 2-4 Illustrations des multiples interactions de sillage entre les systèmes d'éoliennes.[61]

Il existe deux principaux types d'interactions de sillage qui se produisent dans les fermes éoliennes et on peut les voir dans la figure 2.5.

Le premier type d'interaction se produit lorsqu'une turbine crée un sillage et que d'autres en aval, une autre turbine crée un sillage à l'intérieur de la première (la partie (a)).

Le deuxième type d'interaction se produit lorsque deux turbines créent des sillages individuels qui s'étendent et finissent par se croiser plus en aval (la partie (b)).

Lorsqu'une turbine se trouve dans le sillage d'une autre turbine, le rendement de celle-ci est affecté par le déficit de sillage. Cette réduction de la vitesse du vent entraîne à son tour une perte de puissance qui diminue l'efficacité d'un parc éolien entier. Il a été observé que les effets de sillage seuls en moyenne représentent une perte de puissance d'environ 10 % [73]. Lors de la conception et de l'exploitation d'une ferme éolienne, Il est important de comprendre ces sillages afin de minimiser l'impact qu'ils auront sur la performance de la ferme éolienne [67].

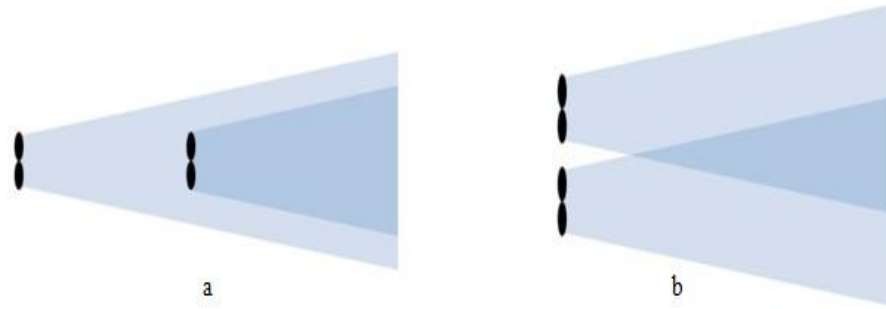


Figure 2-5 Illustration des deux principaux types d'interactions de sillage qui se produisent dans les parcs éoliens. [67]

2.2.3.4 La surface balayée

La zone balayée A_{ov} est fortement dépend du niveau d'interaction de sillage des turbines.

Si l'éolienne est partiellement placée dans la zone de sillage créée par turbine en amont, cette inégalité est satisfaite, [65 -49] :

$$R_{wk} - R < d_{per} \leq R_{wk} + R \quad (2.16)$$

La zone balayée peut être calculée par cette expression :

$$A_{ov} = R_{wk}^2 \cos^{-1}(F1) - R^2 \cos^{-1}(F2) + \frac{1}{2} \sqrt{F3} \quad (2.17)$$

Avec :

$$F1 = \left(\frac{d_{per}^2 - R^2 + R_{wk}^2}{2R_{wk}d_{per}} \right) \quad (2.18)$$

$$F2 = \left(\frac{d_{per}^2 + R^2 - R_{wk}^2}{2R_{wk}d_{per}} \right) \quad (2.19)$$

$$F3 = (R + R_{wk} - d_{per})(R - R_{wk} + d_{per}) \quad (2.20)$$

$$(-R + R_{wk} + d_{per})(R + R_{wk} + d_{per})$$

Sinon, si le système éolien est totalement installé dans la zone de sillage, cela l'inégalité est :

$$R_{wk} - R_r \geq d_{per} \quad (2.21)$$

La zone balayée dans ce cas est donnée par cette expression:

$$A_{ov} = \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) \quad (2.22)$$

S'il n'y a pas d'interactions de sillage entre les turbines, cette inégalité est vérifiée:

$$d_{per} > R + R_{wk} \quad (2.23)$$

La valeur de la zone de balayée est égale à:

$$A_{ov} = 0 \quad (2.24)$$

2.3. Modèle de puissance

2.3.1 La puissance de sortie par l'éolienne

La puissance produite par l'éolienne est calculée selon le modèle suivant,[65] :

$$P_{pr} = (V, x, y) = \frac{1}{2} \rho \pi \frac{D^2}{4} C_p \eta_{tm} \eta_g (V - V_{dft}(x, y))^3 \quad (2.25)$$

2.3.2 Le rendement d'une éolienne

La performance des éoliennes sous l'effet de sillage est calculée comme suit,[65] :

$$\eta_{wts} = \left(\frac{P_{pr}}{\frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_p \eta_{tm} \eta_g V^3} \right) \quad (2.26)$$

2.3.3 La puissance de sortie extraite par une ferme éolienne

La puissance totale extraite par une ferme éolienne pour un nombre fixe de turbines éoliennes est calculée comme suit, [65] :

$$P_{tot} = \sum_{i=1}^n P_{pr} \quad (2.27)$$

2.4. Cas étudié

Dans ce travail, nous cherchons une position appropriée du système éolien qui maximise l'énergie de sortie de la ferme éolienne avec un faible effet de sillage.

Selon les équations (8) et (9), l'expansion est une fonction linéaire et dépend principalement de la distance en aval d_{sw} . On conclut donc que :

- Les interactions de sillage ne peuvent être évitées si les turbines sont classées à la même rangée.
- Plus on augmente le d_{sw} , plus R_{wk} devient élevé et ou bien l'inverse.

2.4.1 Hypothèses de calcul

- La surface du terrain est uniforme et non limitée
- Les systèmes d'éoliennes sont supposés être idéals et ont le même type.
- La vitesse et la direction du vent sont constantes $V=12$ m/s et $\Theta=0$.
- Les variables de conception sont d_{sw} et d_{per}
- Le constante d'entraînement $\alpha : =0.04$.
- Le coefficient de poussée $C_t = 0.88$.
- Le coefficient de puissance $C_p=0.4$.
- Rendement mécanique est égal $\eta_m =0.8$.
- Rendement électrique de générateur est égal $\eta_g=0.9$
- La rugosité du sol $Z_0=0.02$.
- Le type de l'éolienne choisie est V80 (voire les caractéristiques dans la partie annexe).

1.4. Configurations adoptées

Cette étude se concentre sur la réduction des interactions aérodynamiques de sillage entre les turbines par une sélection de la distance optimale. Il est basé sur les équations (9) et (23) qui expliquent clairement que le système éolien doit être déplacé hors-ligne de la turbine en amont. Les turbines ont été disposées selon deux cas présentés en figure 2.6.

- Cas 1 : 9 éoliennes placées en 3 colonnes par 3 lignes.
- Cas 2 : 9 éoliennes dans la deuxième rangée les 3 turbines sont décalées par rapport aux éoliennes de la première et la troisième rangée.

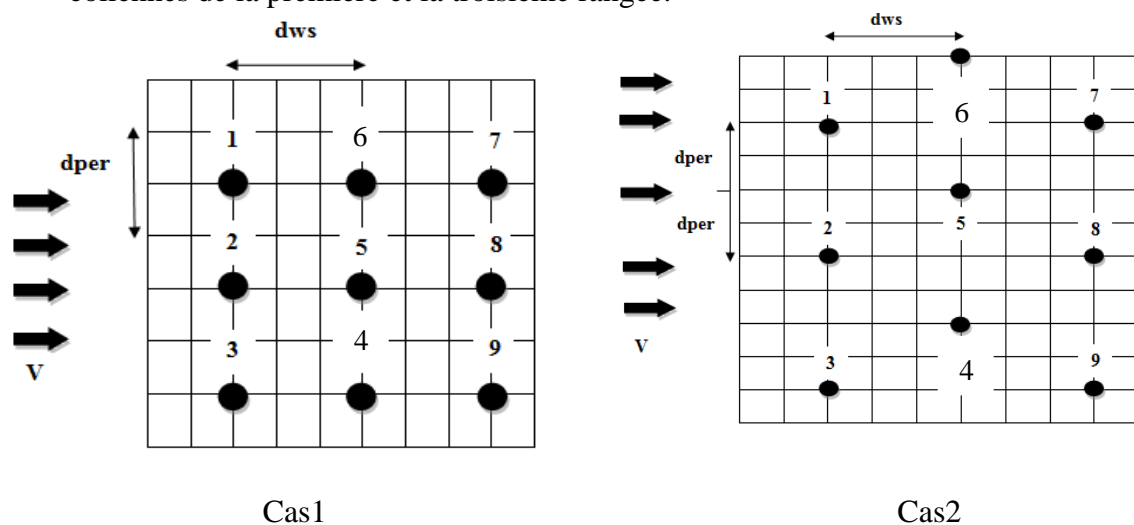
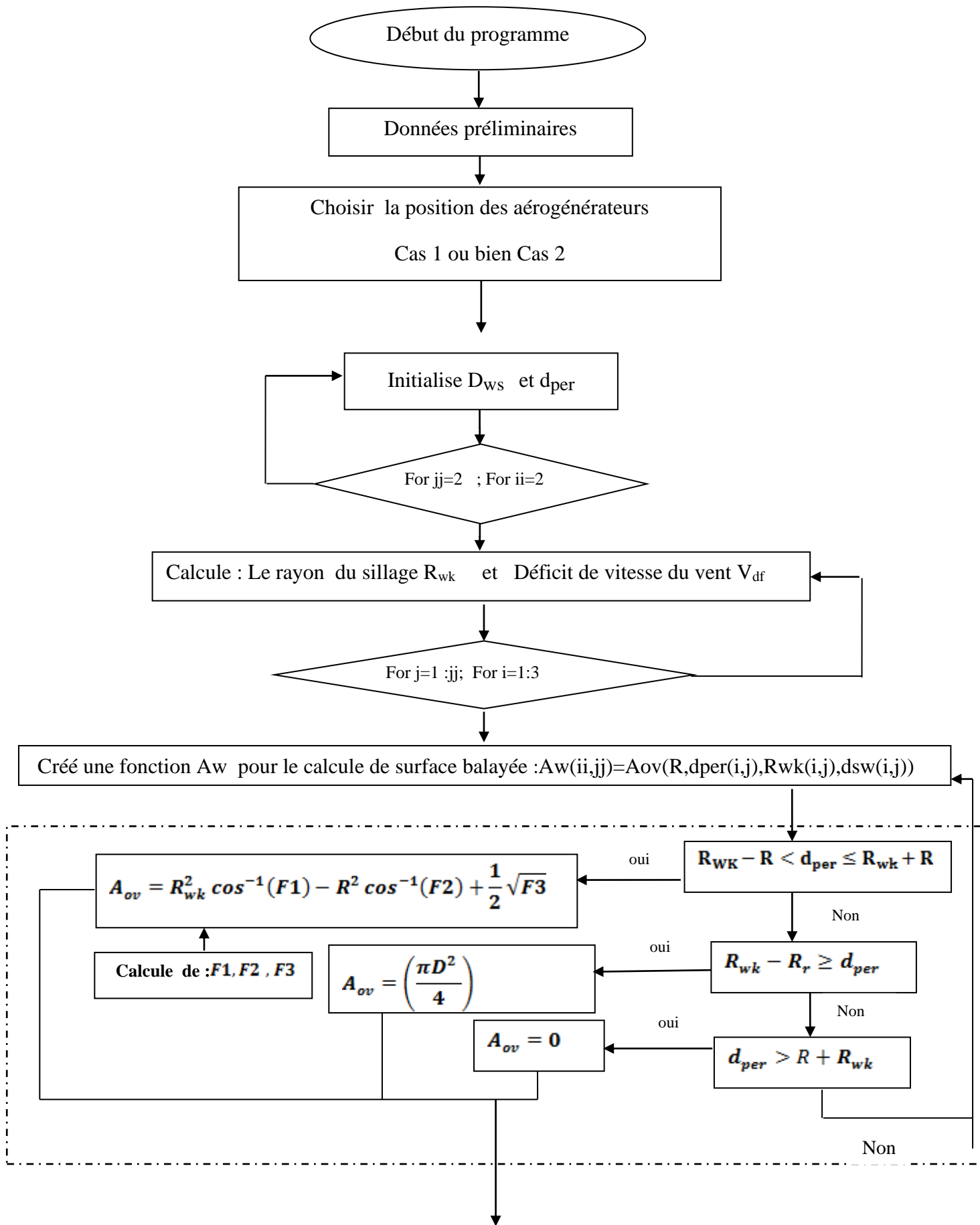
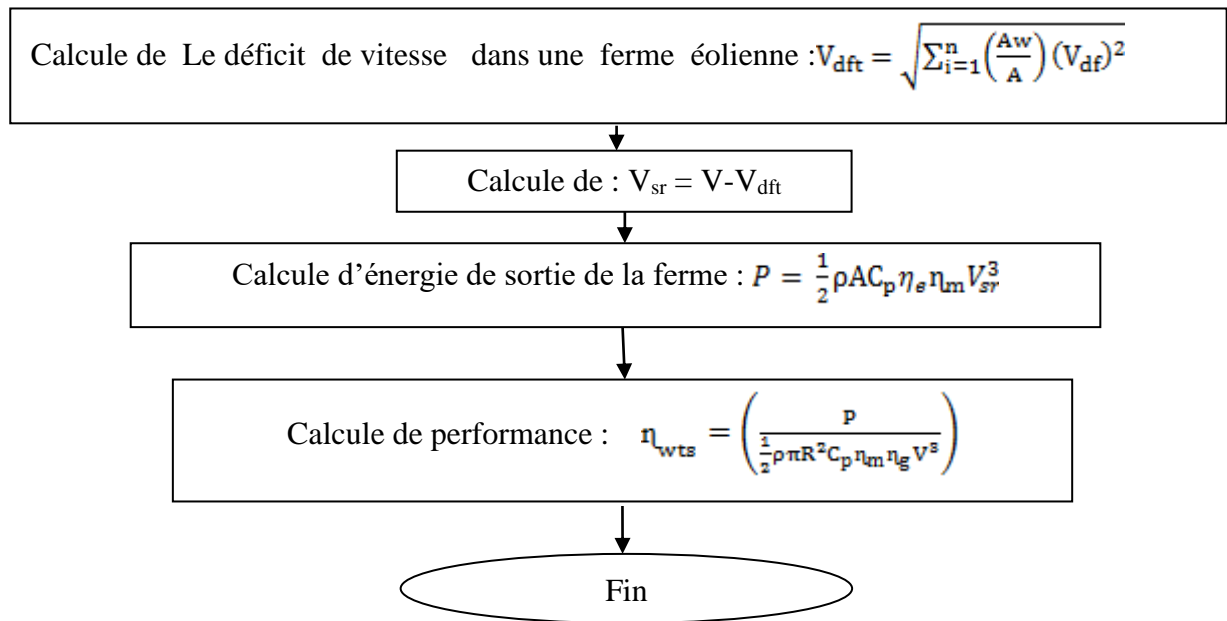


Figure 2-6 Positionnement des turbines de la ferme.

2.5. L'organigramme du programme de calcul

Pour effectuer tous les calculs, un programme MATLAB calculant le sillage ainsi que les puissances et rendement a été utilisé. L'organigramme est donné :





2.6. Conclusion

Dans ce travail, nous cherchons une position appropriée du système éolien qui maximise l'énergie de sortie de la ferme éolienne avec un faible effet de sillage.

Donc la première tâche a été de donner les équations du modèle de calcul de l'effet de sillage et de la puissance produit. La deuxième tâche a consisté au développement de l'étude proposée.

Un organigramme qui décrit les différentes étapes du programme numérique a été présenté à la fin du chapitre de modélisation, les résultats développés dans le chapitre suivant.

Chapitre 3

Résultats et discussion

3.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter les résultats permettant donner la position appropriée du système éolien qui maximise l'énergie de sortie de la ferme éolienne avec un faible effet de sillage. Ce sont les résultats obtenus par le programme MATLAB qui s'appuie sur la modélisation définie dans le second chapitre.

3.2. Positionnement des éoliennes de la ferme (Cas 1)

Nous rappelons le premier positionnement adopté des turbines éoliennes de la ferme éolienne en figure 3.1.

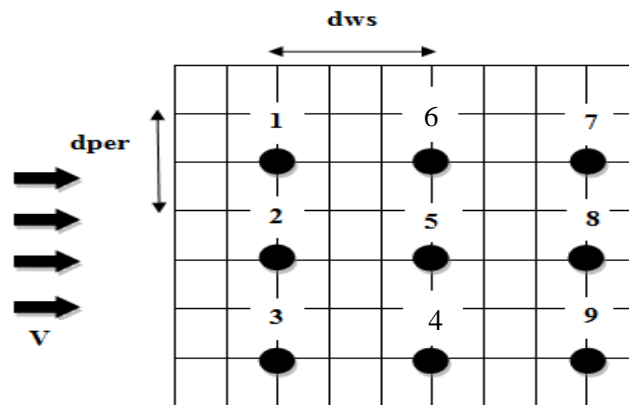


Figure 3-1: Cas 1 : Position initiale des turbines éoliennes

Pour ce cas, nous allons placer les 9 éoliennes selon 3 colonnes par 3 lignes. Les turbines se trouvent les unes derrière les autres à une distance égale à d_{per} selon l'axe des y et d_{ws} selon l'axe des x. Celles situées dans la deuxième et la troisième ligne subissent le sillage de la première ligne.

3.2.1. Vitesses de sillage

Les différentes vitesses arrivant sur la face des éoliennes ont été estimées à partir de la vitesse du vent en amont de la ferme et qui arrive sur la première rangée.

Les vitesses arrivant sur chaque turbine ont été estimée en fonction de la distance de séparation suivant l'axe d_{ws} . Cette dernière a été variée de $3D$ à $13D$ pour une distance d_{per} selon l'axe y fixe et égale à $2D$.

La figure 3.2. Est représenté la vitesse du sillage arrivant sur chaque turbine en fonction de la distance d_{ws} .

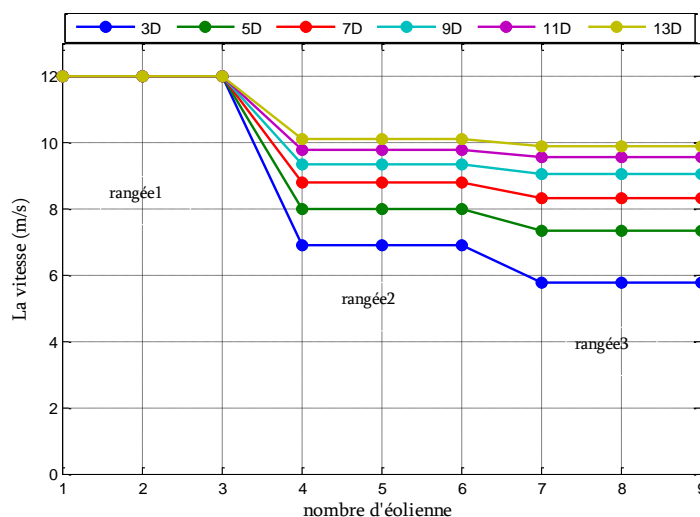


Figure 3-2 La vitesse de sillage des éoliennes en fonction de la distance en aval (cas 1)

On remarque que pour la première rangée : il n'y a pas d'interactions de sillage entre les 3 premières turbines. En effet, ce rang de turbine reçoit une vitesse du vent constante égale 12m/s. L'effet du sillage et le déficit de la vitesse du vent affecte le reste des turbines de la ferme à partir de la deuxième rangée. On remarque une diminution de la vitesse dès la deuxième rangée et aussi pour la troisième rangée. Ceci entraîne l'augmentation des interactions de sillage entre les systèmes éoliens et réduit l'énergie cinétique de vent.

Figure 3.2, il est montré que les vitesses des éoliennes sont améliorées lorsque la distance de séparation passe de 3D à 13D. Cela peut s'expliquer par le fait que les interactions sont fortes lorsque l'espace entre les turbines est petit.

3.2.2. Puissance sortie d'une ferme éolienne

En prenant en considération les caractéristiques de l'aérogénérateur V80, l'énergie extraite sortie de chaque éolienne a été estimée en fonction de la distance de séparation suivant l'axe dsw. Cette dernière a été variée de 3D à 13D pour une distance dper selon l'axe y fixe et égale à 2D. La figure 3.3. représente l'énergie sortie aérogénérateur de chaque turbine en fonction de la distance dws.

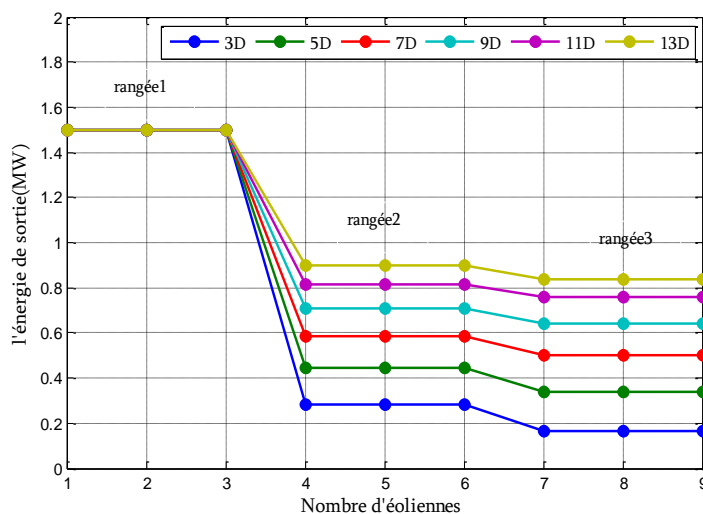


Figure 3-3 Energie de sortie des éoliennes en fonction de la distance en aval (cas 1).

On remarque que l'énergie sortie des éoliennes subit une diminution à partir de la deuxième rangée. Toutefois la puissance varie avec la distance. L'augmentation de cette dernière diminue l'effet sur la perte d'énergie. On en déduit que l'inter-espace entre les éoliennes est une variable cruciale qui peut influer sur la production des turbines éoliennes.

La figure 3.3 montre clairement comment les puissances sorties d'éoliennes dépendent fortement de la distance de séparation. Cela peut s'expliquer par le fait que les interactions sont fortes lorsque l'espace entre les turbines est petit.

3.2.3. Le rendement

La figure 3.4 représente l'évolution de rendement de chaque éolienne dans une ferme éolienne en fonction des différentes distances en aval (entre 3D, 5D, 7D, 9D, 11D à 13D) selon le cas 1.

On remarque que les rendements des turbines en aval sont plus faibles que ceux des turbines de la première rangée qui égale à 100%.

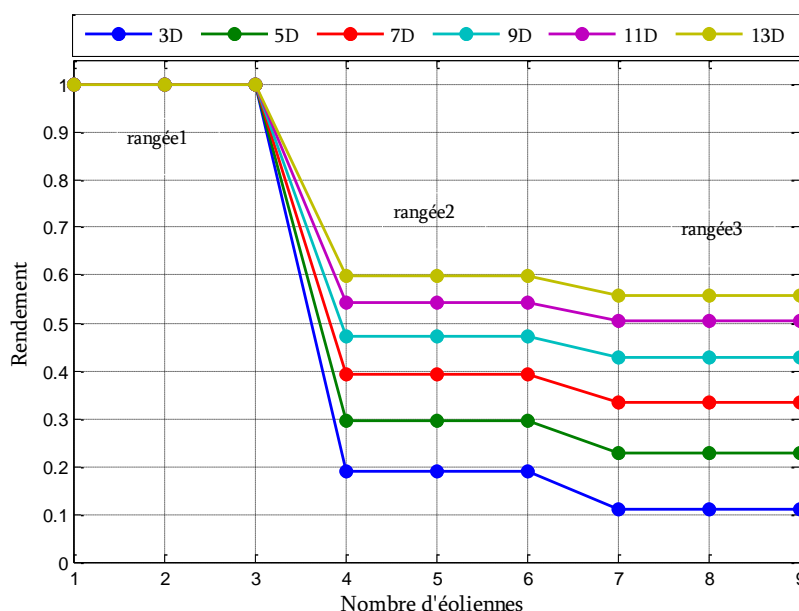


Figure 3-4 Rendement des éoliennes en fonction de la distance en aval (cas 1)

Le rendement des turbines de la deuxième rangée, atteignent 20% pour 3 D et 60% pour 13 D. Pour la troisième rangée il est de l'ordre de 11% pour 3 D jusqu'à 56% pour 13D. Le déficit de sillage, implique une réduction de la vitesse du vent donc une réduction de puissance sur qui entraîne une diminution de l'efficacité de toute la ferme éolienne entière.

3.2.4. Puissance totale extraite par une ferme éolienne

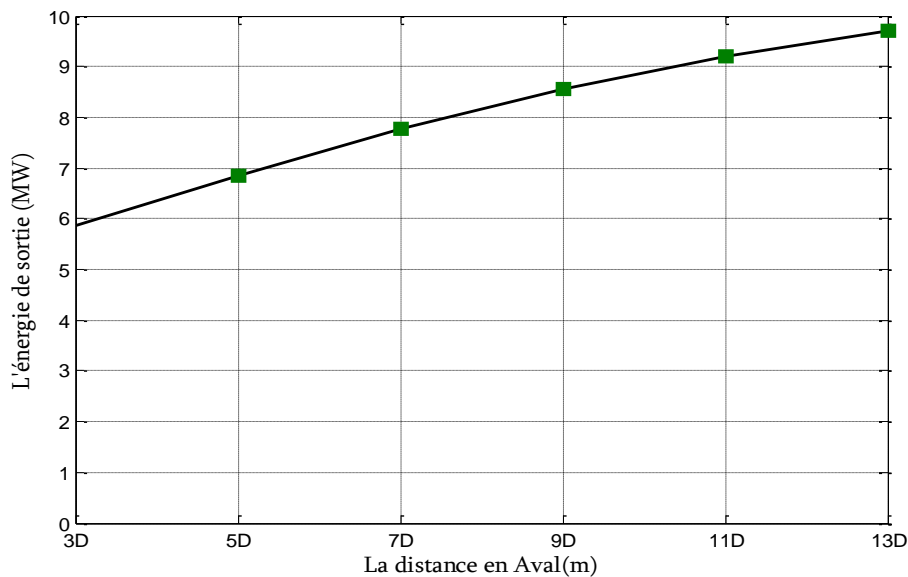
Le tableau 3-1, synthétise les résultats de simulation de la puissance de sortie totale et le rendement total ainsi que les pertes de puissance en fonction du sillage. La puissance maximale de toute la ferme éolienne est inférieure à celle produite par tous les aérogénérateurs sans effet de sillage. En effet, la puissance d'une seule éolienne est estimée à 1.5009 MW, ce qui donne pour les 9 éoliennes de la ferme, une puissance totale de 13.5081MW. En effet les pertes dues au sillage sont fortement liées à la production de la puissance totale de la ferme selon l'axe des x.

Tableau 31 Rendement, Puissances et Pertes de puissance en fonction du sillage

dsw, (m)	Rendement total, %	Puissance totale (MW)	Pertes de puissance dues au sillage%
3D	39.032	5.8585	60.96
5 D	45.702	6.8595	54.298
7D	51.792	7.7736	48.208
9D	57.010	8.5567	38.616
11D	61.384	9.2132	38.616
13D	64.617	9.6985	35.383
Sans sillage	100	13,5081	0,00

En effet, la turbine 9 est influencée par les turbines 3 et 6 qui réduisent la puissance de sortie des lignes 3 de 61 % pour la 3D et de 35% pour le 13D. Ce résultat prouve que les interactions ne peuvent être évitées dans le cas d'éoliennes placées sur la même ligne. Le même résultat a été prouvé dans la référence [14-25] (voir la partie annexe).

La figure 3.5 représente la variation de la puissance de sortie des éoliennes en fonction de différentes distances en aval (entre 3D à 13D) selon le cas1.

**Figure 3-5** Puissance maximum de la ferme éolienne

La puissance maximale dans ce cas peut atteindre jusqu'à 10 MW pour 13D. Nous remarquons que la courbe de puissance augmente avec l'augmentation de la distance de séparation.

3.2.5. Le rendement total par une ferme éolienne

La figure 3.6 représente l'évolution du rendement des éoliennes dans une ferme éolienne en fonction des différentes distances en aval suivant l'axe x (entre 3D à 13D) selon le cas1.

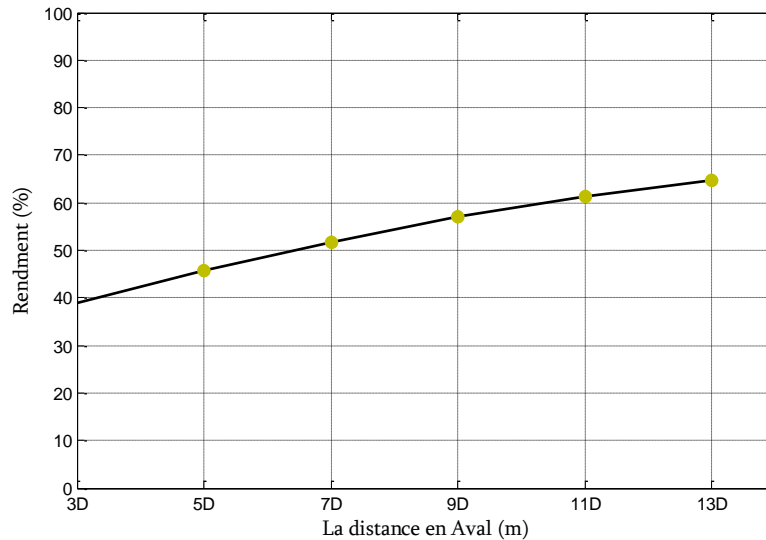


Figure 3-6 Rendement de la ferme éolienne cas 1

Le rendement varie de 39.03% pour 3D jusqu'à 64.62% pour 13D. Nous remarquons que le rendement augmente avec la distance de séparation, que la courbe du rendement n'est pas linéaire et que la courbe de pertes de puissance dues au sillage diminue avec l'augmentation du rendement.

3.3. Deuxième positionnement des éoliennes de la ferme (Cas 2)

Nous rappelons le deuxième positionnement des turbines adopté de la ferme éolienne pour le cas 2 en figure 3.7.

Pour ce cas, les éoliennes de la deuxième rangée de 3 turbines sont déplacées vers le haut d'une distance égale à $2d_{per}$ selon l'axe des y et d_{ws} selon l'axe des x. Celles situées dans la deuxième et la troisième ligne subissent le sillage de la première ligne.

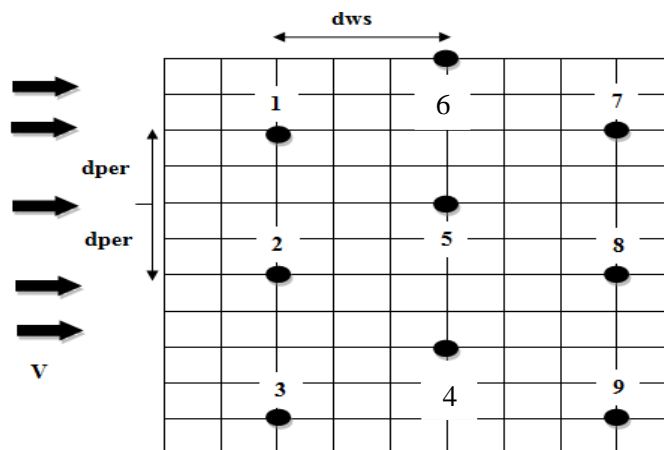


Figure 3-7 Cas 2 : Configuration proposée pour 9 éoliennes.

3.3.1. Vitesses de sillage

Les vitesses arrivant sur chaque turbine ont été estimées en fonction de la distance de séparation suivant d_{sw} . Cette dernière a été variée de 3D à 13D pour une distance $2d_{per}$ alors que selon l'axe de y la distance est fixe et égale à 4D.

La figure 3.8 est représenté la vitesse de sillage arrivant sur chaque turbine en fonction de la distance dws.

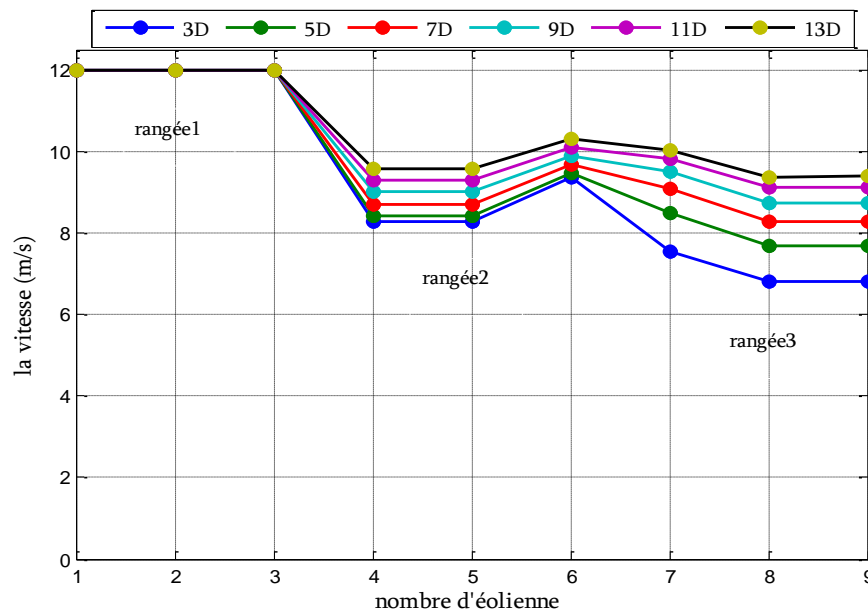


Figure 3-8 Vitesses de sillage des éoliennes en fonction de la distance en aval (cas 2)

Comme prévu pour la première rangée il n'y a pas d'interactions entre les 3 premières turbines. En effet, ce rang de turbines reçoit une vitesse de vent constante égale à la vitesse initiale de 12m/s. L'effet du sillage et le déficit de vitesse du vent affecte le reste des turbines de la ferme dès la deuxième et troisième rangée. Toutefois les effets individuels, sur la même rangée ne sont pas similaires que pour le cas1. En effet, les turbines 6 et 7 subissent les effets de sillage d'une seule turbine alors que les autres subissent le déficit de deux turbines au minimum.

En figure 3.8, il est montré que les vitesses des éoliennes sont améliorées lorsque la distance de séparation est passée de 3D à 13D. Cela peut s'expliquer par le fait que les interactions sont fortes lorsque l'espace entre les turbines est petit.

3.3.2. Puissance sortie d'une ferme éolienne

En prenant en considération les mêmes caractéristiques de l'aérogénérateur V80, l'énergie extraite sortie de chaque éolienne a été estimée en fonction de la distance de séparation suivant l'axe dsw. Cette dernière a été variée de 3D à 13D pour une distance de 2dper selon l'axe y fixe et égale à 4D.

En figure 3.9 est représenté l'énergie sortie aérogénérateur de chaque turbine en fonction de la distance dws pour cas2.

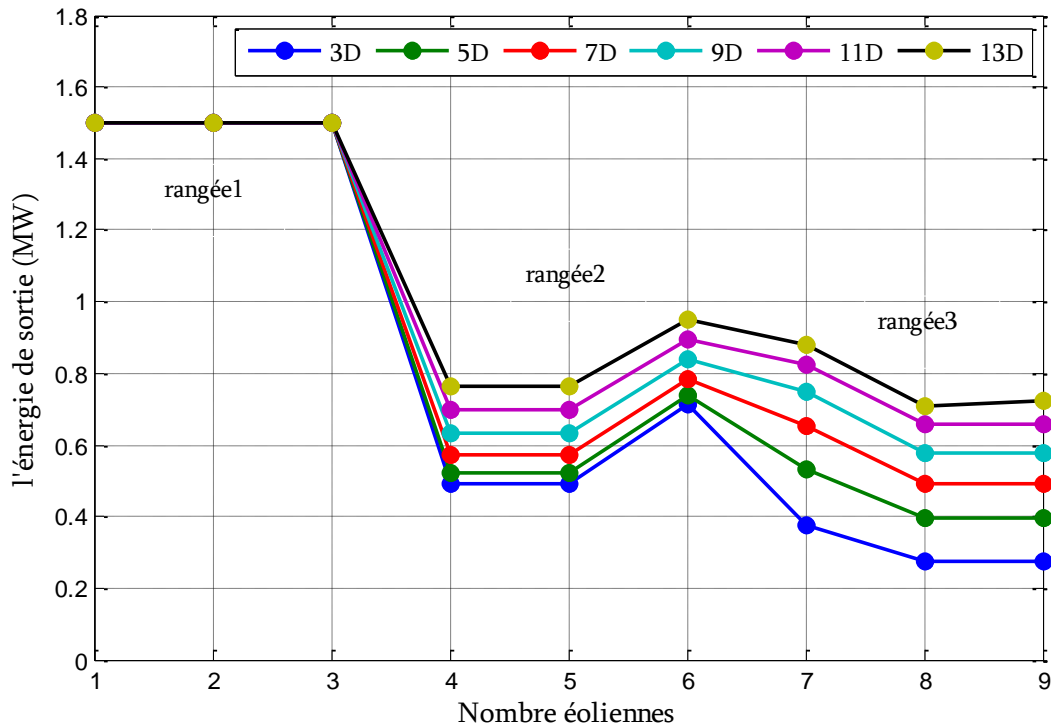


Figure 3-9 Energie de sortie des éoliennes en fonction de la distance en aval (cas2)

On remarque une augmentation de la puissance produite de la turbine 6 et 7 quelque soit la distance en aval par rapport au cas1. Cela signifie que l'interaction de sillage entre la première et la deuxième rangée a diminué par rapport au cas 1. Pour les 3 turbines de la première rangée la puissance de sortie est égale à 4.5027MW pour une distance égale à 13D. Pour la deuxième rangée elle est de l'ordre de 1.69MW pour 3D et 2.49MW pour 13D. Pour la troisième rangée la puissance est égale à 0.93MW pour 3D et 2.31MW pour 13D. On déduit que le fait d'intercaler les éoliennes réduit les interactions de sillage entre les systèmes éoliens.

La Figure 3.9 montre clairement comment les interactions d'éoliennes dépendent fortement de la distance de séparation. Il est démontré que l'énergie sortie des éoliennes est améliorée lorsque la distance de séparation passe de 3D à 13D. Cela peut s'expliquer par le fait que les interactions sont fortes lorsque l'espace entre les turbines est petit.

3.3.3. Le rendement

La figure 3.10 représente évolution de rendement de chaque éolienne de la ferme éolienne en fonction des différentes distances en aval (entre 3D, 5D, 7D, 9D, 11D à 13D) selon le cas2. On remarque que les rendements des turbines en aval sont plus faibles que ceux des turbines de la première rangée qui égale à 100%.

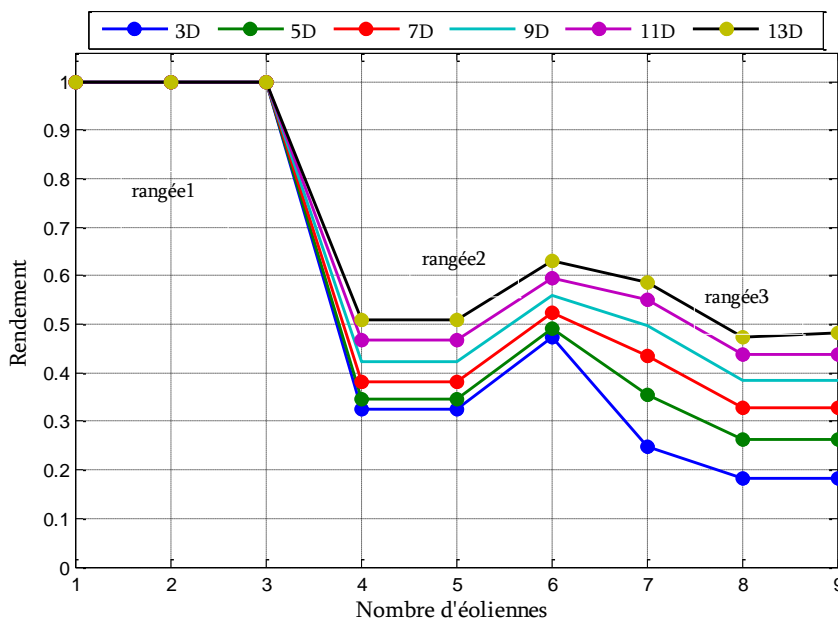


Figure 3-10 Rendement des éoliennes en fonction de la distance en aval (cas 2)

On remarque une augmentation des performances de la turbine 6 et 7. En effet, pour la deuxième rangée le rendement atteint jusqu'à 37% pour 3D et 55% pour 13D alors que pour la troisième rangée il peut atteindre 20% pour 3D et 52% pour 13D. Les résultats montrent que le fait d'intercaler la position des turbines améliore le rendement de certaines éoliennes.

3.3.4. Puissance totale extraite par une ferme éolienne :

La figure 3.11 représente la variation de la puissance de sortie des éoliennes en fonction de la distance en aval (entre 3D à 13D) selon le cas2, résultats de simulation de la puissance de sortie totale, le rendement total et pertes de puissance en fonction du sillage extrait par la somme des aérogénérateurs dans une ferme éolienne.

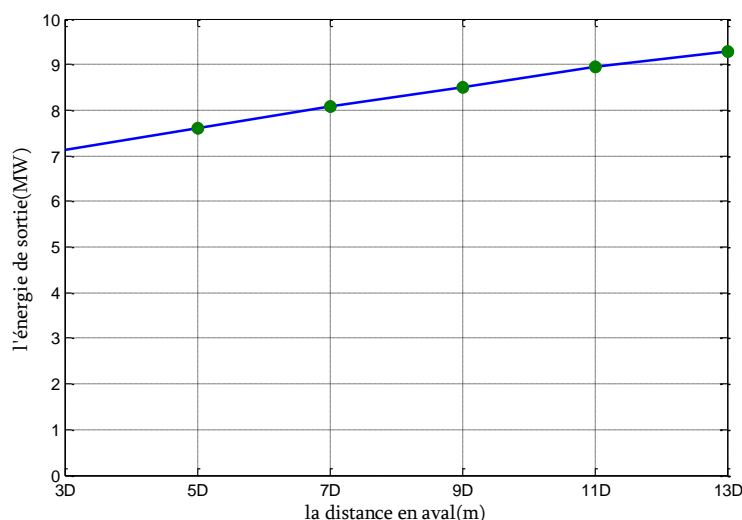


Figure 3-11 Puissance maximum de la ferme éolienne (cas 2)

La puissance maximum dans ce cas atteint jusqu'à 9.30 MW pour 13D. Nous remarquons que la courbe de puissance augmente avec l'augmentation de la distance de séparation

3.3.5. Le rendement total par une ferme éolienne :

La figure 3.12 représente l'évolution du rendement des éoliennes dans une ferme éolienne en fonction des différentes distances en aval suivant l'axe x (entre 3D à 13D) selon le cas2. Le rendement varie de 47.44% pour 3D jusqu'à 61.93 % pour 13D. Nous remarquons que le rendement augmente avec la distance de séparation et que la courbe du rendement n'est pas linéaire.

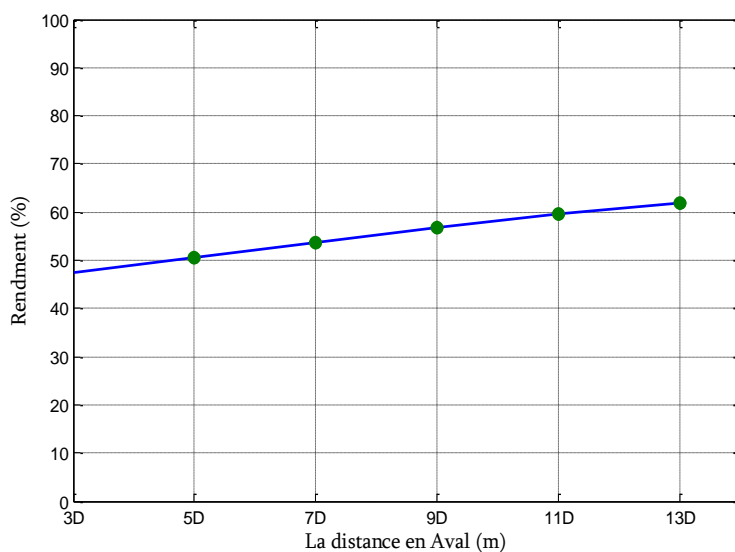


Figure 3-12 Rendement de la ferme éolienne cas 2

3.4. Synthèse des cas1 et cas2

La figure 3.13 représente l'évolution l'énergie de sortie de la ferme éolienne en fonction des différentes distances en aval suivant l'axe x (entre 3D à 13D) selon le cas1 et cas2. C'est la synthèse des résultats de la puissance totale sortie ferme ainsi que le rendement par sommation des puissances sortie de chaque turbine

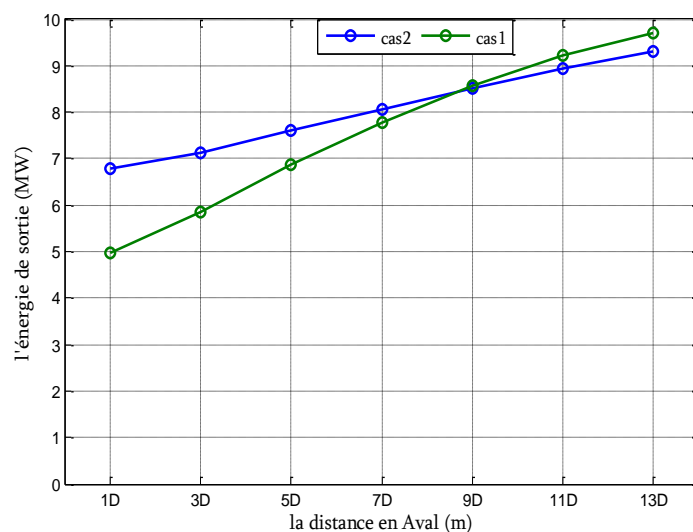


Figure 3-13 l'énergie de sortie de la ferme éolienne cas1 et cas 2

Le tableau 3-2 synthétise les résultats de rendement total de chaque turbine pour le cas1 et le cas2.

Tableau 3-2 Rendement total cas 1 et cas2

Dws	Rendement totale, cas1, %	Rendement total, cas2 %
3D	49.31	55.59
5D	59.56	60.86
7D	67.58	65.73
9D	72.95	69.60
11D	77.15	73.74
13D	80.78	78.73

La figure 3.14 représente l'évolution du rendement de la ferme éolienne en fonction des différentes distances en aval suivant l'axe x (entre 3D à 13D) selon le cas1 et cas2.

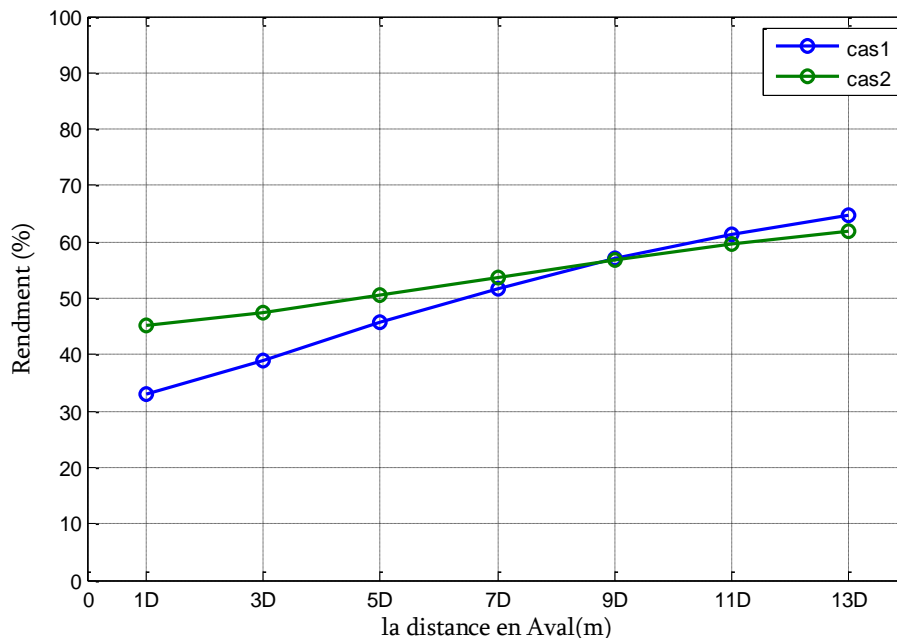


Figure 3-14 Rendement de la ferme éolienne pour Cas 2 et Cas2

En figures 3-13 et la figure 3-14 sont tracées les courbes comparatives de la puissance maximale sortie de la ferme éolienne et leur rendement pour cas1 et cas2 en fonction de la distance en aval (entre 3D à 13D) selon le cas 1 et cas2.

Le maximum de production de puissance est obtenu pour le cas 2 pour une distance de séparation allant de 3D à 9D. A partir de cette valeur les courbes s'inversent. Cela veut dire qu'il existe un point à partir duquel il n'est pas nécessaire d'intercaler les turbines. Par exemple, nous obtenons une puissance (9.7MW pour 13D) pour le cas1 par rapport à cas2 (9.3MW pour 13D) avec un rendement élevé environ 61.93 pour le cas 2 et 64.617% pour le cas1. Ce choix est étroitement lié à l'assiette allouée pour le projet d'installation de la ferme éolienne.

3.5. Effet de l'espacement perpendiculaire entre les éoliennes :

Pour ce cas, nous allons placer les 9 éoliennes aligné selon y 3 colonnes par 3 lignes. On maintient la distance d_{ws} constante et égale à $3D$ et on va faire varier la distance perpendiculaire à la direction du vent de D , $2D$, $4D$, $6D$. Celles situées dans la deuxième et la troisième ligne subissent le sillage de la première ligne.

3.5.1. Vitesses de sillage

Les différentes vitesses arrivant sur la face des éoliennes ont été estimées à partir de la vitesse du vent de 12 m/s en amont de la ferme et qui arrive sur la première rangée. Les vitesses de sillage ont été estimées en fonction de la distance de séparation perpendiculaire d_{per} suivant l'axe y. La figure 3.12. Représente la vitesse de sillage arrivant sur chaque turbine en fonction de la distance d_{per} .

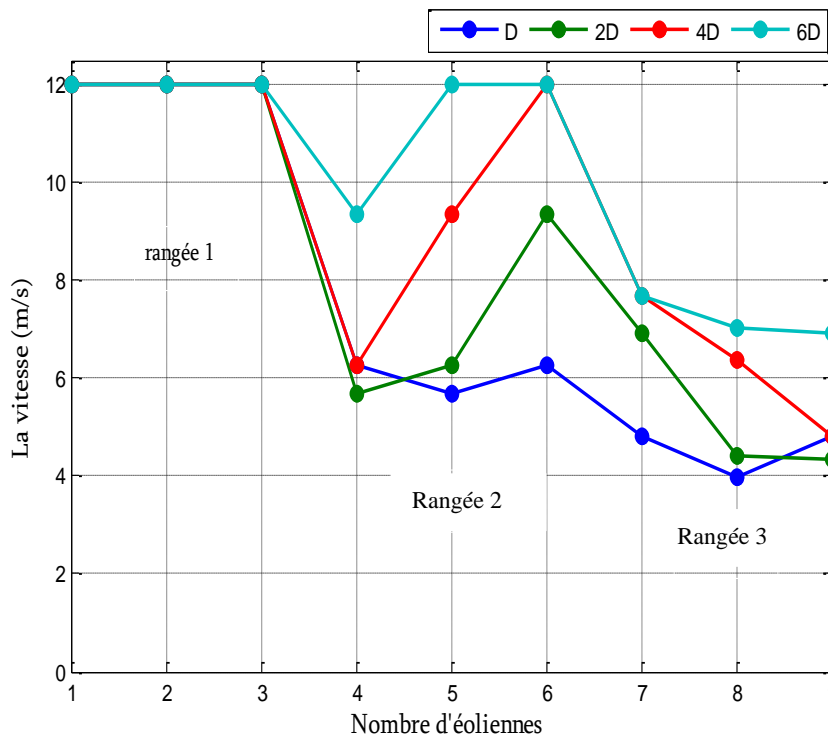


Figure 3-15 Vitesse de sillage des éoliennes en fonction de la distance perpendiculaire d_{per}

Figure 3.15, il est montré que les vitesses de sillage arrivant sur les éoliennes sont améliorées lorsque la distance perpendiculaire passe à $6D$, les turbines 5 et 6 ne subissent plus le sillage des turbines de la première rangée puisque les vitesses sont de 12 m/s . Cela peut s'expliquer par le fait que les interactions sont fortes lorsque l'espace entre les turbines est petit. Donc le choix de l'espace perpendiculaire est important pour diminuer les interactions de sillage entre les systèmes éoliens.

3.5.2. Puissance sortie de la ferme éolienne

En prenant en considération les caractéristiques de l'aérogénérateur V80, l'énergie extraite sortie de chaque éolienne a été estimée en fonction de la distance de séparation suivant l'axe y. Cette dernière a été variée de D à $6D$ pour une distance d_{ws} selon l'axe x fixe et égale à $3D$.

La figure 3.16. Donne l'énergie sortie aérogénérateur de chaque turbine en fonction de la distance d_{per} .

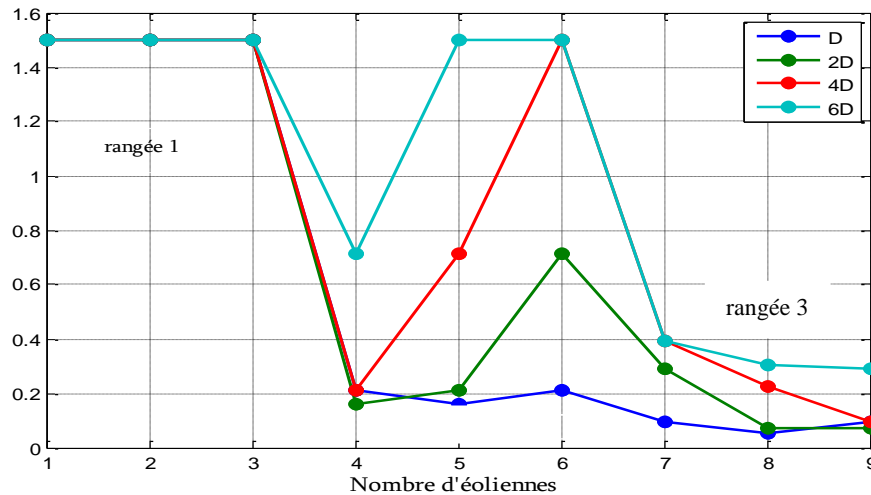


Figure 3-16 Energie de sortie des éoliennes

Il est clair que pour $d_{per}=D$ les puissances sorties de tous les aérogénérateurs de la deuxième et troisième rangée sont très faibles. En effet en plus de l'effet du sillage derrière la turbine, il y a un effet latéral qui résulte du développement de tourbillons du vent entre les turbines. On remarque une augmentation remarquable de l'énergie de sortie des éoliennes 4,5,6, proportionnelle à la distance perpendiculaire de 2D jusqu'à 6D.

On en déduit que l'inter-espace perpendiculaire entre les éoliennes est une variable peut réduire les interactions de sillage entre les systèmes éoliens.

3.5.3. Le rendement

La figure 3.17 représente l'évolution de rendement de chaque éolienne dans une ferme éolienne en fonction des différentes distances perpendiculaires (D, 2D, 4D, 6D).

On remarque que les rendements des turbines en aval sont plus faibles que ceux des turbines de la première rangée qui égale à 100%.

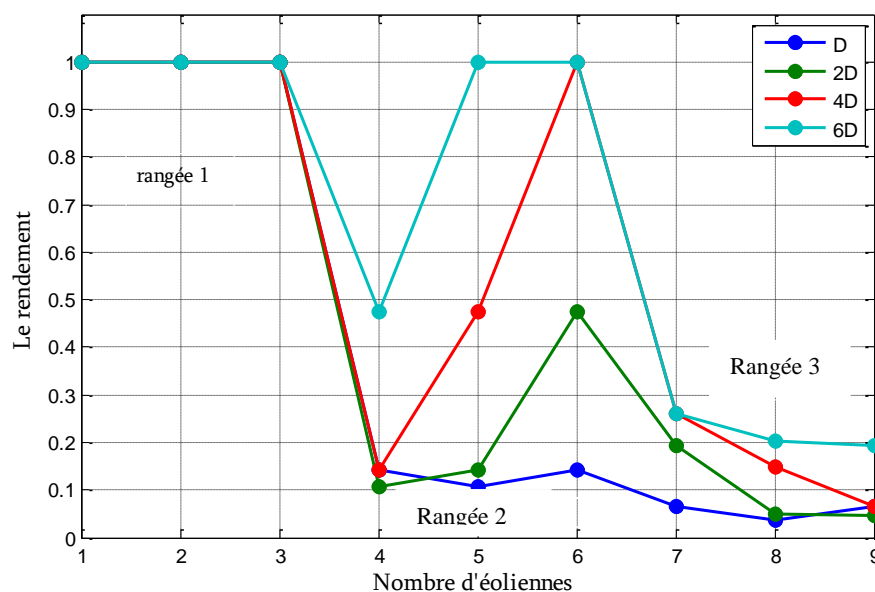


Figure 3-17 Rendement de la ferme éolienne

Figure 3- 17 représente l'évolution de rendement de 9 éoliennes de la ferme éolienne en fonction de la distance perpendiculaire suivant l'axe y

Le rendement pour la première rangée est de 100% car de sillage et le vent arrive directement avec sa vitesse initiale sur la roue de la turbine. Pour la deuxième rangée, le rendement atteint 12.9% pour $2D$. Pour la troisième rangée il est de l'ordre de 5.4% pour D jusqu'à 65% pour $6D$. De la seconde et la troisième rangée, on remarque une augmentation remarquable de l'efficacité des éoliennes à partir de d_{per} égale $6D$.

3.5.4 Puissance totale extraite par une ferme éolienne :

Figure 3- 18 représente la variation de l'énergie de sortie totale des éoliennes en fonction de la distance perpendiculaire d_{per} suivant l'axe y. La puissance maximale dans ce cas peut atteindre jusqu'à 9.2008MW pour $6D$.

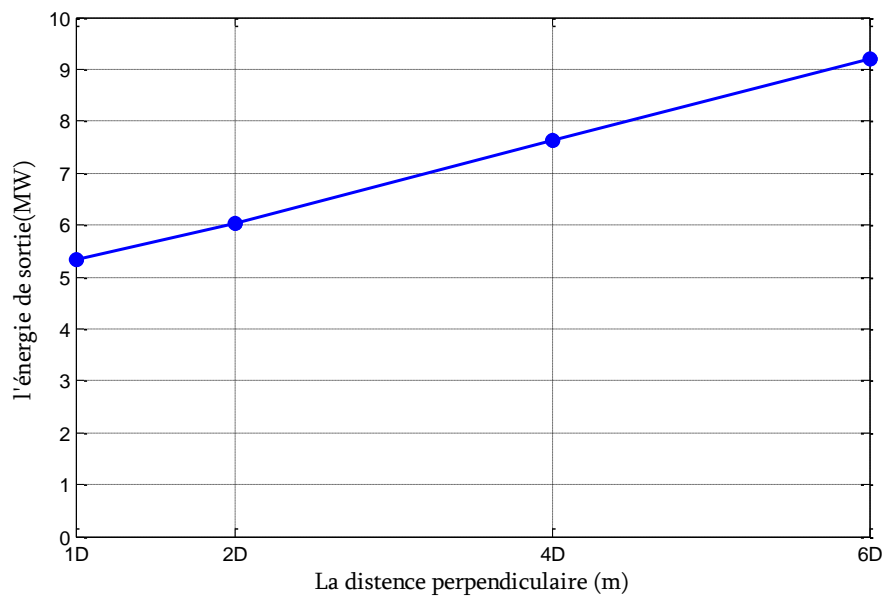


Figure 3-18 Puissance maximum de la ferme éolienne

Figure 3- 19 : représente l'évolution de rendement de notre ferme éolienne en fonction de la distance perpendiculaire d_{per} suivant l'axe y. On remarque que la distance perpendiculaire à partir de $4D$ à $6D$ donne des meilleurs résultats. La performance maximale peut atteindre jà 61.30% pour $6D$.

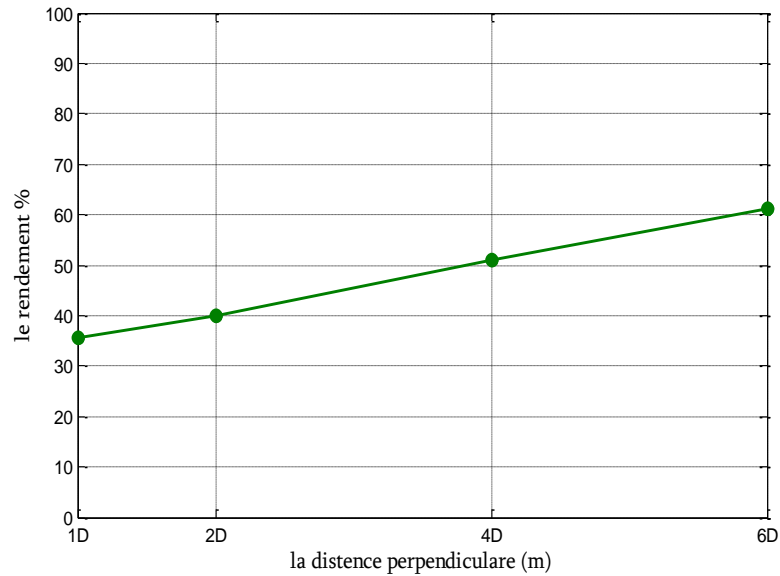


Figure 3-19 Rendement de la ferme éolienne

Donc le choix de la distance optimale entre les éoliennes dans une ferme éolienne est plus important pour diminuer les interactions de sillage entre les systèmes éoliens.

On déduit que les interactions dues à l'effet de sillage dans une ferme éolienne sont sensibles à la variation de distance perpendiculaire. Il faut donc augmenter l'espace perpendiculaire entre les turbines afin de réduire l'impact de sillage

3.6. La courbe de puissance pour une gamme de vitesse du vent typique

Dans cette partie, nous allons placer les 9 éoliennes en 3 colonnes par 3 lignes. On fixe la distance suivant l'axe x égale 3D et la distance suivant l'axe y égale D. On trace la courbe de puissance pour une gamme de vitesse du vent typique entre 8m/s à 12 m/s.

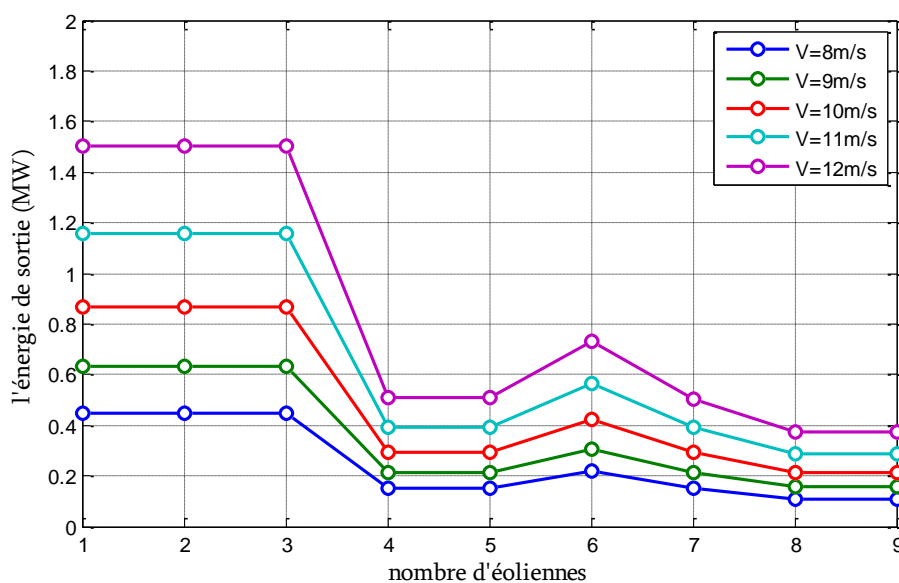


Figure 3-20 L'énergie de sortie des éoliennes en fonction de la variation de la vitesse de vent

Figure 3-20 représente l'évolution de l'énergie de sortie pour la position initiale des 9 turbines éoliennes dans une ferme éolienne en fonction de la variation de vitesse de vent entre 8m/s à 12 m/s. Le maximum de l'énergie est obtenu pour la vitesse de vent 12 m/s, et la puissance produite augmente avec le cube de la vitesse du vent.

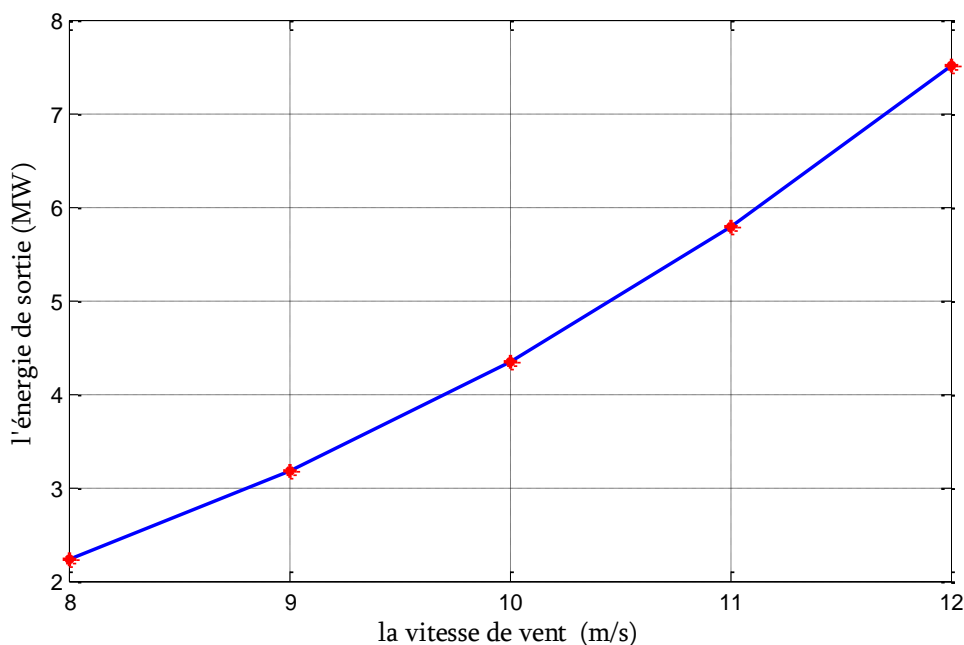


Figure 3-21 Energie de sortie d'une ferme éolienne en fonction de la variation de la vitesse de vent

Figure 3-21 et figure 3-20 représentent l'évolution de l'énergie de sortie des 9 turbines éoliennes dans une ferme éolienne en fonction de la variation de vitesse de vent entre 8m/s à 12 m/s. Les résultats montrent clairement comment la puissance produite dépend fortement de la vitesse de vent. Le maximum de l'énergie obtenu pour la vitesse de vent 12 m/s. la puissance produite, augmente avec le cube de la vitesse du vent. Comme mentionné précédemment, la production totale d'énergie éolienne d'une ferme ou bien d'un parc augmente avec la vitesse de vent.

3.7. Le choix d'aérogénérateurs

Dans cette partie, nous allons placées 9 éoliennes en 3 colonnes par 3 lignes comme présenté dans cas1. On estime l'énergie de sortie d'une ferme éolienne pour 3 types d'aérogénérateurs 600kW, 1MW, 3MW avec $d_{ws}=3D$ et $d_{per}=2D$. Les caractéristiques d'éoliennes choisies sont présentées au tableau suivant :

Tableau 3-3 Caractéristiques des éoliennes étudiées

Aérogénérateurs	Puis. Nominale, kW	Diamètre, m	Hauteur, m
Vestas 44	600	44	50
El Kraft Avedore	1000	50	55
Vestas 90	3000	90	100

La figure 3.22. présente l'énergie de sortie d'une ferme éolienne pour les 3 types d'aérogénérateurs 600kW, 1MW, 3MW.

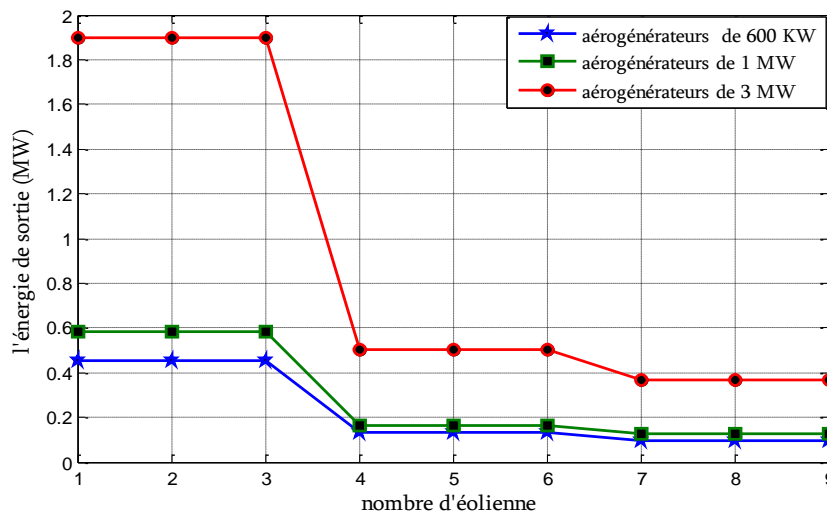


Figure 3-22 L'énergie de sortie d'une ferme éolienne pour 3 types d'aérogénérateurs 600kW, 1MW, 3MW

La Figure 3-22 représente l'évolution de l'énergie de sortie de 9 turbines éoliennes dans une ferme éolienne pour 3 types d'aérogénérateurs 600kW, 1MW, 3MW. Le maximum de l'énergie obtenue pour l'aérogénérateur de 3MW. Cette figure montre clairement comment la puissance produite, augmente automatiquement avec la puissance nominale de l'aérogénérateur.

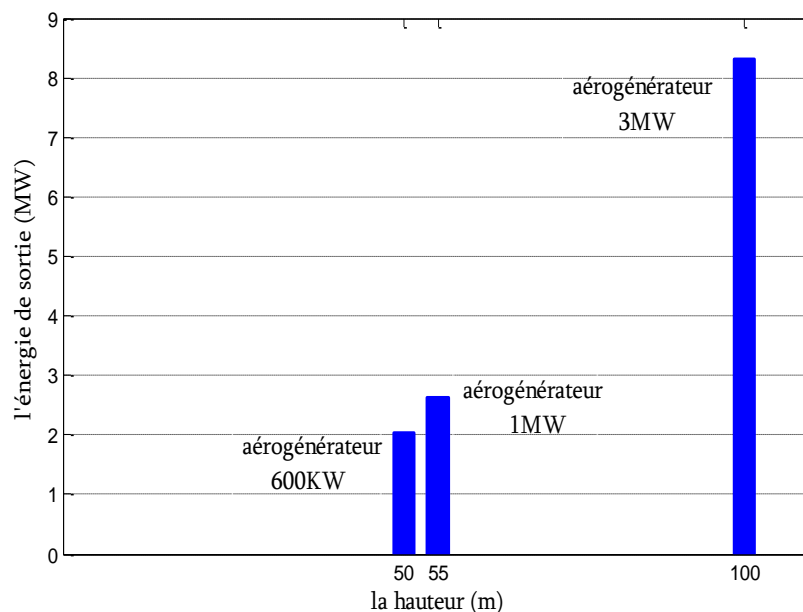


Figure 3-23 Puissance de sortie totale d'une ferme éolienne en fonction de la hauteur pour 3 types d'aérogénérateurs 600kW, 1MW, 3MW

Figure 3-23 représente l'évolution de puissance de sortie totale d'une ferme éolienne en fonction de la hauteur pour 3 types d'aérogénérateurs 600kW, 1MW, 3MW avec une vitesse de vent de 12m/s. Nous remarquons que pour l'aérogénérateur de 600kW, avec un mât de plus de 50 m de hauteur, la puissance atteint 2.0444 MW. Pour l'aérogénérateur de 1MW, avec un mât de plus de 55 m de hauteur, la puissance arrive jusqu'à 2.0444 MW alors que la puissance maximum peut arriver jusqu'à 8.3094MW pour l'aérogénérateurs de 3MW, avec un diamètre de 90 m et un mât de plus de 100 m de hauteur. Ces résultats montrent clairement comment la puissance produit augmente avec l'augmentation de la vitesse du vent qui augmente selon la hauteur du mat de l'aérogénérateur. Il est évident que l'importance de l'aérogénérateur qu'il soit place à une hauteur au maximum possible ou la vitesse du vent est plus importante.

3.8. Conclusion

Ce chapitre donne les résultats de l'effet des interactions de sillage sur les éoliennes exploitées dans le cadre d'une ferme éolienne. La puissance totale produit par les systèmes éoliens dépend fortement des conceptions cruciales variables : espace en aval et espace perpendiculaire. Cet espacement peut être encore augmenté pour une meilleure performance, mais il peut être coûteux car nous avons besoin plus de terres et d'autres ressources pour plus d'espacement.

Les résultats et les discussions montrent que la production d'énergie est diminuée sensiblement lorsque les turbines fonctionnent à faible distance où le niveau d'interaction avec le sillage est très important. Cette dégradation peut être évitée si les turbines en aval sont déplacées par rapport à celles en amont. En outre, Les résultats de simulation et l'étude paramétrique montrent que :

- ❖ Les interactions d'éoliennes dépendent fortement de la distance de séparation. Il est démontré que l'énergie sortie des éoliennes est améliorée lorsque la distance de séparation est passée de 3D à 13D. Cela peut s'expliquer par le fait que les interactions sont fortes lorsque l'espace entre les turbines est petit.
- ❖ La puissance totale produit par les systèmes éoliens en cas 1 à partir des distances en avale 9 D à 13D donne des meilleurs résultats c'est ta dire extraient le maximum que le cas2.
- ❖ Le fait de déplacer la deuxième ligne avec un minimum la distance perpendiculaire peut éviter l'effet de sillage qui par conséquent, faire en sorte que les turbines en aval extraient le maximum à partir de 3D à 9D pour le cas2. Donc le choix de la distance optimale ou espacement entre les éoliennes dans une ferme éolienne est plus important pour diminuer les interactions de sillage entre les systèmes éoliens
- ❖ Une augmentation de l'espace perpendiculaire est essentielle pour réduire la perte de puissance active en raison de la faible variation de la direction du vent.
- ❖ Les interactions dues à l'effet de sillage dans une ferme éolienne sont sensibles à la variation de distance perpendiculaire. Il faut donc augmenter espace perpendiculaire entre les turbines afin de réduire impact de sillage.
- ❖ Si la distance en aval est augmentée avec une augmentation de l'espace perpendiculaire, l'efficacité énergétique de la ferme éolienne va atteindre la valeur maximale.
- ❖ Le maximum de puissance produit dépend de plusieurs paramètres (L'espace en aval et l'espace perpendiculaire, La vitesse de vent, et le nombre d'éoliennes, Le choix de type d'aérogénérateurs, la hauteur, diamètre).

Conclusion générale

Les interférences de sillage créées par les systèmes en amont influencent la qualité de l'électricité produite par les turbines en aval. Le travail présenté dans ce mémoire présente une approche d'optimisation en phase de conception générale qui recherche un emplacement optimal d'éoliennes qui maximisent la puissance produite avec de faibles pertes de puissance active en raison de l'effet de sillage.

L'étude bibliographique présentée dans le premier chapitre a permis de faire le point sur les principaux travaux de recherche se rapportant à l'étude concernant la technologie éolienne et l'implantation des centrales éoliennes. L'étude a été orientée vers la présentation des travaux de l'influence de l'effet du sillage sur la production énergétique.

Le deuxième chapitre, consiste à la modélisation, les équations du modèle de calcul de l'effet de sillage et de la puissance produit ont été définies. Le développement de l'étude proposée a été modélisés, les équations décrivant le système étudié ont été établies. La résolution numérique a été faite par un code de programme Matlab.

Le troisième chapitre, concerne les résultats et les discussions. La puissance totale produite par les systèmes éoliens dépend fortement des variables cruciales: espace en aval et espace perpendiculaire. Cet espacement peut être encore augmenté pour une meilleure performance. Les résultats montrent que la production d'énergie est diminuée lorsque les turbines fonctionnent à faible distance où le niveau d'interaction avec le sillage est très important. Cette dégradation peut être évitée si les turbines en aval sont décalées par rapport à celles en amont.

Comme perspective et continuité à cette présente étude, nous proposons :

- Une recherche sur l'optimisation de la position des éoliennes, en fonction des variables de conception clés qui maximisent la production d'énergie de parc d'éoliennes
- D'utiliser les méthodes d'optimisation l'algorithme génétique et la méthode de Monte Carlo comme une approche mathématique d'optimisation des turbines dans un parc éolien.
- La modélisation complète de projet de la réalisation d'une ferme éolienne située en Algérie (choix de site, caractéristique de vent, choix des turbine, choix de l'emplacement, rentabilité économique).
- Une étude plus détaillée sur l'effet de sillage et la production en fonction de la direction du vent.

Références bibliographiques

- [1] L'évolution de la puissance du parc éolien mondiale. [Site web], disponible sur : <https://www.Connaissance des énergies>, d'après GWEC (Global Wind Energy Council), page consultée le 09/2020.
- [2] La puissance éolienne totale installée en Algérie. [site web], disponible sur : <https://www.ecomena.org/renewables-algeria/Renewable Energy in Algeria>, page consultée le 09/2020 .
- [3] Programme des énergies renouvelables en Algérie. [Site web], disponible sur : <https://era.dz/salon/fr/content/ Salon International des Energies Renouvelables, des Energies Propres et du Développement Durable>, page consultée le 09/2020.
- [4] M. Benmedjahed, « Choix du site et optimisation du dimensionnement d'une installation éolienne dans le nord Algérien et son impact sur l'environnement », Thèse de Doctorat, Université Abou-Bakr Belkaid, Tlemcen, 2013.
- [5] J. Hladik, M. Bremont, « applications pratiques, chauffage éolien, production d'électricité, pompage ». Paris, Document de l'Université du Québec, 1984.
- [6] C.. Alinot, «Analyse aérodynamique des parcs éoliens immergés dans une couche limite terrestre ayant différentes conditions de stabilité thermique». Thèse Doctorat, Ecole de technologie supérieure université du Québec, 2003.
- [7] N. Kasbadji Merzouk, « Evaluation du gisement énergétique éolien contribution a la détermination du profil vertical de la vitesse du vent en Algérie ». Thèse de doctorat, Université Abou Bekr Belkaid , Tlemcen ,2006.
- [8] Le vent. [site web], disponible sur : <https://fr.wikidia.org/wiki/vent> ,page consultée en 2020 .
- [9] Atmosphère. [PDF] : chapitre 2 disponible sur : <https://www.Kean.edu> ,page consultée en 2020 .
- [10] E. Le Roy Ladurie. [livre], « Histoire du climat depuis l 'a mil »,1967.
- [11] K. E. Trenberth, « Recent observed interdecadal climate changes in the Northern Hemisphere, » Bull. Am. Meteorol. Soc., vol. 71, no. 7, pp. 988–993, 1990.
- [12] Søren, « Visite guidée dans l'univers de l'énergie éolienne, Association KROHN », Association de l'industrie éolienne (2002).
- [13] M. Van Loon et all. « Evaluation of long-term ozone simulations from seven regional air quality models and their ensemble », vol. 41, no. 10, pp. 2083–2097, 2007.
- [14] W. Hussein, W. El-Osta, E. Dekam, « Effect of the wake behind wind rotor on optimum energy output of wind farms », Revue des Energies Renouvelables Vol. 11 N°49 pp128-132, 2013.
- [15] Mesurer la vitesse du vent . [site web], disponible sur : [https://www.energieplus /mesurer la vitesse du vent](https://www.energieplus/mesurer la vitesse du vent), page consultée en 2020 .
- [16] Rose des vents. [Site web], disponible sur : https://fr.wikidia.org/wiki/Rose_des_vents. page consultée en 2020.
- [17] [A. S. Thorndike et all. «Sea ice motion in response to geostrophic winds, » J. Geophysics ». Colony, vol. 87, no. C8, pp. 5845–5852, 1982.
K. Labitzke, A. H. Manson, J. J. Barnett, and M. Corney, « Comparison of geostrophic and observed winds in the upper mesosphere over Saskatoon », Canada, vol. 49, no.

- 10, pp. 987–997, 1987.
- [18] Fonctionnement d'une éolienne. [pdf], disponible sur [http://jeunes.edf.com/article/Histoire et fonctionnement de L'éolienne](http://jeunes.edf.com/article/Histoire_et_fonctionnement_de_L'eoienne) [site web] disponible sur <http://tpe.samron.free.fr/TPE-SamRon/.html>,
- [19] Eolienne disponible sur : <http://www.vitaminefr.com/articles2014/adrar-remise-en-service-de-la-plus-vieilleeolienne/> html.
- [20] F. Chellali, « Etude du comportement stochastique et cyclique du vent en Algérie », Thèse Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2011.
- [21] A. Mrecki . « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance », Thèse Doctorat, Institut National Polytechnique. Toulouse. 2005.
- [22] Etude théorique sur les éoliennes. [site web], disponible sur :<http://eoienne.org/eoienne/> etude théorique.
- [23] S. Chowdhury, J. Zhang, A. Messac, L. Castillo, «Unrestricted wind farm layout optimization (UWFLO): Investigating key factors influencing the maximum power generation», *Renewable Energy Reviews* 49: 128–132, 2013.
- [24] Coefficient de puissance [site web], disponible sur [http://fr.wikipedia.org/wiki/Limite de Betz](http://fr.wikipedia.org/wiki/Limite_de_Betz).
- [25] S.M. Boudia, « Optimisation de l'Evaluation Temporelle du Gisement Énergétique Éolien par Simulation Numérique et Contribution à la Réactualisation de l'Atlas des Vents en Algérie », Thèse de Doctorat, Université Abou Bekr Belkaïd Tlemcen, 2013.
- [26] G. Samir, « Modélisation d'une centrale à énergie renouvelable photovoltaïque-éolienne », Thèse de Magister, Université Ferhat Abbas ,Sétif, Algérie, 2011.
- [27] Catégories d'éolienne à axe horizontal, [site web], disponible sur [http://sites-final.uclouvain.be/e-lee/FR/réalisations/EnergiesRenouvelables/Généralités Eolien.htm](http://sites-final.uclouvain.be/e-lee/FR/réalisations/EnergiesRenouvelables/GénéralitésEolien.htm).
- [28] TH. Philippe T., «étude d'une éolienne, projet technologique, » .Universté de Québec, (2007), TCH-090-095.
- [29] The photo of the Horns Rev offshore wind farm originates. From: The Horns Rev Photo Case, <http://www.mdpi.com/1996-1073/6/2/696>; Creative Commons Attribution Licence <http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/>, the picture has been taken by Christian Steiness. doi:10.3390/en6020696.
- [30] Maghsel Saliha. «Contribution a la modélisation et la commande d'une turbine éolienne», Thèse Magister, laboratoire d'automatique de Skikda ,2012
- [31] Bernard Multon, Olivier Gergaud, Hamid Ben Ahmed, Xavier Roboam, Stéphan Astier, Brayima Dakyo, Cristian Nichita , «Etat de l'art dans les aérogénérateurs électriques », l'École Normale Supérieure de Cachan Campus de Ker, Toulouse, Université du Havre.
- [32] Vincent Courte cuisse, «Supervision d'une centrale multi sources à base d'éoliennes et de stockage d'énergie connectée au réseau électrique », Thèse de doctorat, L'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers 2008.
- [33] C. Maalouf. «Étude des phénomènes tourbillonnaires dans le sillage éolien ». Thèse Doctorat ,Laboratoire de Mécanique des Fluides ,2010. France .
- [34] P.Alfredsson et J. Dahlberg, « A preliminary wind tunnel study of windmill wake dispersion in various flow conditions». Technical Note *AU-1499*, 1979.

- [35] D. Simms, S. Schreck, M. Hand et L.J. Fingersh, « NREL Unsteady Aerodynamics Experiment in the NASA-Ames Wind Tunnel, :A comparison of predictions to Measurements». Rapport technique, National Renewable Energy Laboratory, June 2001.
- [36] H. G. Beyer, B. Lange, and H. P.Waldl. , « Modelling Tools for Wind Farm Upgrading. Proc ». European Union Wind Energy Conf, Sweden, pages 1069–1072, 20-24 may, 1996.
- [37] B. Lange, H. P. Waldl, A. G. Guerrero, D. Heinemann, and R. J. Barthelmie, « Modelling of Offshore Wind Turbine Wakes with the Wind Farm Program FLaP »Wind Energy. Reviews, 6(1) :87–104, 2003.
- [38] Davide Medici, «Wind turbine wakes - control and vortex shedding ». Technical report, KTH Mechanics, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2004.
- [39] M. Magnusson, K. G. Rados, and S. G. Voutsinas, «A Study of the Flow Downstream of a Wind Turbine Using Measurements and Simulations. » .Wind Engineering Vol.20 N.6, 1996.
- [40] S. G. Voutsinas, K. G. Rados, and A. Zervos, « On the analysis of wake effects in wind parks». Wind Engng, 14 : 204-219, 1990.
- [41] K. Badreddinne, H. Ali, and A. David., «Optimum project for horizontal axis wind turbines ‘OPHWT’». Renewable Energy, 30(13) :2019–2043, 2005.
- [42] C. Leclerc, «Simulation numérique de l’écoulement tridimensionnel turbulent dans un parc éolien». National Library of Canada= Bibliothèque nationale du Canada,2000.
- [43] H. Mattsson and E. Djerf, «Evaluation of the software program wind farm and comparisons with mesure data from Alsvik. » .The Aeronautical Research Institute of Sweden, FFA TN 30, 2000.
- [44] N.O. Jensen, «A Note of Wind Generator Interaction»,Denmark: Riso National Laboratory, 1993.
- [45] G. Moseti, C. Poloni and B. Diviacco, «Optimization of Wind Turbine Positioning in Large Wind Farm by Means of a Genetic Algorithm», Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 51, N°1, pp. 105 – 116, 1994 .
- [46] M. Magnusson, A. S. Smedman,«Air flow behind wind turbinrs », Journal of wind Engineering and Industrial Aerodynamics80-169-189, 1999.
- [47] C. KIRANOUDIS ,N. Voros M.Maroulis, « Short –cut design of wind farms » Energy policy 43-567-578,2001.
- [48] I. Ammara ,C.Masson , «A viscous three dimensional actuator disk method for the aerodynamic analysis of wind farm» , JSol Energy 124(4)345-56, 2002.
- [49] L. Vermeera, J. Sorensen, A. Crespo, «Wind turbine wake aerodynamics », Progress in Aerospace Scinces 39-467-510,2003.
- [50] M .Zhao , Z . Chen , F .Blaajer , «probabilistic capacity of a grid connected wnd farm based on optimization method» Renewable energy 31-2171-2187 ,2006.
- [51] G.Gomboia ,G .munda , «The problem of wind farm location : A social multi criteria evaluation framework », Energy policy 70 -1564-2658,2007
- [52] J.C.Mora , J.M.C.Baron,J.R.Santos ,M.B.Payan , «An evaluative algorithm for wind farm optimal design» , Neurocomputing70-2651-2658,2007.
- [53] G .Marmidis, S.Lazarou, E.Pyrgioti, «Optimal placement of wind turbines in a wind park using Monte Carlo simulation » ,Renewable energy 35-1751-1772,2007.

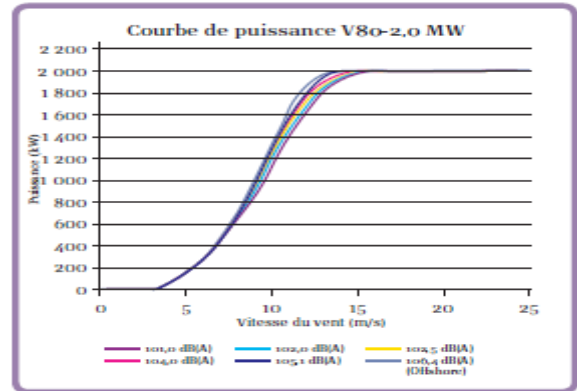
- [54] J.Sorensen, S.Frandsen, N.Trap-Johansen, «Effective turbulence models and fatigue reliability in wind farms », Probabilistic Engineering Mechanics, 2008
- [55] J.Rodriguez-Amenedoa, S. Arnaltesa, M. Rodriguez , «Operation and coordinated control of fixed and variable speed wind farms», Renewable Energy 33-406-414,2008.
- [56] C.Masson, A.El Kasmi , «an extended k- ϵ model for turbulent flow through horizontal-axis wind turbines », Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 966-103-122,2008.
- [57] .J. González, M.B. Payán , J. R. Santos , «Optimum Wind Turbines Operation for Minimizing Wake Effect Losses in Offshore Wind Farms », Seville, 41092, Spain ,978-1-4799-2803-3 ,2013 .
- [58] C. Hwanga, J.H.Jeonb, G.H.Kimb, E. Kimb, M. Parka and I.Keun Yua, «Modelling and simulation of the wake effect in a wind farm», Journal of International Council on Electrical Engineering, Vol. 5, No. 1, 74–77, Korea,2015.
- [59] Zergan Said , Arezki. Smaïli,« Optimisation de la micro-localisation des aérogénérateurs dans un parc éolien », Revue des Energies Renouvelables Vol.14 N°4 727 – 732 ,2011.
- [60] Michele Samorani, «The Wind Farm Layout Optimization Problem», Handbook of Wind Power Systems, Energy Systems ,DOI: 10.1007 / 978-3-642-41080-2_2, 2013.
- [61] JN .Charhouni, et all , « Investigation of wake interactions effect on wind farm efficiency», Morocco , Renew. Energy, pp 5386-4225,2018
- [62] Soteris A.Kalogirou,«Solar thermal collectors and applications». Progress in Energy and Combustion Science 30, 231-295, 2004.
- [63] A. Karl Scholbrock , «Optimizing Wind Farm Control Strategies to Minimize Wake Loss Effects», University of Wisconsin Madison, 2011
- [64] R. Shakoor, M. Yusri, A. Raheem, and Y. Wu, « Wake effect modeling : A review of wind farm layout optimization using Jensen model », Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 58, pp. 1048–1059, 2016.
- [65] S. Jeon, B. Kim, and J. Huh, « Comparison and verification of wake models in an onshore wind farm considering single wake condition of the 2 MW wind turbine », *Energy*, vol. 93, pp. 1769–1777, 2015.
- [66] N. Charhouni, A. Arbaoui, and M. Sallaou, «Analysis of wake impact on wind farm performance using two analytical models», *Ieee*, no. 1, pp. 1–5, 2014.
- [67] S. J. Andersen, J. N. Sørensen, S. Ivanell, and R. F. Mikkelsen, « Comparison of engineering wake models with CFD simulations», *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 524, no. 1, 2014.
- [68] N. O. Katic, I. Hojstrup, J. Jensen, «A simple model for cluster efficienc» ,*Ewea 1986*, no. October, pp. 407–410, 1986.
- [69] A. Peña and O. Rathmann, « Atmospheric stability-dependent infinite wind-farm models and the wake-decay coefficient »,2013.
- [70] D.Wilcox , « Turbulence Modeling for CFD». Canada, DCW Industries. 1998.
- [71] N.Jensen , « A note on wind generator interaction». Risø DTU national laboratory,1983
- [72] I. Katic , « Program PARK, calculation of wind turbine park performance », Risø National Laboratory, Roskilde . 1993.

- [73] E.Petersen, N.Mortensen, L.Landberg et al , « Wind power meteorology. Part I:climate and turbulence ». Wind Energy 1:25–45 ,1998 .
- [74] U.Aytun Ozturk , B.Norman , « Heuristic méthodes for wind Energie conversion system positioning». Electr Power Syst Res 70:179–185 ,2004 .
- [75] H .Sheng, « Distributed Genetic Algorithm for optimization of wind farm annual profits »,International conférence on intelligent Systems applications to power Systems, Kaohsiung, Taiwan 2007.
- [76] S.Sisbot , O.Turgut , M.Tunç et al, « Optimal positioning of wind turbines on Gökçeada using multi-objective genetic algorithm ». Wind Energy 13:297–306 ,2010.
- [77] M.Lackner ,C . Elkinton ,« An analytical framework for offshore wind farm layout optimization». Wind Eng 31:17–31 ,2007.

Annexes

A- Les aérogénérateurs choisis :

L'éolienne de type VestasV80 de 2MW :



P : 2MW

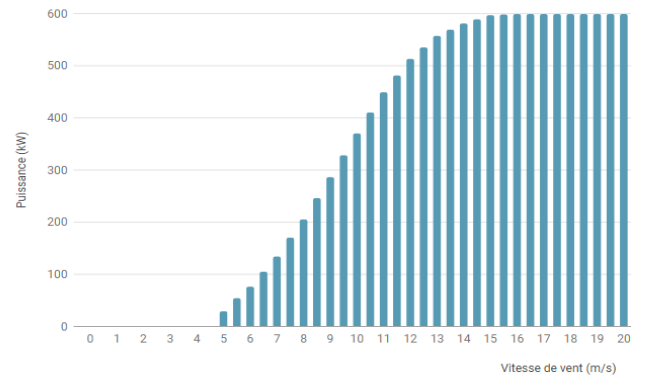
D : 80m

H : 70m

L'éolienne de type VestasV44 de 600KW :



Courbe de puissance



P : 600KW

D : 44m

H : 50m

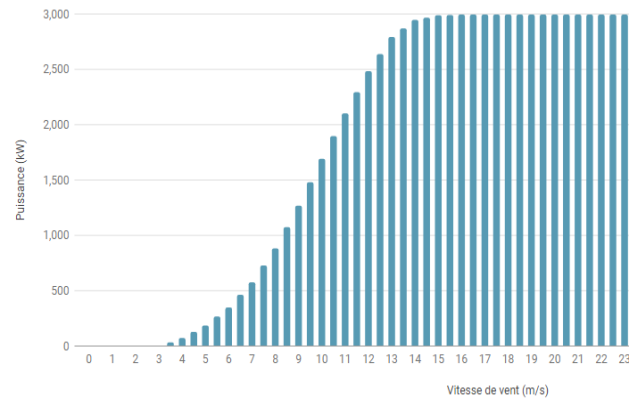
L'éolienne de type VestasV90 de 3MW :**Courbe de puissance****P :3MW****D :90m****H :100m****B – Les calculs du partite 3-7 (Le choix d'aérogénérateurs) :**

Tableau -B 1 représente la puissance d' sortie en MW de 9 aérogénérateurs dans une ferme éolienne de 3 type d'aérogénérateurs 600KW, 1MW, 3MW

Type	1	2	3	4	5	6	7	8	9
600KW	0.454	0.454	0.454	0.454	0.454	0.454	0.097	0.097	0.097
1MW	0.586	0.586	0.586	0.165	0.165	0.165	0.124	0.124	0.124
3MW	1.899	1.899	1.899	0.504	0.504	0.504	0.366	0.366	0.366

32 représente le rendement de 9 aérogénérateurs dans une ferme éolienne de 3 type d'aérogénérateurs 600KW, 1MW, 3MW

Type	1	2	3	4	5	6	7	8	9
600KW	1.000	1.000	1.000	0.285	0.285	0.285	0.215	0.215	0.215
1MW	1.000	1.000	1.000	0.282	0.282	0.282	0.212	0.212	0.212
3MW	1.000	1.000	1.000	0.265	0.265	0.265	0.192	0.192	0.192

C -Les résultats prouvés dans la référence [14 et 25] pour la partie 3-1 :

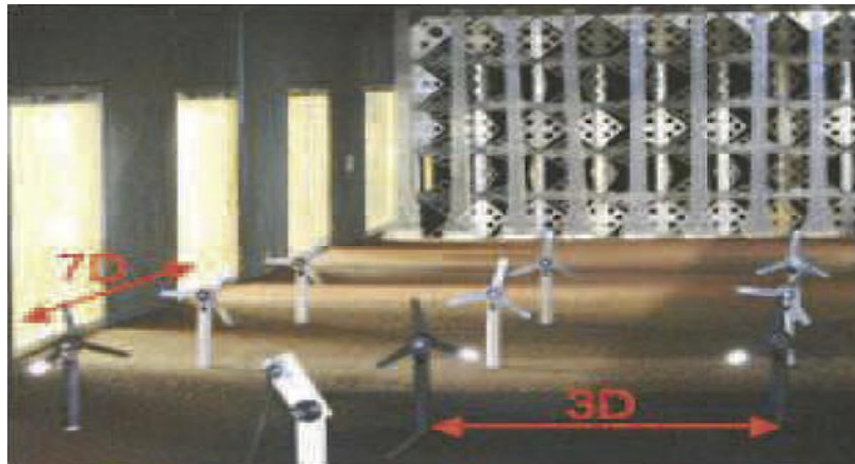


Figure 1 Photographie du montage expérimental depuis un emplacement en aval [14]

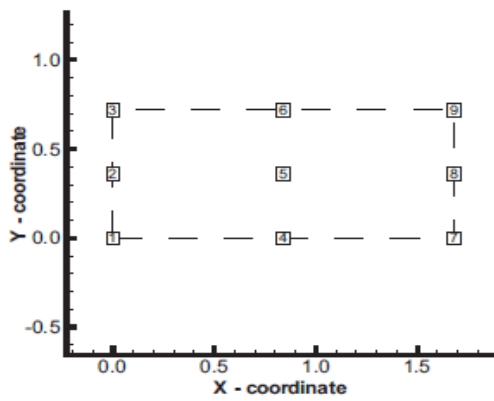


Figure 2: expérimentale d'aménagement de parc éolien [14]

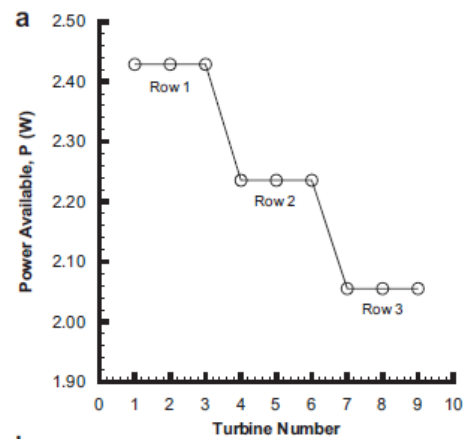


Figure 3: la puissance produite dans une ferme éolienne [14]

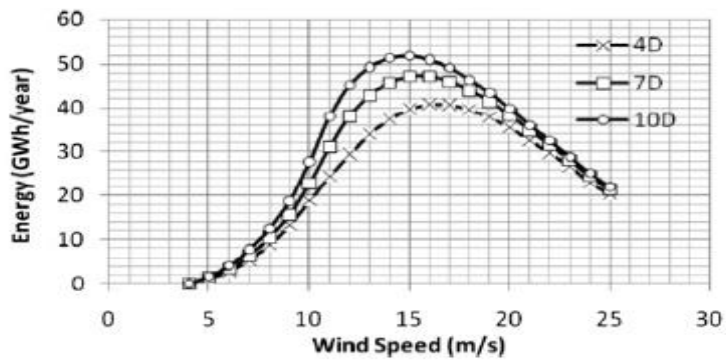


Figure 4 Énergie annuelle extraite à différentes distances en aval [24]